



# CATALOGUE DES COURS DE 2<sup>ème</sup> ANNÉE

Année académique 2023-2024

Édition du 19 septembre 2023

# TABLE DES MATIERES

<b>COURS COMMUNS .....</b>	<b>10</b>
2CC1000 – Commande des systèmes dynamiques.....	11
2CC1005 – Commande des systèmes dynamiques - DUAL.....	16
2CC3000 – Optimisation .....	20
2CC3005 – Optimisation - DUAL .....	22
<b>COURS HORS SEQUENCE .....</b>	<b>24</b>
2SL1000 – Economie .....	25
2SL1100 – Sciences du Climat et enjeux du changement climatique.....	27
2SL2000 – Droit.....	29
2SL3000 – Philosophie .....	31
2SL4000 – Sociologie des Organisations.....	33
2SL5007 – Ateliers Pratiques Ingénieur - API - 2A .....	35
2SL7007 – Ateliers Pratique Professionnelle - APP - 2A .....	37
2SL8000 – Projet S7 .....	39
2SL8100 – Projet S8 .....	41
2SL9000 – Sport .....	43
<b>COURS DE SCIENCES POUR L'INGENIEUR .....</b>	<b>45</b>
2EL0010 – Teaching assistant .....	46
2EL1110 – Systèmes dynamiques en neurosciences.....	48
2EL1120 – Systèmes Robotiques Interactifs .....	51
2EL1130 – Systèmes dynamiques multi-agents. Application au vol en formation de drones.....	54
2EL1210 – Exposition des personnes à l'électromagnétisme et compatibilité électromagnétique	58
2EL1230 – Systèmes spatiaux embarqués .....	60
2EL1240 – Systèmes de navigation et optroniques pour véhicules autonomes et satellites - Technologies temps réel .....	62

2EL1310 – Energies renouvelables .....	64
2EL1315 – Conversion d'énergie électrique pour les sources d'énergie renouvelables et l'électromobilité.....	66
2EL1320 – Conversion d'énergie.....	68
2EL1410 – Transferts Thermiques .....	71
2EL1420 – Mécanique des fluides.....	75
2EL1430 – Ingénierie Nucléaire .....	80
2EL1440 – Modélisation et simulation numérique des milieux réactifs.....	82
2EL1450 – Cours d'analyse structurelle .....	85
2EL1520 – Génie logiciel orienté objet .....	87
2EL1540 – Informatique théorique.....	89
2EL1550 – Calcul haute performance .....	92
2EL1560 – Modèles et systèmes pour la gestion des données massives .....	95
2EL1580 – Intelligence Artificielle.....	97
2EL1590 – Cloud computing et informatique distribuée.....	100
2EL1710 – Probabilités avancés.....	103
2EL1720 – Distributions et opérateurs .....	105
2EL1730 – Machine Learning .....	107
2EL1740 – Algèbre et cryptologie .....	109
2EL1750 – Statistiques avancées .....	112
2EL1760 – Calcul scientifique.....	114
2EL1810 – Dynamique des Structures et Acoustique .....	116
2EL1830 – Comportement non-linéaire des matériaux.....	118
2EL1840 – Construire Demain – La Mécanique Appliquée au Génie Civil.....	120
2EL1850 – Simulation des couplages multiphysiques avec la MEF .....	122
2EL1860 – Construire la ville – urbanisme, architecture et ingénierie.....	124
2EL1910 – Lois fondamentales de l'Univers : physique des particules et de la gravitation .....	126
2EL1920 – Physique quantique et Statistique Avancée.....	128
2EL2010 – Compréhension, optimisation et simulation des procédés biotechnologiques.....	130
2EL2020 – Physique de la matière divisée.....	132
2EL2030 – Génomique et biologie synthétique en biotechnologie sanitaire et industrielle .....	136
2EL2040 – Génie des procédés : application à l'environnement et aux biofabrications.....	139
2EL2140 – Stratégie, Marketing et Organisation.....	142
2EL2150 – Finance et Droit de l'entreprise.....	144
2EL2160 – Economie de l'environnement, énergie et développement durable .....	146
2EL2170 – Economie de la croissance et de l'innovation .....	148

2EL2190 – Innovation sobre et durable.....	151
2EL2210 – Operations and supply chain management .....	154
2EL2220 – Théories des organisations et des marchés .....	156
2EL2230 – Maintenance et industrie 4.0 .....	158
2EL2240 – Économie des systèmes de transport décarbonés.....	160
2EL2250 – Enjeux du secteur public .....	163
2EL2410 – Compression et débruitage des signaux .....	165
2EL2420 – Traitement d'images numériques .....	168
2EL2510 – Architecture et conception des systèmes numériques.....	171
2EL2520 – Électronique pour les applications biomédicales et de communication .....	174
2EL2530 – Capteurs intégrés MEMS.....	176
2EL2610 – Théorie des communications .....	178
2EL2620 – Réseaux de communication mobiles et services.....	181
2EL2630 – Applications de la physique statistique et quantique aux sciences de l'information ..	183
2EL2720 – Engagement handicap - Tutorat auprès de jeunes en situation de handicap.....	186
2EL2730 – Electif associatif.....	189
2EL5010 – Introduction à l'ingénierie des applications mobiles .....	191
2EL5020 – Introduction au développement d'applications multi tiers et aux services web.....	193
2EL5030 – Programmer efficacement en C++ .....	196
2EL5040 – Big Data : collecte, stockage et analyse de données sur clusters et sur Cloud .....	199
2EL5050 – Méthodes d'estimations et introduction à la théorie moderne du codage.....	202
2EL5060 – Analyse et traitement de données audio ( parole et musique) .....	205
2EL5070 – Traitement d'image .....	207
2EL5090 – Conception de systèmes électroniques complexes : du composant au système hétérogène.....	209
2EL5110 – La lumière pour comprendre la matière .....	211
2EL5120 – Systèmes photoniques intelligents .....	213
2EL5130 – Chaos, Fractales et complexité.....	215
2EL5140 – Modélisation pour l'ingénierie des systèmes.....	218
2EL5150 – Transitions et symbiose socio-économique .....	220
2EL5160 – Economie sociale et solidaire, transitions et modèles socio-économiques.....	222
2EL5170 – Les outils du management de l'innovation au service d'une innovation responsable	223
2EL6010 – Conception de systèmes embarqués critiques de controle-commande.....	224
2EL6020 – Architecture des ordinateurs .....	226
2EL6030 – Systèmes d'explotation .....	229
2EL6040 – Programmation système sous linux et windows.....	231

2EL6050 – Modelica et bond graph : modélisation multi-domaine, analyse et simulation .....	233
2EL6060 – Serious Game.....	236
2EL6090 – Intelligence artificielle et Deep Learning.....	239
2EL6100 – Communication Systems Engineering.....	242
2EL6110 – Réseaux informatiques avancés .....	245
2EL6120 – Accès sans fil intelligent et expérimentation .....	247
2EL6130 – Systèmes embarqués et internet des objets.....	250
2EL6140 – Microréseaux : composants et pilotage .....	252
2EL6150 – Commande prédictive .....	255
2EL6170 – Management de la production et des flux .....	258
2EL6180 – Marketing digital .....	260
2EL6190 – Méthodes bayésiennes pour l'apprentissage automatique.....	262
2EL6200 – Finance d'entreprise avancée.....	265
2EL6210 – Géopolitique des ressources et des objets .....	267
<b>COURS SEQUENCE THEMATIQUE 5 .....</b>	<b>270</b>
ST5 - 51 - PILOTAGE ET CONTROLE DE VOL DANS LE TRANSPORT AERONAUTIQUE ET SPATIAL.....	271
2SC5110 – Performances et trajectoires de vol.....	273
2SC5191 – Stratégie de contrôle d'un nanosatellite.....	277
2SC5192 – Définition et conception de mission d'un lanceur .....	279
2SC5193 – Conception et pilotage d'un avion d'affaire.....	281
ST5 - 52 - COMMANDE DE BIOPROCEDES POUR L'ENVIRONNEMENT ET LES BIOFABRICATIONS ....	283
2SC5210 – Génie des procédés : application à l'environnement et aux biofabrications .....	286
2SC5291 – Traitement biologique optimisé des eaux résiduaires urbaines.....	289
2SC5292 – Système de support de vie pour le spatial.....	292
2SC5293 – Supervision avancée de la production de biogaz à partir de déchets .....	294
ST5 - 53 - VEHICULE AUTONOME ET CONNECTE .....	297
2SC5310 – Architecture et technologie du véhicule autonome .....	299
2SC5390 – Conception d'un système de livraison urbaine "dernier kilomètre" par véhicules autonomes et connectés .....	301
ST5 - 54 - L'ECO-QUARTIER, UN SYSTEME COMPLEXE. AMENAGEMENT DURABLE & MAGAGEMENT DE PROJET COMPLEXE. ....	303
2SC5410 – Aménagement et urbanisme durable.....	305
2SC5490 – Projet de conception d'un éco-quartier.....	308
ST5 - 55 - LUMIERE ET MATIERE : DEVELOPPEMENT D'INSTRUMENTS DE HAUTE TECHNOLOGIE...	310
2SC5510 – Physique de la matière.....	312

2SC5591 – Conception d'un faisceau Synchrotron .....	314
ST5 - 56 - SYSTEMES COMPLEXES INDUSTRIELS ET CRITIQUES A LOGICIELS PREPONDERANTS .....	316
2SC5610 – Introduction à la production d'énergie .....	318
2SC5691 – Régulation et commande de systèmes de production et de conversion d'énergie ....	320
2SC5692 – Groupe motopropulseur hybride .....	323
2SC5693 – Propulsion aéronautique hybride .....	325
ST5 - 57 - CONTROLE DE LA POLLUTION ACOUSTIQUE ET ELECTROMAGNETIQUE .....	327
2SC5710 – Théorie et algorithmique pour le contrôle des ondes .....	330
2SC5791 – Conception d'un revêtement afin de contrôler la pollution des ondes : Contrôle de la pollution acoustique extérieure.....	334
2SC5792 – Conception d'un revêtement afin de contrôler la pollution des ondes : Contrôle de la pollution acoustique intérieure .....	336
2SC5793 – Conception d'un revêtement afin de contrôler la pollution des ondes : Contrôle de la pollution électromagnétique .....	338
ST5 - 58 - SYSTEMES COMPLEXES INDUSTRIELS ET CRITIQUES A LOGICIELS PREPONDERANTS .....	340
2SC5810 – Conception et vérification de systèmes critiques .....	342
2SC5891 – Conception d'un système de signalisation sûre pour le ferroviaire.....	344
2SC5893 – Système intelligent pour le contrôle automatisé du trafic aérien .....	346
2SC5894 – Automatisation de la conception de la signalisation : de la spécification au code embarqué.....	348
ST5 - 59 - ASSISTANCE ET AUTONOMIE DE LA PERSONNE .....	350
2SC5910 – Commande d'une chaîne de motorisation .....	352
2SC5990 – Conception d'un fauteuil roulant motorisé pour personne à mobilité réduite .....	354
ST5 - 60 - NAVIGATION SEMI-AUTONOME DE DRONES .....	356
2SC6010 – Python pour la robotique.....	358
2SC6090 – Inspection de bâtiment par un drone (quadricoptère) semi-autonome .....	360
ST5 - 61 - SMART PHOTONICS SYSTEMS FOR CONTROL AND MEASURE.....	362
2SC6110 – Photonique pour le contrôle des systèmes physiques .....	364
2SC6190 – Télédétection laser (LIDAR) pour la surveillance optronique et la détection de cibles.....	366
ST5 - 62 - INTELLIGENCE ENERGETIQUE ET SMART BUILDING .....	368
2SC6210 – Communications à haute performance énergétique.....	370
2SC6291 – Pilotage hiérarchisé du confort thermique.....	373
2SC6292 – Pilotage à distance du confort thermique .....	375
ST5 - 63 - SYSTEMES INTELLIGENTS ET EMBARQUES POUR LA SANTE .....	377
2SC6310 – Architecture Système et Modélisation .....	379
2SC6390 – Système intelligent pour la régulation personnalisée de glycémie .....	381



ST5 - 64 - MODELISATION ET DEVELOPPEMENT DE LOGICIELS DE SUPERVISION .....	383
2SC6410 – Modèles de données et schémas de conception.....	385
2SC6490 – Développement d'un système de supervision de capteurs.....	387
<b>COURS SEQUENCE THEMATIQUE 7 .....</b>	<b>389</b>
ST7 - 71 - FINANCE STOCHASTIQUE ET MODÉLISATION DU RISQUE.....	390
2SC7110 – Modélisation des risques financiers.....	392
2SC7190 – Gestion des risques financiers .....	393
ST7 - 72 - OPTIMISATION DE L'INFRASTRUCTURE DES RESEAUX POUR LES VILLES INTELLIGENTES .	394
2SC7210 – Théorie des jeux pour les villes intelligentes .....	396
2SC7290 – Smart cities : les cités connectées.....	398
ST7 - 73 - ECONOMIE CIRCULAIRE ET SYSTEMES INDUSTRIELS .....	400
2SC7310 – Economie circulaire et méthodes de l'écologie industrielle .....	403
2SC7390 – Projet industriel d'économie circulaire.....	406
ST7 - 74 - OPTIMISATION DE SYSTEMES DE TRANSPORT PASSAGERS.....	410
2SC7410 – Aide à la Décision : Modèles, algorithmes et implémentation.....	412
2SC7490 – Optimisation des systèmes de transport de passagers .....	414
ST7 - 75 - SIMULATION DE FLUX INDUSTRIELS .....	415
2SC7510 – Optimisation et gestion de flux.....	416
2SC7591 – Gestion des flux dans la livraison de gaz industriels.....	418
ST7 - 76 - SIMULATION A HAUTE PERFORMANCE POUR LA REDUCTION D'EMPREINTES.....	420
2SC7610 – Méthodes et algorithmes de calcul parallèle, et méthodes d'optimisation.....	423
2SC7691 – Optimisation d'une campagne d'exploration sismique pour la protection des ouvrages .....	426
2SC7692 – Optimisation de formes et réduction de la trainée en aéronautique .....	429
2SC7693 – Optimisation de détection d'ondes infrasonores pour la vérification du traité d'interdiction complète d'essais nucléaires .....	432
2SC7694 – Optimisation énergétique et accélération d'un graphe de calculs financiers sur cloud .....	436
2SC7695 – Optimisation à faible coût des performances d'un code de propagation d'ondes acoustiques.....	440
ST7 - 77 - EFFICACITE DES SYSTEMES D'ENERGIE EMBARQUES .....	444
2SC7710 – Méthodes numériques et résolution des problèmes d'optimisation des systèmes d'énergies embarqués .....	446
2SC7790 – Efficacité des systèmes d'énergie embarqués .....	448
ST7 - 78 - TRANSITION ENERGETIQUE EN SITE ISOLE .....	449
2SC7810 – Energies renouvelables et micro grids.....	451

2SC7890 – Micro grid insulaire décarbonné .....	453
ST7 - 79 - LE NUMERIQUE AU SERVICE DU FACTEUR HUMAIN .....	455
2SC7910 – Analyse d’image et son 2D-3D .....	457
2SC7990 – Ce que vous dites sans le vouloir : décryptage et analyse automatique des comportements non verbaux .....	459
ST7 - 80 - SEPARATION DE SOURCES POUR UNE EXPLOITATION OPTIMALE DE SIGNAUX.....	462
2SC8010 – Représentations parcimonieuses des signaux .....	465
2SC8092 – Suivi d’un locuteur par un robot .....	467
2SC8093 – Séparation de sources sonores à partir d'enregistrements de plusieurs microphones .....	469
2SC8094 – Extraction non-invasive de l’électrocardiogramme du fœtus .....	471
ST7 - 81 - CONCEPTION EN FABRICATION ADDITIVE .....	473
2SC8110 – Couplages multiphysiques pour la fabrication additive.....	475
2SC8190 – Optimisation de structure en fabrication additive .....	477
ST7 - 82 - SYSTEMES PHYSIQUES NEURO-INSPIRES POUR LE TRAITEMENT D’INFORMATION .....	479
2SC8210 – Optimisation pour l’apprentissage des systèmes physiques .....	481
2SC8290 – Classification de signaux vidéos et d’images à haute performance et faible coût énergétique par des systèmes photoniques.....	483
PARCOURS COMPILATION / INFOSEC .....	486
2SC3000 – Compilation - Infosec .....	486
2SC3090 – Projet Compilation - Infosc.....	488
<b>COURS en SEMAINE INTERCALAIRE 2A .....</b>	<b>489</b>
2IN1510 – Comprendre la blockchain.....	490
2IN1520 – Analyse de risques - INFOSEC.....	492
2IN1570 – Développement d'applications web et mobile .....	494
2IN1580 – Intelligence artificielle et santé mondiale .....	496
2IN1590 – Biomécanique et matériaux du vivant .....	498
2IN1600 – Design your way .....	500
2IN2100 – Communiquer la Recherche scientifique durable .....	502
2IN2180 – Gestion des achats.....	505
2IN2310 – Individus, Travail, Organisations.....	507
2IN2320 – Enjeux de Société .....	508
2IN2330 – Science, Technologie, Société .....	510
2IN2340 – Innovation, Arts et créativité.....	512
2IN4000 – Jeux d'entreprise .....	513



2IN5010 – Bridge Building challenge .....	515
2IN5015 – Numérisation 3D sans contact .....	517
2IN5020 – Innovation des semi-conducteurs .....	519
2IN5030 – Travail expérimental de physique .....	521
2IN5050 – Découverte de la radio logicielle .....	523
2IN5060 – Traitement du signal audio.....	525
2IN5070 – Semaine d'immersion dans les biomatériaux .....	527
2IN5080 – Physique des décharges électriques (plasmas froids) .....	528
2IN5106 – Le marketing et ses outils: vers un marketing responsable ? .....	530
2IN5110 – Ethique et Responsabilité.....	532
2IN5120 – Finances publiques .....	534
<b>COURS de LANGUES et CULTURES .....</b>	<b>536</b>
LC0100 – Anglais .....	537
LC0200 – Français Langue Etrangère .....	538
LC0300 – Allemand .....	540
LC0400 – Espagnol .....	542
LC0500 – Italien.....	543
LC0600 – Portugais.....	544
LC0700 – Chinois 2A.....	545
LC0800 – Japonais.....	546
LC0900 – Russe .....	547
LC1000 – Arabe .....	548
LC1200 – Hébreu.....	549

# COURS COMMUNS

# 2CC1000 – Commande des systèmes dynamiques

Responsables : **Pedro Rodriguez-Ayerbe, Maria Makarova**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT AUTOMATIQUE**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS, FRANCAIS**

Type de cours : **Cours commun**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **31,50**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

La majorité des systèmes physiques fait apparaître le concept fondamental de boucle de rétroaction, permettant de les piloter et de leur conférer un comportement le plus insensible possible aux perturbations de l'environnement. L'objectif général de ce cours est de fournir aux étudiants les concepts et compétences leur permettant de comprendre la structure et les interactions au sein de systèmes dynamiques existants ou en phase de conception, de traiter l'information, de déterminer une loi de commande en vue de satisfaire un cahier des charges et d'analyser son niveau de performance et de robustesse. Pour y parvenir, les étudiants devront être à même de définir un modèle (ou un ensemble de modèles), de façon à mettre en évidence les grandeurs influant sur l'état de ce système (entrées), les mesures permettant d'accéder à cet état et les grandeurs sur lesquelles portent des exigences (sorties), ainsi que les relations liant ces variables. A partir de l'analyse des entrées pilotables (commandes) ou subies (perturbations), l'étudiant devra déterminer une loi de commande en vue d'assurer les performances attendues. La dernière étape abordée dans ce cours consistera en l'analyse de la robustesse de la loi de commande déterminée.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Cours en promotion complète "Modélisation" en ST2, Cours en promotion complète hors séquence

"Convergence, intégration, probabilités" et "équations aux dérivées partielles", Cours en promotion complète «

Traitement du signal » en ST4

## Plan détaillé du cours (contenu)

### Découpage du cours en chapitres :

1. Introduction

- a. Intérêt de la boucle fermée, notions clés du contrôle, rejet de perturbation
- b. Approche fréquentielle classique vs approche temporelle plus actuelle et générique

- c. Exemples d'application
  - d. Théorèmes généraux : limitations intrinsèques à la boucle idéale (nécessité de formaliser, de compromis à faire)
2. Représentation d'état
- a. Rappels
  - b. Propriétés (commandabilité, observabilité)
  - c. Rapport entre modèle linéarisé et non linéaire - implémentation de la loi de commande sur le modèle non linéaire.
3. Commande des systèmes par approche d'état
- a. Commande par placement de pôles dans le cas monovariable, précision et suivi de trajectoire de référence
  - b. Commande Linéaire Quadratique (LQ)
  - c. Cas des perturbations mesurables et leurs rejets
  - d. Commande LQ avec action intégrale
4. Commande par retour d'état avec observateur
- a. Observateur par placement de pôles
  - b. Filtre de Kalman (dualité avec la commande LQ)
  - c. Commande Linéaire Quadratique Gaussienne (LQG) – Théorème de séparation
5. Analyse des performances et de robustesse d'une loi de commande
- a. Rappels : liens avec la fonction de transfert
  - b. Correcteur équivalent pour les commandes LQ et LQG
  - c. Théorème du petit gain
  - d. Définition des marges de stabilité dans le cas multivariable.
  - e. Cas particulier des marges de stabilité dans le cas monovariable
  - f. Cas particulier des lois LQ et LQG - Loop Transfer Recovery (effet LTR)
  - g. Cas particulier des marges de stabilité pour des lois de commande fréquentielles classiques (par exemple correction par avance de phase, régulateur PI et PID)
6. Conférence industrielle : les enjeux et les problématiques ouvertes et actuelles de la commande des systèmes dans l'industrie

## Déroulement, organisation du cours

12h de cours, 9h de travaux dirigés, 6h de travaux de laboratoire, 1,5h de conférences industrielles

- Sur le campus de Saclay : le cours est dispensé en 8 voies d'environ 100 élèves, 7 voies en Français et une voie en Anglais.
- Sur le campus de Rennes : le cours est dispensé en Français avec des modalités spécifiques pour permettre l'adaptation des étudiants à faible niveau en français. Des séances de soutien en anglais sont également programmées.
- Sur le campus de Metz : le cours est dispensé en Français.

## Organisation de l'évaluation

Evaluation des connaissances :

- Les TPs sont des activités obligatoires.
- Compte-rendu de travaux pratiques & contrôle final sous forme d'examen écrit (3h) avec calculatrice, photocopiés et notes de cours de l'élève autorisés.
- Note TP : 25%, note contrôle final : 75%, présence contrôlée en TD et TP, pouvant donner lieu à pénalité.

Evaluation des compétences :

- Les compétences C1 et C2 seront évaluées dans le cadre des travaux pratiques et de l'examen final. Les textes de ces deux activités feront ressortir les paragraphes et questions clairement identifiés en lien avec chacune de ces compétences.
- La sous compétence C2.4 de la compétence C2 sera plus spécifiquement évaluée dans le cadre des travaux pratiques.
- Les modalités de validation de ces deux compétences seront indiquées au début du premier cours par l'équipe enseignante.

## Support de cours, bibliographie

**Polycopiés :**

- Polycopié « Commande des systèmes dynamiques » en Français
- Glossaire "Commande des systèmes dynamiques" Français-Anglais et Anglais-Français
- Recueil des transparents utilisés en cours

**Bibliographie :**

- J.J. D'Azzo & C.H. Houpis - "Linear Control System. Analysis and Design" - 3e éd., Mc Graw-Hill, 1988.
- P. Borne, G. Dauphin-Tanguy, J.-P. Richard, F. Rotella et I. Zambettakis - "Analyse et régulation des processus industriels. Tome 1. Régulation continue, Tome 2. Régulation numérique" - Éditions Technip, 1993.
- J.B. Deluche - "Automatique. De la théorie aux applications industrielles. Tome 2 : Systèmes continus" - Edipol, 2000.
- J.M. Flaus - "La régulation industrielle" - Hermès, 1994.
- G.F. Franklin, J.D. Powell, A. Emami-Naeini - "Feedback Control of Dynamic Systems" - 7° ed., Ed. Pearson Publishing Company, 2014.
- B. Friedland - "Control system design" – Mc Graw-Hill, 1986.
- Ph. de Larminat - "Automatique. Commande des systèmes linéaires" - Hermès, 1996.
- L. Maret - "Régulation automatique" - Presses Polytechniques Romandes, 1987.
- K. Ogata - "Modern Control Engineering" - 5e éd., Ed. Pearson Education International, 2009.
- A. Rachid - "Systèmes de régulation" - Masson 1996.
- M. Zelazny, F. Giri et T. Bennani - "Systèmes asservis : commande et régulation" - Eyrolles, 1993.

## Moyens

- Équipe enseignante :

- Chargés et chargées de cours sur le campus de Saclay : Antoine Chaillet, Didier Dumur, Hugo Lhachemi, Maria Makarova, Cristina Maniu, Pedro Rodriguez-Ayerbe, Sihem Tebbani, Cristina Vlad
- Chargés et chargées de TD sur le campus de Saclay : Antoine Chaillet, Didier Dumur, Maria Makarova, Cristina Maniu, Cristina Vlad, Sorin Olaru, Pedro Rodriguez-Ayerbe, Guillaume Sandou, Hugo Lhachemi, Stéphane Font, Jacques Antoine, Jing Dai, Maxime Pouilly-Cathelain, Adnane Saoud
- Chargé de cours sur le campus de Rennes : Romain Bourdais
- Chargés et chargées de TD sur le campus de Rennes : Stanislav Aranovski, Hervé Guéguen, Marie-Anne Lefebvre, Nabil Sadou, Romain Boudais
- Chargé de cours sur le campus de Metz : Jean-Luc Colette

- Taille des TD sur le campus de Saclay : 35 élèves

- Travaux pratiques (TP) sur le campus de Saclay : 100 élèves par demi-journée, études réalisées sur des maquettes expérimentales

- Outils logiciels : Matlab (utilisé pendant les TP)

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de :

1. Comprendre et analyser l'intérêt d'une structure de commande en boucle fermée.
2. Modéliser le comportement d'un système dynamique par une représentation temporelle (représentation d'état) ou éventuellement fréquentielle :
  - faire le choix d'un modèle (ou d'un ensemble de modèles) de comportement adapté au regard de l'objectif de commande et/ou d'analyse (linéarisation, réduction de modèle, ...).
  - valider la pertinence du modèle (ou de l'ensemble de modèles proposé)
3. Synthétiser des lois de commande sous forme de représentation d'état complétée si besoin par la synthèse d'un observateur.
  - analyser les caractéristiques du système initial et les comparer au cahier des charges.
  - choisir et synthétiser le correcteur adapté.
  - déterminer un observateur permettant d'estimer les grandeurs d'état non mesurées.
  - valider en simulation et expérimentalement la loi de commande et critiquer les résultats obtenus.
  - analyser la performance et la robustesse de la loi de commande
4. Utiliser un logiciel de simulation pour mettre en œuvre les développements théoriques et valider les lois de commande (en particulier par l'intermédiaire d'un travail expérimental).
5. Maîtriser la communication scientifique et technique (par l'intermédiaire du compte rendu de Travaux Pratiques).

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

### Compétences validées :

- Compétence C1 "Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques", évaluée dans ce cours :

\* "Modéliser le comportement d'un système dynamique " s'inscrit dans C1.2 "Utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes pour traiter le problème"

\* "Analyser le comportement temporel et/ou fréquentiel d'un système et les effets du bouclage" s'inscrit dans C1.1 "Etudier un problème dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un problème dans ses dimensions scientifiques, économiques et humaines"

\* "Déterminer une loi de commande par retour d'état (complétée si besoin par la synthèse d'un observateur), afin de satisfaire un cahier des charges temporel et/ou fréquentiel" s'inscrit dans C1.4 "Spécifier, concevoir, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe"

\* "Valider en simulation et expérimentalement la loi de commande et critiquer les résultats obtenus" s'inscrit dans C1.3 "Résoudre un problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation"

- Compétence C2 "Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers", évaluée dans ce cours :

\* "Modéliser le comportement d'un système dynamique" et "Analyser les caractéristiques du système initial et les comparer au cahier des charges" nécessitent une appropriation du domaine d'application considéré et de ses contraintes, et s'inscrit donc dans C2.2 "Importer des connaissances d'autres domaines ou disciplines" et C2.3 "Identifier et acquérir de façon autonome les nouvelles connaissances et compétences nécessaires"

\* "Analyser la performance et la robustesse de loi de commande" s'inscrit dans C2.4 "Produire des données et développer de la connaissance selon une démarche scientifique"

\* "Utiliser un logiciel de simulation pour mettre en œuvre les développements théoriques et valider les lois de commande (en particulier par l'intermédiaire d'un travail expérimental)" s'inscrit dans C2.4 "Produire des données et développer de la connaissance selon une démarche scientifique"

- Enfin "Maîtriser la communication scientifique et technique (par l'intermédiaire du compte rendu d'Études de Laboratoire)" s'inscrit dans C7.1 "Convaincre sur le fond. Être clair sur les objectifs et les résultats attendus. Être rigoureux sur les hypothèses et la démarche. Structurer ses idées et son argumentation. Mettre en évidence la valeur créée". Cette compétence ne sera pas évaluée dans ce cours.

### **Évaluation des acquis d'apprentissage**

Les acquis d'apprentissage concernant C1 et C2 seront évalués dans les situations suivantes :

- 2 séances de travaux pratiques permettront d'évaluer l'ensemble de ces acquis d'apprentissage en étant confronté à un procédé réel à modéliser, analyser et piloter. Ce mode pédagogique permet en particulier de confronter les élèves à l'expérimentation et à la validation de la démarche de modélisation et de synthèse.

- Un examen final confrontera également les élèves à une problématique réelle d'un procédé qu'il conviendra de modéliser, analyser et piloter. L'accent y sera mis moins sur les aspects expérimentaux que sur la capacité à satisfaire une problématique industrielle.

La compétence C2.4 sera plus spécifiquement travaillée lors des séances de travaux pratiques, ainsi que lors du travail personnel (nécessitant la mise en œuvre du procédé via un logiciel de simulation) effectué entre les deux séances de travaux pratiques.

La compétence C7 ne sera pas évaluée, mais néanmoins travaillée par l'intermédiaire du compte-rendu remis à l'issue des séances de travaux pratiques.



# 2CC1005 – Commande des systèmes dynamiques - DUAL

Responsables : **Pedro Rodriguez-Ayerbe, Maria Makarova**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT AUTOMATIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **31,50**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

La majorité des systèmes physiques fait apparaître le concept fondamental de boucle de rétroaction, permettant de les piloter et de leur conférer un comportement le plus insensible possible aux perturbations de l'environnement. L'objectif général de ce cours est de fournir aux étudiants les concepts et compétences leur permettant de comprendre la structure et les interactions au sein de systèmes dynamiques existants ou en phase de conception, de traiter l'information, de déterminer une loi de commande en vue de satisfaire un cahier des charges et d'analyser son niveau de performance et de robustesse. Pour y parvenir, les étudiants devront être à même de définir un modèle (ou un ensemble de modèles), de façon à mettre en évidence les grandeurs influant sur l'état de ce système (entrées), les mesures permettant d'accéder à cet état et les grandeurs sur lesquelles portent des exigences (sorties), ainsi que les relations liant ces variables. A partir de l'analyse des entrées pilotables (commandes) ou subies (perturbations), l'étudiant devra déterminer une loi de commande en vue d'assurer les performances attendues. La dernière étape abordée dans ce cours consistera en l'analyse de la robustesse de la loi de commande déterminée.

## Prérequis

Cours en promotion complète "Modélisation" en ST2, Cours en promotion complète hors séquence "Convergence, intégration, probabilités" et "équations aux dérivées partielles"

## Plan détaillé du cours (contenu)

### Découpage du cours en chapitres :

#### 1. Introduction

- a. Intérêt de la boucle fermée, notions clés du contrôle, rejet de perturbation
- b. Approche fréquentielle classique vs approche temporelle plus actuelle et générique
- c. Exemples d'application
- d. Théorèmes généraux : limitations intrinsèques à la boucle idéale (nécessité de formaliser, de compromis à faire)

#### 2. Représentation d'état

- a. Rappels
- b. Propriétés (commandabilité, observabilité)
- c. Rapport entre modèle linéarisé et non linéaire - implémentation de la loi de commande sur le modèle non linéaire.

#### 3. Commande des systèmes par approche d'état

- a. Commande par placement de pôles dans le cas monovarié, précision et suivi de trajectoire de référence

- b. Commande Linéaire Quadratique (LQ)
  - c. Cas des perturbations mesurables et leurs rejets
  - d. Commande LQ avec action intégrale
4. Commande par retour d'état avec observateur
- a. Observateur par placement de pôles
  - b. Filtre de Kalman (dualité avec la commande LQ)
  - c. Commande Linéaire Quadratique Gaussienne (LQG) – Théorème de séparation
5. Analyse des performances et de robustesse d'une loi de commande
- a. Rappels : liens avec la fonction de transfert
  - b. Correcteur équivalent pour les commandes LQ et LQG
  - c. Théorème du petit gain
  - d. Définition des marges de stabilité dans le cas multivariable.
  - e. Cas particulier des marges de stabilité dans le cas monovisible
  - f. Cas particulier des lois LQ et LQG - Loop Transfer Recovery (effet LTR)
  - g. Cas particulier des marges de stabilité pour des lois de commande fréquentielles classiques (par exemple correction par avance de phase, régulateur PI et PID)
6. Conférence industrielle : les enjeux et les problématiques ouvertes et actuelles de la commande des systèmes dans l'industrie

## Déroulement, organisation du cours

12h de cours, 9h de travaux dirigés, 6h de travaux de laboratoire, 1,5h de conférences industrielles.

Tous les cours sont dispensés en français.

## Organisation de l'évaluation

Evaluation des connaissances :

- Les TPs sont des activités obligatoires.
- Compte-rendu de travaux pratiques & contrôle final sous forme d'examen écrit (3h) avec calculatrice, photocopiés et notes de cours de l'élève autorisés.
- Note TP : 25%, note contrôle final : 75%, présence contrôlée en TD et TP, pouvant donner lieu à pénalité.

Evaluation des compétences :

- Les compétences C1 et C2 seront évaluées dans le cadre des travaux pratiques et de l'examen final. Les textes de ces deux activités feront ressortir les paragraphes et questions clairement identifiés en lien avec chacune de ces compétences.
- La sous compétence C2.4 de la compétence C2 sera plus spécifiquement évaluée dans le cadre des travaux pratiques.
- Les modalités de validation de ces deux compétences seront indiquées au début du premier cours par l'équipe enseignante.

## Support de cours, bibliographie

Photocopiés :

- Photocopie « Commande des systèmes dynamiques » en Français
- Glossaire "Commande des systèmes dynamiques" Français-Anglais et Anglais-Français
- Recueil des transparents utilisés en cours

## Bibliographie :

- J.J. D'Azzo & C.H. Houpis - "Linear Control System. Analysis and Design" - 3e éd., Mc Graw-Hill, 1988.
- P. Borne, G. Dauphin-Tanguy, J.-P. Richard, F. Rotella et I. Zambettakis - "Analyse et régulation des processus industriels. Tome 1. Régulation continue, Tome 2. Régulation numérique" - Éditions Technip, 1993.
- J.B. Deluche - "Automatique. De la théorie aux applications industrielles. Tome 2 : Systèmes continus" - Edipol, 2000.
- J.M. Flaus - "La régulation industrielle" - Hermès, 1994.
- G.F. Franklin, J.D. Powell, A. Emami-Naeini - "Feedback Control of Dynamic Systems" - 7° ed., Ed. Pearson Publishing Company, 2014.
- B. Friedland - "Control system design" – Mc Graw-Hill, 1986.
- Ph. de Larminat - "Automatique. Commande des systèmes linéaires" - Hermès, 1996.
- L. Maret - " Régulation automatique" - Presses Polytechniques Romandes, 1987.
- K. Ogata - "Modern Control Engineering" - 5e éd., Ed. Pearson Education International, 2009.
- A. Rachid - "Systèmes de régulation" - Masson 1996.
- M. Zelazny, F. Giri et T. Bennani - "Systèmes asservis : commande et régulation" - Eyrolles, 1993.

## Moyens

- Équipe enseignante : Cristina Vlad
- Travaux pratiques (TP) : études réalisées sur maquettes expérimentales
- Logiciel : Matlab pour les travaux pratiques

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de :

1. Comprendre et analyser l'intérêt d'une structure de commande en boucle fermée.
2. Modéliser le comportement d'un système dynamique par une représentation temporelle (représentation d'état) ou éventuellement fréquentielle :
  - faire le choix d'un modèle (ou d'un ensemble de modèles) de comportement adapté au regard de l'objectif de commande et/ou d'analyse (linéarisation, réduction de modèle, ...).
  - valider la pertinence du modèle (ou de l'ensemble de modèles proposé)
3. Synthétiser des lois de commande sous forme de représentation d'état complétée si besoin par la synthèse d'un observateur.
  - analyser les caractéristiques du système initial et les comparer au cahier des charges.
  - choisir et synthétiser le correcteur adapté.
  - déterminer un observateur permettant d'estimer les grandeurs d'état non mesurées.
  - valider en simulation et expérimentalement la loi de commande et critiquer les résultats obtenus.
  - analyser la performance et la robustesse de la loi de commande
4. Utiliser un logiciel de simulation pour mettre en œuvre les développements théoriques et valider les lois de commande (en particulier par l'intermédiaire d'un travail expérimental).
5. Maîtriser la communication scientifique et technique (par l'intermédiaire du compte rendu de Travaux Pratiques).

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

### Compétences validées :

- Compétence C1 "Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques", évaluée dans ce cours :

\* "Modéliser le comportement d'un système dynamique " s'inscrit dans C1.2 "Utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes pour traiter le problème"

\* "Analyser le comportement temporel et/ou fréquentiel d'un système et les effets du bouclage" s'inscrit dans C1.1 "Etudier un problème dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un problème dans ses dimensions scientifiques, économiques et humaines"

\* "Déterminer une loi de commande par retour d'état (complétée si besoin par la synthèse d'un observateur), afin de satisfaire un cahier des charges temporel et/ou fréquentiel" s'inscrit dans C1.4 "Spécifier, concevoir, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe"

\* "Valider en simulation et expérimentalement la loi de commande et critiquer les résultats obtenus" s'inscrit dans C1.3 "Résoudre un problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation"

- Compétence C2 "Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers", évaluée dans ce cours :

\* "Modéliser le comportement d'un système dynamique" et "Analyser les caractéristiques du système initial et les comparer au cahier des charges" nécessitent une appropriation du domaine d'application considéré et de ses contraintes, et s'inscrit donc dans C2.2 "Importer des connaissances d'autres domaines ou disciplines" et C2.3 "Identifier et acquérir de façon autonome les nouvelles connaissances et compétences nécessaires"

\* "Analyser la performance et la robustesse de loi de commande" s'inscrit dans C2.4 "Produire des données et développer de la connaissance selon une démarche scientifique"

\* "Utiliser un logiciel de simulation pour mettre en œuvre les développements théoriques et valider les lois de commande (en particulier par l'intermédiaire d'un travail expérimental)" s'inscrit dans C2.4 "Produire des données et développer de la connaissance selon une démarche scientifique"

- Enfin "Maîtriser la communication scientifique et technique (par l'intermédiaire du compte rendu d'Études de Laboratoire)" s'inscrit dans C7.1 "Convaincre sur le fond. Être clair sur les objectifs et les résultats attendus. Être rigoureux sur les hypothèses et la démarche. Structurer ses idées et son argumentation. Mettre en évidence la valeur créée". Cette compétence ne sera pas évaluée dans ce cours.

### Évaluation des acquis d'apprentissage

Les acquis d'apprentissage concernant C1 et C2 seront évalués dans les situations suivantes :

- 2 séances de travaux pratiques permettront d'évaluer l'ensemble de ces acquis d'apprentissage en étant confronté à un procédé réel à modéliser, analyser et piloter. Ce mode pédagogique permet en particulier de confronter les élèves à l'expérimentation et à la validation de la démarche de modélisation et de synthèse.

- Un examen final confrontera également les élèves à une problématique réelle d'un procédé qu'il conviendra de modéliser, analyser et piloter. L'accent y sera mis moins sur les aspects expérimentaux que sur la capacité à satisfaire une problématique industrielle.

La compétence C2.4 sera plus spécifiquement travaillée lors des séances de travaux pratiques, ainsi que lors du travail personnel (nécessitant la mise en œuvre du procédé via un logiciel de simulation) effectué entre les deux séances de travaux pratiques.

La compétence C7 ne sera pas évaluée, mais néanmoins travaillée par l'intermédiaire du compte-rendu remis à l'issue des séances de travaux pratiques.

# 2CC3000 – Optimisation

Responsables : **Jean-Christophe Pesquet**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MATHÉMATIQUES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS, ANGLAIS**

Type de cours : **Cours commun**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ, CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **31,50**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours explorera divers aspects fondamentaux de l'optimisation, aussi bien continue que discrète.

Les notions suivantes seront abordées et mises en oeuvre pratiquement: formulation des problèmes d'optimisation, conditions d'existence de minimiseurs globaux et locaux, convexité, dualité, multiplicateurs de Lagrange, méthodes du premier ordre, programmation linéaire, programmation linéaire entière, approche « branch and bound » (séparation-évaluation), introduction à l'optimisation stochastique.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

## Prérequis

Notions de base en analyse, calcul différentiel et probabilités (cours convergence, intégration et probabilité), bonne maîtrise d'un environnement de programmation.

## Plan détaillé du cours (contenu)

### 1. Bases de l'optimisation

- 1.1 Introduction
- 1.2 Existence de minimiseurs
- 1.3 Convexité
- 1.4 Quelques algorithmes itératifs
- 1.5 Dualité

### 2. Programmation linéaire

### 3. Programmation linéaire entière

### 4. Méthode des multiplicateurs de Lagrange

### 5. Optimisation stochastique

## Déroulement, organisation du cours

L'enseignement combine cours magistraux et TD/TP.  
Il se répartit en 21 heures de cours, 7.5 heures de TD et 3 heures d'examen final.

Les parties 3 et 5 du cours feront l'objet d'un auto-apprentissage avec un processus d'évaluation adéquat.

## Organisation de l'évaluation

L'évaluation des acquis se fera à la fois par contrôle continu (40%) et par l'examen écrit final (60%). En cas d'absence justifiée aux contrôles intermédiaires, les notes de ces derniers sont remplacées par celle du contrôle final.

## Support de cours, bibliographie

D. P. Bertsekas, Nonlinear Programming, 3rd Edition. Athena Scientific, 2016. ISBN:978-1-886529-05-2  
H.H. Bauschke and P. L. Combettes, Convex Analysis and Monotone Operator Theory in Hilbert Spaces, 2nd Edition. Springer, 2017. ISBN: 978-3-319-48311-5

## Moyens

Outils logiciels nécessaires: MATLAB, Python,....

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce cours, les élèves seront capable de :

- traiter une large gamme de problèmes concrets d'optimisation se posant dans un contexte scientifique ou industriel.
- formuler de façon adéquate un tel problème et de proposer une solution numérique à l'aide des méthodes existantes
- valider et l'interpréter la solution du point de vue du problème initial.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Compétence de niveau intermédiaire en optimisation à la fois en mathématiques (C1) et en algorithmique (C6)

# 2CC3005 – Optimisation - DUAL

Responsables : **Charles Soussen**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MATHÉMATIQUES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS, ANGLAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **36,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

L'optimisation numérique est utile dans beaucoup de domaines, comme en mathématiques, en ingénierie, en économie, en finance, etc. Par exemple, les problèmes de gestion de stock, d'allocation de ressources, des contrôle de structures mécaniques et d'analyse de données peuvent tous être abordés comme des problèmes d'optimisation. Bien que ces problèmes soient de nature variée, ils peuvent être formulés comme l'optimisation d'une fonction coût sur un certain domaine et sous un certain nombre de contraintes. De façon notable, il existe beaucoup de méthodes d'optimisation en fonction de la structure du problème à traiter.

Ce cours présente un tour d'horizon des approches et algorithmes classiques d'optimisation. Il fournit les connaissances de base qui permettront aux élèves de traiter les divers problèmes d'optimisation qu'ils seront susceptibles de rencontrer, et de les aider à choisir l'algorithme adéquat. Le cours couvre essentiellement les algorithmes d'optimisation locale, avec une brève introduction à l'optimisation globale. Les méthodes couvrent l'optimisation locale sans contrainte (algorithmes de type gradient, gradient conjugué), l'optimisation locale sous contraintes, les méthodes des moindres carrés et l'optimisation discrète.

## Prérequis

Pas de prérequis spécifique. Les élèves doivent avoir des connaissances de base en algèbre linéaire et en calcul matriciel.

## Plan détaillé du cours (contenu)

1. Optimisation locale sans contrainte : algorithmes du gradient, du gradient conjugué, de Newton et quasi-Newton
2. Moindres carrés
3. Optimisation sous contrainte
4. Introduction à l'optimisation globale et discrète



## Déroulement, organisation du cours

Alternance régulière entre cours et TD. Les TD couvrent les aspects calculatoires (résolution de systèmes KKT notamment) et l'optimisation avec le logiciel Matlab

## Organisation de l'évaluation

Examen final écrit (2 heures, 100 % de la note)

L'examen couvre tous les sujets abordés en cours et en TD, avec un focus sur les algorithmes d'optimisation locale : connaissance des algorithmes, calculs simples, connaissance pratique de l'appel aux routines d'optimisation (dans ce cas, l'aide de la routine matlab sera donnée) avec du pseudo-code matlab, interprétation des résultats de simulation numérique. Une connaissance approfondie des méthodes d'optimisation globale et discrète n'est pas demandée. L'évaluation couvre également le contenu des TD.

Aucun document n'est autorisé. L'utilisation d'ordinateurs et de calculatrice est interdite. Les téléphones mobiles doivent être éteints.

## Support de cours, bibliographie

- J. Nocedal and J. S. Wright, Numerical optimization, 2nd edition, Springer Verlag, New York, Jul. 2006.
- R. Fletcher, Practical Methods of Optimization, 2nd edition, Wiley, 2000
- A. Björck, Numerical Methods for Least Squares Problems, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, Apr. 1996.
- R. Horst, P. M. Pardalos, and V. T. Nguyen, Introduction to Global Optimization, 2nd edition, Springer, Dec. 2000.

## Moyens

- Transparents complets du cours
- Documentation Matlab (optimtool)
- Bibliographie

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Ce cours introduit les principaux concepts et les principales méthodes d'optimisation numérique. Il est centré sur les méthodes d'optimisation locale, avec une esquisse des principes généraux sur lesquels reposent les méthodes d'optimisation globale.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

L'examen permet de valider les compétences C1 et C6.

A l'issue du cours, les étudiants doivent posséder une bonne connaissance des principaux algorithmes et doivent être capables de mener à bien des calculs simples : calculs de gradients, de hessiens, résolution de problèmes d'optimisation simples en exprimant les conditions KKT et en résolvant le système associé. De plus, les élèves doivent posséder une bonne connaissance pratique (appel aux solvers d'optimisation sous Matlab) et doivent savoir interpréter les résultats numériques.

## COURS HORS SEQUENCE

# 2SL1000 – Economie

Responsables : **Pascal DA COSTA**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS, FRANCAIS**

Type de cours : **Cours hors séquence**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **21,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Sans doute avez-vous déjà lu la presse économique et entendu parler de variables et de concepts économiques (moteurs de la croissance, relation inflation - chômage, types de concurrences, Banque centrale européenne et autres institutions économiques, etc.) : il est maintenant temps de définir clairement tout cela et de saisir enfin les débats économiques dans toute leur complexité. Ce faisant, vous rencontrerez tous, au moins une fois dans votre scolarité, l'avis des économistes sur les grands problèmes et les débats qui traversent notre société.

L'objectif premier de ce cours d'introduction à l'analyse économique est donc de fournir les concepts de base nécessaires à la compréhension et l'analyse du monde économique. Chaque sujet ou enjeu économique (*cf.* le plan du cours) sera d'abord présenté à l'aide de faits empiriques, de statistiques historiques et récentes, et sera ensuite expliqué à l'aide de théories économiques, pouvant parfois s'opposer (vous verrez que ces controverses théoriques sont assez courantes en économie).

Ce cours a également pour objectif de vous former aux enjeux de la transition écologique à travers ses aspects économiques et les concepts du domaine (externalités, coût de l'inaction, politiques incitatives, croissance et développement, etc.) : aussi, les objectifs de développement durable de l'ONU abordés dans ce cours sont le 7 Energy, 8 Growth, 9 Industrie et Innovation, 10 Inégalités, 12, Consommation et production durable, 13 Climat.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

**1- Histoire de la pensée économique:** Modélisation mathématique des faits économiques. Validation par l'économétrie.

**2- Microéconomie :** Structures et réglementations des marchés. Externalités positives et négatives : l'innovation et la pollution. Discrimination par les prix. Théorie des jeux.

**3- Économie monétaire :** De l'économie de l'endettement à l'économie des marchés financiers. Le rôle de la monnaie. Le rôle de la Banque centrale et des banques commerciales dans le financement de l'économie.

**4- Fluctuations et politiques économiques :** Politique monétaire, politique fiscale. Le chômage (les déséquilibres).

**5- Économie internationale et mondialisation :** Commerce international : réglementation du commerce mondial, théories du commerce international. Finance internationale : taux de change, balance des paiements, systèmes monétaires et financiers internationaux (le modèle IS-sans LM en économie ouverte).

**6- Économie de la croissance, innovations, inégalités. Economie du développement durable.**

## Déroulement, organisation du cours

10,5 heures de conférences (CM)  
9 heures de TD  
2 heures d'examens

ou Classes intégrées (cours + TD) (places limitées)

**Cours en français ou en anglais (au choix).**

## Organisation de l'évaluation

- Contrôle intermédiaire (CI) : 20% de la note finale
- 1 Contrôle final (CF) : sans document, 2h00 : 80% de la note finale (1 ou 2 exercices + 1 question de réflexion)
- Note =  $\text{Max} ( 0,2.CI + 0,8.CF , CF )$

## Support de cours, bibliographie

### Bibliographie / supports :

- Polycopié de cours
- Begg, Fischer, Dornbusch (2002) Macroéconomie, Dunod.
- Begg, Fischer, Dornbusch (2002) Microéconomie, Dunod.
- Blanchard, Cohen (2002) Macroéconomie, Pearson Education.
- Burda, Wyplosz (1998) Macroéconomie : une perspective européenne, Boeck Université.
- da Costa (2013) Etats-Unis, Europe, Chine : des Etats au coeur des crises économiques et financières mondiales, l'Harmattan.
- Mucchielli, Mayer (2005) Economie internationale, Dalloz.
- Picard (1992) Eléments de microéconomie, Montchrestien.
- Stiglitz (2000) Principes d'économie moderne, De Boeck Université.

## Moyens

Equipe enseignante dirigée par **Pascal da Costa**.

Cours en français ou en anglais (200 élèves au maximum en anglais).  
Classes intégrées ouvertes également (cours et TD dans une même classe d'une soixantaine d'élève).

NB : les cours en français ou en anglais sont organisés de la façon suivante : cours d'1h30 en amphi., suivi d'un TD en présentiel d'1h30.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- connaître les théories économiques récentes, leurs objectifs et leurs limites principales ;
- connaître les processus pour générer des connaissances en analyse économique, dans les domaines de la concurrence, du financement de l'économie, de la monnaie, des politiques économiques et du commerce international, du développement durable, etc. ;
- développer et mettre en œuvre des modèles mathématiques simples en micro et macroéconomie.
- rédiger une rédaction en économie

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C3.1 Observer et s'autoriser à critiquer le monde tel qu'il est, douter, dépasser les injonctions, remettre en cause ses hypothèses de départ, s'autoriser à apprendre dans ses échecs, diagnostiquer

C4.1 Identifier et (re)formuler le besoin de création de valeur du client ainsi que les enjeux et contraintes associés. Identifier et intégrer les autres parties prenantes, internes et externes ainsi que les autres dimensions non évoquées initialement (techniques, économiques, humaines, etc.)

C5.3 Analyser les enjeux globaux et/ou locaux à l'international et adapter des projets ou solutions à ceux-ci

C9.2 Analyser et anticiper les conséquences possibles des organisations et modèles économiques des structures auxquelles on contribue

# 2SL1100 – Sciences du Climat et enjeux du changement climatique

Responsables : **Didier Paillard**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ÉNERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS, ANGLAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE METZ, CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **30**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **21,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

L'objectif du cours "Sciences du Climat" est de fournir les bases scientifiques nécessaires pour appréhender les questions et les enjeux du changement climatique actuel. Il s'agit tout d'abord de situer la transition climatique actuelle dans le contexte plus général des changements climatiques ayant déjà eu lieu dans le passé. En effet, c'est uniquement à travers l'évocation de ces crises passées que l'on peut dresser un tableau rapide des diverses conséquences de la crise actuelle (climat, niveau marin, acidification, changements des écosystèmes, ...). Par ailleurs, il est nécessaire de présenter les grands principes physiques qui déterminent le climat, notamment le bilan radiatif de la Planète et ses déclinaisons géographiques et saisonnières, mais aussi les déterminants de l'effet de serre, notamment le cycle du carbone qui modifie et régule le climat sur diverses échelles de temps. L'objectif du cours est également de présenter les outils de modélisations utilisés à la fois pour mieux comprendre les processus mis en œuvre, mais aussi pour simuler les futurs climatiques possibles. Pour cela, il est important de préciser quel est le contenu physique et géochimique de ces modèles en détaillant le rôle respectif des équations de conservation et celui des paramétrisations. Au final, comme il n'existe pas d'outil parfait intégrant tous les processus, il est nécessaire d'établir diverses stratégies de modélisation pour répondre à différentes questions scientifiques ou sociétales.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Pas de prérequis.

## Plan détaillé du cours (contenu)

- l'observation de la variabilité naturelle du climat et leur phénoménologie : les forçages, les rétroactions, effets de seuil, de bascule, et d'hystérésis.
- les grands principes physiques et chimiques : l'effet de serre (rayonnement), les transports d'énergie et d'eau (équations de conservation, transferts thermiques, thermodynamique), le cycle du carbone.
- les simulations numériques du climat.
- les facteurs d'impacts anthropiques : émissions gaz à effet de serre, aérosols, utilisation des terres, et scénarios pour le futur.

## Déroulement, organisation du cours

Cours magistraux: 7h30

TD: 4h30

Conférence: 2h00

Examen: 1h00

## Organisation de l'évaluation

QCM en ligne (obligatoire)

## Support de cours, bibliographie

- Diaporama du cours
- Support de cours écrit
- Sur le changement climatique : les rapports du GIEC (notamment les « résumés pour décideurs ») des groupes 1 ("climat": <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>), 2 ("impacts": <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>) et 3 ("mitigation/adaptation": <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>). Le rapport de synthèse 2023 (<https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>)
- Sur le climat et les recherches associés : voir les liens de l'IPSL : <https://www.ipsl.fr/Pour-tous>

## Moyens

Responsable du cours : Didier Paillard.

Equipe pédagogique (LSCE) : Masa Kageyama, Didier Paillard.

Cours en français ou en anglais.

Travaux dirigés en français ou en anglais.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable:

- d'ancrer les questions relatives au changement climatique en cours dans les principes physiques familiers de l'ingénieur (thermodynamique, bilans de masse, d'énergie, de quantité de mouvement, ...).
- d'appréhender les ordres de grandeur pour l'énergie, le cycle du carbone naturel et pour leurs perturbations anthropiques.
- de mettre en œuvre les notions de rétroaction, de seuil, d'hystérésis, de système complexe, dans le cadre du fonctionnement de la planète Terre.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.1 Analyser : étudier un système dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un système dans le cadre d'une approche transdisciplinaire avec ses dimensions scientifiques, économiques, humaines, etc.

C2.1 Approfondir un domaine des sciences de l'ingénieur ou une discipline scientifique.

C2.2 Importer des connaissances d'autres domaines ou disciplines.

C9.4 Analyser et anticiper les conséquences possibles de ses choix et de ses actes dans le respect de soi-même, d'autrui et de l'environnement

# 2SL2000 – Droit

Responsables : **Valérie Feray**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS, FRANCAIS**

Type de cours : **Cours hors séquence**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ, CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **20**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **10,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

- Introduction générale au droit comme instrument de régulation sociale
- Droit des contrats, responsabilité civile, contractuelle et délictuelle
- Notions fondamentales de droit de la propriété intellectuelle (brevets, marques, modèles, copyright pour la protection des logiciels)

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

Thèmes des cours magistraux :

- Introduction au droit
- Droit des contrats, responsabilité civile
- Droit des brevets, marques, dessins et modèles
- Protection des logiciels

## Déroulement, organisation du cours

Cours magistraux (3\*1h30) | Travaux Dirigés (3\*1h30) | Examen Final (1\*1h00)

## Organisation de l'évaluation

Examen final (100% de la note finale): QCM sans documentation

## Support de cours, bibliographie

*Traité de droit de la Propriété Industrielle, Tomes 1 et 2. Jérôme Passa*



## Moyens

Equipe enseignante :

- Valérie FERAY : cours magistraux et TD - Associée fondatrice - Conseil en Propriété Industrielle | IPSILON
- Grégoire DESROUSSEAUX : conférencier et chargé de TD - Avocat & Associé | August Debouzy

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Avoir une base juridique concernant les principaux aspects du droit auxquels les ingénieurs et chefs d'entreprise peuvent être confrontés, afin de leur donner les bons réflexes à avoir dans les situations sensibles.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C 1.1 - Étudier un problème dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un problème dans ses dimensions scientifiques, économiques et humaines.

C2.3 - Identifier et acquérir rapidement des nouvelles connaissances et compétences nécessaires dans les domaines pertinents, qu'ils soient techniques, économiques ou autres.

C 3.1 - Être proactif, prendre des initiatives, s'impliquer.

C 4.1 - Savoir identifier la valeur apportée par une solution pour un client, le marché. Savoir discerner les opportunités, les bonnes occasions d'affaire et les saisir.

C 9.4 - Faire preuve de rigueur et d'esprit critique dans l'approche des problèmes sous tous les angles, scientifiques, humains et économiques.

# 2SL3000 – Philosophie

Responsables : **Cynthia Colmellere**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS, FRANCAIS**

Type de cours : **Cours hors séquence**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ, CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **30**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **16,50**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours est une introduction à la philosophie. Il s'articule autour de différentes branches de la philosophie, notamment la philosophie morale et politique et la philosophie des sciences.

Cet enseignement poursuit quatre objectifs.

1. Introduire la discipline à travers son histoire, les grandes questions qu'elle aborde et les types de réponses qu'elle propose,
2. Comprendre et questionner la démarche scientifique à partir de connaissances en philosophie des sciences et épistémologie,
3. Initier et approfondir une réflexion sur le progrès scientifique et technique en lien avec le progrès social.
4. A partir de fondamentaux en philosophie morale et politique, proposer des ressources pour une réflexion sur l'éthique professionnelle (éthique des ingénieurs) et personnelle.

Les exemples et les situations traitées sont pris dans différents domaines en lien avec les enjeux de société traités dans le cursus dès la première année. Ces exemples pourront être en lien avec l'actualité scientifique, technologique, politique et sociale. Cette variété de situations et de contextes a pour but de faciliter la compréhension et l'utilisation des concepts étudiés.

Chaque partie comprend une base théorique et des développements à partir d'exemples issus de l'histoire des sciences et des techniques et de l'histoire politique et sociale.

Principales notions abordées

- Connaissance, ignorance
- Vérité, preuve scientifique
- Progrès technologique/progrès social
- Pouvoir, démocratie, responsabilité
- Ethique

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

Chaque séance de cours dure 1h30, les séances sont regroupées en séquences de 3h

## Déroulement, organisation du cours

Ce cours se déroule sous forme de conférences.

## Organisation de l'évaluation

L'évaluation est un travail individuel (dissertation), durée : 3H

## Support de cours, bibliographie

Chaque intervenant transmettra une bibliographie relative à sa partie de cours.

## Moyens

Les cours sont donnés sous forme de conférences par des spécialistes :

Gif: M. Girel et M. Klein

Rennes : M. Calori, Mme Gueguen

Metz Mme Aubert

Attention, les contenus et de le déroulement du cours et les sujets d'examen diffèrent d'un campus à l'autre.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- Comprendre des situations d'innovation, d'incertitude, de controverses, de crise, de mutations économiques, technologiques à l'aide d'une analyse critique des savoirs scientifiques.
- Identifier, dans ce situations, les cadres normatifs, les visions du monde, les enjeux économiques, éthiques et sociétaux des différents acteurs concernés (collaborateurs, citoyens, scientifiques ou institutionnels), et par conséquent leurs positions respective
- Savoir concilier, articuler et intégrer dans ses analyses, ses décisions et ses actions, les savoirs techniques et scientifiques (« durs ») et les savoirs traitant les dimensions humaines, sociales et culturelles.

# 2SL4000 – Sociologie des Organisations

Responsables : **Cynthia Colmellere**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS, ANGLAIS**

Type de cours : **Cours hors séquence**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **20**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **12,00**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours est une introduction à la sociologie des organisations. Cette partie de la sociologie étudie les comportements individuels et collectifs au sein de groupes humains constitués : les organisations.

Ce cours propose des connaissances théoriques et des savoirs méthodologiques en sociologie des organisations et en psychosociologie. L'objectif est d'apprendre aux élèves à les utiliser dans des contextes réels de résolution de problèmes et de changement.

Dans ce cours sont abordés les phénomènes principaux dans les organisations : décisions, stratégies, pouvoirs, négociations, conflits... Il permet également de comprendre les dysfonctionnements et les phénomènes de déviance dans les organisations. Une typologie des formes et des modes de fonctionnement des organisations permet aux élèves d'aborder un répertoire de situations-problèmes courantes.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

Jeux d'entreprises, Gestion d'entreprise, Economie

## Plan détaillé du cours (contenu)

**Ce cours de sociologie des organisations traite des notions suivantes:**

- Introduction à la sociologie (concepts, méthodes, fondements, scientificité).
- Les notions d'organisation, d'institution, de groupe organisé.
- Les travaux fondateurs de la sociologie des organisations : F. W Taylor (doctrine, organisation scientifiques du travail (OST) ; H. Ford (Fordisme), Toyotisme
- Les doctrines d'organisation du travail, la rationalisation du travail, de la révolution industrielle aux développements les plus récents du capitalisme (dématérialisation du travail, plate-formes),
- La notion de travail

Chaque notion est abordée d'un point de vue théorique et à partir d'exemples (situations, enquêtes ) sous des formats variés.

- Normes et règles dans les organisations, respect, adaptations, contournements
- La bureaucratisation des organisations
- Notions de pouvoir, d'autorité, de légitimité, de domination.
- Introduction et pratique de l'analyse stratégique et systémique des organisations
- Critiques de l'analyse stratégique des organisations et propositions : nouvelles approches de l'analyse des dynamiques humaines et sociales dans les organisations.

Chaque notion est abordée d'un point de vue théorique et à partir d'exemples (situations, enquêtes ) sous des formats variés (dont des extraits de films).

## Déroulement, organisation du cours

Cet enseignement se compose de cours et de TD. Il associe apports théoriques, exercices, études de cas, mises en situation... Les exemples et les cas pratiques sont pris dans différents domaines : entreprises et industries, institutions (monde politique, de l'éducation), associations. Cette variété de situations et de contextes a pour but de faciliter la mise en oeuvre des concepts et méthodes proposés.  
6 heures de cours et 3 heures de TD

Le cours est donné en français mais des textes de références (issus d'un manuel) sont donnés en anglais.  
un Td est proposé en anglais intégralement sur le campus de Gif,  
sur les campus de Rennes et Metz, l'un des deux Td est donné en français mais les interactions avec l'enseignant peuvent être en anglais.

## Organisation de l'évaluation

Les modalités d'évaluation proposées sont les suivantes : Une évaluation individuelle : examen sur table de 3h, sans documents, questions de cours et étude de cas, 100 % note finale

## Support de cours, bibliographie

Amblard, H., Bernoux, P., Herreros, G., Livian, Y.-F., Les nouvelles approches de la sociologie des organisations, Paris, Seuil, 2007 (3ème édition augmentée).  
Ballé C., La sociologie des organisations, 4  
Bidet, A., Borzeix, A. Pillon, T., Rot, G. et F. Vatin (coordinateurs) (2006). Sociologie du travail et activité, Toulouse : Octarès Editions, 2006.  
Chamayou G. La société ingouvernable. Une généalogie du libéralisme autoritaire, Paris, La Fabrique, 2018  
Crozier M., Le phénomène bureaucratique, Paris, Seuil, 1963  
Crozier M., Friedberg E., L'acteur et le système, Paris, Seuil, 1977.  
Graeber, D. Bureaucratie. L'utopie des règles, Paris, Les Liens qui libèrent, 2015,  
Hely, M., Moulevrier, P., L'économie sociale et solidaire, de l'utopie aux pratiques, Paris, La Dispute, 2013.  
Linhart, R. L'établi, Paris, Editions de minuit, 1978.  
Seris, J.-P., Qu'est-ce que la division du travail, Paris, Vrin, 1994.  
Stroobants, M., Sociologie du travail, Paris, Amand Colin, 2010 (3ème édition).  
Terkel S., Working, Histoires orales du travail aux Etats-Unis, Paris, Editions Amsterdam, 2005 (1st Edition 1972, 1974)  
Weber M., L'Éthique protestante et l'esprit du capitalisme, Paris, Plon, 1964.  
Weber M., Économie et Société, Paris, Plon, 1971  
Weber M., La domination, Paris, La Découverte, coll. « Politique & sociétés », 2013, édition critique française établie par Yves Sintomer, traduction française par Isabelle Kalinowski

## Moyens

- Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : Cynthia Colmellere (Gif), Natacha Chetcuti Osorovitz (Rennes et Metz)
- Taille des TD (par défaut 35 élèves) : 40
- Outils logiciels et nombre de licence nécessaire : sans objet
- Salles de TP (département et capacité d'accueil) : sans objet

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Acquérir des méthodes et pratiques de raisonnement pour expliquer les comportements en référence à des intérêts, des stratégies, des valeurs, des expériences
- Acquérir une façon d'analyser les problèmes dans les organisations qui met à distance les explications limitées à la personnalité ou aux caractéristiques psychologiques individuelles.
- Comprendre les échecs et les réussites dans des démarches de changement dans les organisations.
- Appréhender la complexité systémique dans les organisations (entreprises, institutions, administrations) en prenant en compte les dimensions humaines et sociales et le contexte.
- Comprendre la force des logiques d'acteurs au niveau individuel et au niveau collectif

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- savoir analyser les situations courantes dans les organisations qui met à distance les explications limitées à la personnalité ou aux caractéristiques psychologiques individuelles.
- savoir analyser les échecs et les réussites dans des démarches de changement dans les organisations.

# 2SL5007 – Ateliers Pratiques Ingénieur - API - 2A

Responsables : **Christophe Laux**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT DÉVELOPPEMENT PROFESSIONNEL ET MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Cours hors séquence**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ, CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **18,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce module s'inscrit dans la suite du cours 1SL5005. Il vise à ancrer les compétences abordées dans les ateliers de première année et à en aborder de nouvelles, de façon à couvrir les bases des compétences attendues d'un ingénieur CentraleSupélec : travail en équipe, gestion de projet, communication, approche de problèmes complexes, créativité, leadership, éthique, aisance dans un environnement multiculturel.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5, SG6, ST7 et SG8

## Prérequis

Semestre 7 : suivre un projet de S7

Semestre 8 : suivre un projet de S8.

## Plan détaillé du cours (contenu)

Compétences-clés de l'ingénieur :

- travail en équipe : s'organiser, décider, animer en équipe; différents rôles des membres de l'équipe; influence de la personnalité sur la performance de l'équipe
- communication orale : augmenter son impact en communication orale, prendre la parole en public, structurer une synthèse, construire une présentation
- approche de la résolution de problèmes complexes : savoir bien les poser, gérer l'incertitude, robustesse des hypothèses, ordres de grandeur
- créativité : méthodes de créativité de groupe
- leadership et connaissance de soi
- multiculturel : s'ouvrir aux autres, savoir s'adapter à un environnement différent
- éthique : agir avec éthique, comprendre les conséquences de ses choix

API 8 : Coaching projet

API 9 : Journée Transition Energétique

API 10 : Leadership

API 11 : Ethique

API 12 : Coaching projet à la carte

API 13 : Coaching projet à la carte

## Déroulement, organisation du cours

- Etudes de cas en équipe

- Mises en situation
- Forte participation des élèves demandée
- Mise en oeuvre des apports sur un projet réel
- Travail inter ateliers et notes de bilan

## Organisation de l'évaluation

La présence aux ateliers est obligatoire car toute absence pénalise l'apprentissage de l'élève et handicape le groupe.

La participation de chaque élève durant les ateliers est évaluée car c'est une condition nécessaire à l'apprentissage des compétences.

Les travaux, individuels ou en équipe, demandés pendant les ateliers ou entre les ateliers sont évalués. Le respect des délais intervient dans l'évaluation.

Les travaux en équipe donnent lieu à une évaluation collective pour l'équipe (sauf cas flagrant de retrait de l'équipe).

Les notes de bilan semestrielles sont évaluées sur la base de leur remise dans le délai prévu et de leur qualité de réflexion personnelle, sans jugement sur les avis exprimés dès lors qu'ils sont argumentés.

Les éventuels mini-quizz en début d'atelier, portant sur les apports des ateliers précédents, seront évalués.

La note de chaque semestre sera basée sur :

- Productions lors des cas pratiques en équipe
- Travaux inter-ateliers (TIA) : travail effectué, qualité du travail, sérieux des bilans de synthèse
- Qualité de participation en atelier
- Résultat de l'éventuel mini-quizz

Une absence injustifiée (ABI) conduit à une pénalité de 2 points par demi-journée d'absence. La pénalité est ramenée à 1 point si l'étudiant participe à la session de rattrapage.

La consolidation semestrielle de ces travaux se traduit en validation de jalon des compétences concernées.

## Moyens

Ateliers de 30 à 40 élèves, animés par deux enseignants

Travail sur cas pratiques d'ingénieur

Mises en situation

Echanges en groupes et avec des intervenants extérieurs

Conférences

Analyses de films et vidéos

Un lien étroit avec le projet de deuxième année permet d'appuyer les apports théoriques sur les expériences concrètes des élèves en projet

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève aura assimilé les bases de:

- travail en équipe
- communication scientifique orale, pour convaincre
- résolution de problèmes complexes
- techniques de créativité
- leadership
- évolution en milieu multiculturel
- action éthique

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

A la fin du cours, l'élève aura poursuivi sa progression dans les compétences suivantes :

- être proactif, prendre des initiatives, proposer des solutions nouvelles (C3)
- penser client et savoir identifier la valeur apportée (C4)
- familiarisation avec l'interculturel (C5)
- savoir convaincre (C7)
- mener un projet et travailler en équipe (C8)
- penser et agir de façon éthique (C9)

# 2SL7007 – Ateliers Pratique Professionnelle - APP - 2A

Responsables : **Christophe Laux**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT DÉVELOPPEMENT PROFESSIONNEL ET MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Cours hors séquence**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE METZ, CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **20**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **0,00**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours vise à poursuivre l'accompagnement des étudiants dans la découverte du métier d'ingénieur et dans la construction de leur projet professionnel

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5, SG6, ST7, et SG8

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

Ce cours comprend :

- un atelier de 3h pour partager les retours d'expérience sur les stages d'exécution et pour apprendre à construire son CV, une lettre de motivation ou un pitch
- un atelier de 1h30 pour s'entraîner aux entretiens de recrutement (stage, césure, ...)
- deux entretiens individuels avec un des enseignants-accompagnateurs
- deux table -rondes métier

## Déroulement, organisation du cours

- travail en groupe
- partage d'expériences
- entretiens individuels
- notes de synthèses ou de prise de recul individuelles
- échange avec des représentants d'entreprises

## Organisation de l'évaluation

La présence active aux ateliers et aux entretiens individuels est obligatoire.  
Au global, le cours est évalué en "pass or fail".

Pour valider les APP de chaque semestre, les conditions suivantes devront être toutes respectées :

- Être présent aux ateliers en collectif (Retour expérience stage exécution, et projet professionnel)
- Avoir préparé et effectué l'entretien individuel de chaque semestre
- Avoir suivi 2 tables rondes métiers (TRM).

Un rapport final sur le projet professionnel pourra être demandé.



## **Support de cours, bibliographie**

Documents fournis sur Edunao

## **Moyens**

Ateliers de 30 à 40 élèves, guidés par deux enseignants-accompagnateurs

# 2SL8000 – Projet S7

Responsables : **Laurent Bourgois**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT DÉVELOPPEMENT PROFESSIONNEL ET MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS, FRANCAIS**

Type de cours : **Cours hors séquence**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **90**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **48,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Un projet est une modalité de travail collective utilisée pour appréhender des problèmes complexes ouverts. Son efficacité dépend des compétences individuelles de chacun et des pratiques de fonctionnement de l'équipe ; l'objectif étant d'aboutir à un produit final pour un commanditaire, en un temps donné. Les projets proposés dans la formation ingénieur permettent l'apprentissage de cette modalité par des mises en situation de plus en plus complexes. L'objectif de cette activité est de mettre en oeuvre collectivement les différentes étapes d'un projet, depuis la définition du besoin jusqu'à la restitution du produit, pour aboutir à un livrable à destination d'un client. Les projets doivent conduire à une réalisation ambitieuse, que l'on ne pourrait pas atteindre en refaisant ce que l'on sait déjà faire.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5 et SG6

## Prérequis

Gestion de projets, Ateliers API.

## Plan détaillé du cours (contenu)

Les projets s'étendent sur deux séquences (ST5 et SG6). Ils suivent les phases habituelles d'un projet :

- Définir et cadrer le projet.
- Structurer les actions.
- Définir les rôles et les responsabilités.
- Mesurer les avancements et reboucler les actions.
- Monter en compétences techniques et organisationnelles.
- Communiquer ses réalisations.
- Capitaliser sur l'expérience acquise.

## Déroulement, organisation du cours

L'avancement du projet s'accompagne d'interactions nombreuses et variées avec l'environnement du projet. Il repose sur des actions individuelles et collectives. On retrouvera :

- des temps collectifs à l'échelle du pôle pour la transmission de bonnes pratiques et de connaissances ;
- un travail personnel à définir au sein du groupe ;
- un travail collectif d'alignement et de pilotage du groupe projet.

Les encadrants suivront le projet régulièrement pour s'assurer qu'aucun blocage n'apparaisse et pour valider les démarches entreprises.

## Organisation de l'évaluation

L'évaluation porte sur la participation continue en cours d'année, la qualité du rapport écrit et les présentations orales réalisées au cours du projet. Ces contributions seront regardées sous quatre angles différents : l'implication, le contenu et les livrables, la communication, et le fonctionnement de l'équipe en mode projet. Un projet validé implique que l'étudiant ait validé au moins 2 compétences sur 3 parmi l'ensemble {C4, C7, C8}.

## Moyens

Les projets sont menés par groupes de 5 étudiants. Chaque projet est rattaché à un pôle où sont rassemblés les projets de même nature. Les pôles mettent à disposition des ressources d'encadrement et des moyens logiciels et matériels. Sauf exceptions, les élèves restent affectés dans le pôle projets dans lequel ils étaient au semestre S6. Ils pourront continuer de travailler sur le même sujet ou démarrer un nouveau projet en accord avec les responsables du pôle. Il n'y a donc pas de campagne d'affectation en ligne. Les étudiants qui n'étaient pas rattachés à un pôle projets au semestre S6 peuvent demander à rejoindre un pôle. Ils pourront compléter des équipes déjà existantes ou initier un nouveau projet.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable :

- d'interagir avec un client à distance et en présentiel (discussion téléphonique, échange de messages électroniques, présentation orale, conduite de réunion d'avancement, etc.) ;
- d'identifier la valeur de son travail dans la résolution d'un problème complexe ;
- d'organiser une équipe pour produire une solution originale et de valeur ;
- de prévoir les conséquences humaines, sociales et environnementales de ses actions, et de déterminer le champs de ses responsabilités ;
- de présenter un travail scientifique à l'écrit et à l'oral (en particulier, la bonne gestion des ressources bibliographiques et une communication claire et rigoureuse des réalisations) ;
- de produire un livrable à grande valeur ajoutée en lien avec des parties prenantes variées.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

De manière générale, un projet abouti est un projet où les élèves ont :

- bien posé le problème et apporté des solutions qui créent de la valeur (il y a un avant et un après projet pour le client) ;
- apporté un minimum d'innovation ou de créativité pour répondre au problème de façon novatrice ;
- su fonctionner en équipe et manager le projet avec des ressources ;
- su convaincre dans leur communication orale ou écrite ;
- été capables de prendre du recul sur les aspects éthiques.

Nous retrouvons donc tout au long du projet les compétences :

- C3 : Agir, entreprendre, innover en environnement scientifique et technologique.
- C4 : Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients.
- C7 : Savoir convaincre.
- C8 : Mener un projet, une équipe.
- C9 : Penser et agir en ingénieur éthique, responsable et intègre en prenant en compte les dimensions environnementales, sociales et sociétales.

Selon la nature du projet, les compétences C1, C2, C5 et/ou C6 pourront également être ciblées.

# 2SL8100 – Projet S8

Responsables : **Laurent Bourgois**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT DÉVELOPPEMENT PROFESSIONNEL ET MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS, ANGLAIS**

Type de cours : **Cours hors séquence**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ, CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **200**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **108,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Un projet est une modalité de travail collective utilisée pour appréhender des problèmes complexes ouverts. Son efficacité dépend des compétences individuelles de chacun et des pratiques de fonctionnement de l'équipe ; l'objectif étant d'aboutir à un produit final pour un commanditaire, en un temps donné. Les projets proposés dans la formation ingénieur permettent l'apprentissage de cette modalité par des mises en situation de plus en plus complexes. L'objectif de cette activité est de mettre en oeuvre collectivement les différentes étapes d'un projet, depuis la définition du besoin jusqu'à la restitution du produit, pour aboutir à un livrable à destination d'un client. Les projets doivent conduire à une réalisation ambitieuse, que l'on ne pourrait pas atteindre en refaisant ce que l'on sait déjà faire.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7 et SG8

## Prérequis

Gestion de projets, Ateliers API.

## Plan détaillé du cours (contenu)

Les projets s'étendent sur deux séquences (ST7 et SG8). Ils suivent les phases habituelles d'un projet :

- Définir et cadrer le projet.
- Structurer les actions.
- Définir les rôles et les responsabilités.
- Mesurer les avancements et reboucler les actions.
- Monter en compétences techniques et organisationnelles.
- Communiquer ses réalisations.
- Capitaliser sur l'expérience acquise.

## Déroulement, organisation du cours

L'avancement du projet s'accompagne d'interactions nombreuses et variées avec l'environnement du projet. Il repose sur des actions individuelles et collectives. On retrouvera :

- des temps collectifs à l'échelle du pôle pour la transmission de bonnes pratiques et de connaissances ;
- un travail personnel à définir au sein du groupe ;
- un travail collectif d'alignement et de pilotage du groupe projet.

Les encadrants suivront le projet régulièrement pour s'assurer qu'aucun blocage n'apparaisse et pour valider les démarches entreprises.

## Organisation de l'évaluation

L'évaluation porte sur la participation continue en cours d'année, la qualité du rapport écrit et les présentations orales réalisées au cours du projet. Ces contributions seront regardées sous quatre angles différents : l'implication, le contenu et les livrables, la communication, et le fonctionnement de l'équipe en mode projet. Un projet validé implique que l'étudiant ait validé au moins 2 compétences sur 3 parmi l'ensemble {C4, C7, C8}.

## Moyens

Les projets sont menés par groupes de 5 étudiants. Chaque projet est rattaché à un pôle où sont rassemblés les projets de même nature. Les pôles mettent à disposition des ressources d'encadrement et des moyens logiciels et matériels. En début d'année, les pôles sont présentés lors d'un forum. Les étudiants peuvent demander à rejoindre un pôle. Ils peuvent également proposer de mener un projet personnel avec une équipe constituée qui sera hébergé dans un pôle. Tous les étudiants participent à une campagne d'affectation en ligne. Les responsables de pôle aident à choisir les étudiants les plus motivés. Les élèves qui désirent rester dans le pôle dans lequel ils étaient au semestre S7 sont prioritaires mais devront tout de même passer par la campagne d'affectation.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable :

- d'interagir avec un client à distance et en présentiel (discussion téléphonique, échange de messages électroniques, présentation orale, conduite de réunion d'avancement, etc.) ;
- d'identifier la valeur de son travail dans la résolution d'un problème complexe ;
- d'organiser une équipe pour produire une solution originale et de valeur ;
- de prévoir les conséquences humaines, sociales et environnementales de ses actions, et de déterminer le champs de ses responsabilités ;
- de présenter un travail scientifique à l'écrit et à l'oral (en particulier, la bonne gestion des ressources bibliographiques et une communication claire et rigoureuse des réalisations) ;
- de produire un livrable à grande valeur ajoutée en lien avec des parties prenantes variées.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

De manière générale, un projet abouti est un projet où les élèves ont :

- bien posé le problème et apporté des solutions qui créent de la valeur (il y a un avant et un après projet pour le client) ;
- apporté un minimum d'innovation ou de créativité pour répondre au problème de façon novatrice ;
- su fonctionner en équipe et manager le projet avec des ressources ;
- su convaincre dans leur communication orale ou écrite ;
- été capables de prendre du recul sur les aspects éthiques.

Nous retrouvons donc tout au long du projet les compétences :

- C3 : Agir, entreprendre, innover en environnement scientifique et technologique.
- C4 : Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients.
- C7 : Savoir convaincre.
- C8 : Mener un projet, une équipe.
- C9 : Penser et agir en ingénieur éthique, responsable et intègre en prenant en compte les dimensions environnementales, sociales et sociétales.

Selon la nature du projet, les compétences C1, C2, C5 et/ou C6 pourront également être ciblées.

# 2SL9000 – Sport

Responsables : **Stéphane Blondel**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT EDUCATION PHYSIQUE ET SPORTIVE**

Langues d'enseignement :

Type de cours : **Cours hors séquence**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **30**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **48,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Contribuer, par la pratique des activités physiques sportives et d'expression (APSA), à la formation du futur **cadre citoyen**.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

S7 et S8

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

Spécifique à chaque APSA

## Déroulement, organisation du cours

Situation à résolution de problèmes,

## Organisation de l'évaluation

Contrôle en cours de formation Auto-évaluation

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Gérer le couple risque/sécurité

- Intégrer une démarche « éco citoyenne »
- Utiliser une méthodologie de projet collectif.
- Prendre des responsabilités au sein d'un groupe, d'une équipe, d'une association.
- Etre capable de communiquer, être à l'écoute.
- Faire preuve d'innovation et de créativité
- Entrer dans une logique de développement personnel
- Se former tout au long de sa vie

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

1-

Distinguer les situations à risque perçu (subjectif) des situations à risque réel (objectif) pour soi et autrui (C3-4, C9-1, C9-2, C9-3, C9-4)

Maîtriser des attitudes permettant d'assurer la sécurité individuelle et collective (C3-4, C9-1, C9-2, C9-3, C9-4)

Gérer ses émotions en situation d'opposition, de compétition, de représentation ou d'incertitude (C3-4, C7-3, C9-1, C9-2, C9-3, C9-4)

2-

Agir dans le respect de soi et des autres – prendre en compte les différences (handicap, cultures...) (C3-4, C3-7, C5-2, C7-2, C7-3, C9-1, C9-2, C9-3, C9-4)

Agir dans le respect de l'environnement, des lieux de pratique et du matériel (C3-4, C7-3, C9-1, C9-2, C9-3, C9-4)

Faire preuve d'empathie, d'altruisme (C3-4, C7-3, C9-1, C9-2, C9-3, C9-4)

3-

Définir des objectifs communs atteignables (C8-1, C8-2, C8-3, C8-4)

Définir et répartir les rôles au sein du groupe (C3-2, C7-2, C7-3, C8-1, C8-2, C8-3, C8-4)

Prendre et accepter des décisions (C3-2, C8-1, C8-2, C8-3, C8-4)

Réguler et assurer le suivi d'un projet collectif (C3-2, C8-1, C8-2, C8-3, C8-4)

4-

Accepter les rôles et assumer les responsabilités liées aux missions (y compris financières) (C8-1, C8-2, C8-3, C8-4)

Utiliser des leviers de motivation d'une équipe, d'un individu (C8-1, C8-2, C8-3, C8-4)

Former ses pairs (C8-1, C8-2, C8-3, C8-4)

5-

Adapter sa communication au groupe, à l'individu, aux non spécialistes... (C8-1, C8-2, C8-3, C8-4)

Utiliser la communication verbale et non verbale (C8-1, C8-2, C8-3, C8-4)

Gérer les conflits (C8-1, C8-2, C8-3, C8-4)

Faire un usage approprié des TIC (technologie de l'information et de la communication) (C8-1, C8-2, C8-3, C8-4)

6-

Imaginer des solutions originales (C3-1, C3-4, C3-7, C8-2)

Oser sortir de sa zone de confort (C3-1, C3-4, C3-7, C8-2)

S'engager dans un processus de création (C3-1, C3-4, C3-7, C8-2, C8-3)

7-

Adapter son échauffement et son entraînement à son profil (C2-2, C2-3, C9-1)

Connaître ses points forts et ses points faibles (C2-2, C2-3, C9-1)

8-

Se remettre en question pour évoluer dans ses pratiques (C2-2, C2-3, C9-1)

Planifier sa pratique en vue d'un objectif (C2-2, C2-3, C9-1)

# COURS DE SCIENCES POUR L'INGENIEUR



# 2EL0010 – Teaching assistant

Responsables : **Mehdi Ayouz, Philippe Bouafia**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MATHÉMATIQUES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS, ANGLAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Teaching Assistant Physique: ce cours consiste à donner des cours de renforcement et de soutien aux élèves de 1ère année dans le cadre de leur cours de Physique Quantique et Statistique de première année. Il représente donc une formidable opportunité de s'initier à la pédagogie en vue d'une potentielle carrière d'enseignant ou bien pour postuler à d'éventuelles positions de Teaching Assistant dans de fameuses universités nord-américaines. L'objectif est donc que vous appreniez à (i) transmettre vos connaissances et compréhension à un public encore non-expert, et (ii) accompagner un élève dans sa progression vers un objectif de validation de connaissance et compréhension du cours de Physique Quantique et Statistique.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6 et SG8

## Prérequis

Bon niveau en physique quantique et statistique ainsi qu'en mathématiques (CIP et EDP)

## Plan détaillé du cours (contenu)

Teaching Assistant de Physique: un cours introductif donnera les éléments nécessaires à la construction des objectifs pédagogique, à la construction de qcms et aux notions de scénarisation et d'alignement pédagogique. Cependant, la majorité de ce cours est du type do-it yourself. Vous serez réparti en binôme en charge d'un groupe d'une quinzaine d'étudiants de première année présentant de potentielles difficultés car provenant de parcours non-classiques. Il y aura neuf séances de 1h30, chaque séance se focalisant sur un chapitre du cours de Mécanique Quantique et Statistique. Pour chaque séance, un binôme dispensera le TD de renforcement élaboré à cet effet. Le binôme participera la remise à niveau du TD à partir des retours d'expériences des années précédentes en définissant des objectifs d'apprentissage pédagogique. Il réalisera également un qcm testant les objectifs pédagogiques fixés. La séance de 1h30 sera, pour chaque binôme, consacrée à la correction des TD de renforcement avec leur groupe attiré. Il leur sera demandé de se focaliser sur les points de difficultés rencontrés pour aider à la progression des élèves de 1ère année.

## Déroulement, organisation du cours

Teaching assistant de Physique: Cours introductif et mise en situation (binôme assurant 9 classes de 1h30 avec un effectif de 15 élèves de première année, remise à niveau des TD existants, conception de qcm).

Teaching Assistant en Mathématiques: Des binômes ou trinômes de Teaching Assistant encadreront tout au long de l'année une dizaine d'étudiants de première année et auront un professeur référent pour les guider dans cette

activité. Chaque séance de Modalité Renforcée sera précédé d'un briefing avec le professeur référent, les TA proposeront leur plan pour la séance dans une fiche synthétique, et un debriefing aura lieu après la séance.

Attention: il n'est pas possible d'être Teaching Assistant en Physique ET en Maths, mais seulement dans l'un ou dans l'autre.

## Organisation de l'évaluation

Teaching assistant de Physique: vous serez évalué en binôme sur votre contribution au TD, qcm construit et sur l'animation d'une séance de cours.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Teaching Assistant Physique: à la fin de ce cours, les élèves sauront (1) mettre en place une grille d'objectifs pédagogiques, (2) créer une évaluation de type qcm adaptée aux objectifs d'apprentissage pédagogiques, (3) scénariser et animer une séance en face d'une classe d'une quinzaine d'élèves, et (4) utiliser des outils numériques (notamment la plateforme d'enseignement : <http://prd-mecaqu.centralesupelec.fr/>) permettant à l'élève-utilisateur de réaliser ses proposer expérimentations numériques afin de mieux se représenter les concepts de la mécanique quantique. Des compétences de pédagogie et d'encadrement et de savoir convaincre sont aussi des acquis visés par cet enseignement (C5.1, C7.2, C7.3 et C7.4).

Teaching Assistant en Mathématiques: Compétences de pédagogie, d'encadrement et de savoir convaincre (C5.1, C7.2, C7.3 et C7.4)

# 2EL1110 – Systèmes dynamiques en neuroscience

Responsables : **Antoine Chaillet**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT AUTOMATIQUE**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Cet électif constitue une introduction aux outils permettant d'analyser les processus dynamiques impliqués dans le fonctionnement du cerveau. Malgré leur immense complexité, les fonctions cérébrales se basent en effet sur des processus dynamiques élémentaires dont certains peuvent être appréhendés par des outils mathématiques. La maîtrise de ces processus est indispensable pour avancer dans notre compréhension du fonctionnement du cerveau, pour optimiser les instruments de mesure de l'activité cérébrale (imagerie médicale, signaux électrophysiologiques, ...), pour développer des interfaces cerveau-machine, pour mettre au point des architectures de calcul neuro-inspirées, et pour comprendre les mécanismes impliqués dans certaines maladies neurologiques et ainsi progresser dans leur traitement.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

- SG1 : Systèmes d'information et programmation
- SG1-ST2-SG3 : Convergence, Intégration, Probabilités, Equations aux dérivées partielles
- ST2 : Modélisation
- ST4 : Traitement du signal
- ST5 : Commande des systèmes dynamiques

## Plan détaillé du cours (contenu)

Chapitre 1 : Bases physiologiques et fonctions cérébrales (CM : 4.5h)

Ce premier chapitre présente les bases physiologiques de l'activité neuronale. Il décrit les principes élémentaires impliqués dans la génération d'un potentiel d'action et la communication entre neurones (soma, axone, dendrite, synapse, canaux ioniques, potentiel de repos), ainsi que la plasticité cérébrale et les mécanismes de régulation homéostatique. Il décrit les principes physiques et biologiques qui sous-tendent ces comportements. Il aborde enfin les principales fonctions cérébrales (mémoire, systèmes moteurs, olfactifs et visuels) et leur altération en conditions pathologiques, notamment au travers de l'étude des oscillations cérébrales.

Chapitre 2 : Mesure et actionnement de l'activité cérébrale (CM : 3h)

Ce deuxième chapitre traite des différentes techniques de mesure de l'activité cérébrale, notamment les techniques électrophysiologiques (patch-clamp, enregistrement multi-unités, LFP, EEG, MEG) et l'imagerie (IRM, 2-photons). Il explique la nature des signaux mesurés et en compare les résolutions spatiales et temporelles. Il décrit également les différentes techniques utilisées pour influencer l'activité cérébrale, notamment au travers de la stimulation électrique et de l'optogénétique.

### Chapitre 3 : Interfaces cerveau-machine (CM : 4.5h)

Ce sixième chapitre aborde le développement d'interfaces cerveau-machine, aussi appelées neuroprothèses. Ces dispositifs sont conçus pour restaurer l'autonomie de patients amputés ou tétraplégiques. Leur mise en place chez l'animal et l'humain nous renseigne en parallèle sur le fonctionnement et l'apprentissage dans les boucles sensorimotrices naturelles. Le chapitre détaille les différentes composantes de ces interfaces : enregistrement de l'activité neuronale invasive (ECoG, électrophysiologie corticale) ou non (EEG), traitement des signaux et algorithmes de commande motrice, retour sensoriel de la neuroprothèse vers le cerveau. Il évoque également la mise en jeu de mécanismes de plasticité cérébrale, notamment au niveau cortical, sur lesquels le développement d'interfaces peut s'appuyer pour optimiser l'apprentissage.

### Chapitre 4 : Modèles mathématiques de neurones (CM : 3h)

Ce chapitre présente les modèles de neurones les plus utilisés. Il introduit les modèles à conductances au travers du célèbre modèle de Hodgkin-Huxley, et souligne son analogie électronique. Il aborde ensuite des modèles simplifiés tels que les modèles integrate & fire ou FitzHug-Nagumo, ainsi qu'une modélisation simple de la synapse et des mécanismes de plasticité neuronale. La simulation numérique de ces modèles est également abordée.

### Chapitre 5 : Analyse des modèles neuronaux (CM : 4.5h, TP : 3h)

Ce chapitre présente des outils mathématiques utilisés dans l'analyse du comportement neuronal. Il présente pour cela la notion de diagramme de phase et de bifurcations. Ces notions sont d'abord présentées pour des modèles unidimensionnels, puis sur des modèles bidimensionnels. Le chapitre établit un lien entre ces bifurcations et le comportement qualitatif du neurone. Un TP sur Matlab-Simulink vise à implanter un modèle de neurones à conductance et à prédire son comportement par les outils théoriques présentés.

### Chapitre 6 : Populations neuronales (CM : 1.5h, TP : 3h)

Ce cinquième chapitre s'intéresse à la dynamique d'un ensemble de neurones ou d'une structure cérébrale. Il présente des modèles simplifiés de l'activité d'une population neuronale tels que le modèle de Wilson-Cowan ou les champs neuronaux. Il montre comment prédire le comportement de tels modèles par une analyse de stabilité ou de bifurcations. Lors d'un TP sur Matlab-Simulink, les élèves étudieront le phénomène de rivalité binoculaire au travers d'un modèle simple de populations neuronales.

### Conférence : Exemple de création de start-up (1.5h)

Une conférence du co-fondateur et responsable scientifique de la société Rythm conclut ce cours en présentant des innovations industrielles récentes (mesures non-invasives de l'activité cérébrale, reconnaissance de motifs dans les signaux électrophysiologiques) ainsi que les opportunités que représentent les neurosciences pour l'industrie et l'entrepreneuriat.

## Déroulement, organisation du cours

CM, TD, TP, travail hors présentiel.

## Organisation de l'évaluation

L'évaluation est faite sur la base d'un examen écrit sans documents (2h) en fin de cours et sur les rapports des deux TP. La pondération envisagée est : 60% sur l'examen écrite et 20% sur chaque TP. Toute absence non justifiée en TP conduira à un zéro à la note de TP. Les compétences seront évaluées au travers des rapports de TP et de l'examen écrit. Les compétences C1.2 et C1.3 seront approfondies lors des séances de TP.

## Support de cours, bibliographie

- Dynamical Systems in Neuroscience: The Geometry of Excitability and Bursting, Eugene M. Izhikevich, The MIT Press, 2007
- Nonlinear dynamics and Chaos, by Steven Strogatz, Westview Press, 2001
- Mathematical Foundations of Neuroscience, by G. Bard Ermentrout & D. Terman, Springer, 2010
- Theoretical neuroscience, by P. Dayan & L.F. Abbott, The MIT Press, 2005

## Moyens

Une équipe enseignante pluri-disciplinaire incluant des chercheurs en neurosciences computationnelles, un neurochirurgien, un enseignant-chercheur en Automatique et un créateur d'entreprise.

Les TP seront effectués sur des postes disposant de Matlab-Simulink.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce cours, les élèves auront acquis les bases de neurosciences nécessaires à une interaction avec des professionnels du domaine (neurochirurgiens, experts en neurosciences computationnelles, expérimentateurs). Ils maîtriseront de plus des outils mathématiques permettant de modéliser l'activité d'un neurone ou d'une population neuronale, et de prédire leur comportement dynamique à la fois analytiquement et numériquement. Ils auront en outre été sensibilisés aux opportunités que constituent les neurosciences en termes de recherche, de développement médical ou industriel, et d'entrepreneuriat.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de:

- Maîtriser les bases de neurosciences nécessaires à une interaction avec des professionnels du domaine (neurochirurgiens, experts en neurosciences computationnelles, expérimentateurs)
- Modéliser l'activité d'un neurone ou d'une population neuronale
- Prédire leur comportement dynamique à la fois analytiquement et numériquement.

Ce cours est donc l'occasion pour les étudiants d'approfondir leurs compétences suivantes:

- C1.2: "Utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes pour traiter le problème": Jalon 3
- C1.3: "Résoudre le problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation": Jalon 2A
- C1.5: "Mobiliser un large socle scientifique et technique dans le cadre d'une approche transdisciplinaire"
- C2.2: "Transposer à d'autres champs disciplinaires, généraliser des connaissances"
- C2.3: "Identifier et acquérir rapidement des nouvelles connaissances et compétences nécessaires dans les domaines pertinents, qu'ils soient techniques, économiques ou autres".

# 2EL1120 – Systèmes Robotiques Interactifs

Responsables : **Maria Makarova**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT AUTOMATIQUE**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Le paysage de la robotique industrielle et de service évolue aujourd'hui rapidement avec le développement de **robots collaboratifs conçus pour interagir physiquement avec l'homme**, et à partager un même espace de travail voire une même tâche. Les robots collaboratifs ouvrent de nombreuses perspectives tant dans le contexte de **l'usine du futur** que dans le domaine de **l'assistance à la personne**. L'interaction homme-robot se situe aujourd'hui au cœur des préoccupations de la robotique et nécessite une approche **pluridisciplinaire** pour concevoir des systèmes sûrs et performants à la pointe de la technologie.

Les thématiques abordées dans ce cours permettent de comprendre les enjeux de la robotique interactive et les aspects scientifiques et techniques associés à ces **systèmes complexes en interaction avec l'homme ou leur environnement**. Ce cours a pour objectif de présenter le contexte, les outils méthodologiques fondamentaux ainsi que les thématiques actuelles liés aux manipulateurs robotiques et leur interaction avec l'homme.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

- Commande des systèmes dynamiques (ST5)
- Connaissances de base de mécanique des corps rigides à acquérir si besoin en autoformation

## Plan détaillé du cours (contenu)

Introduction, bref historique, contexte industriel et scientifique

- Bases de la modélisation en robotique (géométrique, cinématique)
  - Modélisation dynamique et commande
  - Téléopération à retour d'effort
  - Robotique collaborative
  - Introduction à ROS (Robot Operating Software)
-

## Déroulement, organisation du cours

Les cours magistraux illustrés par des exemples seront alternés avec des séances de TD/TP sur ordinateur (en binôme/trinôme) pour mettre en pratique les notions présentées sur un cas d'étude représentatif. Les séances de TD/TP en présentiel pourront nécessiter un travail personnel préparatoire hors classe.

- **TD/TP#1 et TD/TP#2** : illustration des concepts de modélisation robotique sous Matlab/Simulink ou python
- **TD/TP#3 (travail personnel)** : introduction à ROS (Robot Operating Software) et application aux manipulateurs robotiques

### Répartition horaire :

- Cours : 22,5h
- TD/TP sur ordinateurs : 6h
- Évaluation finale (quizz) : 2h

## Organisation de l'évaluation

- TD/TP #1 & #2 : Compte-rendu écrit de TD/TP et code fonctionnel commenté [50% de la note finale];
- Évaluation finale : Quizz écrit avec documents (2h) [50% de la note finale].
- Présence contrôlée en TD/TP, pouvant donner lieu à pénalité sur la note de compte-rendu. Une absence non justifiée en séance de TD/TP entraîne la note zéro à la séance concernée.

## Support de cours, bibliographie

- **Supports de cours** : Recueil des transparents utilisés en cours
- **Bibliographie** : W. Khalil, E. Dombre, "Modeling, Identification and Control of Robots", Butterworth-Heinemann, 2004.

## Moyens

- **Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux)** : Mathieu Grossard (CEA LIST Laboratoire de Robotique Interactive), Franck Geffard (CEA LIST Laboratoire de Robotique Interactive), Xavier Lamy (CEA LIST Laboratoire de Robotique Interactive), Alex Caldas (ESME Sudria)
- **Taille des TD** : groupes de 18 élèves maximum
- **Outils logiciels** et nombre de licence nécessaire :
  - Matlab/Simulink, licence campus (illimitée)
  - python (gratuit)
  - ROS (gratuit ; fourniture d'une machine virtuelle sous Ubuntu avec ROS installé)

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de :

1. Décrire le contexte actuel (à travers les principaux enjeux techniques, applicatifs et économiques associés) de la robotique interactive vue comme un domaine pluridisciplinaire autour de l'interaction

- homme-robot et robot-environnement. Décrire les éléments matériels et logiciels principaux constituant un tel système robotique.
2. Établir les modèles géométrique, cinématique et dynamique d'un robot manipulateur.
  3. Choisir une structure de commande appropriée selon le type d'application robotique envisagée et en régler les paramètres de manière à répondre au compromis performance/robustesse.
  4. Modéliser un robot manipulateur en contact avec un humain ou avec un environnement passif ; déterminer les conditions de stabilité du système global asservi en conditions de téléopération ou de collaboration.
  5. Utiliser des outils logiciels (Matlab/Simulink ou python, ROS) pour construire et simuler des modèles de robots manipulateurs vus comme des systèmes dynamiques.
  6. Maîtriser la communication scientifique et technique (par l'intermédiaire du compte rendu de TD)

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Compétences évaluées : C1, C2, C6

- « Etablir les modèles géométrique, cinématique et dynamique d'un robot manipulateur » et « Modéliser un robot manipulateur en contact avec un humain ou avec un environnement passif » s'inscrivent dans **C1.2 "Utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes pour traiter le problème" – jalon 2**
- « Choisir une structure de commande appropriée selon le type d'application robotique envisagée et en régler les paramètres de manière à répondre au compromis performance/robustesse » et « déterminer les conditions de stabilité du système global asservi en conditions de téléopération ou de collaboration » s'inscrivent dans **C1.4 "Spécifier, concevoir, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe" – jalon 2**
- « Utiliser des outils logiciels pour construire et simuler des modèles de robots manipulateurs vus comme des systèmes dynamiques » s'inscrit dans **C6.1 "Résoudre numériquement un problème" ; et C1.3 "Résoudre le problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation" – jalon 2**
- **C2.1** Approfondir un domaine des sciences de l'ingénieur ou une discipline scientifique



# 2EL1130 – Systèmes dynamiques multi-agents. Application au vol en formation de drones

Responsables : **Cristina-Nicoleta Maniu**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT AUTOMATIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Nombreuses sont les applications qui font intervenir une formation de plusieurs systèmes autonomes, capables de coopérer dans un environnement précis et de se reconfigurer pour la réussite de la mission. Notamment, le vol en formation (drones, satellites, etc.), la fluidité de la circulation automobile ou le comportement des piétons dans une foule permettent de mettre en avant la notion de système dynamique multi-agents.

Dans le cadre de missions de sauvetage (extinction de feux à large échelle, recherche de victimes suite à des avalanches ou de boîtes noires dans un vaste environnement, etc.), la coordination et la commande d'une flotte de véhicules autonomes deviennent un élément clé de la réussite. Ces missions multi-agents posent des questions de répartition des tâches entre les agents, de planification de trajectoire, et induisent des problématiques de commande en temps réel sous contraintes etc. Les thématiques abordées dans ce cours permettront aux étudiants de comprendre les concepts et les défis liés aux systèmes dynamiques multi-agents à partir d'une application sur une formation de drones.

Des expérimentations dans la volière de CentraleSupélec sur des nano-drones Crazyflie, des mini-drones DJI RoboMaster TT, sur des robots terrestres TurtleBot et DJI RobotMaster S1, ainsi qu'à distance sur la plateforme Robotarium sont prévues dans le cadre de ce cours.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Commande des systèmes dynamiques (ST5)

## Plan détaillé du cours (contenu)

Ce cours s'appuie sur une **collaboration avec ONERA et le laboratoire Heudiasyc**.

Le plan proposé est le suivant :

- Introduction : bref historique, contexte industriel et académique ;
- Modélisation dynamique des systèmes multi-agents (MAS) ;

- Outils spécifiques MAS : notions de flotte / essaim et de formation, graphe de communication, consensus ;
- Modélisation et prise en main de drones et robots terrestres ;
- Structures de commande de systèmes multi-agents ;
- Prise en compte des contraintes dans la loi de commande coopérative ;
- Raffinement des lois de commande et analyse des résultats ;
- Ouverture vers les systèmes multi-agents dans les missions spatiales.

Une étude de cas tutoré est prévue en fil conducteur tout au long de ce module, permettant de tester à la fois en simulation et sur une flotte de drones et/ou de robots terrestres les concepts étudiés.

Des expérimentations sont prévues dans la volière de CentraleSupélec.

Voir expérimentations en 2022 : <https://twitter.com/centralesupelec/status/1535211296240685057>

## Déroulement, organisation du cours

Ce module est composé de séances type **cours interactif** alternées avec des **TD** et une **étude de cas** (*réalisée en équipe sur un sujet proposé par les étudiants*) qui servira de fil conducteur pendant toute la durée du module électif pour concrétiser l'implantation sur des drones et robots mobiles. L'étude de cas suivra la progression du cours, comme un complément permettant l'acquisition des compétences d'ordre pratique. Des méthodes de pédagogie active du type *Apprentissage par Problèmes (APP)* en petits groupes tutorés sont envisagées pendant les études de cas sur l'application à une formation de drones.

Les élèves découvriront les systèmes dynamiques multi-agents par une succession d'exemples, d'exercices de réflexion, de discussions et d'orientation théorique et pratique. Une estimation du volume horaire (30,5h en présentiel) est la suivante : 13,5h type cours interactif, 6h pour les TD, 9h pour l'étude de cas et 2h pour l'évaluation des posters interactifs.

## Organisation de l'évaluation

Les modalités d'évaluation ont été conçues afin de respecter l'alignement objectifs – activités – évaluations. Un rapport (contenant une étude bibliographique et une analyse des résultats obtenus pendant l'étude de cas) sera réalisé et noté. Les résultats obtenus seront présentés à l'aide d'un poster interactif devant un jury et avec un regard croisé des autres groupes (évaluation par les pairs). La note finale est calculée à partir de l'évaluation du **rapport (50%)** et l'évaluation du **poster interactif**, tant sur sa réalisation que sur sa présentation orale (**50%**). Une évaluation par compétences est également envisagée. Les **compétences C1, C2, C5, C7 et C8** seront évaluées.

## Support de cours, bibliographie

### Bibliographie

- MOOC « Drones et Robotique Aérienne » (DroMOOC), [www.onera.fr/dromoooc](http://www.onera.fr/dromoooc), Université Paris-Saclay, 2018.
- K.K. Oh, M.C. Park, H.S. Ahn, "A survey of multi-agent formation control", *Automatica*, vol. 53, pp. 424-440, 2015.
- J.A. Guerrero, P. Castillo, S. Salazar, R. Lozano, "Mini Rotorcraft Flight Formation Control Using Bounded Inputs", *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 65, pp. 175-186, 2012.
- J. Guerrero, R. Lozano, "*Flight Formation Control*", John Wiley & Sons, 2012.
- I. Prodan, "*Commande des systèmes dynamiques Multi-Agents en présence de contraintes*", thèse de doctorat, Supélec, 2012.
- M.T. Nguyen, "*Commande prédictive sous contraintes de sécurité pour des systèmes dynamiques Multi-Agents*", thèse de doctorat, Université Paris-Saclay, 2016.
- G. Rousseau, C. Stoica Maniu, S. Tebbani, M. Babel, N. Martin, "Quadcopter-performed cinematographic flight plans using minimum jerk trajectories and predictive camera control", *European Control Conference*, Limassol, Cyprus, 12-15 June 2018.

- Y. Rochefort, H. Piet-Lahanier, S. Bertrand, D. Beauvois, D. Dumur, "Model predictive control of cooperative vehicles using systematic search approach", *Control Engineering Practice*, vol. 32, pp. 204-217, 2014.
- N. Michel, S. Bertrand, G. Valmorbida, S. Olaru, D. Dumur. "Design and parameter tuning of a robust model predictive controller for UAVs", *IFAC World Congress*, Toulouse, France, 2017.
- Wilson, S., Glotfelter, P., Wang, L., Mayya, S., Notomista, G., Mote, M., & Egerstedt, M. The Robotarium: Globally Impactful Opportunities, Challenges, and Lessons Learned in Remote-Access, Distributed Control of Multirobot Systems. *IEEE Control Systems Magazine*, 40(1), 26-44, 2020.
- C. Stoica Maniu, C. Vlad, T. Chevet, S. Bertrand, A. Venturino, G. Rousseau, S. Olaru, "Control systems engineering made easy: motivating students through experimentation on UAVs", 21th IFAC World Congress, Demonstrator Late Breaking Results, Berlin, Germany, 12-17 July, 2020.

### Exemples de réalisations pratiques

- <https://www.youtube.com/watch?v=hyGJBV1xnJI>
- <https://www.youtube.com/watch?v=YQIMGV5vtd4>
- <https://www.youtube.com/watch?v=fdrmahUPwal>
- <http://www.asctec.de/en/uav-uas-drones-rpas-roav/asctec-hummingbird/>

## Moyens

**Equipe pédagogique** : Cristina Stoica, Cristina Vlad, Sorin Olaru

**Equipe enseignante** (liste provisoire) : Sylvain Bertrand (ONERA), Pedro Castillo (UTC Heudiasyc), Cristina Stoica, Cristina Vlad, Sorin Olaru.

Un **financement via le projet MEECOD – Moderniser l’Enseignement par l’Expérimentation sur la Coordination de Drones**, avec le soutien de l’UPSaclay, projet « *Initiatives Pédagogiques – Oser !* » 2018, N°FOR-2018-070, a été obtenu pour l’achat du matériel nécessaire pour ce cours (équipements volière CentraleSupélec, plusieurs drones Crazyflie et robots terrestres TurtleBot, etc.) et la contribution à la création de la volière de CentraleSupélec (salle VI.003, bâtiment Eiffel).

Un **financement via le projet DARETeach – Drone Arenas-based Remote International Teaching** de la *Fondation FACE – French-American Cultural Exchange in Education and the Arts* a permis de compléter la flotte de drones Crazyflie.

Un **financement via le projet (Re)CreativeRobot – (Re)Creative Mobile Robotics for Kids** de la *Fondation International Federation of Automatic Control* a permis de compléter la flotte de drones et de robots terrestres DJI.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l’issue de ce module, les élèves seront capables de :

- Décrire et reconnaître le comportement d’un système multi-agents en effectuant une étude bibliographique de travaux précédemment effectués sur le sujet ;
- Modéliser un système multi-agents en proposant une représentation d’état du système qui donnera lieu à la mise en place d’un simulateur ;
- Analyser et traduire un cahier des charges, ainsi que proposer une structure de loi de commande pour un système multi-agents, en suivant une démarche d’analyse à base d’un modèle de synthèse/simulation ;
- Synthétiser une loi de commande pour le système multi-agents et la valider en simulation, en complétant le simulateur ;
- Appliquer une loi de commande à un système multi-agents réel (une formation de drones, de véhicules terrestres) en suivant une démarche de prise en main des drones/véhicules autonomes, d’ajustement des algorithmes de commande développés et de validation expérimentale.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C1.2 – Modéliser : utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes
- C1.4 – Concevoir : spécifier, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe
- C2.3 – Identifier et acquérir de façon autonome les nouvelles connaissances et compétences nécessaires
- C5.3 – Analyser les enjeux globaux et/ou locaux à l'international et adapter des projets ou solutions à ceux-ci
- C7.1 – Savoir convaincre sur le fond : Structurer ses idées et son argumentation, être synthétique (hypothèses, objectifs, résultats attendus, démarche et valeur créée)
- C7.3 – Savoir convaincre sur soi : Être à l'aise et se montrer convaincu, manifester de l'empathie et gérer ses émotions
- C8.1 – Construire le collectif pour travailler en équipe
- C8.2 – Mobiliser et entraîner un collectif en faisant preuve de leadership

# 2EL1210 – Exposition des personnes à l'électromagnétisme et compatibilité électromagnétique

Responsables : **Dominique Lecoïnte**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT ÉLECTRONIQUE ET ÉLECTROMAGNÉTISME**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Non**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

La théorie de Maxwell est depuis plus d'un siècle source d'innovations et de progrès technologiques et il est remarquable de constater l'étendue des secteurs industriels impactés par les applications de cette théorie :

- le secteur des télécommunications au cœur de la société de l'information,
- le secteur aéronautique, automobile et des transports,
- le secteur de l'énergie électrique,
- le secteur de la défense et de la sécurité,
- le secteur de la santé et de l'environnement,
- le secteur du bâtiment et des travaux publics,
- le secteur de l'internet et des objets connectés.

Malheureusement, ces succès et progrès technologiques ne se font pas sans contrepartie. La pollution électromagnétique engendrée par tous ces systèmes électriques et électroniques est devenue un des enjeux sociétaux du 21<sup>ème</sup> siècle. Les victimes potentielles de cette pollution sont les systèmes électroniques (compatibilité électromagnétique) et les personnes (exposition). La maîtrise de cette pollution est l'objectif de la compatibilité électromagnétique et de l'exposition des personnes aux ondes électromagnétiques. L'ingénieur doit faire face à un enjeu scientifique mais aussi économique et sociétal pour répondre à ce défi.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

1. Présentation des enjeux
2. CEM : sources de perturbations
3. EXPO : sources de champs
4. TD CEM : sources et ordre grandeurs
5. CEM : couplage et protection
6. CEM : moyens d'essais, normes
7. EXPO : effets biologiques
8. EXPO : limites, indice

9. TD EXPO : émetteurs fixes
10. TD CEM : quantification des phénomènes de couplage
11. EXPO : retour d'expérience : création d'une entreprise dans le domaine de l'exposition des personnes
12. TD EXPO : téléphonie mobile
13. TD EXPO : fréquences intermédiaires

## Déroulement, organisation du cours

- 17 Cours et exercices
- 2 TD

## Organisation de l'évaluation

1 examen final sans document de 2h00.

## Support de cours, bibliographie

Planches présentées durant les cours  
Textes des TD

Compatibilité électromagnétique de P. Degauque et J. Hamelin, édition Dunod  
Exposition humaine aux champs électromagnétiques de P. Staebler, ISTE editions

## Moyens

- Équipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : Dominique Lecointe, Dominique Picard, Stéphane Pannetrat
- Taille des TD : 2 groupes de 20 élèves (au maximum)

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de :

- poser le problème CEM lors de la conception d'un système complexe.
- identifier, en fonction des bandes de fréquences, les phénomènes physiques mis en jeu.
- utiliser et mettre en œuvre les modèles adaptés (maîtrise des ordres de grandeur, prise en compte des contraintes économiques).
- faire preuve de rigueur et d'esprit critique pour analyser et résoudre les problèmes d'exposition des personnes.
- argumenter en se basant sur les réglementations nationale et internationale.

Ces différents acquis d'apprentissage permettent de valider les jalons 1 et 2 de la compétence C1, les jalons 1 et 2 de la compétence C2,

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Ces différents acquis d'apprentissage permettent de valider les jalons 1 et 2 de la compétence C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques.

Ces différents acquis d'apprentissage permettent de valider les jalons 1 et 2 de la compétence C2 : Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers.

# 2EL1230 – Systèmes spatiaux embarqués

Responsables : **Laurent Bourgois**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT ÉLECTRONIQUE ET ÉLECTROMAGNÉTISME**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Non**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Avoir une vision globale du monde spatial d'aujourd'hui et de ses enjeux stratégiques, et découvrir en détail les principes et technologies mis en œuvre dans la conception de systèmes spatiaux embarqués, un domaine où les défis se jouent tout autant à l'échelle du nanomètre qu'à l'échelle de l'année-lumière.

- Système de contrôle d'attitude et d'orbite.
- Propagation de pannes & fiabilité.
- Avionique & logiciel embarqué.
- Compression d'images & traitement de signal.
- Electronique numérique & codes correcteurs.

Une visite d'Airbus conclura le module et permettra de voir concrètement la conception et la fabrication d'équipements spatiaux chez Space Electronics.

Si vous avez trouvé le mot caché dans les cinq points listés précédemment, cet électif est fait pour vous. Sinon, cet électif vous apportera la réponse ainsi qu'à de nombreuses autres questions.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

Ce cours peut être abordé sans prérequis particulier pour un domaine. Tous les concepts techniques nécessaires seront expliqués pendant le module.

## Plan détaillé du cours (contenu)

Prêt pour un voyage dans l'espace ?

### Introduction aux systèmes spatiaux

Contexte historique et enjeux stratégiques de l'accès à l'espace. Marché du spatial.  
Les différents types de missions spatiales et le choix des orbites.

Défis et contraintes de l'environnement spatial.

### Le satellite

Description détaillée du fonctionnement et de l'architecture d'un satellite.  
Sous-systèmes. Focus sur le contrôle d'attitude et d'orbite.  
Capteurs, actuators, calculateur embarqué, propulsion.

### Logiciel embarqué

Les différents traitements bord.

Processeurs, mémoires et architectures utilisés.  
Focus sur la robustesse, la fiabilité, le temps réel et la validation.  
Intérêt du co-design hardware/software.

#### **Fiabilité - Validation des systèmes spatiaux**

Comment garantir la tenue de la mission.  
Types de redondances. Tolérance aux pannes : détection, décision, correction, reconfiguration, non propagation.  
Test et validation au sol des systèmes spatiaux.

#### **Équipements électroniques & traitement de signal**

Techniques de traitement de signal utilisées.  
Focus sur les algorithmes de compression d'image.  
Spécificités des systèmes électroniques spatiaux comparés aux équipements " terrestres ".  
Électronique numérique. Tendances autour des nouveaux composants (ASIC/FPGA).  
Focus sur le durcissement aux radiations. Codes correcteurs d'erreur.

#### **Visite d'un site industriel**

Airbus Defence and Space (Elancourt) : bureaux d'études, conception (engineering) et fabrication (salles blanches).

## **Déroulement, organisation du cours**

Cours magistraux réalisés par des intervenants de l'industrie, experts dans leur domaine et différents pour chaque module.  
Visite du site Airbus Defence and Space (Elancourt) sur une journée complète.

## **Organisation de l'évaluation**

Évaluation sous forme d'exposé oral sur un sujet autour du domaine spatial.

La pondération exposé oral et QCM sera la suivante : 24% pour les QCM et 76% pour l'exposé oral.

- un contrôle final (CF) sous forme d'exposé oral sur un sujet autour du domaine spatial :  $\alpha_f = 0,76$ .
- 8 quiz en début de séance qui constituent le contrôle continu (CC1, CC2, ... , CC8) :  $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_8 = 0,03$ .

## **Moyens**

Équipe enseignante composée d'un référent CentraleSupélec (Laurent Bourgois) et de plusieurs intervenants de l'industrie, experts dans leur domaine chez Airbus Defence and Space.

## **Acquis d'apprentissage visés dans le cours**

À l'issue de ce module, les élèves auront une connaissance globale des systèmes spatiaux et seront capables d'intervenir dans la conception de systèmes embarqués fonctionnant en environnement hostile. Ils comprendront pourquoi et comment faire face à des contraintes mécaniques, thermiques, radiatives et électromagnétiques. L'accent sera également mis sur la variété des activités relatives aux systèmes embarqués et sur les interfaces avec les métiers connexes : du silicium au système complet, du hardware au software, de la conception à la validation.

## **Description des compétences acquises à l'issue du cours**

- C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes.
- C2 : Développer ses compétences dans un domaine d'ingénieur et dans un métier.

Les compétences C1 et C2 sont validées si la note globale de l'électif est supérieure ou égale à 10/20.



# 2EL1240 – Systèmes de navigation et optroniques pour véhicules autonomes et satellites - Technologies temps réel

Responsables : **Dominique Lecoïnte**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT ÉLECTRONIQUE ET ÉLECTROMAGNÉTISME**

Langues d'enseignement :

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Non**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours est réalisé par une équipe d'ingénieurs de la société SAFRAN. Il s'adresse aux élèves qui s'intéressent à la navigation inertielle et optronique pour les véhicules autonomes, qu'ils soient terrestres, marins, aériens ou spatiaux. La navigation inertielle est une méthode de navigation qui utilise les mesures des accélérations et des rotations d'un véhicule pour déterminer sa position et son orientation dans l'espace. L'optronique, quant à elle, concerne l'utilisation de systèmes optiques pour la détection et la mesure de la lumière, qui peuvent être utilisés pour la reconnaissance d'objets, la détection de mouvement et la surveillance.

Le cours abordera les principes fondamentaux de la navigation inertielle et de l'optronique, ainsi que les technologies associées. Les élèves apprendront comment ces techniques sont utilisées dans les véhicules autonomes, tels que les voitures autonomes, les drones, les avions sans pilote, les sous-marins autonomes, etc., pour permettre la navigation et la surveillance autonome. Le cours couvrira également les défis liés à l'utilisation de la navigation inertielle et de l'optronique, tels que les perturbations atmosphériques, la gestion de l'énergie, les interférences électromagnétiques, etc.

Enfin, les élèves auront l'occasion de découvrir les dernières avancées dans ce domaine en matière de recherche et d'applications pratiques. En suivant ce cours, les élèves pourront acquérir une solide compréhension des principes de la navigation inertielle et de l'optronique pour les véhicules autonomes, qu'ils soient terrestres, aéronautiques ou spatiaux, et être prêts à relever les défis techniques liés à l'autonomie de ces véhicules.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

1. Navigation inertielle : senseurs , équipements et systèmes de navigation
2. Optronique : observation et identification, caméra et viseurs

3. Spatial : satellites, communications et observations
4. Véhicule autonome : fusion des capteurs et autonomie

## Déroulement, organisation du cours

Présentation sous forme de conférences

## Organisation de l'évaluation

Les élèves travaillent par groupe et préparent un exposé sur un sujet complémentaire aux notions présentées durant le cours. Le sujet sera précisé en début de cours. L'ensemble des élèves assistent aux exposés.

## Support de cours, bibliographie

Planches présentées durant les conférences

## Moyens

Ce cours est réalisé par une équipe d'ingénieurs de la société SAFRAN  
Une visite de certains sites de la société SAFRAN illustre les problèmes présentés durant le cours.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de ce cours, voici quelques acquis d'apprentissage obtenus par les élèves :

- Une compréhension approfondie des principes fondamentaux de la navigation inertielle et optronique.
- Une connaissance des différentes technologies de capteurs utilisées dans les systèmes de navigation pour les véhicules autonomes.
- La capacité de comprendre les limites et les défis associés à l'utilisation de ces technologies de capteurs, tels que les perturbations atmosphériques, les interférences électromagnétiques, les erreurs de mesure et la dérive.
- Une maîtrise des techniques de fusion de données de capteurs pour améliorer la précision de la navigation.
- Une connaissance des dernières avancées en matière de recherche et d'applications pratiques dans le domaine de la navigation pour les véhicules autonomes.

Ces différents acquis d'apprentissage permettent de valider les jalons 1 et 2 de la compétence C1, les jalons 1 et 2 de la compétence C2.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Ces différents acquis d'apprentissage permettent de valider les jalons 1 et 2 de la compétence C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques.

Ces différents acquis d'apprentissage permettent de valider les jalons 1 et 2 de la compétence C2 : Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers.

# 2EL1310 – Energies renouvelables

Responsables : **Simon Meunier**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SYSTÈMES D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Cet électif comporte des cours, quatre TD et un projet.

L'objectif de ce cours est de présenter les potentialités des systèmes utilisant les sources d'énergie renouvelable. Une première partie est consacrée aux principaux dispositifs de production d'énergie à partir de sources renouvelables.

Une seconde partie concerne l'intégration des énergies renouvelables et la gestion de l'énergie au sein du réseau électrique. Les éléments de conversion et de stockage utilisés dans ce cadre seront abordés.

Projet :

Le titre du projet: Dimensionnement du système d'énergie renouvelable pour alimenter une ferme agricole

Les élèves sont divisés en plusieurs groupes. Des créneaux sont prévus pour répondre aux questions des élèves

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Cours de sciences pour l'ingénieur 1A « Energie électrique » ou équivalent

## Plan détaillé du cours (contenu)

- Principaux moyens de production d'énergie à base de sources renouvelables : éolien, solaire photovoltaïque, solaire thermique, cycle organique de Rankine
- Intégration et gestion de l'énergie : énergie éolienne et photovoltaïque dans les réseaux électriques
- Filière hydrogène : production, stockage, utilisation
- Cas des réseaux isolés autonomes : modélisation et dimensionnement des éléments, gestion des flux d'énergie

## Déroulement, organisation du cours

Cours, TD, projet

## Organisation de l'évaluation

La modalité de l'évaluation du cours : l'évaluation se fera par un examen écrit de 2h et le projet sera noté.

La note d'évaluation : 75% pour l'examen écrit et 25% pour le projet.

## Moyens

Equipe enseignante : enseignants-chercheurs de CentraleSupélec et intervenants industriels

Taille des TD (par défaut 35 élèves) : 18 (pour un effectif de 72 étudiants)

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Maîtriser les particularités des différents dispositifs intervenants dans la génération, la conversion et la gestion de l'énergie d'origine renouvelable

- Comprendre les difficultés liées à l'intégration de ces moyens de production dans les réseaux électriques
- Résoudre des problèmes simples de dimensionnement de systèmes d'alimentation énergétique de sites à partir de sources renouvelables.
- Evaluer les aspects économiques

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.3 Résoudre le problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation

C1.4 Spécifier, concevoir, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe. Jalon 1 : Spécifier et concevoir un système ou une partie d'un système

C3.7 Choisir les solutions et agir de façon pragmatique, en vue d'obtenir des résultats tangibles. Jalon 1 : Choisir la solution la plus prometteuse pour un problème donné

# 2EL1315 – Conversion d'énergie électrique pour les sources d'énergie renouvelables et l'électromobilité

Responsables : **Marc Petit**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SYSTÈMES D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Compte tenu des objectifs de décarbonation au niveau mondial, la Commission européenne a prévu un programme ambitieux pour atteindre un objectif d'émission nette nulle en 2050. Ainsi, plusieurs scénarios ont été construits, parmi lesquels une plus grande électrification du secteur énergétique, une meilleure efficacité énergétique, et le développement de l'hydrogène. Ces scénarios ont également été organisés en sept priorités stratégiques. Deux d'entre elles sont le développement des énergies renouvelables (avec un objectif de 80% d'électricité produite à partir de sources renouvelables en 2050) et une mobilité plus électrifiée. Ainsi les convertisseurs électriques (ou électromécaniques) seront au cœur de cette évolution, avec les applications suivantes : éoliennes, production photovoltaïque, stockage de batteries, groupe motopropulseur électrique pour véhicules électriques (VE), avions plus électriques, navires tout électrique, nouvelles lignes DC pour réseaux électriques, convertisseurs de puissance pour électrolyseurs et pour piles à combustible, récupération d'énergie pour systèmes autonomes, ...

Quelle que soit l'application, une étape importante sera la conception de la solution optimale et son exploitation dans un environnement complexe et entièrement interconnecté. Ainsi, une compréhension approfondie des dispositifs et des sous-systèmes est un point clé. Cela signifie : quelle est la structure ? Comment cela fonctionne ? comment connecter les appareils entre eux ? comment concevoir un système plus complexe avec plusieurs appareils ? Comment les modéliser pour l'optimisation et le dimensionnement ?

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Bases sur les circuits électriques, systèmes triphasés, puissances électriques

## Plan détaillé du cours (contenu)

- étude des bases des convertisseurs électromécaniques (machines électriques alternatives) pour la génération d'électricité (éolienne ou centrale hydroélectrique) et pour les applications de motorisation (pompage, propulsion électrique). Modélisation pour le dimensionnement et la simulation
- étude des bases sur les convertisseurs électroniques de puissance pour la recharge des véhicules électriques (à batterie ou hybride-rechargeable), et pour la propulsion électrique (VE, bateau, trains). Modélisation pour le dimensionnement et la simulation

## Exercices

- a) connexion d'une génératrice AC à un réseau électrique alternatif. Point de fonctionnement en puissance active et réactive
- b) architecture d'une chaîne de conversion pour la recharge d'une batterie de véhicule électrique

## Déroulement, organisation du cours

Supports de présentation avec commentaires détaillés/rédigés

## Organisation de l'évaluation

75% de la note est donnée par un examen écrit de 2h (questions de cours+ exercice)

25 % de la note est donnée par les compte(rendus des séances de laboratoire). Une absence à une séance de TP donne la note '0' pour cette séance

## Moyens

Cours (13h30) + sessions de laboratoire (6h) + exercices (9h)

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

En sélectionnant des applications telles que (i) un système de charge d'une batterie de VE, (ii) un moteur à vitesse variable pour une utilisation industrielle (pompe) ou une propulsion électrique, et (iii) une génératrice d'une centrale hydroélectrique, l'objectif est de présenter les éléments fondamentaux pour l'étude des convertisseurs électromécaniques et à base d'électronique de puissance.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Les étudiants connaîtront les composants de base pour définir une chaîne de conversion électrique. Ils seront capables de mener un premier dimensionnement du système, et pourront analyser l'intégration de ce système dans un environnement plus large.

compétences : C1.1 ; C1.2 ; C1.4

# 2EL1320 – Conversion d'énergie

Responsables :

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SYSTÈMES D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

La production et l'utilisation d'énergie ne se conçoivent désormais que dans le respect de l'environnement et de critères stricts de développement durable. Par ailleurs, la disponibilité de l'énergie sous une forme adéquate est la clé du développement de nouvelles applications dans tous les domaines, des transports à la conception d'appareils mobiles. Ainsi, l'ensemble des secteurs d'activité doivent aujourd'hui se donner les moyens de maîtriser l'énergie électrique, seul vecteur à même de répondre à ces besoins. Le cours de conversion d'énergie introduit les principaux objets, moteurs et générateurs, permettant les transformations entre énergie électrique et énergie mécanique. Il traite également des principes et dispositifs électroniques permettant d'optimiser le transfert d'énergie entre source et charge électriques. Les convertisseurs concernés sont omniprésents dans le transport d'énergie et les énergies renouvelables, mais aussi dans la plupart des objets modernes consommateurs d'électricité.

Le cours commence par le positionnement des principes et des systèmes qui vont être étudiés par rapport aux bases déjà acquises par les étudiants dans le domaine de l'énergie électrique. L'accent est mis sur les enjeux industriels et économiques de la maîtrise de l'énergie. La première partie du cours est consacrée à l'étude des machines électriques tournantes à courant alternatif, qui sont aujourd'hui des acteurs majeurs dans la production et la consommation d'énergie électrique. En s'appuyant sur les bases de l'électromagnétisme basse fréquence et de la mécanique, on introduit les principes de fonctionnement des machines synchrone et asynchrone afin d'obtenir une modélisation de type circuit utilisable en régime permanent. Il devient alors possible de dresser un bilan énergétique de la conversion et de présenter quelques modes de pilotage. Dans une seconde partie, on aborde les composants et les convertisseurs électroniques de puissance. On souligne l'intérêt du fonctionnement électronique en commutation et son lien avec les aspects topologique et thermique de la conception. Les différentes structures sont ensuite présentées en s'appuyant sur une méthodologie qui permet d'établir une classification des convertisseurs en fonction des sources et charges électriques concernées et de la réversibilité éventuelle du transfert d'énergie.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

Cours de sciences pour l'ingénieur 1A « Energie électrique » ou équivalence

## Plan détaillé du cours (contenu)

### Introduction

Conversion d'énergie et génie électrique

### Concepts généraux sur les machines à courant alternatif

Distribution sinusoïdale de champ - Création de champ tournant - Réalisation pratique

### Machine synchrone en régime permanent

Principe et réalisation pratique - Équations fondamentales - Schéma équivalent - Fonctionnement en alternateur - Utilisation en moteur

### Moteur asynchrone en régime permanent

Principe et réalisation pratique - Équations fondamentales - Schéma équivalent - Mise en œuvre sur un réseau à fréquence fixe - Alimentation à fréquence variable

### Bases de l'électronique de puissance

Principes des convertisseurs statiques : fonctions réalisées, structures classiques - Interrupteur idéal, interrupteurs réels : régime de commutation, pertes - Principaux composants : propriétés fondamentales, principes de commande, domaines d'utilisation, limites

### Convertisseurs continu-continu

Objectifs - Hacheurs : structures fondamentales - Différents régimes de fonctionnement - Réversibilité – Applications

### Convertisseurs continu-alternatif

Objectifs - Onduleurs monophasés : structures fondamentales - Modes de fonctionnement, différentes lois de commande - Onduleurs triphasés

### Convertisseurs alternatif-continu

Objectifs - Ponts redresseurs : montages de base en monophasé et en triphasé - Réversibilité, onduleur assisté - Impact sur la source d'alimentation, facteur de puissance

## Déroulement, organisation du cours

CM(9x1H30) // TD(6x1H30) // TP(2x3H)// EE(2H)

## Organisation de l'évaluation

L'évaluation se fera par un examen écrit de 2 heures avec documents. Les travaux pratiques (**s'ils peuvent avoir lieu dans le contexte de fermeture du bâtiment Breguet**) seront pris en compte pour 25% dans la note finale du module. L'absence à une séance donnera la note 0 au TP concerné.

## Support de cours, bibliographie

Polycopiés "Machine synchrone - Moteur à induction" et "Electronique de Puissance"

## Moyens

Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : Bruno Lorcet

Taille des TD (par défaut 35 élèves) : 18 (pour un effectif de 72 étudiants)

Salles de TP (département et capacité d'accueil) : Travaux Pratiques en binôme ou trinôme (selon effectif) au département Energie



## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À l'issue de cet enseignement, les étudiants seront capables :

- d'analyser ou construire une chaîne de conversion d'énergie
- de maîtriser le fonctionnement de l'ensemble des composants de base du génie électrique
- de choisir et mettre en oeuvre une machine à courant alternatif dans le cadre d'une application à vitesse stabilisée
- d'effectuer un choix de convertisseur de puissance et d'adapter structure et commande à une problématique de conversion d'énergie

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.3 Résoudre un problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation

C1.4 Spécifier, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe

C2.1 Approfondir un domaine des sciences de l'ingénieur ou une discipline scientifique

# 2EL1410 – Transferts Thermiques

Responsables : **Gabi-Daniel Stancu**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ENERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS, ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Les transferts thermiques couvrent un domaine scientifique et technique très vaste. Le champ d'application de cette discipline se caractérise entre autres par des spectres d'échelles spatiales et temporelles considérables : du nanomètre (thématique des transferts thermiques à la nanoéchelle) aux distances interstellaires (astrophysique), de la femtoseconde (réponse thermique d'un système à une impulsion laser ultracourte) aux temps caractéristiques de la genèse de l'univers (évolution thermique des étoiles). Les transferts thermiques sont également en prise directe avec des sujets de société et des enjeux majeurs tels que l'énergie (optimisation énergétique des procédés industriels, isolation thermique des bâtiments,...), l'environnement (réchauffement climatique, effet de serre atmosphérique,...) ou encore les transports (optimisation des moteurs thermiques, piles à combustible et filière hydrogène, ...). Ils sont par essence une discipline où les phénomènes physiques à l'œuvre sont de natures très différentes, coexistent et sont couplés.

Ce cours approfondit et étend les notions de transfert thermique introduites dans les cours « Sciences des transferts » et « Modélisation et simulation de transferts thermiques instationnaires ». Par ailleurs, l'accent est porté ici sur l'acquisition des notions de base (via des exercices d'application immédiate - EAI) et des techniques de modélisation physique des transferts (via des problèmes de synthèse - PbS).

Intérêts de la discipline :

Concevoir, maîtriser et contrôler tout système ou procédé de tout secteur d'activité où apparaissent des transferts thermiques comme l'habitat résidentiel et tertiaire, les transports, l'industrie, la production d'énergie, etc. Certaines sciences de l'univers (météorologie, géophysique, ...) ainsi que les sciences de l'environnement reposent également en partie sur la maîtrise de ces transferts.

Objectif de l'enseignement :

Aborder les principaux modes de transfert thermique dans des cas simples. Cette formation à caractère scientifique est destinée à de futurs ingénieurs généralistes, a priori non spécialistes de la discipline. C'est un enseignement de base en : conduction stationnaire et instationnaire ; rayonnement entre corps opaques à travers un milieu transparent, convection forcée et naturelle, laminaire et turbulente (approche phénoménologique).

Le traitement d'exercices et de problèmes lors de séances de Travaux Dirigés (TD) est l'occasion d'appliquer les connaissances introduites en cours et de développer des modèles simples de bilans. Il s'agit de résoudre des problèmes industriels, environnementaux ou météorologiques concrets (démarche inductive). Certains exercices à caractère didactique introduisent, à partir d'exemples simples, des notions essentielles en transferts.

Inversement, des problèmes de synthèse sont proposés en fin d'enseignement. Dans ceux-ci, la difficulté principale est de construire le fil conducteur de la solution (confrontation au flou et à l'incertain).

Par ailleurs, de nombreux exercices d'application immédiate sont traités dans le livre de cours. Ils constituent un excellent entraînement.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6 et SG8

## Prérequis

Idéalement, avoir suivi les cours « Sciences des transferts » (cours de sciences pour l'ingénieur 1A, SG1 ou SG3) et « » (cours spécifique : Étude et modélisation des systèmes de conversion électromagnétique et transfert thermique instationnaire énergie 1A, ST2). Cependant, les étudiants qui n'auront pas suivi les deux cours ci-dessus pourront suivre cet électif mais ils devront, en amont des séances, travailler les cours qui sont disponibles sur les plateformes E-learning « E-SELF-LEARNING »

## Plan détaillé du cours (contenu)

- Cours LES BASES DES TRANSFERTS THERMIQUES : Conduction, convection rayonnement. Introduction du transfert conducto-convectif. Bilan d'énergie en régime stationnaire et sans mouvement. Analogie électrique.  
o TD : ( EAI ) Mur entre deux fluides; Allure du profil de température dans un system 1D; (PbS) Isolation d'un conteneur cryogénique
- Cours AILETTE ET APPROXIMATION DE L'AILETTE  
o TD (EAI) : Plaque chauffée; Refroidissement d'un circuit électronique; (PbS) Efficacité d'un radiateur domestique; Mesure de température d'un liquide par doigt de gant (devoir)
- Cours LES BASES DU RAYONNEMENT THERMIQUE : Notions de : corps opaque, milieu transparent, flux émis, absorbé, réfléchi, partant, incident et radiatif.  
Conditions aux limites en présence d'échanges radiatifs. Notion de luminance monochromatique directionnelle. Première expression du flux radiatif. Notion et propriétés du rayonnement d'équilibre.  
o TD (EAI) Calculs d'angles solides et de flux surfaciques incidents; Calculs d'intégrales spectrales de la loi de Planck (PbS) Principe de télédétection infrarouge
- Cours LES PROPRIÉTÉS RADIATIVES ET TRANSFERT RADIATIF : Caractérisation de la surface d'un corps opaque : notions d'émissivité, d'absorptivité et de réflectivité. Notions de : corps gris, corps noir et corps à propriétés radiatives isotropes. Modèles simples de transfert radiatif : (i) corps opaque convexe isotherme entouré par un corps noir isotherme ; (ii) corps opaque convexe isotherme de petites dimensions entouré par une enceinte opaque isotherme.  
o TD (EAI) Rayonnement entre deux sphères; (PbS) Température d'une surface exposée au rayonnement solaire
- Cours METHODE GENERALE DE TRANSFERTS RADIATIFS ENTRE CORPS OPAQUES A TRAVERS UN MILIEU TRANSPARENT : Hypothèses de base de la méthode. Expression du flux partant et incident. Expression du flux total partant.  
Notion de facteur de forme – propriétés. Equations pour une enceinte fermée constituée de surfaces grises. Généralisation aux surfaces non grises  
o TD (EAI) Rayonnement « face à face » ; (PbS) Ecran radiatif - Mesure de température par thermocouple
- Cours CONDUCTION INSTATIONNAIRE ET PHYSIQUE DE LA DIFFUSION (1/2): Equation de bilan d'énergie et conditions aux limites. Notion de diffusivité thermique  
Théorèmes généraux : théorème de superposition et théorème  $\Pi$ . Application à une géométrie semi-infinie (réponse aux temps courts) : problèmes de la température imposée, du flux imposé et du régime périodique forcé  
o TD (EAI) Mise en équation d'un problème de conduction instationnaire 2D; Conduction instationnaire 1D – solution analytique dans le cas du flux imposé; (PbS) Inertie thermique d'un bâtiment (1/2)
- Cours CONDUCTION INSTATIONNAIRE ET PHYSIQUE DE LA DIFFUSION (2/2): Application à une géométrie semi-infinie (réponse aux temps courts – suite) : problème de la mise en contact thermique de deux corps. Cas des milieux d'extension finie. Temps caractéristiques de conduction et de transfert conducto-convectif, nombre de Biot et retour sur l'approximation de l'ailette  
o TD (EAI) Refroidissement d'une bille transparente; (PbS) Inertie thermique d'un bâtiment (2/2); Traitement thermique de l'acier par laser
- Cours APPROCHE PHENOMENOLOGIQUE DE LA CONVECTION FORCEE EXTERNE : Flux de diffusion (à une paroi) et de convection (au loin). Notion de viscosité d'un fluide. Problème académique de la plaque plane à température imposée. Analyse dimensionnelle. Allure générale d'une corrélation de convection forcée externe. Introduction et significations physiques des groupements adimensionnés caractéristiques. Notion de similitude en convection. Critères de transition entre régimes laminaire et turbulent dans des configurations standard. Evolution du coefficient de transfert local le long d'une plaque ; effet de bord d'attaque.  
o TD (EAI) Baie vitrée en convection forcée externe; (PbS) Conducteur, prudence – problème instationnaire

- Cours LES NOTIONS DE CONVECTION FORCEE INTERNE : Notions élémentaires sur les établissements des régimes (mécanique et thermique) et sur les régimes établis dans les conduites de section constante. Notion de température de mélange. Expression du nombre de Nusselt en régimes laminaire et turbulent pour des écoulements en conduite de section circulaire ; discussion physique des résultats. Cas des conduites de section non circulaire ; notion de diamètre hydraulique.

- o TD (EAI) Calcul du coefficient de transfert dans un canal semi-circulaire; (PbS) L'hélium comme fluide caloporteur; Circulation d'eau dans un tube (devoir)

- Cours ANALYSE DIMENSIONNELLE EN CONVECTION NATURELLE : Phénomène – approximation de Boussinesq. Couches limites mécanique et thermique. Analyse dimensionnelle – similitude. Critère de transition entre régimes laminaire et turbulent. Expressions du coefficient de transfert. Spécificités de la convection naturelle interne. Caractère itératif d'un calcul de convection naturelle.

- o TD (PbS) Etude thermique d'un double vitrage

- o TD PROBLEMES DE SYNTHESE (PbS ) Récupérateur d'énergie pour le résidentiel-tertiaire; Climatisation d'un local dans un pays chaud et ensoleillé (devoir)

- EXAMEN FINAL

## Déroulement, organisation du cours

Le cours est proposé en SG6 (occurrence en anglais) et SG8 (occurrence en français) à travers 19 créneaux de 1h30 chacune, 3 éléments de préparation en distanciel (3 x 1h30) et une séance d'examen de 2h.

## Organisation de l'évaluation

Les deux premiers acquis d'apprentissage constituent le niveau de connaissance minimal attendu de la part de tout étudiant ayant suivi ce cours. Ils seront évalués en contrôle continu au fil de l'enseignement par de petits QCMs. Ces tests, non notés, permettront aux étudiants de s'autoévaluer et aux enseignants de mesurer le niveau de compréhension de certaines notions fondamentales et de détailler les points difficiles. Concernant l'activité de modélisation des systèmes thermiques, il s'agit là d'une compétence complexe à acquérir, à laquelle les étudiants s'initieront lors des séances de TD et qu'ils maîtriseront progressivement. La dernière séance de l'enseignement sera l'occasion de consolider tous les acquis de modélisation. Les acquis d'apprentissage seront évalués lors de l'examen final (2H) qui comportera deux parties. La première portera sur l'évaluation du niveau d'acquisition des deux premiers acquis d'apprentissage. Dans la deuxième on soumettra les étudiants à un problème de modélisation a priori complexe pour évaluer l'acquis de modélisation des systèmes thermiques.

La compétence C1.2 est validée si l'étudiant accomplit au moins 50% de la partie 2 de l'examen final. La compétence fondamentale C2.1 est validée si l'étudiant accomplit au moins 50% de la partie 1 de l'examen final. La note finale est la moyenne des notes des deux parties de l'examen.

## Support de cours, bibliographie

- Livre en Anglais: « A first course in heat transfer » J. Taine, E. Iacona Editions Dunod 2011.
- Livre en Français : « Transferts Thermiques » Partie 1, J. Taine, F. Enguehard, E. Iacona, Dunod 2014
- Plateforme « E-Self-Learning » en Anglais : <http://e-mentor-en.ecp.fr/> cours présenté par G.D. Stancu
- Plateforme « E-Self-Learning » en Français : <http://e-mentor2.ecp.fr/> cours présenté par J. Taine

## Moyens

- Equipe enseignante (noms des responsables) : Gabi Daniel Stancu, Benoit Goyeau
- Taille des TD (par défaut 35 élèves) : 35
- Plateformes « E-Self-Learning » en Français et en Anglais
- Outils logiciels et nombre de licences nécessaire : aucun
- Salles de TP (département et capacité d'accueil) : aucune

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de cet enseignement, les élèves :

o Sauront identifier les différents modes de transfert thermique à l'œuvre dans une configuration donnée,  
o Sauront écrire et utiliser les bilans d'énergie appropriés sous leurs formes locale et globale et les équations de continuité aux interfaces, et pourront ainsi déterminer les champs de flux thermique et de température d'un système permettant ainsi de calculer les caractéristiques locales et globales nécessaires au dimensionnement du système,

o Auront acquis une pratique de l'activité de modélisation des systèmes thermiques :

- Lister de manière exhaustive les phénomènes de transfert thermique à l'œuvre dans une configuration donnée,
- Utiliser l'analyse d'échelle pour : (i) faire des estimations d'ordres de grandeur permettant de discriminer les phénomènes prédominants de ceux qui peuvent être ignorés ; (ii) simplifier des problèmes a priori en géométries tridimensionnelles et/ou instationnaires vers des modèles avec des solutions analytiques,
- Utiliser une approche inductive de résolution des problèmes : poser des hypothèses pertinemment justifiées qui seront validées a posteriori par les solutions résultantes,
- Reformuler un problème multi-physiques et multi-échelles avec des phénomènes de couplage complexe, en une version simplifiée dans laquelle seuls les phénomènes prédominants auront été retenus,
- Modéliser des systèmes thermiques complexes et utiliser les bilans fondamentaux pour résoudre des problèmes d'ingénieur.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C1.2 « Choisir le modèle adapté (parmi plusieurs possibles) pour un problème donné grâce aux bons choix d'échelle de modélisation et d'hypothèses simplificatrices »
- C2.1 « Approfondir l'ensemble de ses connaissances sur un domaine choisi, via les enseignements de 2A »

# 2EL1420 – Mécanique des fluides

Responsables : **Ronan Vicquelin, Morgan Chabanon**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ENERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS, ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Le cours de Mécanique des Fluides prolonge les notions, équations et compétences fondamentales établies lors du cours de Sciences des Transferts vers une maîtrise des diverses complexités des écoulements fluides, de leur dynamique et des systèmes et configurations reposant sur la mécanique des fluides. Le cours permet d'atteindre un niveau confirmé dans cette discipline et les applications concernées avant d'envisager des études plus avancées et spécialisées. Dans leur construction, le cours et les travaux dirigés prennent en compte les évolutions récentes de la discipline en combinant les approches expérimentale, numérique et théorique pour former aux pratiques des ingénieurs du domaine et aux enjeux à venir (analyse de données, modélisation, simulations, mesures...).

Le cours se compose de trois blocs. Le premier approfondit les notions fondamentales au travers d'outils théoriques, de traitement et de l'analyse de données expérimentales et numériques. Un deuxième bloc est dédié à l'analyse des écoulements compressibles dans différents régimes (subsonique, supersonique, ondes de choc), permettant ainsi d'aborder un vaste champ d'applications jusqu'alors non traité. Enfin, les étudiants sont invités à choisir le thème de leur troisième bloc afin de s'ouvrir brièvement à une spécialisation parmi : Aérodynamique, Ecoulements météorologique et climatique, Propulsion aéronautique et spatiale, Systèmes énergétiques, Environnement, Hypersonique ...

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6 et SG8

## Prérequis

Les notions et compétences essentielles liées à la mécanique des fluides vu dans le cours de Sciences des Transferts sont un prérequis.

- Analyse dimensionnelle
- Bilans locaux et macroscopiques de transport de masse, espèces, quantité de mouvement et énergie
- Evolution entre des différents champs (vitesse, pression, température) et leurs interactions
- Calcul d'efforts (locaux ou intégrés), puissances, rendements, pertes de charges
- Couche limite

Pour les quelques élèves qui n'ont pas suivi Sciences des Transferts mais qui souhaiteraient tout de même suivre le cours de Mécanique des Fluides : il est impératif de travailler ces concepts et applications-clé avant de rejoindre le cours. Contactez le responsable de cours le cas échéant pour récupérer l'accès aux ressources mises à disposition pour rattraper.

## Plan détaillé du cours (contenu)

Bloc n°1 : Mécanique des Fluides avancée (4 séances de 3h00)

- **Séance 1 : Equations fondamentales et Ecoulements potentiels**

Rappel des équations-bilan locales, calcul des grandeurs d'intérêt, analyse dimensionnelle. Propriétés des écoulements incompressibles. Solutions analytiques classiques : Couette, Poiseuille, Tourbillon. Ecoulements potentiels.

TD : Ecoulement autour d'une sphère.

- **Séance 2 : Solutions analytiques et profil exact de Couche Limite**

Méthodes de résolution analytique des équations (suite) : Fonction de courant, Autosimilarité. Application à la détermination du profil de couche Limite sur une plaque plane. Extension des écoulements potentiels. Notions sur les expériences et simulations numériques pour la caractérisation de champs de vitesse.

TD : Dispersion de polluants dans l'atmosphère ; Ecoulement devant un plan d'arrêt

- **Séance 3 : Bilans macroscopiques et conditions de saut aux interfaces**

Rappel sur les bilans macroscopiques et expressions de la poussée d'un turboréacteur et d'une fusée. Approfondissement : écriture de nouveaux bilans, bilan sur entrée/sortie non-homogène. Résolution d'un problème ouvert. Conditions de saut à travers une interface. Notions de tension superficielle.

TD : Etude du ressaut hydraulique

- **Séance 4 : Instabilités et Turbulence**

Types d'écoulements instationnaires. Ondes acoustiques et vagues. Exemples d'instabilités. Démarche pour l'analyse d'instabilités. Application Couche Limite et Transition turbulente. Description des écoulements turbulents (Cascade de Kolmogorov, approches DNS, RANS, LES). Problème de fermeture et Hypothèse de Boussinesq.

TD : Instabilités d'interfaces ; Ressources de calcul pour une simulation directe

Bloc n°2 : Ecoulements compressibles (4 séances de 3h00)

- **Séance 5 : Dynamique des gaz - écoulements isentropiques**

Écoulements isentropiques de gaz réels. Conditions d'arrêt isentropiques. Écoulements avec section de passage variable. Écoulements isentropiques de gaz parfaits. Équations fondamentales pour écoulements isentropiques de gaz parfaits.

TD : Calcul de grandeurs d'arrêt dans une tuyère convergente-divergente ; Etude d'une entrée d'air

- **Séance 6 : Conditions critiques et rendements isentropiques**

Conditions critiques isentropiques. Section critique et phénomène d'amorçage. Expression débit pour un écoulement compressible. Transformations réelles et Rendements isentropiques. Systèmes propulsifs.

TD : Analyse d'un turboréacteur à simple flux

- **Séance 7 : Ondes de choc**

Équations fondamentales pour les ondes de chocs droits. Expressions pour les gaz parfaits. Propriétés de l'écoulement au travers d'un choc droit. Perturbations faibles des écoulements supersoniques.

TD : Etude d'un statoréacteur élémentaire

- **Séance 8 : Chocs obliques et écoulement dans les tuyères**

Ondes de choc obliques. Régimes d'écoulement dans les tuyères convergentes-divergentes pour diverses valeurs du rapport de détente. Souffleries supersoniques.

TD : Entrée d'air d'un jet supersonique ; Soufflerie à basse densité

Bloc n°3 : Ouverture thématique (trois séances)

- **Au choix parmi plusieurs thématiques proposées.** Par exemple : Aérodynamique, Ecoulements météorologique et climatique, Propulsion aéronautique et spatiale, Systèmes énergétiques, Environnement, ... Les thèmes proposés en 2020-2021 étaient :
  - Aérodynamique
  - Propulsion Aéronautique
  - Propulsion Spatiale
  - Circulation atmosphérique
  - Environnement et Qualité de l'air
  - Hypersonique

Ces thèmes sont variables d'une année à l'autre. Ils seront présentés dès la première séance pour l'année en cours.

## Déroulement, organisation du cours

Un équilibre est recherché entre une présentation de la physique des phénomènes, la discussion des aspects qualitatifs, l'introduction des concepts, de la modélisation, de l'écriture des équations et de leur résolution. Le choix des problèmes traités résulte d'un compromis difficile entre l'importance respective des sujets et le temps réduit disponible. Sur le plan pédagogique, le cours s'appuie sur une utilisation de tous les moyens audiovisuels : développements complets au tableau, expériences en amphi, illustrations et démonstrations sur ordinateur, projections multiples, films de mécanique des fluides, des sessions de résolution de problèmes en Petites Classes (« problem solving workshops »). Les problèmes abordés en PC sont proposés comme travail personnel en dehors des séances.

Le cours est programmé sur 10 séances de 3h (cours magistral puis classes de TD) et une séance d'examen. L'activité comprend ainsi :

7 séances communes de cours en amphithéâtre, + 1 séance en vidéo

7 séances de problem-solving workshop réparties en Petites Classes + 1 séance à travailler à distance. Les étudiants sont répartis en groupes homogènes dans des salles de 30-35 personnes et encadrés par des assistants,

un contrôle continu sous la forme d'un test de connaissance à la 4<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> séances,

3 séances en blocs thématiques

un contrôle final écrit d'une durée de 2h.

une évaluation des blocs thématiques

### Langues

Cours SG6 : Français + petite classe en anglais

Par défaut, l'ensemble des élèves suivent le cours en Français en amphithéâtre.

Avant le début du cours, un message est envoyé aux élèves pour leur permettre, s'ils le souhaitent, de rejoindre une petite classe intégrée où tout le cours est réalisé en anglais.

Cours SG8 : Anglais

Le cours de SG8 est proposé uniquement en anglais. L'offre en bloc thématique est réduite.

## Organisation de l'évaluation

3 évaluations à travers les différents blocs :

### Bloc 1 (20%) : questionnaires (2 x 15 min.) de connaissances

Les contrôle des connaissances lors des séances n°4 et n°6 ont pour but la vérification des notions acquises durant le premier bloc du cours. L'étudiant obtient une **note CA sur 20**. La présence à ces tests est obligatoire. Tout absence justifiée amène à repasser un questionnaire-test en dehors des séances prévues. En cas d'absence non-justifiée auprès de l'équipe pédagogique, la note de 0 sur 20 est attribuée à CA.

### Bloc 2 (50 %) : contrôle écrit surveillé lors du dernier créneau de cours



Le contrôle écrit final est de 2h00. Dans l'absolu, l'ensemble des éléments du cours hors bloc thématique est au programme. En pratique, le sujet portera essentiellement sur le contenu du bloc n°2 lié aux écoulements compressibles. Le contrôle est réalisé avec tout document écrit autorisé. L'étudiant obtient une **note CF sur 20**.

### **Bloc 3 (30%) : évaluation bloc thématique**

L'évaluation du bloc thématique porte sur un projet spécifique démarré en séance sur un sujet technique et scientifique lié à la thématique étudiée. La démarche et les résultats du projet sont rapportés au format spécifique demandé par le bloc (poster, présentation ou rapport). L'étudiant obtient une note CB sur 20 déterminée à partir de trois critères globaux déclinés dans chaque bloc:

CB.1 (4 points) : Forme, clarté et structure

CB.2 (7 points) : Engagement personnel en séance, travail continu en séance et en dehors, investissement particulier

CB.3 (9 points) : Qualité de l'étude, appréciation du travail, des résultats et analyses

La note finale correspond à l'arrondi de la note obtenue après application de la formule

$$NF = 0,5 \times CF + 0,3 \times CB + 0,2 \times CA$$

Une session bis est organisée plus tard dans l'année (juin les années précédentes). Dans ce cas, seule la note obtenue lors de ce contrôle de rattrapage est prise en compte. Les notes CA ou CB ne sont alors pas considérées.

Pour les élèves partant en S8 anticipé, leur absence à l'examen de session 1 est excusée et une dérogation au bloc thématique est accordée. La note finale est alors calculée comme  $0,65 \times CF + 0,35 \times CA$ , où CF est la note obtenue lors de l'examen de deuxième session.

## **Support de cours, bibliographie**

Mécanique des Fluides, Tome I & II, S. Candel

## **Acquis d'apprentissage visés dans le cours**

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de :

- Modéliser des systèmes complexes, étape nécessaire à leur dimensionnement et leur optimisation :
  - Faire des approximations et des estimations d'ordres de grandeur,
  - Simplifier un problème d'apparence compliquée
  - Utiliser les bilans fondamentaux pour résoudre des problèmes d'ingénieur.
- Caractériser un système mettant en jeu un écoulement fluide à l'aide de plusieurs éclairages : solutions analytiques simplifiées, résultats de simulations numériques, données expérimentales.
- Décliner ces compétences dans des écoulements complexes (instationnaires, compressibles)
- S'approprier un champ disciplinaire et/ou applicatif connexe à la mécanique des fluides, lui permettant de démontrer qu'il/elle sait s'adapter à un nouveau contexte avec une certaine autonomie grâce à son niveau de maîtrise.

## **Description des compétences acquises à l'issue du cours**

Compétences liées au cursus CentraleSupélec :

Le cours émerge dans l'acquisition des compétences C1 et C2 du cursus ingénieur CentraleSupélec.

- C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques
  - C1.2 : Modéliser : utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes
- C2 : Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers

- C2.1 : Approfondir un domaine des sciences de l'ingénieur ou une discipline scientifique
- C2.3 : Identifier et acquérir de façon autonome les nouvelles connaissances et compétences nécessaires
- C2.4 : Produire des données et développer de la connaissance selon une démarche scientifique

**La compétence C1 est validée si  $CF \geq 10$ .**

**La compétence C2 est validée si les deux conditions suivantes sont respectées :  $NF \geq 10$  et  $CB \geq 12$ .**

# 2EL1430 – Ingénierie Nucléaire

Responsables : **Pascal Yvon**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ENERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Non**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours est destiné à apporter des connaissances de base sur le fonctionnement des réacteurs nucléaires et le cycle du combustible nucléaire civil. Il permettra aux élèves d'apprécier, sur un plan technique, économique et environnemental, les avantages et inconvénients de cette source d'énergie bas carbone, et sa place dans le paysage énergétique mondial actuel et futur.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Notions de physique et de chimie

## Plan détaillé du cours (contenu)

- Principes de la fission nucléaire
- Fonctionnement des réacteurs à eau sous pression
- Interactions neutrons matière
- Les systèmes nucléaires de 4ème génération et les Small Modular Reactors
- Ressources naturelles et secondaires, activités minières, "yellow cake", chimie de l'uranium
- Enrichissement de l'uranium: technologies de séparation isotopique (diffusion gazeuse, centrifugation, autres ...)
- Fabrication du combustible et comportement en réacteur
- Economie circulaire, retraitement et gestion des déchets: le recyclage des combustibles usés
- Transport des matières nucléaires
- Développements futurs et R&D: une énergie jeune, déjà éprouvée et avec encore des promesses

## Déroulement, organisation du cours

28,5 h de cours en amphi

4,5 de travail personnel en amont des cours

## Organisation de l'évaluation

Contrôle écrit de 2 heures ( sans documents) - Oral de rattrapage

## Support de cours, bibliographie

Documents, vidéos disponibles sur Edunao

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Principes de fonctionnement des réacteurs à eau sous pression
- Abondance des ressources en uranium, seul élément fissile naturel
- Introduction aux technologies d'extraction minière, d'enrichissement et de retraitement du "combustible" nucléaire
- Impact de l'irradiation neutronique sur la microstructure et le comportement des matériaux
- Fabrication et comportement en réacteur du combustible nucléaire
- Problématiques et solutions de gestion des déchets radioactifs
- Perspectives de développement futur des procédés et technologies nucléaires (Génération IV, SMR)

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Bonne compréhension du fonctionnement des réacteurs à eau sous pression et du cycle du combustible.  
Compréhension des enjeux liés à la production d'électricité et de la place de l'énergie nucléaire dans un mix bas carbone.

# 2EL1440 – Modélisation et simulation numérique des milieux réactifs

Responsables : **Benoît Fiorina**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ÉNERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Non**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Les milieux réactifs couvrent un vaste champ d'études qui s'inscrivent parfaitement dans le contexte énergétique et environnemental actuel. D'un point de vue scientifique, les milieux réactifs englobent la combustion et les plasmas. Représentant 80% des modes de conversion de l'énergie primaire, la combustion est présente dans le secteur de l'énergie, des transports et des procédés. Quant aux plasmas, ceux-ci représentent plus de 99% de la matière visible de l'univers. Ils interviennent dans de très nombreuses applications industrielles : énergétique, fabrication de semi-conducteurs, procédés de transformation et de traitement, santé.

L'objectif de ce cours est d'introduire les notions de bases de la combustion et des plasmas. Il vise notamment à sensibiliser les étudiants à la modélisation numérique qui est au cœur des stratégies de recherche et développement de l'ingénierie des systèmes réactifs. Afin d'illustrer le champ d'application des milieux réactifs dans le domaine de l'énergie, les étudiants construiront un outil numérique multi-physique pour simuler une technologie émergente et prometteuse : la combustion assistée par plasma d'une turbine à hydrogène.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

1. Introduction générale : applications industrielles et enjeux scientifiques
  - a. Combustion - (1h30)
  - b. Plasmas – (1h30)
2. Description d'un système réactif
  - a. Cours (1h30)
    - i. Rappels de thermodynamique chimique
    - ii. Richesse d'un mélange
    - iii. Calcul de la température de fin de combustion
  - b. TD (1h30) "Decreasing CO2 emissions by addition of di-hydrogen"
3. Formation aux outils numériques du cours
  - a. Initiation à Matlab (1h30)

- i. Fonctions de base de Matlab
  - ii. Utilisation du package cinétique
- b. TD (1h30) "Computation of adiabatic combustion temperature of H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>-air reactive systems under global-step reaction assumption "
- 4. Équilibre thermochimique
  - a. Cours (1h30)
    - i. Second principe de thermodynamique
    - ii. Méthodes de calculs de l'équilibre thermochimique
  - b. TD (1h30) "Computation of equilibrium composition in H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>-air reactive systems "
- 5. Cinétique chimique de la combustion
  - a. Cours (1h30)
  - b. TD (1h30) "Computation of auto-ignition in a constant pressure reactor"
- 6. Production de plasma par décharges électriques
  - a. Cours (1h30)
  - b. TD et démonstrations expérimentales (1h30)
- 7. Cinétique chimique à deux températures dans les plasmas
  - a. Cours (1h30)
  - b. TD (1h30)
- 8. Optimisation énergétique des décharges
  - a. Cours (1h30)
  - b. TD (1h30)
- 9. Combustion assistée par plasma
  - a. Expériences et modèles (0h45)
  - b. Simulations (0h45)
  - c. Visite du laboratoire EM2C et présentation du mini-projet (1h30)
- 10. Mini-projet : simulation numérique de la combustion assistée par plasma (3h00)
- 11. Mini-projet : simulation numérique de la combustion assistée par plasma (3h00)

## Déroulement, organisation du cours

Cours, travaux dirigés et travaux sur ordinateurs

## Organisation de l'évaluation

Une soutenance sous forme de présentation orale.

## Support de cours, bibliographie

Nasser Darabiha, Emile Esposito, François Lacas et Denis Veynante, Poly de combustion de CentraleSupélec.  
 - Kenneth Kuo, Principle of Combustion, published by John Wiley & Son, 2005  
 - Principles of Plasma Discharges and Materials Processing, Michael A. Lieberman and Allan J. Lichtenberg, John Wiley and Sons, New York, 2nd edition, 2005  
 - Partially Ionized Gases, M. Mitchner and C.H. Kruger, John Wiley & Sons, New York, 1973.  
 - Gas Discharge Physics, Yu. P. Raizer, Springer Verlag, Berlin, 1997

## Moyens

Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : Benoît Fiorina, Christophe Laux

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Pour dimensionner des systèmes réactifs, un ingénieur est amené à faire des approximations et à calculer des ordres de grandeurs. Il doit calculer des bilans de masse, d'espèces chimiques et d'énergie. Il doit déterminer l'équilibre thermochimique d'un système réactif et savoir exploiter les déséquilibres thermochimiques. En particulier, ce cours apporte les compétences suivantes :

- Comprendre les enjeux industriels, énergétique et environnementaux de la combustion et des plasmas
- Être capable d'établir les équations fondamentales permettant de dimensionner des systèmes de combustion et de plasmas
- Caractériser les états thermodynamiques et chimiques transitoire et d'équilibre d'un système réactif
- Être capable de programmer (sous environnement Matlab) un outil de simulation numérique de réacteurs chimiques avec prise en compte d'une cinétique détaillée. Le code développé par l'étudiant s'appuiera sur une bibliothèque MATLAB de fonctions thermochimiques pré-existantes.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Pour concevoir des systèmes réactifs, les ingénieurs doivent faire des approximations et calculer des ordres de grandeur. Ils doivent effectuer des bilans massiques, chimiques et énergétiques. Ils doivent déterminer l'équilibre thermochimique d'un système réactif et savoir comment exploiter les déséquilibres thermochimiques. Ce cours fournit à cet effet les compétences suivantes :

- Comprendre les enjeux industriels, énergétiques et environnementaux de la combustion et des plasmas
- Établir les équations fondamentales pour la conception des systèmes de combustion et de plasma
- Caractériser les états thermochimiques transitoires et d'équilibre d'un système réactif
- Programmer (sous l'environnement Matlab) un outil numérique pour les réacteurs chimiques avec une cinétique détaillée. Le code développé par les étudiants sera basé sur une bibliothèque préexistante de fonctions thermochimiques de MATLAB.

# 2EL1450 – Cours d'analyse structurelle

Responsables : **Karim Tarbali**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ENERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement :

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Comprendre comment les structures se comportent et si elles peuvent supporter leur propre poids et protéger les humains contre les facteurs environnementaux tels que les tremblements de terre, les tempêtes, les glissements de terrain, etc. est crucial pour concevoir des structures sûres et rentables.

Les méthodes de détermination des forces internes et des réactions d'appui des systèmes structuraux classiques et modernes seront au centre de ce cours. La connexion des concepts et méthodes fondamentaux avec les algorithmes utilisés par les progiciels d'analyse structurelle dans la pratique de l'ingénierie sera abordée.

Les conférences se concentreront sur le développement d'ensembles de compétences pour identifier les comportements du système et analyser les structures à l'aide de méthodes d'analyse appropriées. Des cas d'exemple seront résolus dans le cadre du processus d'enseignement-apprentissage dans les cours magistraux et les séances de TD. Un projet sera défini à mi-parcours et les étudiants sont invités à y travailler progressivement pendant le reste du cours. Ce projet implique des calculs manuels, une modélisation logicielle et une vérification des réponses calculées. Le projet doit être remis sous la forme d'un rapport professionnel (soit lisiblement manuscrit, soit électronique ou un mélange des deux) une semaine après l'examen final. Il y aura deux quiz afin de renforcer les concepts appris lors des sessions précédentes.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Mécanique (pour les étudiants de CentraleSupélec )

Statique, résistance des matériaux (ou génie mécanique) pour les étudiants internationaux

## Plan détaillé du cours (contenu)

1. Concepts généraux de comportement statique, dynamique, élastique, inélastique, linéaire, non linéaire
2. Équations d'équilibre ; Supports, réactions et diagrammes du corps libre ; Stabilité et détermination des réactions
3. Force de cisaillement et moment de flexion ; Relations entre la charge, l'effort tranchant et le moment fléchissant ; Principe de superposition
4. Stabilité et détermination (exemples avec fermes et joints) ; Résolution aux joints pour les fermes ; Méthode des sections
5. Déflexion par intégration directe ; Méthodes moment-aire ; étuis standards; brève remarque sur la flèche due au cisaillement
6. Travail virtuel appliqué à des structures statiquement déterminées ; Théorème de Castigliano distribution
7. Moment ; déviation de la pente



8. Définition du projet ; Présentation du logiciel OpenSees
9. L'approche de la rigidité ; l'approche de la flexibilité
10. Méthode matricielle
11. Flambage
12. Introduction à l'analyse plastique et non linéaire; Pliage plastique de poutres; formation de charnière en plastique

## Déroulement, organisation du cours

Cours interactif, Apprentissage par projet

## Organisation de l'évaluation

- Deux quiz (d'une heure chacun).
- Un rapport de projet (10 pages maximum) comprenant des calculs manuels, des extraits de code, des sorties logicielles et des commentaires sur la vérification et la justification des résultats
- Un examen final de 3 heures. Apporter 2 pages de notes de support (sur deux faces d'une feuille A4 sans aucun espace blanc) est autorisé.

La note finale est calculée comme suit :

### Part de la note totale

Quiz	30% (15% pour chacun)
Projet	35%
Examen final	35%

## Support de cours, bibliographie

- 1- Structural theory and analysis, Todd, J. D. (1974).
- 2- Structural Analysis in Theory and Practice, Williams A. (2008).

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Démontrer une compréhension des comportements des systèmes linéaires, non linéaires, déterminés et indéterminés
- Analyser les structures en treillis et en ossature pour déterminer la réaction et les forces internes utilisées dans les processus de conception
- Utiliser les méthodes d'analyse classiques et les approches de rigidité et de flexibilité pour les analyses structurelles
- Créer des liens conceptuels entre les calculs manuels et le flux de travail informatique du logiciel et effectuer des tests de vérification

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- Identifier les systèmes structuraux déterminés et indéterminés et leur condition de stabilité
- les comportements matériels et géométriques linéaires et non linéaires
- Calculer la réaction et les forces internes des fermes et leurs déformations d'élément
- Appliquer les méthodes d'intégration directe, de distribution des moments et de déviation des pentes aux structures d'ossature pour déterminer leur déformation
- Expliquer et appliquer les méthodes de rigidité et de flexibilité et les contraster
- Déterminer la force de flambement pour diverses conditions aux limites

# 2EL1520 – Génie logiciel orienté objet

Responsables : **Paolo Ballarini, Dominique Marcadet**  
Département de rattachement : **DÉPARTEMENT INFORMATIQUE**  
Langues d'enseignement : **FRANCAIS, ANGLAIS**  
Type de cours : **Electif 2A**  
Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**  
Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**  
Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**  
Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**  
Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Le génie logiciel regroupe des concepts, techniques et outils visant la production de logiciels de qualité, en maîtrisant le coût et le délai de développement tout en prenant en compte les contraintes classiques des systèmes informatiques actuels : respect des exigences et des standards, ouverture, facilité de test et de maintenance, évolutivité. Java est l'un des langages de programmation les plus utilisés pour le développement d'applications informatiques.

En mettant l'accent sur la modélisation orientée objet, le langage java, le langage UML, en relation avec les phases du processus de développement de logiciels menant de l'expression du besoin au produit final testé et documenté, ce cours apporte aux étudiants des compétences de base indispensables à la réalisation de logiciels industriels.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6 en français et SG8 en anglais

## Prérequis

- 1CC1000 : Systèmes d'Information et Programmation
- 1CC2000 : Algorithmique et Complexité

## Plan détaillé du cours (contenu)

- Introduction, notions de base du langage Java
- Classes Java, bases de l'API Java
- Héritage en Java, classes abstraites, interfaces
- Introduction Génie logiciel, UML
- Diagrammes de classes avec UML, liens avec Java
- Autres diagrammes UML
- Compléments Java (exceptions, généricité, énumérations...)
- Patrons de conception, exemples sur API Java
- Introduction à la réalisation d'interfaces graphiques en Java
- Tests unitaires avec JUnit
- Processus légers et synchronisation
- Mise en œuvre UML/Java sur un projet

## Déroulement, organisation du cours

- Cours magistraux : 13h30 (SG6) - 13h30 (SG8)
- Travaux dirigés sur ordinateur : 15h00 (SG6) - 15h00 (SG8)
- Travail personnel (dont projet intégré) : 28h30
- Examen final : 2h00

## Organisation de l'évaluation

40% sur le projet intégré 60% sur l'examen final (2h00)

## Support de cours, bibliographie

- Livres
  - Java et Eclipse - Développez une application avec Java et Eclipse - Frédéric Déléchamp
  - UML 2.5 par la pratique - Etudes de cas et exercices corrigés - Pascal Roques
- Supports
  - Transparents projetés pendant les cours magistraux
  - Exercices et corrigés des travaux dirigés

## Moyens

- Enseignant des cours magistraux : Dominique MARCADET
- 4 groupes de travaux dirigés, encadrants : Idir AIT SADOUNE, Francesca BUGIOTTI, Dominique MARCADET, Joanna TOMASIK
- Outils logiciels : Java : Eclipse, UML : Modelio

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À l'issue de ce module, les élèves seront capables :

- de mettre en œuvre les principaux éléments de la programmation orientée objets en utilisant le langage Java ;
- d'écrire un programme informatique de complexité moyenne en utilisant le langage Java ;
- de connaître les différentes activités d'un cycle de développement logiciel et savoir choisir des outils adaptés pour ces activités ;
- de choisir le niveau d'abstraction approprié à la réalisation d'une activité ;
- de connaître et comprendre l'utilité de la modélisation UML dans la conception et la réalisation d'un logiciel ;
- de concevoir et réaliser une interface homme-machine simple ;
- d'appliquer des principes de bonne conception pour le développement des logiciels évolutifs et facilement maintenables ;
- de comprendre l'utilité de la programmation parallèle et savoir utiliser les outils nécessaires à sa mise en œuvre.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C2.1 : Approfondir un domaine des sciences de l'ingénieur ou une discipline scientifique  
C6.3 : Spécifier, concevoir, réaliser et valider un logiciel

# 2EL1540 – Informatique théorique

Responsables : **Marc Aiguier, Pascale Le Gall**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT INFORMATIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Cet enseignement donne une partie des fondements de la science informatique sur ses deux paradigmes de calcul que sont la réduction (calcul pas à pas) et la résolution (inférence logique/démonstration automatique).

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Cours Algorithmes et Complexité (ST Modélisation)

Goût pour l'abstraction mathématique et pour le raisonnement

## Plan détaillé du cours (contenu)

Il sera alors abordé dans ce cours les notions fondamentales sous-jacentes aux thèmes

- de l'induction et la récurrence (ensemble bien-fondé et équivalence avec l'induction mathématique). L'objectif est de formaliser les notions fondamentales d'induction et récursivité sous-jacentes à toutes les mathématiques discrètes.
- de l'algorithmique (fonctions récursives de Gödel/Herbrand, machine de Turing et tous les résultats d'indécidabilité associés). L'idée est de définir formellement (i.e. mathématiquement) ce qu'est un problème de décision et donner une dénotation formelle à la notion d'algorithme (thèse de Church).
- de la logique (syntaxe, sémantique et systèmes de preuves). L'intérêt des logiques est d'exprimer de façon formelle les propriétés des systèmes et de raisonner, de façon automatique ou assistée, à propos de ces propriétés. Les logiques propositionnelles et du premier ordre seront détaillées.

Le cours est composé des parties suivantes :

- Fondements de l'induction et la récursivité.

On y abordera plus particulièrement les notions de : Théorie des ensembles : Ordre et préordre, Majorants et minorants, Ensembles bien fondés et induction; Systèmes formels, preuves, correction et complétude.

- Logique propositionnelle.

La logique propositionnelle sera présentée selon les composantes classiques : syntaxe, sémantique et preuve. En particulier, les points suivants seront abordés : arbres binaires de décision, méthode des tableaux, algorithme DPLL, satisfiabilité des formules propositionnelles (problèmes SAT et 3-SAT), SAT-solveurs, les systèmes de preuve de la résolution, déduction naturelle, séquents.

- Théorie de la calculabilité et de la complexité.

On verra plus précisément : les fonctions primitives récursives, les fonctions récursives, les problèmes décidables, indécidabilité du problème de l'arrêt, fonction récursive universelle (interpréteur) ; les machines de Turing, théorèmes d'équivalence, thèse de Church ; la théorie de la complexité en lien avec les modèles de calcul (complexité en temps, classes P et NP, structuration de la classe NP - problèmes NP-complets et NP-durs, un premier problème NP-complet) ; la décidabilité et NP-complétude du problème 3-SAT.

- Logique des prédicats

La logique des prédicats est une extension de la logique propositionnelle et est la logique privilégiée pour décrire les structures de données informatiques. On verra que la logique des prédicats est indécidable et la programmation logique sera introduite.

## Déroulement, organisation du cours

Le cours sera divisé en 13,5h de cours magistraux et 15h de tds.

Un ou plusieurs travaux personnels (projet avec réalisation informatique ou problème à résoudre) seront proposés et constitueront la note de l'évaluation obligatoire.

## Organisation de l'évaluation

L'évaluation se fera au moyen d'un projet et d'un examen écrit d'une durée de 2 heures.

La note finale sera partagée en 50% pour l'évaluation obligatoire et 50% pour l'examen écrit.

Pour cet examen, ne sont autorisés que le polycopié ainsi que les notes personnelles. Les dispositifs électroniques (ordinateurs portables, téléphones portables et tablettes) ne sont pas autorisés.

## Support de cours, bibliographie

Il sera fourni aux élèves un polycopié ainsi que le sujet des tds et leur correction.

## Moyens

- Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : Marc Aiguier et Pascale Le Gall
- Taille des TD : 35 élèves au maximum
- Outils logiciels et nombre de licence nécessaire : les seuls logiciels utilisés (prolog, solveurs, assistants à la preuve) seront des logiciels libres d'accès, que les élèves installeront sur leur machine personnelle

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Comprendre les principes fondamentaux et les outils formels (i.e. mathématiquement fondés) à la base de toutes les méthodes de conception, de vérification et d'implantation des systèmes informatiques.

Savoir formaliser un problème de nature informatique et maîtriser les outils fondamentaux, de nature théorique, méthodologique et logicielle, nécessaires pour raisonner à propos de ces formalisations.

Donner les outils théoriques fondés sur les modèles de calcul et utilisés pour l'analyse de complexité des algorithmes abordés dans le cours Algorithmes et Complexité, ainsi que les méthodes de raisonnement fondées sur la logique mathématique.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Savoir formaliser un problème de nature informatique et maîtriser les outils fondamentaux, de nature théorique, méthodologique et logicielle, nécessaires pour raisonner à propos de ces formalisations. Donner les outils théoriques fondés sur les modèles de calcul et utilisés pour l'analyse de complexité des algorithmes abordés dans le cours Algorithmes et Complexité, ainsi que les méthodes de raisonnement fondées sur la logique mathématique.

# 2EL1550 – Calcul haute performance

Responsables : **Stephane Vialle**

Département de rattachement : **CAMPUS DE METZ**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours permettra aux étudiants de :

- Comprendre les enjeux et les difficultés de la simulation numérique intensive dans tous les domaines de la recherche et du développement.
- Appréhender l'algorithmique parallèle et maîtriser les étapes de la parallélisation d'un code de calcul.
- Connaître et avoir expérimenté des bibliothèques et environnements de calcul parallèle.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

- Cours commun « Systèmes d'Information et Programmation » de SG1 (1CC1000)
- Cours commun « Algorithmique et complexité » de ST2 (1CC2000)
- *Ainsi que des connaissances de bases en algèbre linéaire*

## Plan détaillé du cours (contenu)

- **Architectures parallèles et distribuées** : composants d'un supercalculateur ; hiérarchie de mémoires ; aspects énergétiques ; besoin de tolérance aux pannes.
- **Optimisation et parallélisation de boucles en mémoire partagée** : optimisation sérielles et vectorisation, algorithmique et programmation multithreads avec OpenMP, analyse et réécriture de boucles.
- **Algorithmique distribuée par envoi de messages** : circulation de données et communications point-à-point en MPI (mpi4py) ; déploiement d'application et exécution distribuée en MPI (OpenMPI + mpi4py) ; distribution de données et communications collectives en MPI (mpi4py) ; algèbre linéaire, méthodes directes et méthodes itératives.
- **Calcul scientifique parallèle** : stratégies pour la résolution de problèmes linéaires de grande taille ; méthodes itératives de sous-structurations ; méthodes de décomposition de domaines.
- **Mesure et analyse de performances** : méthodologie de mesure ; métriques et limites d'accélération et d'efficacité ; métriques et limites de passage à l'échelle.

## Déroulement, organisation du cours

Les approches mathématiques et les algorithmes présentées en cours seront mis en oeuvre lors de TD sur *clusters de calculs*, et des performances seront mesurées et analysées lors de chaque expérimentation. L'expérimentation sera une part importante du cours, et permettra de bien appréhender les concepts étudiés.

- **Composition du cours en présentiel** : 18h00 de CM, 1h30 de TD, 9h00 de TD sur machines (3 TP), et 2h00 d'examen écrit final
- **Composition du cours en autonomie** : lecture de polycopié, exercices de programmation multithread, TP noté de calcul distribué.
- **Séquencement possible du cours** :
  - 5 x 1h30 de CM ;
  - *Autonomie* : *exercices de parallélisation de boucles et de programmation multithreads en OpenMP*
  - 2 x 1h30 de TD sur machines (TP) ;
  - 3 x 1h30 de CM
  - 1x1h30 de TD de programmation distribuée
  - *Autonomie* : *approfondissement du cours de MPI à partir d'un polycopié et de l'analyse numérique à partir d'un livre (distribués aux élèves)*
  - 2 x 1h30 de TD sur machines (TP) ;
  - *Autonomie* : *TP noté de programmation distribuée sur clusters de PC, avec enseignants joignables à certaines heures (office hours)*
  - 4 x 1h30 de CM
  - *Autonomie* : *exercices sur les méthodes de résolution*
  - 2 x 1h30 de TD sur machines (TP) ;
  - 2h00 d'EE final
- **Organisation des TD en présentiels (36% du volume total en présentiel)** :
  - 1 TD + 6 TD sur machines qui seront groupés par 2 (i.e. par blocs de 3h),
  - les codes développés seront exécutés sur les clusters de calculs du *Data Center d'Enseignement* de CentraleSupélec, accessibles à partir de salles informatiques, ou à partir des ordinateurs des élèves.

## Organisation de l'évaluation

**Poids relatifs des différents examens:**

- 50% : Comptes rendus de TDs sur machines
- 50% : Examen écrit de 2h00 (en fin de cours)
- En cas d'absence justifiée à l'un des TDs sur machines, la note de ce dernier est remplacée par celle du contrôle final. En cas d'absence injustifiée une note de 0/20 sera appliquée pour ce TD sur machines.
- L'examen de rattrapage consistera entièrement en un examen écrit, similaire à l'examen initial.

## Support de cours, bibliographie

**Supports de cours fournis aux étudiants :**

- Frédéric Magoulès, François-Xavier Roux, Guillaume Houzeaux. *Parallel Scientific Computing*. Wiley & Sons, Inc., 2015. Hardcover 354 pages (in English). *This course support is available in other languages: in French (Dunod, 2017), in Spanish (CIMNE, 2014), in Japanese (Morikita Publishing Co Ltd, 2015), in Hungarian (Pollack Press, 2018).*
- Numerical Methods: Slides of the lectures
- Parallel and Distributed Computing: Slides of the lectures.

**Autres livres suggérés :**

- W. Gropp, E. Lusk, A. Skjellum. "Using MPI". MIT Press. 1999.



- R. Chandra, R. Menon, L. Dagum, D. Kohr, D. Maydan, J. McDonald. "Parallel Programming in OpenMP". Morgan Kaufmann Publishers. 2000.
- B. Chapman, G. Jost, R. Van Der Pas.. "Using OpenMP". MIT Press. 2007.

## Moyens

- **Equipe pédagogique : Frédéric MAGOULES et Stéphane VIALLE**
- 64% de cours et 36% de TD, avec des groupes de TD de 25 étudiants travaillant sur des machines à haute performance.
- Accès à différents serveurs et clusters de calculs (Data Center d'Enseignement de CentraleSupélec, et/ou mésocentre CentraleSupélec-ENS Paris Saclay).
- Expérimentation avec des logiciels Open-source standards : C/C++/Python, bibliothèque de multithreading pour multicœurs (OpenMP), bibliothèque d'envois de messages pour clusters de calculs (MPI: MPICH2/OpenMPI), bibliothèque scientifiques optimisées (OpenBLAS).

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue du cours les étudiants seront capables de :

1. **[Acquis d'Apprentissage 1\* (AA1\*)]** contribuant aux compétences **C1 C2 C6** :
  - a. adapter des méthodes numériques pour le calcul à haute performance (HPC)
  - b. concevoir des méthodes numériques pour le calcul à haute performance (HPC) afin de résoudre des problèmes complexes
- **[Acquis d'Apprentissage 2\* (AA2\*)]** contribuant aux compétences **C1 C2 C6** :
  - concevoir des algorithmes parallèles de simulation intensive selon les règles du calcul à haute performance (HPC)
  - implanter des algorithmes parallèles de simulation intensive sur supercalculateurs ou sur clusters de PC multi-cœurs
  - gérer un quota d'heures de calculs lors de l'exécution d'une simulation intensive
- **[Acquis d'Apprentissage 3\* (AA3\*)]** contribuant aux compétences **C1 C2 C6** :
  - mettre en œuvre une simulation à haute performance complète et cohérente :
    - choisir des modèles adaptés en précision et extensibles (pour un passage à l'échelle)
    - choisir des stratégies d'implantations parallèles et efficaces
    - réaliser une campagne de simulation en temps et ressources limitées

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- **C1** : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques
- **C2** : Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers
- **C6** : Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

# 2EL1560 – Modèles et systèmes pour la gestion des données massives

Responsables : **Nacera Seghouani**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT INFORMATIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Les technologies de gestion de données ne cessent d'évoluer pour s'adapter à l'hétérogénéité des données (structurées, document, texte, image, video,...), à leur volumétrie et à leur vitesse. Les bases de données NoSQL (Not only SQL) désignent une famille de Systèmes de Gestion de Base de Données (SGBD) qui s'écarte du paradigme traditionnel des SGBDs relationnels. Le but est de répondre aux besoins de mise à l'échelle horizontale (clusters de machines) de centres de données décrites à l'aide de schémas flexibles, d'accès en temps réel, de disponibilité et de performance dans une infrastructure distribuée.

L'objectif du cours *Modèles et Systèmes pour la Gestion des Données Massives* est d'étudier les fondements théoriques, les modèles conceptuels et les technologies permettant de stocker et de manipuler des données massives. Le passage du SQL au NoSQL, les différents modèles de représentation de données NoSQL, les requêtes de manipulation et d'analyse de données, les critères de mesure des performances dans un environnement distribué sont les principaux aspects traités dans ce cours.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

Connaissances élémentaires sur les bases de données relationnelles et du langage de requêtes SQL.

Connaissances élémentaires en réseau (architecture Client/Serveur) souhaitées.

## Plan détaillé du cours (contenu)

1. Modèles conceptuels de représentation de données SQL (relationnels) et NoSQL (document, clé-valeur, colonne, graphe).
2. Langages de requêtes de manipulation et analyse des données.
3. Concepts transaction, propriétés ACID, théorème CAP.
4. Concepts fondamentaux liés à la distribution des données sur un cluster.
5. Travaux dirigés de modélisation et mise en pratique utilisant des données réelles (réseaux sociaux, Wikipédia, ...).
6. Logiciels : postgres, MongoDB, Neo4J, Spark-MapReduce.

## Déroulement, organisation du cours

Le cours est organisé comme suit :

- 11 créneaux de 1h30 de cours magistral.
- 4 créneaux de 3h TP.

## Organisation de l'évaluation

Contrôle continu pendant TDs/TPs, mini-projet, examen écrit (2h) :

60% Examen écrit,

20% mini-projet (dernier TP),

et 20% contrôles continus (tests liés aux TP, 2 meilleures notes).

## Moyens

Slides, TDs/TPs/ QCMs et corrigés, références bibliographiques.

Utilisation de logiciels de gestion de bases de données installés sur MyDocker.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de :

- choisir un modèle de gestion de données adapté à l'application et à la nature des données.
- définir, déployer et manipuler une base de données SQL et NoSQL.
- acquérir les concepts fondamentaux liés aux données distribuées.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.2 Utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes pour traiter le problème

C6.4 Résoudre des problèmes dans une démarche de pensée computationnelle.

C6.5 Exploiter tout type de données, structurées ou pas, y compris massives.

# 2EL1580 – Intelligence Artificielle

Responsables : **Fabrice Popineau**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT INFORMATIQUE**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Qu'est-ce que la recherche d'informations sur le Web, la réalisation d'assistants personnels, la conduite autonome ou la planification automatique ont en commun ?

Ce sont tous des problèmes complexes du monde réel que l'intelligence artificielle (IA) vise à résoudre en les abordant avec des méthodes rigoureuses.

Dans ce cours, vous étudierez les principes fondamentaux qui guident ces applications et vous mettrez en œuvre certains de ces systèmes.

Les sujets spécifiques incluent l'apprentissage automatique, l'exploration, le jeu, les processus de décision de Markov, la satisfaction de contraintes, les modèles graphiques et la logique.

L'objectif principal du cours est de vous fournir un cadre pour attaquer les nouveaux problèmes d'IA que vous pourrez rencontrer ultérieurement.

Les aspects éthiques et philosophiques de l'IA seront également abordés.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Pré-requis : **bonnes compétences en programmation Python.**

Cours Systèmes d'Information et Programmation

Cours Algorithmique et Complexité

Notions de base en probabilités : variable aléatoire, théorème de Bayes

## Plan détaillé du cours (contenu)

- Introduction – Présentation du domaine
- Agents et architectures d'agents
- Apprentissage automatique et agents réflexe
  - Prédicteurs linéaires
  - Fonction de perte et optimisation
  - Réseaux de neurones
- Représentation par états et exploration
  - a. Agents qui planifient
  - b. Exploration adversariale
  - c. Fonctions d'utilité
  - d. Processus décisionnels de Markov
  - e. Apprentissage par renforcement

- Représentation à base de variables
  - Connaissance incertaine
  - Raisonnement probabiliste
  - Réseaux bayésiens
  - Prise de décisions simples et complexes
- Représentation basée sur la logique
  - Propositions et prédicats
  - Syntaxe vs sémantique
  - Systèmes d'inférence
- Conclusion
  - Approfondissement sur l'apprentissage profond
  - Futur de l'IA

## Déroulement, organisation du cours

Après la première session d'introduction (1,5 heure), toutes les sessions durent 3 heures et consistent en un mélange de cours magistraux et de travaux dirigés.

Les étudiants recevront des notes de cours avant chaque sujet abordé.

Les notes de cours seront commentées et des réponses seront apportées aux questions en début de session. Ensuite, la session se poursuivra avec des exercices permettant d'appliquer les nouvelles notions.

À la fin de chaque sujet abordé, du temps sera pris pour s'assurer que les étudiants progressent correctement dans leurs travaux de programmation.

## Organisation de l'évaluation

L'évaluation se fera intégralement sur la base d'exercices de codage.

Les étudiants recevront des spécifications de tâches pour lesquels ils devront construire un programme "agent" capable de prendre en charge la tâche demandée. Les soumissions des étudiants seront évaluées automatiquement sur la base de leur performance.

Les travaux de programmation seront distribués selon un calendrier présenté en début de module.

Chaque travail aura une fenêtre temporelle de remise.

Des pénalités seront appliquées pour les remises tardives.

## Support de cours, bibliographie

Intelligence artificielle (4<sup>ème</sup> éd.) (Français)

Auteurs : Stuart Russel, Peter Norvig

ISBN : 9782326002210 (Français)

Editeur : Pearson

## Moyens

- Equipe enseignante : Fabrice Popineau (responsable du module)
- Taille des TD (par défaut 25 élèves) : 25 élèves, possibilité d'encadrer 100 étudiants avec les enseignants (Hugo Thimonier, Arpad Rimmel, ...)
- Outils logiciels et nombre de licences nécessaires : Pas de licences. Outils libres : Python et son écosystème essentiellement.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À l'issue de ce module, les élèves seront capables :

- d'identifier les problèmes pour lesquels les techniques d'intelligence artificielle sont adaptées, et quand c'est le cas identifier la ou les techniques adéquates,
- de formaliser un problème donné dans le langage / le cadre de différentes techniques d'IA,
- de mettre en œuvre des algorithmes élémentaires d'IA (par exemple, les algorithmes d'exploration standards),
- de concevoir et mettre en œuvre une évaluation de différents algorithmes sur une formalisation d'un problème, et tirer les conclusions de cette évaluation.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.2 Choisir le modèle adapté (parmi plusieurs possibles) pour un problème donné grâce aux bons choix d'échelle de modélisation et d'hypothèses simplificatrices

C2.1 Approfondir l'ensemble de ses connaissances sur un domaine choisi, via les enseignements de 2A

C6.1 Développer des méthodes heuristiques afin de résoudre des problèmes de haute complexité

C6.3 Analyser des données (analyse prédictive, prise de décision)

# 2EL1590 – Cloud computing et informatique distribuée

Responsables : **Francesca Bugiotti, Gianluca Quercini**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT INFORMATIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

De nos jours, la stratégie marketing des entreprises repose de plus en plus sur l'analyse de données massives et hétérogènes qui nécessite d'une grande puissance de calcul.

Au lieu d'investir sur l'acquisition de matériel et de logiciel, les entreprises souvent font recours à la puissance de calcul et de stockage mise à disposition par des plateformes de *cloud computing* via internet.

L'objectif du cours est de présenter les concepts fondamentaux des systèmes distribués et du calcul distribué qui sont à la base du *cloud computing*.

Le cours abordera les principes de la virtualisation et de la conteneurisation, ainsi que les méthodes et les outils pour effectuer des calculs distribués (par exemple, *MapReduce*, *HDFS*, *Spark*).

Le cours introduira aussi des techniques et des algorithmes avancés pour l'analyse de données massives et hétérogènes (*PageRank*, apprentissage supervisé, *clustering*) et une introduction à un ensemble techniques de stockage optimisées Spark-compliant (*Parquet*).

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Programmation en Python, bases de données, des notions en réseaux seront aussi appréciées.

## Plan détaillé du cours (contenu)

### Introduction

- Cloud computing : motivation et terminologie.
- Présentation des cloud publiques (Amazon AWS, Microsoft Azure)
- Démarrage d'une machine virtuelle sur le cloud Microsoft Azure

### Virtualisation

- Principes de base de la virtualisation.
- Principes de la conteneurisation.
- Architecture de Docker.
- Images, conteneurs, volumes et réseaux en Docker.
- Déploiement d'applications avec Docker.

## Applications multi-services et orchestration

- Architecture microservices.
- Principes de l'orchestration.
- Présentation de Kubernetes.
- Déploiement d'applications avec Kubernetes.
- Déploiement d'applications dans le cloud.

## Programmation cloud et environnements logiciel.

- Calcul parallèle, paradigmes de programmation.
- Hadoop MapReduce.
- Apache Spark.
- Apache Parquet.

## Analyse de données.

- Environnements Cloud et stockage de données.
- Données distribués.
- Dataframes.

# Déroulement, organisation du cours

## Introduction.

- **Cours magistral** : 3h
- **Virtualisation et conteneurisation.**
  - **Cours magistral** : 3h
  - **TD** : 3h
- **Applications Multi-service.**
  - **Cours magistral** : 3h
  - **TD** : 3h
  - **TP (noté)** : 1,5h
- **Programmation cloud et environnements logiciel.**
  - **Cours magistral** : 7,5h
  - **TD** : 3h
  - **TP (noté)** : 1,5h
- **Exam**: 2h

16,5h cours magistral, 9h TD, 3h TP, 2h exam.

Des ponts réguliers de suivi seront programmés pendant le cours, notamment pour la finalisation des TP notés. L'équipe enseignante sera aussi disponible à des créneaux horaires fixés pour suivre le travail individuel requis pour le cours et répondre aux questions des élèves.

## Organisation de l'évaluation

Examen écrit à la fin du cours (QCM + exercices) sur la plateforme Evalmee (examen dématérialisé).

- 2 TP notés.
- Chaque TP compte pour 30% de la note finale et l'examen écrit pour 40%

## Support de cours, bibliographie

1. Hwang, Kai, Jack Dongarra, and Geoffrey C. Fox. *Distributed and cloud computing: from parallel processing to the internet of things*. Morgan Kaufmann, 2013.
2. Erl, T., Puttini, R., & Mahmood, Z. (2013). *Cloud computing: concepts, technology & architecture*. Pearson Education.
3. Tel, G. (2000). *Introduction to distributed algorithms*. Cambridge university press.



4. Miner, D., & Shook, A. (2012). *MapReduce Design Patterns: Building Effective Algorithms and Analytics for Hadoop and Other Systems*. O'Reilly Media, Inc..
5. Karau, H., Konwinski, A., Wendell, P., & Zaharia, M. (2015). *Learning spark: lightning-fast big data analysis*. O'Reilly Media, Inc.
6. Schenker, Gabriel. *Learn Docker - Fundamentals of Docker 19.x*. Packt Publishing,. Print.
7. Lisdorf, Anders. *Cloud Computing Basics: A Non-technical Introduction*. Apress, 2021.
8. Linthicum, David. *An Insider's Guide to Cloud Computing*. Addison-Wesley, 2023

## Moyens

Equipe enseignante : Francesca Bugiotti, Gianluca Quercini, Idir Ait Sadoune, Marc-Antoine Weisser, Arpad Rimmel

Taille des TP : 25 élèves

Outils logiciels et nombre de licence nécessaire : Utilisation de logiciels licence libre

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce cours, l'élève sera capable de :

- Comprendre les concepts à la base du cloud computing.
- Maîtriser la notion de virtualisation et conteneurisation dans le cloud.
- Connaître les différentes plateformes cloud.
- Utiliser les paradigmes de calcul distribué, tels que MapReduce et Spark.
- Concevoir des algorithmes de calcul distribué sur les données.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Exploiter tout type de données, structurées ou pas, y compris massives.

- Spécifier, concevoir, réaliser et valider un logiciel.

# 2EL1710 – Probabilités avancés

Responsables : **Erick Herbin**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MATHÉMATIQUES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours théorique fait suite au cours de Mathématiques de 1<sup>ère</sup> année, qui comprend les concepts de base de la théorie des probabilités. Il introduit les fondements de la théorie générale de processus stochastiques, prenant en compte l'évolution temporelle de concepts aléatoires.

Ces modèles probabilistes constituent les objets mathématiques de base pour modéliser des phénomènes à forte variabilité, incertains ou dont la complexité rend impossible une description déterministe fine. Parmi eux, le mouvement brownien est largement utilisé pour décrire les phénomènes (naturels, physiques, biologiques ou financiers) à base d'équations différentielles stochastiques. Il se situe au carrefour de classes importantes telles que martingales, processus de Markov ou processus gaussiens, dont il hérite des propriétés.

L'objectif de ce cours est l'étude théorique des deux premières familles de processus stochastiques, dans le cas particulier où les paramètres sont dans un espace discret, puis d'introduire les processus gaussiens indicés par les réels. Le cours revêt le format classique d'un cours de mathématiques dans lequel les théorèmes fondamentaux sont démontrés au tableau.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

Cours de CIP du cursus CentraleSupélec ou les cours de dernière année de Licence de Mathématiques :

Intégration, théorie de la mesure, Probabilités.

## Plan détaillé du cours (contenu)

Martingales à temps discrets : étude des martingales à temps discrets ; martingales et stratégie de jeu ; résultats de convergence

Chaînes de Markov : opérateurs de transition, propriété de Markov et chaîne de Markov canonique ; classification des états, récurrence/transience ; résultats asymptotiques

Processus gaussiens et introduction au mouvement brownien : loi d'un processus stochastique ; processus gaussiens, bruit blanc et introduction au mouvement brownien

## Déroulement, organisation du cours

Cours magistraux entièrement au tableau (résultats, preuves et exemples) : 19h30

Travaux dirigés : 9h

## Organisation de l'évaluation

Home Works, Evaluation continue sous forme de devoirs libres, Contrôle final écrit : 2h (sans document, ni calculatrice, ni ordinateur).

## Support de cours, bibliographie

Notes de cours et éléments de correction d'exercices en ligne

## Moyens

Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : Erick Herbin

Un seul groupe de TD (effectif complet) : Philippe Bouafia

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

L'objectif de ce cours est l'étude théorique des deux premières familles de processus stochastiques, dans le cas particulier où les paramètres sont dans un espace discret, puis d'introduire les processus gaussiens indicés par les réels.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Fondements théoriques de l'étude des processus stochastiques à temps discret et des processus aléatoires gaussiens. A l'issue de ce cours, les étudiants seront prêts à suivre un cours de Calcul Stochastique de 2ème année de Master de Mathématiques.

C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

C2.1 : Approfondir un domaine des sciences de l'ingénieur ou une discipline scientifique

C2.2 : Importer des connaissances d'autres domaines ou disciplines

C2.3 : Identifier et acquérir de façon autonome les nouvelles connaissances et compétences nécessaires

C7 : Savoir convaincre

C7.1 : Structurer ses idées et son argumentation

# 2EL1720 – Distributions et opérateurs

Responsables : **Pauline Lafitte**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MATHÉMATIQUES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours théorique revient à la genèse des concepts d'analyse fonctionnelle présentés dans le cours de CIPEDP de 1ère année.

Historiquement, les distributions et les opérateurs ont été introduits pour donner un cadre mathématique adapté à la formalisation de problèmes issus de la physique. Ainsi ont été généralisés les concepts de fonctions en fournissant une théorie pour traiter de manière rigoureuse des questions fondamentales de l'analyse (interversions de limites, interversion limite-intégrale, transformée de Fourier...).

Ces concepts permettent d'apporter une réponse : dans quel espace fonctionnel doit-on chercher la solution du problème pour qu'il soit bien posé au sens de Hadamard, c'est-à-dire pour qu'il ait une et une seule solution qui dépende continûment des données ? En particulier, le concept de topologie (générale) sur de tels espaces revêt un rôle essentiel pour étudier la question de la continuité et plus généralement celle de la convergence. Selon les cas considérés, elles peuvent être définies par une distance, une norme ou une famille de semi-normes.

Dans le cadre de la théorie générale des processus stochastiques (ou fonctions aléatoires), les distributions et opérateurs constituent les outils mathématiques de base pour étudier les processus gaussiens ou des extensions du mouvement brownien classique. Les concepts étudiés dans ce cours sont à la base de la représentation de ces processus sous forme spectrale ou intégrale, qui permet leur étude fine (propriétés géométriques, propriétés de Markov, définition d'une intégrale stochastique, etc.)

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

CIP-EDP

## Plan détaillé du cours (contenu)

Ce cours de mathématiques fondamentales est organisé autour de l'étude théorique des notions suivantes :

- Théorèmes de Hahn-Banach
- Opérateurs non bornés
- Topologies faibles
- Concepts avancés de distributions

Au sein de chacun de ces thèmes, la majeure partie des résultats sont démontrés rigoureusement en cours.

## Déroulement, organisation du cours

Cours magistraux durant lesquels les concepts et les résultats sont exposés et démontrés au tableau. Séances d'exercices d'application sous forme de travaux dirigés.

## Organisation de l'évaluation

Homeworks + Devoirs libres + Contrôle Final obligatoire écrit 2h sans document

## Support de cours, bibliographie

Éléments de correction d'exercices en ligne.

## Moyens

- Equipe enseignante : Pauline Lafitte (CM), Alexandre Richard (TD)
- Taille des TD (par défaut 35 élèves) : un seul groupe de TD (effectif complet)

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Maîtriser les bases de la théorie de l'analyse fonctionnelle : les élèves posséderont les capacités de raisonnement et de rigueur indispensables à l'acte de modélisation et à son analyse.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

C2.1 : Approfondir un domaine des sciences de l'ingénieur ou une discipline scientifique

C2.2 : Importer des connaissances d'autres domaines ou disciplines

C2.3 : Identifier et acquérir de façon autonome les nouvelles connaissances et compétences nécessaires

C7.1 : Structurer ses idées et son argumentation, être synthétique (hypotheses, objectifs, résultats attendus, démarche et valeur créée)

Ce cours constitue un fondement important pour les étudiants souhaitant poursuivre un Master 2 en lien avec les mathématiques fondamentales (par exemple en Analyse, Equations aux dérivées partielles ou Probabilités).

# 2EL1730 – Machine Learning

Responsables : **Nora Ouzir**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MATHÉMATIQUES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours est une introduction aux aspects principaux de l'apprentissage statistique (ou machine learning). L'apprentissage est présenté sous l'angle du risque statistique et de sa minimisation par rapport à une fonction de prédiction. Une section pratique, qui comprend un projet en groupe sur une compétition de data science, donne l'opportunité aux étudiants d'appliquer les concepts théoriques du cours à des problèmes réels.

Ce cours vise à familiariser les étudiants avec :

- Les concepts fondamentaux de l'apprentissage statistique, tels que le risque, la régularisation, le sur-apprentissage, la complexité d'un modèle, ou encore la validation croisée.
- Un éventail d'algorithmes d'apprentissage pour la classification et la régression, incluant les méthodes bayésiennes, les régressions logistique et linéaire, les approches plus proches voisins, les arbres de décision et forêts aléatoires, les méthodes à noyau, les réseaux de neurones, la réduction de dimension, le clustering; ainsi que les techniques d'optimisation associées.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

Notions d'algèbre linéaire, de probabilités/statistiques et de programmation scientifique en Python (numpy).

## Plan détaillé du cours (contenu)

Le cours abordera les sujets suivants :

- Introduction à l'apprentissage machine
- Sélection et évaluation des modèles
- Régression linéaire et logistique
- La classification probabiliste et l'analyse discriminante linéaire
- Apprentissage non paramétrique et méthodes des plus proches voisins
- Les arbres de décision et l'apprentissage ensembliste
- Machines à vecteurs de support (SVM)
- Réseaux de neurones
- Réduction de dimension
- Apprentissage non supervisé : classification non supervisée (clustering)

## Déroulement, organisation du cours

Chaque séance de cours est divisée en 1h30 de cours magistral et 1h30 de travaux pratiques (TP). Les travaux pratiques incluront des exercices théoriques ainsi que de l'implémentation pratique en Python.

## Organisation de l'évaluation

L'évaluation du cours sera basée sur les éléments suivants :

- Un devoir individuel comprenant des questions théoriques ainsi que des questions pratiques. L'objectif du devoir est de résoudre des problèmes du point de vue théorique à l'instar du travail réalisé en TP. Ces exercices ont aussi vocation à familiariser les étudiants avec les types de questions proposées à l'examen final.
- Un projet en groupe de 3 personnes : les étudiants proposeront un sujet pour leur projet et soumettront un rapport écrit.
- Un examen final : examen type QCM (questionnaire à choix multiples). Une première partie de l'examen porte sur les connaissances acquises en cours. Une deuxième partie vise à résoudre des exercices théoriques (comme ceux abordés en TP ou devoir individuel).

La note finale sera pondérée comme suit : devoir individuel 20%, projet 20%, et examen final 60% de la note.

## Support de cours, bibliographie

Il n'y aura pas de manuel unique ou de poly pour ce cours. Les diapositifs utilisés en cours seront fournis aux étudiants et des chapitres spécifiques des livres suivants seront recommandés pour chaque thème du cours (via Edunao) :

- Shai Shalev-Shwartz and Shai Ben-David. *Understanding Machine Learning: From Theory to Algorithms*. Cambridge University Press, 2014.
- Christopher M. Bishop. *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer, 2011.
- Trevor Hastie, Robert Tibshirani, and Jerome Friedman. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. Second Edition, Springer, 2017.
- Jure Leskovec, Anand Rajaraman, and Jeff Ullman. *Mining of Massive Datasets*. Cambridge University Press, 2014.

## Moyens

Les ressources et références sont disponibles sur la page **Edunao** du cours. Le forum Eduano servira de plateforme pour les annonces des professeurs. Les étudiants sont priés d'utiliser le forum pour poser leurs questions sur l'organisation ou le contenu du cours.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue du cours, les étudiants seront en mesure de :

- Identifier les problèmes qui peuvent être résolus à l'aide de méthodes d'apprentissage machine.
- Identifier et appliquer le ou les algorithmes les plus appropriés pour chaque problème.
- Implémenter intégralement certains de ces algorithmes.
- Évaluer et comparer les algorithmes d'apprentissage machine pour une tâche en particulier.
- Relever les défis du monde réel en matière de données.

# 2EL1740 – Algèbre et cryptologie

Responsables : **Remi Geraud**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MATHÉMATIQUES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Non**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours est une introduction aux outils mathématiques modernes, et leur matérialisation en applications technologiques et scientifiques.

À la croisée des mathématiques fondamentales, de l'informatique et de la théorie de l'information, nous aborderons des questions telles que

- Comment envoyer un message depuis une sonde spatiale ?
- Comment garantir l'authenticité d'un document numérique ?
- Comment trouver de très grands nombres premiers ? Ou factoriser de grands nombres ?
- et beaucoup d'autres

Le thème directeur de notre exploration sera la théorie du logarithme discret et des réseaux euclidiens, qui soutient une immense partie des concepts cryptologiques des 20e et 21e siècles et croise de nombreuses questions fondamentales de mathématiques.

L'objectif de ce cours est de doter les étudiants :

- D'un bagage culturel sur le développement des mathématiques au 20e et 21e siècle, avec un langage qui leur permettra d'approfondir ces questions
- D'une maîtrise opérationnelle du calcul dans les structures algébriques, en particulier anneaux, corps finis et courbes elliptiques
- D'une compréhension des fondements mathématiques de la cryptologie moderne

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Ce cours ne suppose pas de connaissances spécifiques au-delà de notions mathématiques générales normalement acquises en classes préparatoires.

Une familiarité avec la programmation informatique est fortement recommandée.

Attention, **ce cours demande un travail sérieux et conséquent**, pour assimiler et s'approprier les notions discutées.



## Plan détaillé du cours (contenu)

En 2023 le cours détaillait notamment les points suivants :

- Applications des groupes cycliques [Diffie-Hellman'76, Schnorr'89, ElGamal'85]
- Constructions élémentaires sur les corps finis [Reed-Solomon'60, Shamir'79, Toom-Cook'66]
- Outils arithmétiques élémentaires [Miller-Rabin'80, Pollard'74, Dixon'81]
- Groupe de Picard des anneaux de Dedekind et des variétés projectives lisses
- Réduction de réseaux et applications [LLL'82, Lagarias-Odlyzo'85, Wiener'02, Coppersmith'96]
- Courbes elliptiques sur les corps finis et applications [Lenstra'85, Koblitz-Miller'86, NIST'05]
- Apprentissage avec erreurs et applications [Regev'05, Dilithium'22]

## Déroulement, organisation du cours

- Les cours sont présentés au tableau
- Des notes de cours, reprenant les éléments importants, sont fournies après les séances
- Des exemples commentés de calcul formel sont mis à disposition
- Les TDs prennent la forme d'une application détaillée des notions acquises et permet de les mettre en contexte et d'en discuter les spécificités ou les limites
- Un contrôle continu permet de s'approprier les notions importantes du cours et de les mettre en œuvre

## Organisation de l'évaluation

Contrôle continu

## Support de cours, bibliographie

- David Eisenbud, *Commutative Algebra (with a View Toward Algebraic Geometry)*
- Robin Hartshorne, *Algebraic Geometry*
- William Fulton, *Algebraic curves: An Introduction to Algebraic Geometry*
- Henning Stichtenoth, *Algebraic Function Fields and Codes*
- Michel Demazure, *Cours d'algèbre*
- Joseph H. Silverman, *The Arithmetic of Elliptic Curves*
- Joseph H. Silverman, *Advanced Topics in the Arithmetic of Elliptic Curves*
- Jean-Pierre Serre, *Cours d'arithmétique*
- Michael Tsfasman, Serge Vlăduț, Dmitry Nogin, *Algebraic Geometric Codes: Basic Notions*

## Moyens

- Cours magistral au tableau, certains exercices nécessitent l'utilisation de l'ordinateur. Le cas échéant on précisera les logiciels à installer.
- Equipe enseignante : Rémi Géraud-Stewart (remi.geraud@ens.fr)

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de ce cours, les élèves seront capables de :

1. Identifier les structures algébriques manifestes dans les problèmes rencontrés
2. Comprendre les enjeux et les outils de la cryptologie et de la théorie des codes, et (re)connaître leurs principales applications industrielles
3. Maîtriser le langage dans lequel sont formulés et analysés les problèmes algébriques

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

1. Identifier les structures algébriques manifestes dans les problèmes rencontrés

- Compétence C.1.2 : reconnaître les structures étudiées en cours
- Compétence C.6.1 : utiliser les outils technologiques appropriés

2. Comprendre les enjeux et les outils de la cryptologie et de la théorie des codes, et (re)connaître leurs principales applications industrielles

- Compétence C.6.7 : comprendre les enjeux de l'échange d'information
- Compétence C.3.6 : comparer les solutions existantes ou proposées aux besoins et contraintes
- Compétence C.6.1 et C.1.4 : invoquer les outils pertinents et bien les configurer

3. Maîtriser le langage dans lequel sont formulés et analysés les problèmes algébriques

- Compétence C.2.3 : apprendre à approfondir ses connaissances pour répondre à un problème donné

# 2EL1750 – Statistiques avancées

Responsables : **Sarah Lemler**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MATHÉMATIQUES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Le cours de Statistiques Avancées a pour objectif de présenter diverses méthodes statistiques permettant de faire de l'estimation, de la prédiction et de déterminer les propriétés des estimateurs proposés. Nous développerons deux grands thèmes :

- la régression linéaire multivariée
- les statistiques non-paramétriques.

Le cours aborde à la fois les aspects théoriques de ces notions mais propose également une mise en pratique des modèles et méthodes considérées à l'aide de TPs avec le logiciel R sur des jeux de données provenant de différents domaines.

A télécharger avant le premier TP :

- le logiciel R <https://www.r-project.org/>
- l'interface RStudio <https://www.rstudio.com/>

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Pour ce cours les prérequis sont les suivants :

Il faut connaître les notions vues en cours de Statistiques et Apprentissage en 1ère année, en particulier :

- les estimateurs,
- les intervalles de confiance,
- les tests,
- les premières notions sur le modèle linéaire

## Plan détaillé du cours (contenu)

Nous développerons deux thèmes :

- la régression linéaire multivariée
- les statistiques non-paramétriques

## Déroulement, organisation du cours

Le cours se fera au tableau (pour la partie la plus théorique) ou à partir de slides projetées lorsqu'il s'agira par exemple de présenter une application faite à partir du logiciel R.

Il y a 30,5 heures prévues pour cet électif, dont 2 heures pour l'examen final.

## Organisation de l'évaluation

Le cours comporte deux évaluations : un devoir maison (DM) obligatoire à composer par binôme à rendre à mi parcours (la date sera précisée lors du premier cours) et un examen final (EX) sur table de 2 heures qui porte sur l'ensemble du programme traité en cours. La note de cet électif sera alors la moyenne pondérée des notes des deux évaluations précédentes ( $(1/3)*DM+(2/3)*EX$ ), arrondie au demi point le plus proche. Le rattrapage est un examen EX2 de même modalités que EX. La note de l'électif après le rattrapage est celle de l'examen EX2 uniquement (sans le DM).

## Support de cours, bibliographie

Le cours de Statistiques et apprentissage de première année de Arthur Tenenhaus

## Moyens

A l'issue de chaque cours, des exercices de TDs ou des TP seront proposés pour se familiariser avec les notions théoriques vues en cours et les mettre en pratique pour répondre à des problèmes concrets éventuellement à partir de jeux de données.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Utiliser des techniques d'estimation statistiques paramétriques et non-paramétriques
- Valider une modélisation et comprendre les limites d'un modèle statistique
- Proposer, implémenter et calibrer un modèle prédictif
- Utiliser le logiciel R et interpréter des résultats

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- Utilisation de techniques d'estimation statistiques paramétriques et non-paramétriques
- Valider une modélisation et comprendre les limites d'un modèle statistique
- Proposer, implémenter et calibrer un modèle prédictif
- Utiliser le logiciel R et interpréter des résultats

# 2EL1760 – Calcul scientifique

Responsables : **Hachmi Ben Dhia**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MATHÉMATIQUES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours est une brique rigoureuse et appliquée, à la fois, contribuant à la conception des systèmes mécaniques complexes et énergétiquement soutenables, via la modélisation, l'analyse mathématique, l'approximation et la simulation numérique contrôlée de problèmes d'ingénieur en mécanique des solides et des fluides, à la fois. Cela couvre des secteurs tels l'énergie, le transport, le Génie Civil ou l'aérospatial, etc.

L'objectif pédagogique est que les élèves suivant ce cours acquièrent une bonne compréhension de cette chaîne intégrant la modélisation, l'analyse mathématique et la simulation numérique performante pour l'aide à la conception des systèmes complexes et soutenables, et ce à travers des problèmes simplifiés, mais pertinents, de la mécanique des solides et des fluides.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Notions de base de la Mécanique des Milieux Continus - Notions de base de calculs intégral et différentiel - Notions de base sur les espaces de Hilbert (Sobolev classiques, en particulier) - Notions premières d'approximations numériques appropriées en espace et en temps pour un solide et pour un fluide - Quelques éléments de programmation. En bref, un niveau de base de première année CS, en Mathématique et en Mécanique ou un niveau de base de M1 de Mathématiques Appliquées à la Mécanique.

## Plan détaillé du cours (contenu)

Le cours comporte deux parties successives : 5,5x3h, Partie Fluides dont (4,5x3h données par l'enseignante et 3h sur le temps libéré pour les élèves) et 5x3h Partie Solides + 1,5h sur temps libéré pour les élèves.

1. Simulation des écoulements de fluides compressibles :
  - Modèles d'écoulements, solutions discontinues, entropie, solveurs basiques, extensions.
  - Mise en oeuvre en TP.
2. Modélisation, analyse et simulation en mécanique du solide :
  - Rappels des équations de l'élasticité linéaire: Equations fortes et faibles
  - Analyse mathématique du problème primal. Méthode des éléments finis vectoriels. Estimation d'erreur a priori.
  - Mise en oeuvre numérique de la MEF (TP d'assemblage EF) temps libéré pour les élèves
  - Approximation d'un problème d'élasticité singulier (lecture de documents en temps libéré).

## Déroulement, organisation du cours

Cours-TD (individuels et Collaboratifs)-TP, Projet + du travail (dans des temps libérés) pour mieux comprendre et avancer des points de cours

## Organisation de l'évaluation

Examens Ecrits, Oraux, TP, projets Evaluation (première session) : Examen écrit et TP/projet Note E : Contrôle écrit de 2 h dont 1h00 pour la mécanique des solides et 1h00 pour la mécanique des fluides, avec tous les documents papiers autorisés Note P : TP et projet Note finale= $(2 \cdot E + P) / 3$  Evaluation (session de rattrapage) : oral ou écrit (selon de nombre d'élèves à rattraper)

## Support de cours, bibliographie

- Polycopié EDP de Première année, Polycopiés pour la partie fluides et la partie solide du cours (et références mentionnées dans ces polycopiés)

- Matlab, Scilab, Python...

## Moyens

Hachmi Ben Dhia (Professeur des Universités, CentraleSupélec), Laboratoire MSSMat et Fédération de Math CS, (Partie Solides & Responsable du cours)

Frédérique Laurent-Nègre (Chercheur CNRS), Laboratoire EM2C et Fédération de Math CS, (Partie Fluides du cours)

(TP, Projets)

Salles informatiques

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Méthodes et outils mathématiques de base pour l'analyse de problèmes continus de Mécanique des solides et des fluides

Méthodes numériques variées pour l'approximation des problèmes continus (Différences Finies, Volumes Finis et Eléments Finis)

Estimation des erreurs entre solution continue et approchées et contrôle mathématique de la convergence

- Analyse de problèmes régis par des Equations aux Dérivées Partielles (EDPs)

- Pratique de la simulation numérique, en lien avec la nature et les propriétés mathématiques de ces EDPs

- Initiation au problème du choix des méthodes numériques adaptées

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Analyse de problèmes d'ingénierie régis par des équations aux dérivées partielles (EDP)- Acquérir des Idées sur la maîtrise de la complexité

Pratique de la simulation numérique, prenant en compte les propriétés mathématiques de ces EDP

Initiation au choix du meilleur ajustement des méthodes numériques.

Prendre conscience de l'intérêt de la recherche de la performance de la résolution de problèmes d'in génieurs pour minimiser l'impact énergétique

Intégrer les intérêts des travaux collaboratifs

# 2EL1810 – Dynamique des Structures et Acoustique

Responsables : **Didier Clouteau**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ENERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Les vibrations jouent un rôle essentiel dans de nombreux domaines : géophysique, résistance des ouvrages au vent et aux séismes, stabilité et confort des véhicules aéronautiques ou terrestres. Les questions d'acoustique sont aussi importantes, par exemple dans les transports, à la fois du point de vue du confort interne que vis à vis de l'environnement. Ces deux domaines sont associés dans le fonctionnement d'instruments de musique, mais également dans le cadre de contrôles non destructifs.

Le but de ce cours est de donner les connaissances essentielles, en termes de méthodes et d'outils pour l'analyse et la quantification des phénomènes de vibration et d'acoustique. Il s'appuiera sur un certain nombre d'applications pour mettre en évidence les concepts fondamentaux de résonance et d'émission.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

Il est fortement recommandé d'avoir suivi le cours de mécanique des milieux continus ou un cours sur les ondes.

## Plan détaillé du cours (contenu)

1. Réponse d'un oscillateur à des chargements stationnaires, transitoires et aléatoires (cours)
2. Ondes mécaniques et acoustiques, résonances (cours et TD)
3. Vibration des poutres (cours et TD)
4. Construction de modèles réduits en dynamique et rappels de mécanique des milieux continus (cours et TD)
5. Réponse dynamique d'un système complexe ( Cours et Bureau d'étude 1.1 : vibrations d'un bâtiment soumis à un séisme et au vent )
6. Bureau d'étude 1.2 et 2.1: vibrations d'un bâtiment soumis à un seisme et au vent (modèle par Eléments Finis )
7. Modèles dynamiques avancés (cours) et BE 2.2
8. Rayonnement acoustique (cours et TD)
9. Résonances acoustiques (cours et TD)
10. Bureau d'étude 3: Analyse d'un papier scientifique par binôme
11. Examen final

## Déroulement, organisation du cours

Cours : 8 séances

TD : 5 séances

Bureau d'étude : 6 séances + travail personnel

## Organisation de l'évaluation

Examen écrit 2h (coeff 0,55) + 3 Contrôles continus en Bureau d'études ( Coeff 0,15 chacun)

## Support de cours, bibliographie

Document de cours + slides des séances de cours + Videos du cours en français et en anglais

## Moyens

Le cours sera donné en amphi en anglais et des videos dans les deux langues seront à la disposition des étudiants.

TD : 35 élèves avec au moins une classe en français et une classe en anglais.

Software Comsol multiphysics et notebook Python

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de l'enseignement les élèves seront capables de:

- Modéliser le comportement vibratoire de structures en adoptant la bonne modélisation (3D, poutres,...)
- Modéliser le comportement acoustique d'un système fermé et le rayonnement d'une source ou d'un système ouvert
- Modéliser les effets dynamiques et aléatoires de l'environnement ( vent, séisme...)
- Mettre en œuvre une stratégie d'approximation en basses fréquences par projection sur une base adaptée ( pour un problème de vibration ou d'acoustique )

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.2 capacité à modéliser le comportement dynamique d'une structure

C1.2 capacité à modéliser des effets incertains d'environnement (vent, séismes )

C1.2 capacité à modéliser des problèmes acoustiques simples

C1.3 Capacité à résoudre les problèmes de dynamique des structures et d'acoustique en basses fréquences , en utilisant les outils associés à une approche modale ( développement sur base , fonction de réponse en fréquence )



# 2EL1830 – Comportement non-linéaire des matériaux

Responsables : **Véronique Aubin**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ENERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

La conception des structures des matériaux et leur optimisation (en termes de durée de vie, de performances, de coût) nécessite de pouvoir prédire la réponse des matériaux considérés pour cette application sous les sollicitations imposées pendant leur durée de vie (charge, température, contrainte, humidité...).

L'objectif de ce cours est de mettre en évidence le comportement mécanique et la durabilité des principales classes de matériaux dans diverses conditions de chargement, de comprendre les bases physiques des micromécanismes impliqués, et d'utiliser une modélisation pertinente pour la conception, dans le cadre de méthodes numériques. Les concepts sont introduits dans le cadre de la mécanique des milieux continus, et utilisent des notions liées au cours de Matériaux.

Applications dans les transports, l'énergie, les systèmes électroniques et le génie civil.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

1EL5000 Mécanique des milieux continus

1CC3000 Modélisation

## Plan détaillé du cours (contenu)

1. Introduction, approche de la modélisation, rappel de mécanique des milieux continus et de thermoélasticité
2. Élasticité anisotrope des matériaux composites: Introduction aux matériaux composites (nature, intérêt au moyen des cartes Ashby, procédé de fabrication). Élasticité linéaire anisotrope. Calcul des propriétés du milieu homogène équivalent.
3. Viscoélasticité des polymères et des élastomères: introduction aux polymères (nature, comportement en fonction de la température). Viscoélasticité. Comportement dépendant du temps.
4. Mécanismes de plasticité dans les alliages métalliques: Structure et défauts des matériaux cristallins. Dislocations et facteur de Schmid. Durcissement des alliages.
5. Élastoplasticité: Description des modifications du domaine élastique. Déformation décomposition. Élastoplasticité 3D incrémentielle.
6. Sécurité des structures - dommages et fractures: introduction au béton (nature et spécificités du comportement et des dommages). Volume de dégâts. Durabilité des fissures.
7. Choix d'un modèle de comportement. (Sur 2 cas donnés, analysez le problème, proposez / créez un modèle capable de prendre en compte les mécanismes physiques observés.)

8. Modèles couplés
9. Conférence, Etude de cas (utilisation des différents concepts du cours sur une application donnée)
10. Etude de cas (utilisation des différents concepts du cours sur une application donnée), révisions avant l'examen
11. Examen final

## Déroulement, organisation du cours

- Sessions 1 à 6: cours magistral + session d'étude dirigée
- Session 7: session de travail
- Session 8: conférence + session d'étude dirigée
- Sessions 9 et 10: session de travail
- Session 11: examen final : 2H

## Organisation de l'évaluation

L'évaluation finale comprend un examen (70% de la note) + un rapport sur une étude de cas (30% de la note). Examen et rapport sur l'étude de cas permettant d'évaluer des compétences différentes, les deux seront exigés au rattrapage le cas échéant.

## Support de cours, bibliographie

Pas de polycopié; mais une liste de livres  
Chaboche and Lemaître, Mechanics of Materials, Dunod  
Roesler, Harders, Baeker, Mechanical Behaviour of Engineering Materials, Springer, 2007  
Besson, Cailletaud, Chaboche, Forest, Non linear Mechanics of Materials, Hermès, 2001

## Moyens

- Personnel enseignant : Véronique Aubin, Camille Gandiolle, Jan Neggens
- Nombre maximum d'inscriptions : 70

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À la fin de ce cours, les étudiants seront capables de :

- analyser une structure matérielle, énumérer les sollicitations qui lui sont appliquées, expliquer les critères auxquels elle doit répondre (performance, économique, etc.).
- interpréter le comportement mécanique expérimental d'un matériau donné à partir des mécanismes physiques impliqués, distinguer entre plusieurs interprétations possibles
- sélectionner, utiliser et enrichir une loi de comportement adaptée aux observations expérimentales
- Convaincre de la valeur d'une solution ou d'une recommandation prouvable ou démontrable

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Le cours permet de progresser dans les compétences C1 et C2.

# 2EL1840 – Construire Demain – La Mécanique Appliquée au Génie Civil

Responsables : **Brice Bossan**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ENERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Il s'agit de matérialiser un projet de construction futuriste, et donc d'exercer simultanément des compétences en innovation et scientifiques, et aussi de travail en mode-projet ...

A travers cette problématique posée d'un environnement contraint et différent de celui connu aujourd'hui les élèves développent leurs capacités d'innovation et acquièrent des compétences en Génie Civil, en Matériaux, en Thermique, et en Construction & Logistique, et aussi Environnementales

Les travaux dirigés se faisant en sous-groupe, les élèves acquièrent alors des compétences de travail en équipe, en pilotage de projet transdisciplinaire, en reporting et en communication scientifique lors des revues de projet et la soutenance finale.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

1EL3000 - Génie industriel ou 1EL4000 - Matériaux ou 1EL5000 - Mécanique des milieux continus ou 1EL7000 - Sciences des transferts

## Plan détaillé du cours (contenu)

Séance 1 (1h30) : amphi de lancement, constitution des 4 groupes projet, bibliographie commentée en 4 groupes de 25 élèves.

Séances 2, 4, 6, 8 (4 fois 3h) : travaux dirigés en 4 groupes de 25 élèves (travaillant en parallèle) avec pour chaque groupe un animateur scientifique présent. Le scientifique délivre alors les cours théoriques (1h30) et appliqués (1h30) dont les élèves ont besoin pour avancer dans leurs travaux

Séances 3, 5, 7, 9 (4 fois 3h) : en alternance avec les séances 2, 4, 6, 8 la revue de projet (faite par chacun des 4 groupes) permet aux élèves de mesurer l'avancement des travaux de toutes les thématiques, de faire les choix cohérents et d'acter les acquis, puis d'identifier les verrous à lever pour la bonne suite des travaux qu'ils feront en TD, et en travail perso.

Séance 10 (3h00) : restitution des travaux via une soutenance en amphi des 4 groupes de 25 ainsi qu'une synthèse de la solution par les 4 rapporteurs des 4 groupes. L'évaluation des élèves est faite par les responsables du cours + les animateurs scientifiques et innovation.

## Organisation de l'évaluation

L'évaluation individuelle des élèves est faite « en continue » par le Scientifique lors des TD/TP, celle du groupe est faite lors des restitutions intermédiaires lors des séances 3-5-7-9 et lors de la Séance 10.

## Support de cours, bibliographie

Les étudiants pourront échanger avec le corps professoral pour obtenir des références bibliographique et être orientés dans leurs recherches

## Moyens

Equipe enseignante : B.Bossan est responsable de l'organisation de l'électif. Chaque thématique est pilotée par un scientifique.

Taille des TD : 4 groupes de 25 élèves

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C2 Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers

C7 Savoir convaincre

C8 Mener un projet, une équipe

# 2EL1850 – Simulation des couplages multiphysiques avec la MEF

Responsables : **Guillaume Puel**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ENERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Le but de ce cours est de donner des connaissances théoriques et appliquées sur les simulations de couplages multiphysiques telles que : thermomécanique, piézoélectrique, vibroacoustique, magnétomécanique.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Équations aux dérivées partielles

1EL1010 - Rayonnement et propagation ou 1EL1500 - Physique des ondes ou 1EL4000 - Matériaux ou 1EL5000 - Mécanique des milieux continus ou 1EL7000 - Sciences des transferts

## Plan détaillé du cours (contenu)

S1(1h30)-S2-S3 Formulation variationnelle et MEF 1D / Application : poutre thermoélastique (couplage faible thermique/mécanique)

- S4-S5 MEF 2D / Application : pièce chauffée avec fenêtre ouverte (couplage faible thermique et mécanique des fluides)
- S6 Techniques de couplage multiphysique / Application : microactionneur thermique
- S7-S8 Estimation de l'erreur de modèle / Application : pièce chauffée avec fenêtre ouverte (estimation des erreurs)
- S9-S10 Problèmes dépendant du temps et de la fréquence / Application : évolution de température d'une pièce chauffée et acoustique
- S11 Examen final

## Déroulement, organisation du cours

- S1 à S10 : cours magistral 1h30 + TD numérique sur Comsol 1h30, sauf séance 6 (3h TD)
- En autonomie : projet de simulation multiphysique (capteur, actionneur, phénomène physique...) par groupes de 4

## Organisation de l'évaluation

Examen écrit de 2 heures (1h de théorie + 1h de pratique sur l'outil de simulation) : 65% de la note finale

Evaluation des projets en guise de contrôle continu : 35% de la note finale

## Support de cours, bibliographie

Polycopié de cours

### Moyens

Enseignant : Guillaume PUEL

TD : 35 élèves

Logiciel : Comsol Multiphysics (Structural mechanics, MEMS)

### Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Résoudre et modéliser un problème multiphysique incluant la mécanique des solides, la thermique, la mécanique des fluides, l'électricité et le magnétisme.
- Concevoir des capteurs et des actionneurs grâce à l'utilisation de différentes physiques et technologies couplées.
- Modéliser et résoudre un problème multiphysique avec un code d'éléments finis commercial en portant une attention particulière à la précision de la solution.

### Description des compétences acquises à l'issue du cours

La validation des jalons 2 des compétences **C1** et **C6** est liée au projet effectué en groupe, en autonomie.  
La validation du jalon 2 de la compétence **C2** est liée à la note finale obtenue à ce cours.

# 2EL1860 – Construire la ville – urbanisme, architecture et ingénierie

Responsables : **François Cointe, Frédérique Delmas-Jaubert**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ENERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Non**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Sensibiliser les élèves aux problématiques de la construction de la ville : que construit-on et pour qui

- Faire maîtriser les concepts et jeux de rôle fondamentaux de la construction à travers des études de cas, ainsi que les outils de l'ingénierie au service de l'acte de construire et donner envie d'approfondir dans des cours plus détaillés
- Les initier à la diversité des métiers nécessaires à l'acte de construire
- Leur faire prendre conscience des verrous scientifiques et techniques limitant la création de valeur

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

Introduction des grands enjeux de la ville, face au changement climatique, choix des territoires d'étude

Séances 2 et 3 : une histoire de Paris et du Grand Paris, par François Cointe

Séance 4 : cours in situ, avec la visite d'un quartier très urbain

Séance 5 : le Grand Paris Express, chantier du siècle

Séance 6 : le climat des villes, les moyens d'actions

Séance 7 : les espaces publics et l'adaptation au changement climatique

Séance 8 : le génie urbain et les services urbains

Séance 9 : rendu des analyses territoriales

Séances 10 et 11 : l'architecture, l'immobilier et les acteurs privés de la ville

## Déroulement, organisation du cours

Chaque cours magistral est accompagné d'une séance de TD encadrée pour élaborer l'analyse territoriale puis l'analyse architecturale qui constituent l'évaluation. Pas de contrôle.

Une visite obligatoire.

## Organisation de l'évaluation

Les étudiants sont notés sur une analyse territoriale collective réalisée principalement en TD, comprenant évaluation de la présence et participation aux séances de TD, ainsi qu'une étude individuelle architecturale d'un bâtiment

## Support de cours, bibliographie

Institut Paris Région <https://www.institutparisregion.fr/documents-historiques-de-reference.html>

APUR–Atelier Parisien d'URbanisme <https://www.apur.org/fr>

Pavillon de l'arsenal–espace d'exposition de la Ville de Paris sur l'architecture et la ville <https://www.pavillon-arsenal.com/>

Cité de l'architecture et du patrimoine <https://www.citedelarchitecture.fr/f>

## Moyens

Equipe enseignante : François Cointe, Ulisse Vizzardi, Louis Massonet, Didier Lourdin, Olivier Ledru, Frédérique Delmas Jaubert

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de :

- Connaître et comprendre les principaux paradigmes de la construction de la ville
- Identifier les parties prenantes économiques et non économiques d'un projet de construction ainsi que ses enjeux
- Distinguer les donneurs d'ordre, financeurs, concepteurs, constructeurs, et exploitants
- Connaître et comprendre les chaînes de valeur associées de l'immobilier, du BTP et des services urbains
- Comparer les positionnements des principales entreprises du secteur et leurs logiques d'innovation



# 2EL1910 – Lois fondamentales de l'Univers : physique des particules et de la gravitation

Responsables : **Christophe Yèche, Samira HASSANI**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT PHYSIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Non**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours est une introduction aux quatre interactions fondamentales : physique des particules d'une part et physique de la gravitation et cosmologie d'autre part, tant du point de vue théorique qu'expérimental.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

### A. Physique des particules

- A.1 Introduction historique aux particules élémentaires
- A.2 Relativité restreinte et dynamique relativiste
- A.3 Interactions fondamentales
- A.4 Modèle standard de la physique des particules

### B. Gravitation

- B.1 Relativité générale : principe d'équivalence, équation du mouvement, équation Einstein
- B.2 Cosmologie : géométrie et expansion de l'Univers, histoire thermique, formation des structures (CMB), matière noire, énergie noire
- B.3 Exemple d'un projet de cosmologie observationnelle : DESI, étude de l'énergie noire et de la gravitation, sélection de quasars, tomographie de l'Univers avec des quasars.

## Déroulement, organisation du cours

Sept cours d'une heure trente en cours magistraux sur la physique des particules et sept cours magistraux d'une heure trente sur la gravitation et la cosmologie. Cinq TD d'une heure trente.

## Organisation de l'évaluation

L'évaluation combinera un contrôle final [75% de la note] et plusieurs contrôles continus équipondérés dont leur moyenne suit la règle énoncée dans le RDE [25% de la note].

Toutes les compétences seront évaluées dans les deux types de contrôle. Mais plus spécifiquement, les compétences C2-1 entreront en jeu surtout au cours de l'examen final, tandis que les compétences C1-2, C2-3 et C6-3 seront testées en contrôle continu et en TD.

## Support de cours, bibliographie

Vidéos, diapositives de cours, supports écrits et par ailleurs références bibliographiques distribuées en cours.

## Moyens

Les cours seront donnés en français sous la forme de cours magistraux qui se termineront par des exercices comptant comme contrôle continu. Les diapos et des documents écrits en anglais seront mis à disposition.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- se familiariser avec les concepts de particule élémentaire et de symétrie fondamentale
- maîtriser les concepts d'espace-temps et de quadrivecteur
- identifier les référentiels inertiels pertinents dans un problème et maîtriser les transformations de Lorentz.
- Comprendre la différence entre conservation et invariance et savoir appliquer la conservation de l'énergie-impulsion dans l'espace-temps.
- maîtriser les bases de l'algèbre tensorielle avec les notations d'Einstein
- calculer les corrections relativistes pour le Global Positioning System
- introduction à la cosmologie

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C1.2 - Savoir utiliser un modèle présenté en cours de manière pertinente
- C1.3 - Mettre au point une simulation numérique
- C2.1 - Approfondir ces connaissances en physique des particules et en cosmologie
- C6.3 - Traiter des données de physiques des particules et d'astrophysiques

# 2EL1920 – Physique quantique et Statistique Avancée

Responsables : **Jean-Michel Gillet**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT PHYSIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours est à la fois la continuité du cours de première année et son complément.

Il permet ainsi de revenir sur certains aspects qui, faute de temps, ont été parcourus de manière trop superficielle pour une véritable utilisation et d'accroître sa familiarité avec les concepts de base. Ce sera l'occasion de traiter de la physique statistique des systèmes ouverts (grand canonique) et des statistiques quantiques (bosons et fermions). Des liens seront établis avec les bases de la mécanique Hamiltonienne (et Lagrangienne). Le cours a aussi pour but d'offrir un prolongement vers la physique quantique des atomes et des molécules. Une séance dédiée à l'intrication quantique est prévue.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

Le prérequis est :

Cours Physique Quantique et Statistique de première année.

## Plan détaillé du cours (contenu)

Dans le désordre, nous aborderons une sélection de sujets parmi lesquels (de manière non contractuelle):

Rudiments de mécanique Lagrangienne et Hamiltonienne

Compléments sur l'oscillateur harmonique quantique

Compléments sur le moment cinétique

Physique statistique des systèmes ouverts

Statistiques quantiques

Fermions

Bosons

Structure fine et hyperfine de l'atome

Théorème variationnel

Retour sur l'atome à N électrons

Aspects de la physique quantique moléculaire

Le phénomène d'intrication et les inégalités de Bell

## Déroulement, organisation du cours

Cours magistraux, travaux dirigés, lectures et projet informatique

8 cours

1 séminaire (3h).

9 TD ou TP

## Organisation de l'évaluation

L'évaluation se fait au moyen de 2 volets :

- Une épreuve écrite (1h30) dont les questions portent potentiellement sur l'ensemble du programme et qui permet en particulier d'évaluer les connaissances, la maîtrise des méthodes énoncées plus haut et les compétences associées.

La compétence C1, jalon 2 sera testée au travers du projet numérique et d'une question associée lors de l'examen final.

## Support de cours, bibliographie

Le livre de référence est "Application-Driven Quantum and Statistical Physics" (Vol. 1, 2 et 3, World Scientific).

Des références additionnelles seront être données.

## Moyens

L'équipe enseignante est composée de : F. Bruneval, M. Ayouz, E. Klein, J-M Gillet

· Nombre maximum d'élèves : 100

· Utilisation de codes sous : Python et GAMESS

· Les locaux seront constitués de : petit amphi pour cours magistral, 3 salles de TD

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin du cours, l'étudiant sera capable de :

- justifier la structure des premières lignes du tableau périodique et les mécanismes de liaisons

- décider de la nécessité d'une approche quantique sur des problèmes dépendant de la température.

- différencier un comportement fermionique de celui adopté par des bosons. Il pourra alors justifier des différentes composantes intervenant dans les fonctions réponses telles que la chaleur spécifique, en particulier à basse température.

- proposer une méthode de modélisation quantique de quelques propriétés importantes d'un gaz moléculaire idéal mais connaîtra des moyens de prendre en compte certaines interactions.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Les compétences visées sont

C1.2 (jalon 1 voire 2) : Étudier un problème dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un problème dans ses dimensions scientifiques, économiques et humaines

et C1.3 (jalon 1) : Résoudre le problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation

Les compétences sont testées au moyen du projet numérique et d'une question associée lors de l'examen final

# 2EL2010 – Compréhension, optimisation et simulation des procédés biotechnologiques

Responsables : **Filipa Lopes**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ENERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

La biotechnologie est définie comme « l'application de la science et de la technologie à la transformation de matériaux par des agents biologiques et des enzymes pour produire des biens et des services ». Ses domaines d'application sont très larges et comprennent de nombreuses applications industrielles, en particulier dans les secteurs de la santé, l'agroalimentaire, le traitement de déchets, la production d'énergie, la cosmétique ou la pharmaceutique. Les procédés biotechnologiques connaissent un très fort développement, et recrutent fortement. L'objectif général de cet enseignement est d'introduire les approches modernes du génie des bioprocédés nécessaires pour comprendre, améliorer, optimiser et concevoir des bioprocédés innovants, compétitifs et plus respectueux de l'environnement.

Dans ce contexte, le bioprocédé sera abordé par une approche multi-échelle (de la cellule au bioréacteur) et multidisciplinaire aux interfaces, guidés par des outils de simulation et d'optimisation. Ce cours se situe entre les sciences des transferts, le génie des procédés, la physique et les sciences du vivant. Les concepts abordés dans ce cours serviront pour certains enseignements des dominantes (Vivant, Santé et Environnement, Energie, ...) ainsi qu'en appui de certains Pôles Projets (Biotechnologies et Santé, Energie, ...).

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

Science des Transferts (électif 1A)

## Plan détaillé du cours (contenu)

### Microbiologie :

- La cellule ;
- Le métabolisme microbien.

### Principes de génie des bioprocédés :

- Le bioréacteur ;
- La mise en œuvre d'un bioprocédé ;
- Etudes d'exemples emblématiques : méthanisation, fermentation alcoolique, microalgues, boues activées, ...
- Modes de conduite ;
- Transfert de matière au sein du bioréacteur.

### Modélisation multi-échelle du bioprocédé :

- Modélisation macroscopique ;
- Modélisation métabolique ;
- Propriété des modèles à bilan de masse ;
- Calibration et validation des modèles.

## Déroulement, organisation du cours

Les principes généraux seront abordés et illustrés avec des exemples et applications industriels lors de cours magistraux et des TDs. Ainsi les élèves mettront en œuvre les connaissances acquises sur des cas pratiques d'ingénieur. En parallèle, les élèves développeront un projet dont le but est de proposer un schéma de bioprocédé pour une application industrielle donnée. Les élèves appliqueront ainsi leur connaissance à une étude de cas, qu'ils traiteront en groupe. Ils choisiront un sujet parmi différents objectifs biotechnologiques. Ils devront proposer à la fois des procédés et des microorganismes adaptés et mettre en œuvre une modélisation du bioprocédé.

## Organisation de l'évaluation

Contrôle final écrit (65%) et présentation orale du projet en équipe (35%).

## Support de cours, bibliographie

Copies des présentations des différents intervenants et ouvrages (Madigan, M. (2007). Brock Biologie des microorganismes ; Doran, P. M. (1995). Bioprocess engineering principles. Academic press, ...).

## Moyens

Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : Filipa Lopes (Dép. Procédés) et Olivier Bernard (Equipe Biocore, Inria).

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- A l'issue de cet enseignement, l'élève sera capable de :
- Expliquer les bases du fonctionnement du vivant.
- Identifier les phénomènes (chimiques, physiques et biologiques) qui ont lieu au sein du bioréacteur.
- Ecrire le réseau réactionnel caractérisant les principaux flux de matière au sein d'un bioréacteur, et adapté aux objectifs du modèle.
- Identifier les expressions mathématiques des cinétiques réactionnelles associées au réseau réactionnel.
- Etudier les principales propriétés des modèles dynamiques de bioréacteur (positivité des variables, bornitude, équilibres, stabilité locale).
- Calibrer un modèle de bioréacteur à partir de données expérimentales.
- Proposer un schéma de bioprocédé pour une application donnée.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 – Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

C2 – Développer une compétence approfondie dans un domaine scientifique ou sectoriel et une famille de métiers

# 2EL2020 – Physique de la matière divisée

Responsables : **Hervé Duval**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ENERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

## Présentation, objectifs généraux du cours

"God made solids, but surfaces were the work of the devil" (Wolfgang Pauli)

Plus la matière est divisée (en d'autres termes, plus la taille caractéristique d'un système, solide ou liquide, est petite), plus son comportement est dominé par les forces de surface. Corrélativement, le rôle des forces de volume telle que la gravité par exemple, devient négligeable. L'échelle de taille des systèmes qui nous intéressent ici s'étend typiquement de 10 nm à 1 mm. Les formes de la matière divisée sont multiples : bulles, gouttes, films liquides, colloïdes...

Ces systèmes sont très présents autour de nous. Les applications concernent la biologie (feuilles super-hydrophobes, film liquide à la surface des alvéoles pulmonaires, bulle de cavitation formée par la crevette-pistolet), l'environnement (rôle des gouttes de pluie dans la biosphère, envasement des estuaires), l'industrie (fabrication d'émulsions pour les industries cosmétique, pharmaceutique ou agro-alimentaire, mousses extinctrices ou isolantes, traitements de surface, lab-on-a-chip) ou la vie quotidienne (larmes du vin, remontée capillaire dans les maisons ou les monuments historiques). Un grand nombre d'innovations industrielles repose sur la mise en œuvre et la maîtrise de ces systèmes.

Dans le cadre de ce cours, nous découvrirons les phénomènes liés à la capillarité et au mouillage, la dynamique des interfaces et les instabilités associées. Nous examinerons également le rôle de l'énergie interfaciale lors de l'apparition (germination) d'une nouvelle phase. Enfin, nous aborderons quelques aspects plus spécifiques à l'échelle colloïdale (inférieure au micromètre) : mouvement brownien, forces DLVO.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Sciences des transferts (conseillé)

## Plan détaillé du cours (contenu)

**Le cours s'articule en trois volets** : 9h de **cours de base et de travaux dirigés associés**, 12h consacrées à des **études de cas**, 9.5h dédiées à la réalisation d'un **miniprojet** et à son rendu.

**Concepts de base** (3 x (1.5h de cours + 1.5h de TD))

1) Notion de tension de surface

Origine physique

Les points de vue thermodynamique et mécanique

Capillarité : loi de Laplace

Interfaces et conditions aux limites des équations de Navier-Stokes

Minimisation d'aire et surfaces minimales

TD n°1 : Ménisques de liquide, forces capillaires, cheveux mouillés et insectes sur l'eau

## 2) Mouillage

Surfaces solides idéales : loi de Young-Dupré

Hystérésis d'angle de contact

Influence de la rugosité de surface

Influence des hétérogénéités chimiques

Vers les surfaces superhydrophobes

Dynamique de la ligne triple

TD n°2 : Modélisation des angles de contact d'équilibre sur des surfaces texturées

## 3) Tensioactifs : équilibre et dynamique

Des molécules amphiphiles

Concentration de surface et équation d'adsorption de Gibbs

Micelles et concentration micellaire critique

Tension de surface dynamique et dynamique des tensioactifs

Rhéologie interfaciale

TD n°3 : Formation et drainage d'un film de savon

## 4) Etudes de cas (4 x 3h)

Chaque étude de cas donne l'opportunité de se pencher sur un phénomène particulier, d'intérêt industriel ou pratique, d'appliquer les concepts introduits dans la première partie du cours et de se familiariser avec différentes méthodes de modélisation ou outils mathématiques. Les études de cas ont la forme de « grands TD », réalisés par groupes de 3 à 4 étudiants et encadrés par un enseignant. La durée de 3h par étude laisse le temps à chaque groupe de bien s'approprier le sujet, de construire sa démarche et d'élaborer sa solution, en autonomie, avec l'appui méthodologique de son encadrant. A l'issue des 3h, chaque groupe fournit un compte rendu écrit (manuscrit ou par traitement de texte, au choix) de son travail.

## 5) Montée capillaire et imbibition

De l'ascension de la sève brute dans les arbres à la fabrication de matériaux composites

Hauteur d'équilibre dans un tube vertical

Dynamique de l'imprégnation : régime inertiel et régimes visqueux

Montée dans un coin

## 6) Drainage et dépôt de films liquides sur une plaque plane verticale

Des traitements anti-corrosion aux couches anti-reflet des verres à lunette

Drainage d'un film de liquide

Enduction par trempage

Analyse en loi d'échelle

Théorie de Landau-Levich-Derjaguin : ménisque dynamique et raccordement asymptotique

## 7) Etalement de gouttes

Revêtements, impression à jet d'encre et enquêtes criminelles

Angle de contact dynamique et vitesse de la ligne triple

Cas du mouillage parfait : loi de Tanner

Influence de la vitesse d'impact sur le diamètre d'étalement maximal

Les différents régimes d'impact

## 8) Mesure de tension de surface

Cette étude de cas comporte une partie expérimentale. Elle est réalisée dans les salles de travaux pratiques du Laboratoire de Génie des Procédés et Matériaux (bâtiment EIFFEL, Univers Vivant). Deux techniques de mesure de tension de surfaces sont mises en oeuvre, analysées et modélisées:

La méthode de la goutte pesée (ou stalagmométrie)

La méthode de la goutte pendante

## Miniprojet (7.5h + 2h)

Le mini-projet est l'occasion d'étudier plus en détails un phénomène physique, un système ou un objet relevant de la physique de la matière divisée. Il permet non seulement d'appliquer et d'approfondir les différents concepts abordés en cours mais aussi d'explorer d'autres pans de la physique de la matière divisée. Le miniprojet est réalisé par groupes de 3 à 4 étudiants. A titre d'exemple, voici une liste non exhaustive de thèmes choisis par différents groupes les années précédentes : Ascension de la sève dans les arbres, Physique des pièges utilisés par les plantes carnivores, Marangony bursting, Détergence et rolling-up, Caléfaction, Analyse de l'impact de gouttes en science forensique, Gerris artificiel ... Partant du thème retenu, le travail consiste à :

- dégager une problématique,
- réaliser et présenter des expériences de « coin de table » permettant d'illustrer le thème et/ou la problématique choisie
- identifier les mécanismes physiques mis en jeu



- au choix : conception d'une expérience, campagne d'essais, analyse des résultats expérimentaux et proposition d'un modèle simple permettant de rendre compte de ces résultats OU développement d'un modèle plus complexe, implémentation informatique, étude paramétrique et analyse/discussion des résultats obtenus

Les livrables sont :

- Un fichier ppt qui rend compte du travail effectué (le support de la présentation orale + annexes détaillant les expériences, les calculs, la liste des références bibliographiques)
- Un exposé oral de 20 min avec une démonstration du code ou un film de la manip en fonctionnement, suivi de 10 min de questions (durée ajustée en fonction du nombre de groupes)

## Déroulement, organisation du cours

Le cours s'articule en trois volets (voir Contenu pour de détails sur chacun des volets): 9h de cours de base et de travaux dirigés associés, 12h consacrées à des études de cas (incluant 3h de travaux pratiques), 9.5h dédiées à la réalisation d'un miniprojet et à son rendu.

## Organisation de l'évaluation

Contrôle continu (note sur 6, basée sur les rendus à l'issue de chaque étude de cas) + Miniprojet (note sur 14, Fichier ppt + soutenance orale + réponses aux questions)

## Support de cours, bibliographie

- Matériel de cours fourni : copie des slides, énoncés des problèmes, corrigés
- Quelques références bibliographiques :
  - P.G. de Gennes, F. Brochard-Wyart and D. Quéré, Capillarity and Wetting Phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves, Springer, New York, 2004.
  - J. Israelachvili, Intermolecular and surface forces, Academic Press, Elsevier, 3rd edition, 2011.
  - E. Guyon, J.P. Hulin, L. Petit, Hydrodynamique physique, EDP Sciences, 3ème édition, 2012.

## Moyens

- Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : Hervé Duval, Marie-Laurence Giorgi, Irma Liascukiene, Jacopo Seiwert
- Taille des TD (par défaut 35 élèves) : 35
- Outils logiciels et nombre de licence nécessaire : ImageJ (logiciel libre), python avec les modules scipy, matplotlib et numpy (logiciel libre)
- Salles de TP (département et capacité d'accueil) : aucune

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de cet enseignement, les étudiants seront capables de :

- Lister et expliquer les mécanismes et phénomènes physiques intervenant dans les systèmes dispersés les plus courants, dans l'industrie ou la vie quotidienne;
- Définir et calculer les longueurs, temps et vitesses caractéristiques associés ;
- Interpréter le comportement dynamique d'un système dispersé ;
- Construire un modèle capturant l'essentiel de la physique de ce système et permettant de décrire son évolution ;
- Proposer un dispositif/protocole expérimental permettant de valider ce modèle.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.1 : Étudier un problème dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un problème dans ses dimensions scientifiques, économiques et humaines.

C1.2 : Utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes pour traiter le problème.

C1.3 : Résoudre le problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation.

C2.1 : Avoir approfondi un domaine ou une discipline relative aux sciences fondamentales ou aux sciences de l'ingénieur.

# 2EL2030 – Génomique et biologie synthétique en biotechnologie sanitaire et industrielle

Responsables : **Behnam Taidi**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ENERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Non**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

L'avènement récent des techniques de biologie moléculaire à haut débit et la compréhension approfondie de la génétique fondée sur les progrès des méthodes de séquençage ont submergé **la biotechnologie médicale et industrielle**. De plus, la **biologie synthétique** (où des systèmes basés sur ou inspirés par la biologie sont conçus et construits pour mettre en place de nouvelles fonctions qui n'existent pas dans la nature) a ouvert un tout nouveau champ d'opportunités où les ingénieurs interagissent avec des biologistes, des chimistes et des informaticiens pour concevoir et fabriquer des dispositifs diagnostiques et thérapeutiques.

Un cours est prévu pour les étudiants afin de **s'immerger dans l'univers de la génétique et de la biologie synthétique** où les **derniers concepts et applications industrielles** sont dévoilés et discutés.

Le but de ce cours est d'enseigner au futur ingénieur la structure, **le fonctionnement et la régulation du génome et comment cela peut être lié aux applications industrielles et médicales**. De plus, en apprenant la nature des signaux analogiques et des données génétiques numériques, l'ingénieur pourra choisir les méthodes les plus pertinentes pour le traitement et l'interprétation des données. Cela transformera le bassin d'informations en connaissances informatives qui pourraient être utilisées pour la fourniture de nouveaux produits et services. Ainsi, à la fin du cours, les étudiants auront une vision stratégique sur la façon de progresser dans le domaine de la génomique et de la biologie synthétique : de l'exploration d'une accumulation de données sans précédent à l'extraction de connaissances novatrices et la transformation des données en nouvelles connaissances rationnelles et utiles.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

Un intérêt pour la biologie et la modélisation des phénomènes biologiques.

Des notions générales de biologie au niveau de la culture générale.

## Plan détaillé du cours (contenu)

Le programme se compose de quatre modules, dont deux sont des cours de base communs qui ouvrent la voie aux deux modules suivants, axés sur l'application de la biologie synthétique à la santé humaine et à la biotechnologie industrielle.

- **Introduction** : Structure et régulation du génome, techniques de clonage, biologie synthétique
- **Analyses génomiques par des méthodes à haut débit** : De l'ADN génomique à l'ARN
- **Applications à la santé humaine** : Modifier et reprogrammer le génome comme base de la thérapie génique et cellulaire, à base de cellules souches et de cellules souches pluripotentes induites (IPSC).
- **Applications en biotechnologie industrielle** : Ingénierie du génome, du châssis cellulaire, allocation des ressources, ingénierie des circuits, ingénierie métabolique, rôle de la conception assistée par ordinateur en biologie synthétique et ingénierie métabolique, introduction à iGEM

## Déroulement, organisation du cours

- Le module est organisé en cours magistraux pour introduire les connaissances et outils méthodologiques
- 28,5 heures de cours
- Ils sont obligatoires et compteront dans la note finale au même titre que l'examen écrit final.
- La présence aux quiz est obligatoire, une absence non justifiée sera considérée comme un zéro point.

## Organisation de l'évaluation

- Examen écrit final de 2 heures (aucun document et aucun ordinateur n'est permis)
- Contrôle continu pour les cours magistraux donnés par Marie-Anne DEBILY ; la présence est donc obligatoire pour tous ces cours magistraux qui couvrent la moitié de l'élective. Le contrôle en continue compte pour 40% de note de l'examen mais il ne compte pas pour l'examen de rattrapage.
- Il y a 4 contrôle continue, chacun compte pour 10% de grade finale.
- L'examen final compte pour 60%

## Support de cours, bibliographie

Diaporamas disponibles en ligne

## Moyens

- Equipe enseignante (nom des enseignants des cours magistraux) : Behnam TAIDI (CS-LGPM), Marie-Anne DEBILY (Gustave Roussy), Jean Loup FAULON (INRA), Ioana POPESCU (Université d'Evry-val-d'Essonne), Matthieu JULES (AgroParisTech)
- Inscription maximale : 40 étudiants
- Logiciel, nombre de licences requises : Plateforme d'analyse Knime (open source)
- Salles de classe spécifiques à l'équipement : Salle informatique équipée d'un bureau (Linux ou Windows OS) pour un module de 4 heures
- Contrôle continu pour une partie du cours avec un examen final de 2 heures pour la seconde moitié du cours. La présence aux cours magistraux couvrant la première moitié du cours est obligatoire car ils comprennent les quiz d'évaluation continue qui contribueront à la note finale. Toute absence non justifiée sera considérée comme un zéro et diminuera donc la note moyenne à la fin du cours après l'examen écrit.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- A l'issue de l'enseignement les étudiants devraient être en mesure de :
- connaître les outils et les développements techniques qui permettent de mieux comprendre comment les génomes fonctionnent et ont une action de régulation.
- comprendre les contributions des génomes à l'identité d'une personne et comprendre les principes généraux qui régissent l'évolution immunitaire physiologique et pathologique
- comprendre comment l'information génomique peut être utilisée pour mettre au point de meilleures thérapies
- se renseigner sur l'état actuel des cellules souches et sur les nouveaux développements thérapeutiques
- avoir une vision stratégique de la façon de progresser dans le domaine de la génomique : de l'exploration de données à l'extraction de connaissances novatrices

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C1.1 : Étudier un problème dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Jalon 1
- C1.2 : Identifier, formuler et analyser un problème dans ses dimensions scientifiques, Économiques et humaines. Jalon 1
- C1.3 : Spécifier, concevoir, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe. Jalon 1

# 2EL2040 – Génie des procédés : application à l'environnement et aux biofabrications.

Responsables : **François Puel, Julien Colin**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ENERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Non**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Le Génie des Procédés moderne consiste à **concevoir, exploiter, optimiser des procédés**, destinés à l'**élaboration de produits et services variés** dans de nombreux secteurs classiques et high-tech (pharmacie, pétrole, chimie fine, agroalimentaire, cosmétiques, traitement de l'eau et des déchets, matériaux, biotechnologies, etc.) et à la production d'**énergies** traditionnelles, décarbonées et renouvelables.

Ce cours est une introduction au Génie des Procédés et des Bioprocédés et à ses méthodologies. **Les fondamentaux enseignés permettent aux élèves d'acquérir des outils généralistes**, transposables aisément à de multiples domaines.

**La durabilité des procédés est un enjeu majeur.**

Certains procédés s'inscrivent intrinsèquement comme des outils de choix dans la stratégie de **développement durable** aux différentes échelles (locale et mondiale), tel que le recyclage et la valorisation de nombreux produits ou la purification d'effluents liquides et gazeux. Il n'en demeure pas moins que, de manière générale, **de nouveaux procédés doivent être développés et que les procédés existants doivent être optimisés (intensification)**, afin de réduire les impacts du secteur industriel. Les défis associés à cette dynamique sont multiples : réduction des coûts, des risques et dangers, des déchets, des consommations en énergie et en matières premières.

Par ailleurs, les **bioprocédés** connaissent un très fort développement, pour deux raisons : (i) l'emploi du vivant pour transformer la matière, épurer des systèmes pollués (liquide, solide), les microorganismes se comportant comme des usines et (ii) l'emploi de biomasse renouvelable en remplacement de ressources fossiles.

Ce cours s'appuie sur des **exemples concrets** (simplifiés afin de les rendre accessibles), pour permettre aux étudiants **d'appliquer et de s'approprier les fondamentaux** du cours, tout en **s'intéressant à des procédés orientés vers le développement durable**.

Certaines études de cas se concentrent sur des bioprocédés déployés en **biotechnologie industrielle et environnementale**. Le bioprocédé est étudié **à l'échelle du bioréacteur industriel**. La description et compréhension des processus biologiques (métabolisme, maintenance, etc) à l'échelle de la cellule ne sont pas abordées. Les agents biologiques sont donc considérés comme des catalyseurs cellulaires transformant des matières premières en des produits selon des lois cinétiques fournies, dont l'application ne nécessite **aucun prérequis en biologie**.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Aucun

**Ce cours n'est pas accessible aux étudiants ayant suivi le cours analogue en ST5 (2SC5210)**

## Plan détaillé du cours (contenu)

### 1. Introduction Génie des Procédés au service du Développement Durable ; Bilan matière

Étude de cas : Procédé de production de bioéthanol de 1<sup>ère</sup> génération (*conversion des matières premières renouvelables par biotechnologies blanches*)

### 2. Modèles d'écoulement (parfaitement agité et piston)

Étude de cas :

Valorisation de Lactoserum (*Valorisation de résidu de l'industrie agroalimentaire par biotechnologies blanches*)

Dimensionnement de bassins de traitement biologique d'une station d'épuration des eaux usées urbaines (*procédé au service de l'environnement, réduction des volumes de réacteurs et de l'emprise au sol*)

### 3. Bilans thermiques : calorifique / enthalpique

Étude de cas : Dimensionnement d'une cuve de vinification et de son contrôle de température (*optimisation de la géométrie d'un réacteur et de sa régulation thermique*)

### 4. Équilibres liquide-vapeur, distillations simple et multi-étagée

Étude de cas : Distillation multi-étagée de bioéthanol (*production d'alternatives aux carburants fossiles*)

### 5. Transfert de Matière : Diffusion et Convection

Étude de cas : Production en Raceway de Microalgues Spirulina (*production durable de nutriments pour alimentation humaine et animale*)

### 6. Transfert de Matière : technologie à Contact Permanent

Étude de cas :

Traitement d'un effluent gazeux. Élimination d'un polluant (*procédé pour l'environnement*)

Épuration de biogaz pour produire du biométhane par technologie membranaire (*production d'un vecteur énergétique renouvelable pour usages conventionnels*)

## Déroulement, organisation du cours

Le module est organisé en cours magistraux (12h), pour introduire les connaissances et outils méthodologiques, et en TD (13.5h) afin d'appliquer les acquis dans le cadre d'études de cas. La modalité pédagogique des cours magistraux (présentiel ou classe inversée) sera discutée collectivement lors de la première séance. Les TD seront effectués en présentiel, sauf le dernier qui sera en distanciel. Deux de ces TD consisteront à des mini projets à réaliser par groupe en autonomie.

## Organisation de l'évaluation

Homework : Présentation, par groupe, d'un projet bibliographique dont le sujet s'inscrit en prolongement du cours (40 % de la note) ; ces présentations auront lieu soit à l'oral, soit par affiche (poster). Contrôle final individuel, sur table : Étude de cas de 2h (60 % de la note).

## Support de cours, bibliographie

### Diaporamas

#### • Techniques de l'ingénieur :

+ Charpentier J., Génie des procédés, développement durable et innovation – Enjeux et perspectives, 2013

+ Moulin J.P., Pareau D., Rakib M., Stambouli M., Transfert de matière – Méthodologie, 2000

+ Moulin J.P., Pareau D., Rakib M., Stambouli M., Isambert A., Transfert de matière – Distillation compartimentée idéale, 2001

+ Moulin J.P., Pareau D., Rakib M., Stambouli M., Transfert de matière- Autres opérations compartimentées, 2002

+ Buch A., Rakib M., Stambouli M., Transfert de matière- Cinétique du transfert de matière entre deux phases, 2008

+ Sun L.M., Thonnellier J.Y., Perméation gazeuse, 2004

+ Vuillermans J., Réacteurs chimiques – Principes, 1994

+ Boulinguez B., Le Cloirec P., Purification de biogaz – Élimination des COV et des siloxanes, 2011

#### • Ouvrages généraux : Perry Chemical Engineer's Handbook, 8th edition, 2007, McGraw-Hill, New York

#### • Ouvrages spécifiques :

- *Génie des réacteurs et bioréacteurs*

+ Coulson and Richardson's Chemical Engineering – Volume 3A: Chemical and Biochemical Reactors and Reaction Engineering, 4th Edition, 2017, Elsevier. Oxford

+ Fogler H.S., Elements of chemical reaction engineering, 5th Edition, 2016, Pearson Education, Englewood Cliffs

+ Levenspiel O., Chemical Reaction Engineering, 3rd edition, 1999, John Wiley and Sons, New York  
+ Villadsen J., Nielsen J., Lidén G., Bioreaction Engineering Principles, 3rd Edition, 2011, Springer, New York  
- *Transferts de chaleur et de matière*  
+ Bergman T.L., Lavine A.S., Incropera F.P., Dewitt F., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th Edition, 2011, John Wiley and Sons, New York  
+ Coulson and Richardson's Chemical Engineering – Volume 1B: Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Application, 7th Edition, 2018, Elsevier, Oxford  
+ Cussler E.L., Diffusion Mass Transfer in Fluid systems, 3rd Edition, 2009, Cambridge University Press, Cambridge  
+ Treybal R., Mass Transfer Operations, 4th Edition, 1982, McGraw Hill, New York  
- *Production de bioéthanol*  
+ Cardona C.A., Sanchez O.J., Gutierrez L.F, Process synthesis for fuel ethanol production, 2010, CRC Press, Boca Raton  
+ Naik S.N., Goud V.V., Rout P.K., Dalai A.K, Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 14, 2010, 578–597  
+ Vohra M., Manwar J., Manmode R., Padgilwar S., Patil S. Bioethanol production: Feedstock and current technologies, Journal of Environmental Chemical Engineering 2, 2014, 573–584

## Moyens

Équipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : François PUEL / Victor POZZOBON / Cristian PUENTES / Julien COLIN  
Taille des TD (par défaut 35 élèves) : 60  
Outils logiciels et nombre de licence nécessaire : Excel, Python  
Salles de TP (département et capacité d'accueil) : Aucune

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À l'issue de cet enseignement, les étudiants seront capables de :

- Lister les modes de transfert de matière,
- Identifier les différentes modes de transfert de matière (diffusion / convection) à l'œuvre dans une configuration donnée et les éventuels couplages entre transferts de matière et thermique,
- Écrire les bilans de matière, en prenant en compte, si nécessaire, des cinétiques réactionnelles chimiques ou biochimiques,
- Simplifier un problème en apparence compliqué, où plusieurs phénomènes de transfert coexistent, en ne retenant que les modes de transfert significatifs (qui ont un impact),
- Traduire les phénomènes en équations en utilisant les bilans fondamentaux,
- Dimensionner des technologies de conversion et de séparation, sur la base de considérations thermodynamiques et cinétiques.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.2 : Utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes pour traiter le problème. **Jalon 2**

C1.3 : Résoudre le problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation.

**Jalon 1**

C2.4 : Créer de la connaissance, dans une démarche scientifique. **Jalon 2**

C7.1 : Convaincre sur le fond. Être clair sur les objectifs et les résultats attendus. Être rigoureux sur les hypothèses et la démarche. Structurer ses idées et son argumentation. Mettre en évidence la valeur créée.

**Jalon 2**

C7.2 : Convaincre en travaillant sur la relation à l'autre. Comprendre les besoins et les attentes de ses interlocuteurs. En tenir compte de façon évolutive. Susciter des interactions. Créer un climat de confiance.

**Jalon 2**



# 2EL2140 – Stratégie, Marketing et Organisation

Responsables : **Éléonore MOUNOUD**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours permet de mettre en œuvre de façon pertinente et raisonnée les principaux modèles de la stratégie et du marketing. Il permet en particulier d'approfondir la notion de business model et d'apprendre à utiliser le concept de business model pour rendre compte des transformations passées et futures de développement des entreprises. Les enjeux stratégiques liés au développement des services, à la globalisation des chaînes de valeur, à l'innovation sont ainsi abordés à travers des études de cas. Les enjeux sociétaux de transformation numérique et de transition écologique ainsi que leur impact sur les business modèles seront également traités. Les principes de l'économie de fonctionnalité et de l'économie circulaire sont présentés et appliqués. Le cours invite les étudiants à une réflexion personnelle sur la complémentarité mais aussi la rivalité entre ces deux transitions à partir d'études de cas présentées par des conférenciers sur la transition numérique, la transition énergétique et écologique marquée par la raréfaction des ressources et la prise en compte de la logique de sobriété.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

Cours commun de gestion d'entreprise ou cours équivalents pour les étudiants en échange (Analyse PESTEL, SWOT, stratégies génériques, notions de parties prenantes et de RSE responsabilité sociale de l'entreprise)

Start up Week : business model canvas

## Plan détaillé du cours (contenu)

1. Introduction marketing
2. introduction stratégie
3. Etude de cas Nespresso / détail des composantes du business model
- 4.. Conférence sur l'analyse de la filière mondiale du café (Le Basic) / globalisation des chaînes de valeur CGV / calcul de coûts sociaux
5. Etude de cas Michelin solutions / stratégies dans les services / calcul de TCO / notion de fonctionnalité
6. Etude de cas SKF / comprendre le marketing B to B et la globalisation
7. Etude de cas Tesla / gestion de l'innovation
- 8/9/10. ATELIER D'APPROFONDISSEMENT Convention des entreprises pour le climat (40 étudiants)  
Quantification des business modèles (80 étudiants)
11. Oraux
12. Examen écrit

## Déroulement, organisation du cours

cours 8h  
études de cas 10h  
conférences 6 h  
atelier / workshop 9h  
examen écrit 2h oral 1h

## Organisation de l'évaluation

Travail demandé : préparation des séances (5 notes de lecture préalables aux études de cas),  
Evaluation : participation aux études de cas (30%), livrable de l'atelier (30%), examen écrit (40%)

## Support de cours, bibliographie

Strategor - 7e éd. - Toute la stratégie d'entreprise. DUNOD éditeur 2016  
business model, chapitre 4  
globalisation, chapitre 12  
services, chapitre 12 (de la 5eme édition)  
RSE et DD, chapitre 10 (DD)  
Innovation, chapitre 11

## Moyens

Eléonore Mounoud, responsable du cours

Marie France Crevecoeur, Head of Professional Services and Solution Delivery chez Philips, chargée de cours  
Fedi Soyah consultant de EY Parthenon

Alexis Treilhès, Green insiders

Alain Honnart, ex directeur industriel Vallourec, directeur Métal Value

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable :

- De formuler le positionnement et la proposition de valeur d'une entreprise à ses clients
- De détailler le business model d'une entreprise et d'en diagnostiquer la cohérence
- D'identifier les enjeux de transformations internes ou externes (transitions) pertinents pour une entreprise et les façons d'y répondre
- De proposer une logique de transformation d'une entreprise (services, innovation, globalisation, transitions) vers un modèle plus durable

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Compétences cahier des charges

C4.1 Penser client. Identifier/analyser les besoins, les enjeux et les contraintes d'autres parties prenantes, notamment sociétales et socio-économiques

C4.2 Savoir identifier la valeur ajoutée par une solution apportée par une solution pour un client, le marché. Savoir discerner les opportunités, les bonnes occasions d'affaires et les saisir.

C9.2 Percevoir le champ de responsabilité des structures auxquelles on contribue, en intégrant les dimensions environnementales, sociales et éthiques

C9.4 Faire preuve de rigueur et d'esprit critique dans l'approche des problèmes sous tous les angles, scientifiques, humains et économiques.

# 2EL2150 – Finance et Droit de l'entreprise

Responsables : **Maxime Guymard, Valérie Feray**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Le cours permet d'approfondir la gestion financière d'une entreprise et le droit de l'entreprise. Il fait suite au cours d'initiation de première année en Finance et de deuxième année en Droit. Il donne également une ouverture sur différents métiers de la Finance et du Droit via des interventions de conférenciers du monde de l'entreprise (audit, conseil financier, responsables innovation et propriété intellectuelle, avocats et spécialistes de la propriété intellectuelle).

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

Cours de Gestion de l'Entreprise 1A, Cours d'introduction à la Finance d'entreprise 1A, Cours d'introduction au Droit 2A

## Plan détaillé du cours (contenu)

Les sujets abordés seront divisés en 2 parties : la moitié pour le Droit et la moitié pour la Finance d'entreprise.

### Droit

Thèmes des cours magistraux :

- Droit du travail
- Introduction au Droit des sociétés
- Brevetabilité, procédure brevets et coûts associés
- Protection des logiciels

### Finance

Thèmes des cours magistraux :

- Rappels et approfondissements des bases de comptabilité : bilan, compte de résultat, le tableau de flux de trésorerie
- Solvabilité de l'Entreprise
- Rentabilité de l'Entreprise (ROCE, ROE)
- Coût Moyen Pondéré des Capitaux (WACC)
- Critères financiers pour sélectionner des investissements (VAN, TRI)
- L'Evaluation d'entreprise
- Gestion financière des Start-Up
- Faillites et restructurations
- Introduction à la Finance de Marché (actions, obligations, produits dérivés)

## Déroulement, organisation du cours

Cours magistraux (13\*1h30) | Travaux Dirigés (6\*1h30) | Examen Final (2 heures : Finance 1h + Droit 1h)

## Organisation de l'évaluation

Examen écrit final (100% de la note finale).

## Moyens

• **Equipe enseignante** (noms des enseignants des cours magistraux) :

### Droit

Valérie FERAY (cours magistraux et TD - Associée fondatrice IPSILON)

Pierre-Jacques CASTANET (conférencier et chargé de TD - Associé In Extenso et avocat spécialisé en droit du travail)

Mélanie COIRATON (conférencière et chargée de TD - Associée Racine et avocate)

Mardson McQUAY (conférencier et chargé de TD - Senior IP Attorney - King Abdullah University of Science and Technology)

Ghislain DEMONDA (Conseil en Propriété Industrielle - API Conseil)

### Finance

Maxime GUYMARD (cours magistraux)

Jean-Baptiste MONLOUIS (chargé de TD – KPMG)

Louis-Arthur HUIGNARD (chargé de TD – KPMG)

• **Nombres d'élèves** : maximum 105 pour le cours, répartis en 3 groupes de TD de 35 élèves

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

### **En Finance :**

- Savoir lire et interpréter les états financiers d'une entreprise (Bilan, Compte de Résultat, Tableau de Flux de trésorerie)
- Evaluer la rentabilité et la solvabilité d'une entreprise
- Connaître les critères financiers de décision d'un investissement
- Comprendre les notions de bases de la Finance de Marché (actions, obligations, produits dérivés)
- Connaître les différents métiers de la Finance

### **En Droit :**

- Droit du travail : connaître les éléments de base en tant qu'employeur et en tant que salarié (**cette séance de 3 heures de cours + TD sera exceptionnellement en français - un abrégé en anglais sera fourni pour les étudiants non-francophones**)
- Introduction au Droit des sociétés : Pourquoi créer une Société ? Quelle est la définition d'une société ? Le classement des sociétés ; Présentation des principaux acteurs, aspects financiers et étapes clés de la vie d'une entreprise.
- Brevetabilité, procédures brevets : évaluer les sujets susceptibles d'être protégés par brevets, l'état de la technique pour comprendre si un sujet est brevetable ou pas, connaître les procédures du dépôt à la délivrance du brevet
- Logiciels : connaître les principes fondamentaux et les différentes voies de protection, et les avantages et inconvénients de chacune d'entre elles ainsi que les écueils correspondants

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C3- Agir, entreprendre, innover en environnement scientifique et technologique

C4- Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients

# 2EL2160 – Economie de l'environnement, énergie et développement durable

Responsables : **Vincent Rious, Pascal DA COSTA**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

L'objectif du cours d' "Economie de l'Environnement, de l'Energie et du Développement Durable" est d'aborder, à la fois :

- i) les grands enjeux environnementaux du XXI<sup>e</sup> s. et les facteurs humains les structurant (démographie, économie, développement, etc.) ;
- ii) les principales théories dans le domaine qui ont notamment fondé les principes économiques adoptés face à ces enjeux (taxe carbone optimale et fiscalité environnementale, lutte contre les externalités négatives, etc.) ;
- iii) les politiques économiques et de régulations dans les faits, tant aux niveaux environnemental qu'énergétique (neutralité carbone européenne, mix électriques décarbonés, etc.) ;
- iv) les stratégies de transitions écologiques et climatiques de grands secteurs énergétiques structurants (électricité, transports, hydrogène, etc.), en France et en Europe, grâce à l'intervention de spécialistes et experts du domaine, capables : 1. de présenter les ordres de grandeurs tant physiques qu'économiques ; 2. dans une vision à la fois prospective et pluridisciplinaire également.

Plan du cours :

- Les grands enjeux de décarbonation de l'économie à l'échelle mondiale
- Principes généraux d'économie de l'environnement sur la décarbonation et la biodiversité (services écosystémiques) et systèmes fiscaux et de comptabilité environnementale
- Le retour de la planification des systèmes énergétiques. L'illustration par les bilans prévisionnels et schémas décennaux de développement de réseau dans les secteurs gaziers et électriques
- Evolutions du système énergétique. Focus sur le système électrique (ouverture à la concurrence et glissement vers la transition énergétique)
- Clair obscur de la politique de décarbonation française
- Les enjeux de la décarbonation de la consommation
- Le gaz dans la transition énergétique

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Cours commun d'économie.

## Plan détaillé du cours (contenu)

- Origines de la croissance économique et effet sur l'"indisponibilité" des ressources naturelles (fin du pétrole bon marché, etc.)
- Modèles économiques de gestion optimale des ressources naturelles renouvelables et non-renouvelables
- Démographie : évolution des populations mondiales
- Climat : effet de serre et changement climatique, enjeux liés à la mitigation et l'adaptation...
- Les enjeux de la gestion des ressources naturelles (réserves, répartition, prix) : ressources pour l'énergie (pétrole, gaz, charbon, uranium), matières premières (minerais), l'eau...
- Etat de l'art et nouvelles technologies pour l'énergie, dans une vision à la fois prospectives et pluridisciplinaires.

## Déroulement, organisation du cours

Amphi / TD

## Organisation de l'évaluation

Evaluation en mode projet / travail sur articles scientifiques : **les 3 derniers créneaux de cours sont prévus pour l'évaluation et tous les élèves doivent y être présents.**

## Support de cours, bibliographie

Diaporamas, divers ouvrages pluridisciplinaires et articles économiques.

## Moyens

Cours en français.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Connaître les chiffres clés (état des lieux et prévisions scientifiques) qui font tant débat dans les médias lorsqu'ils opposent des parties prenantes d'un conflit environnemental, par exemple les industriels aux écologistes.
- Comprendre les hypothèses et les modèles économiques et d'ingénieurs sur lesquels reposent ces chiffres.
- Sensibiliser au couplage ressources, énergie, environnement, climat, économie, géopolitique, démographie.
- Sensibiliser aux différentes échelles : locale à mondiale.
- Un cours accède sur les objectifs de développement durable.
- Un cours qui porte sur tous les objectifs de développement durable.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.1 Examiner un problème dans toute son ampleur et sa profondeur, dans et au-delà de ses paramètres immédiats, afin de le comprendre comme un tout. Cet ensemble relie les dimensions scientifique, économique et sociale du problème.

C2.1 Maîtriser un domaine ou une discipline fondée sur les sciences fondamentales ou les sciences de l'ingénieur.

C4.1 Penser en termes de clients, identifier et analyser les besoins des clients, les contraintes des autres parties-prenantes ainsi que les défis sociétaux.

C9.4 Faire preuve de rigueur et de pensée critique en abordant les problèmes sous tous leurs angles, scientifique, humain et économique.

# 2EL2170 – Economie de la croissance et de l'innovation

Responsables : **Mehdi SENOUCI**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

La croissance économique, au sens large, est un concept qui désigne l'ensemble des changements économiques au cours du temps. Un des consensus les plus forts en sciences économiques est celui qui lie la croissance à l'innovation. Le premier objectif du cours est de sensibiliser les étudiants à l'étude de la croissance économique, sur le long comme sur le plus court terme, en essayant de les convaincre que les régularités de même que les paradoxes de la croissance justifient une approche analytique mêlant exploration des faits, analyses empiriques et construction de théories. Le second objectif est de présenter les grandes évolutions économiques du monde depuis les origines jusqu'à nos jours, avec une plus grande importance donnée à l'époque moderne, ainsi que les grandes théories afférant à chaque époque et chaque transition. Le troisième objectif, plus diffus, est de pousser les étudiants à s'interroger sur les conséquences futures des innovations actuellement en cours ou en gestation. Le cours mêlera donc théorie et études empiriques en suivant le fil rouge de l'Histoire.

Le cours, exigeant et tourné vers la recherche, est destiné à un public désireux de s'investir. Il est notamment fortement déconseillé aux étudiants partant en S8. A part l'examen final, deux rendus seront attendus (dont l'un en TD) qui impliqueront la lecture constructive d'articles de recherche.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

Cours commun d'économie. Rudiments d'économétrie (moindres carrés ordinaires).

## Plan détaillé du cours (contenu)

- 1 - La croissance économique comme phénomène historique : les grandes tendances
- 2 - Un détour : le modèle néoclassique des marchés parfaits
- 3 - Analyse néoclassique de la croissance : succès et échecs
- 4 - Croissance, énergie et environnement
- 5 - Technologie, travail et inégalités
- 6 - La croissance de très long terme
- 7 - Le futur de la croissance

## Déroulement, organisation du cours

CM (19,5h), TD (9h), Examen (2h)

## Organisation de l'évaluation

Un rendu en TD obligatoire : 1/3

Un second rendu obligatoire : 1/3

Examen final obligatoire : 1/3

## Support de cours, bibliographie

- Slides de cours
- Le cours ne s'appuiera pas sur un manuel spécifique, mais les étudiants peuvent se référer à :
  - Hal R. Varian (2014) *Intermediate microeconomics - A modern approach*, W. W. Norton & Company, 9th edition
  - Robert J. Barro & Xavier Sala-i-Martin (2003) *Economic Growth*, MIT Press, 2nd Edition
  - David N. Weil (2012) *Economic Growth*, Pearson Education
  - Charles I. Jones & Dietrich Vollrath (2013) *Introduction to economic growth*, W. W. Norton & Company, 3rd edition
- De nombreux articles et livres seront abordés, parmi lesquels :
  - a. Acemoglu, Johnson, and Robinson (2001) "The Colonial Origins of Comparative Development: An Empirical Investigation." *American Economic Review*.
  - b. Acemoglu, Johnson, and Robinson (2002) "Reversal of Fortune: Geography and Institutions in the Making of the Modern World Income Distribution." *Quarterly Journal of Economics*.
  - c. Aghion, Dechezleprêtre, Hémous, Martin and Van Reenen (2016) "Carbon taxes, path dependency, and directed technical change: Evidence from the auto industry," *Journal of Political Economy*.
  - d. Ashraf and Galor (2013) "The 'Out of Africa' Hypothesis, Human Genetic Diversity, and Comparative Economic Development," *American Economic Review*.
  - e. Clark (2007) *A Farewell to Alms: A Brief Economic History of the World*, Princeton University Press.
  - f. Comin and Mestieri (2014) "Technology Diffusion: Measurement, Causes and Consequences," *Handbook of Economic Growth*.
  - g. Diamond (1997) *Guns, Germs and Steel: The Fates of Human Societies*, W. W. Norton & Company.
  - h. Galor (2005) "From Stagnation to Growth: Unified Growth Theory," in *Handbook of Economic Growth*.
  - i. Galor and Ozak (2016) "The Agricultural Origins of Time Preference," *American Economic Review*.
  - j. Greenwood Hercowitz and Krusell (1997) "Long-Run Implications of Investment-Specific Technological Change," *American Economic Review*.
  - k. Habakkuk (1962) *American & British Technology in the 19th Century: The Search for Labour-Saving Inventions*; Cambridge University Press [2nd edition: 1967].
  - l. Kaldor (1961) "Capital Accumulation and Economic Growth," in *The Theory of Capital* (F. A. Lutz & D. C. Hague, eds.); Macmillan, St. Martin's.
  - m. Mankiw, Romer, and Weil (1992) "A Contribution to the Empirics of Economic Growth." *Quarterly Journal of Economics*.
  - n. Nordhaus (1973) "The Allocation of Energy Resources," *Brookings Papers on Economic Activity*.
  - o. Piketty and Zucman (2014) "Capital is Back: Wealth-Income Ratios in Rich Countries 1700-2012," *Quarterly Journal of Economics*.
  - p. Romer (1990) "Endogenous Technological Change." *Journal of Political Economy*.
  - q. Solow (1956) "A Contribution to the Theory of Economic Growth," *Quarterly Journal of Economics*.
  - r. Solow (1957) "Technical Change and the Aggregate Production Function," *Review of Economics and Statistics*.

## Moyens

Cours magistraux (Mehdi Senouci)

TD



## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce cours, les étudiants seront capables de :

- Modéliser la consommation, la production, l'échange et le changement technique avec les modèles néoclassiques ;
- Connaître, manipuler et interpréter différents modèles théoriques de croissance économique ;
- Débattre des enjeux de la croissance dans une logique analytique et en connaissance de l'histoire et des faits de la croissance économique.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- Modéliser la consommation, la production, l'échange et le changement technique avec les modèles néoclassiques, s'inscrit dans **C1.3 "Résoudre le problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation"**, et dans **C2.3 "Identifier et acquérir rapidement des nouvelles connaissances et compétences nécessaires dans les domaines pertinents, qu'ils soient techniques, économiques ou autres"**.
- Connaître, manipuler et interpréter différents modèles théoriques de croissance économique, s'inscrit dans **C1.1 "Étudier un problème dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un problème dans ses dimensions scientifiques, économiques et humaines"**, et dans **C2.3 "Identifier et acquérir rapidement des nouvelles connaissances et compétences nécessaires dans les domaines pertinents, qu'ils soient techniques, économiques ou autres"**.
- Débattre des enjeux de la croissance dans une logique analytique et en connaissance de l'histoire et des faits de la croissance économique, s'inscrit dans **"C7.1 Convaincre sur le fond. Être clair sur les objectifs et les résultats attendus. Être rigoureux sur les hypothèses et la démarche. Structurer ses idées et son argumentation. Mettre en évidence la valeur créée"**.

# 2EL2190 – Innovation sobre et durable

Responsables : **Éléonore MOUNOUD, Juliette WEBER**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Non**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

L'innovation pose des défis managériaux importants et multiples aux entreprises. D'un côté, de nombreuses entreprises ont des difficultés à innover, car leur organisation qui fait leur succès dans l'exploitation de leur business model est aussi un frein à l'innovation, c'est pourquoi des Directions Innovation y sont créées, à côté des Directions R&D, Marketing, ou Stratégie. De l'autre, des start ups, encore plus nombreuses, explorent et expérimentent de nouveaux business models, afin de trouver ce qui a de la valeur pour le client, comment lui délivrer cette valeur, et comment gagner de l'argent tout en le faisant.

Ce cours a pour objectif d'explorer de manière concrète les enjeux managériaux et sociétaux que pose l'innovation dans un monde en crise (sanitaire, climatique, sociale, économique, financière ...). Le cours est organisé en deux parties

- un cycle de conférences et témoignages sur les enjeux et les méthodes de l'innovation où vous approfondissez votre connaissance des enjeux de transformation (Digital, Carbone, Impacts en termes de Sobriété et Solidarité ) et vous les traduisez en opportunités / menaces à affronter et forces à développer (faiblesses à pallier) pour l'innovation que vous devez analyser

- un cycle de séances de travail où vous développez votre analyse en équipe et de façon itérative pour faire le diagnostic de l'innovation que vous étudiez et proposer des recommandations de développement sur une innovation Sobre et/ou Solidaire

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Ce cours est un cours de sensibilisation, il n'y a donc pas d'autre pré-requis que cours commun de Gestion d'entreprise de 1ère année. Pour les étudiants n'ayant pas suivi ce cours, un document de rappel des notions clés sera mis à disposition en début de cours et un QCM de validation des acquis sera proposé à mi parcours du cours.

## Plan détaillé du cours (contenu)

Cycle de conférences et témoignages sur les enjeux de l'innovation pour prendre connaissance des enjeux et des méthodes de gestion de l'innovation :

- sur l'économie sociale et solidaire, Juliette Weber
- sur les stratégies fondées sur l'innovation de rupture - Erwan Pannier fondateur de Spark - production d'hydrogène par plasma

- sur les méthodes de conception innovantes, théorie CK, TRIZ et méthode agile - Rodolphe Rosier - le cas Axane et l'innovation dans le transport maritime
- sur les enjeux de transition et d'adaptation - Eric Bergé, plan de transformation de l'industrie (PTEF, Shift project)
- sur le financement et l'impact investing - en 2022, Anita de Voisins - financement et impact investing – Investir&+

Cycle de 4 séances de mise en pratique par classe de 30 à 40 étudiants (soit 2 classes organisées en 8 groupes de 5 par classe) soit sur un mini-projet soit sur plusieurs études de cas (diagnostic et recommandations). Chaque classe a une thématique particulière et un responsable différent

- Juliette Weber sur l'innovation circulaire et sociale et/ou la résilience territoriale (cas Enercoop, Envie, Commown ..)
- Robin Armant sur la low tech (cas Atelier Paysan, Neoloco, Thoreme, ...)

## Déroulement, organisation du cours

Cours / Conférences  
Travaux de mise en pratique à préparer et à rendre  
Mini projet

Le cours représente une trentaine d'heures de cours ou conférences (HPE) et demande à peu près l'équivalent en préparation de l'étude de cas (à rendre).

## Organisation de l'évaluation

Travaux à rendre et soutenance orale du mini-projet (40% de la note)

Contrôle final - QCM sur les conférences (2h) 40 % de la note  
Note de participation 20%

## Support de cours, bibliographie

Documents de cours sur Edunao : documents, supports des conférences, vidéo

Management de l'innovation, de la stratégie aux projets Sandrine Fernez Walch, Francois Romon, VUIBERT, Août 2017, ISBN 978-2-311-403435

La fabrique de l'innovation, embarquez pour la conception innovante, Gilles Garel en collaboration avec Elmar Mock, Dunod, avril 2016, 223 pages.

Les outils pour innover : <https://www.lescahiersdelinnovation.com/ressources-pedagogiques/les-outils-pour-innover/>

Managing Innovation: Integrating Technological, Market and Organizational Change, Joe Tidd and John Bessant. WILEY, June 2018 608 Pages,

Les grands auteurs en management de l'innovation et de la créativité, Thierry Burger-Helmchen, Caroline Hussler, Patrick Cohendet, EMS éditions, janvier 2016,

Lean Startup, Eric Ries

Business Model Canvas, Alexander Osterwalder

Startup Owners Manual, Steve Blank & Bob Dorf

Get Going, Guy Kawasaki

Guide pratique de la levée de fonds, Jean-François Galloüin

The Founder's dilemmas, Noam Wasserman

Quel futur pour les métaux ? – Philippe Bihouix, Benoit Guillebon

Pétrole: Le déclin est proche – Matthieu Auzanneau, Hortense Chauvin

L'âge des Low-tech – Philippe Bihouix

L'avenir sera Low-tech – Hors-série Socialter (disponible ici en version dématérialisée)

Le bonheur était pour demain – Philippe Bihouix (la fin du livre est porteuse d'espoir)

Éloge du carburateur – Matthew B.Crawford

Le bluff technologique – Jacques Ellul  
Le système technicien – Jacques Ellul  
Vers la résilience alimentaire – Les Greniers de l'Abondance (disponible ici gratuitement en version dématérialisée)  
La convivialité – Ivan Illich  
Énergie et équité – Ivan Illich  
Small is beautiful – Ernst Friedrich Schumacher

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de ce cours, les élèves seront capable de :

- comprendre ce que représente un projet d'innovation fondé sur la Sobriété et/ou la Solidarité
- identifier les enjeux, et les facteurs clés de succès ou d'échec des démarches d'innovation au sein d'une grande entreprise,
- se projeter (ou non) dans des métiers liés à l'innovation et à l'intrapreneuriat
- appliquer certaines méthodes de la création d'activités nouvelles : Lean startup, Business Model Canvas, LaunchPad Toolkit, etc.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Nous travaillerons principalement sur les compétences :

C3 - Agir, Entreprendre, Innover

C4 - Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et pour ses clients

En présentant de manière concrète des cas

En apportant des cadres méthodologiques

# 2EL2210 – Operations and supply chain management

Responsables : **Guillaume LAMÉ**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT GÉNIE INDUSTRIEL ET OPÉRATIONS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Non**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours initie les élèves aux problématiques de Gestion des Opérations et Supply Chain Management en approfondissant les décisions liées aux problèmes de conception, planification et pilotage rencontrés dans les systèmes de production et distribution de biens et de services. L'enjeu principal pour la Gestion des Opérations étant, dans ces systèmes, de s'assurer que les produits/services commercialisés par l'entreprise soient au bon endroit, au bon moment, avec la qualité et quantité demandées par le client, tout en utilisant de manière efficace les ressources.

Il s'agit donc de comprendre le fonctionnement d'un système de production à différentes échelles (au niveau de la supply chain, de l'usine, de l'entrepôt, des ateliers, des machines), ses processus, les enjeux économiques et environnementaux associés et de développer des approches, méthodes et outils (qualitatifs et quantitatifs) permettant d'en améliorer les performances.

Les exemples seront tirés de divers secteurs industriels.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

Ce cours abordera en particulier :

- les dimensions organisations et processus des systèmes de production et distribution de biens et de services
- la performance d'un système de production au travers de l'organisation du travail, l'organisation physique, les processus et moyens en place
- les approches et méthodes qualitatives et quantitatives pertinentes permettant d'optimiser les performances des systèmes de production et distribution
- la mise en œuvre de ces approches en insistant sur les aspects faisabilité, adaptation, limites et conduite de changement

## Déroulement, organisation du cours

---

Cours et TDs. Une partie des contenus sera sous la forme de lectures et vidéos à étudier individuellement avant les cours.

## Organisation de l'évaluation

Un travail à rendre et présenter (40%) et un examen final écrit de 2 heures (60%)

## Support de cours, bibliographie

Sujets de TDs, vidéos, diapositives de cours et notes de cours.

Ouvrages de référence :

Slack N, Chambers S, Johnston R. Operations management. 5. ed. Harlow: Prentice Hall/Financial Times 2009.  
Holweg M, Davies J, Meyer Ad, et al. Process theory : the principles of operations management. First ed. Oxford: Oxford University Press 2018.  
Chopra S, Meindl P. Supply Chain Management. Strategy, planning and operation. 5th. ed. New York, NY: Pearson Education 2012.

## Moyens

Cours, cas pratiques, témoignages de professionnels

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Diagnostiquer les problèmes et la performance d'un système d'opérations industrielles.
- Mobiliser des outils et concepts fondamentaux pour améliorer la performance des opérations et des chaînes logistiques.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Ce cours permettra de travailler les compétences suivantes :

- C1 Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques
  - C1.2 Utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes pour traiter le problème.
  - C1.3 Résoudre le problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation.
  - C1.5 Mobiliser un large socle scientifique et technique dans le cadre d'une approche transdisciplinaire.
- C2 Développer une compétence approfondie dans un domaine scientifique ou sectoriel et une famille de métiers
  - C2.1 Avoir approfondi un domaine ou une discipline relatif aux sciences fondamentales ou aux sciences de l'ingénieur.
- C4 Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients
  - C4.1 Penser client. Identifier/analyser les besoins, les enjeux et les contraintes d'autres parties prenantes, notamment sociétales et socio-économiques.
  - C4.2 Savoir identifier la valeur apportée par une solution pour un client, le marché. Savoir discerner les opportunités, les bonnes occasions d'affaire et les saisir.

# 2EL2220 – Théories des organisations et des marchés

Responsables : **Yannick PEREZ**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Non**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

L'objet de ce cours est l'analyse des organisations, en s'appuyant sur les outils de la microéconomie élargie. A l'instar d'autres domaines d'application des sciences économiques, l'économie des organisations (Organizational economics) a connu un développement soutenu lors des 20 dernières années. L'économie des organisations implique le recours à l'analyse économique et à ses méthodes pour comprendre l'existence, la nature, le 'design' et la performance des organisations. L'analyse économique des organisations est menée en comparaison avec les marchés et elle porte, au-delà de la firme, sur des formes organisationnelles d'une grande diversité (syndicats, mouvements sociaux, agences, écoles, ...).

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

Ce cours ne suppose pas de prérequis pour les étudiants parfaitement francophones

## Plan détaillé du cours (contenu)

1. Introduction
2. Chapitre 1 : Diversité des modes d'organisation en économie de marché
  - a. Les marchés comme mode structurant de la production et des échanges
  - b. Les organisations intégrées et la nature de la firme.
  - c. Les formes hybrides
  - d. Le problème de l'arbitrage entre les modes d'organisation
3. Chapitre 2 : Les modes de coordination
  - a. Les processus d'information
  - b. Le rôle des contrats
  - c. Nature et fonction de la hiérarchie
4. Chapitre 3. Incitations et motivations
  - a. Incitations : modèles de base
  - b. Incitations liées aux propriétés des modes d'organisation
5. Conclusion

## Déroulement, organisation du cours

Le cours est composé de deux parties :

Une première où les outils de la théorie économique des organisations sont présentés.

La seconde où ils sont mis en applications par l'analyse en groupe d'étudiants de cas typiques de la théorie des organisations.

## Organisation de l'évaluation

L'évaluation est composée de deux exercices.

Le premier est une présentation de situation typique en groupe d'étudiant. Ce travail représente 60% de la note finale.

Le dernier est un devoir sur table composé de 4 questions sur les notions essentielles du cours. Ce travail représente 40% de la note finale.

## Support de cours, bibliographie

Ménard Claude, L'économie des organisations, Repères la découverte.

Saussier Stéphane et Anne Yvrande, L'économie des couts de transactions, Repères la découverte.

Chaubaud Didier, Jean-Michel Glachant, Claude Parthenay et Perez Yannick (eds), 2008, « *Les grands auteurs en économie des organisations* », Ed. Management & Société. 13 chapitres.

## Moyens

Les étudiants doivent venir équipés de leurs ordinateurs portables.

Un seul TD sera ouvert cette année universitaire pour 33 étudiants.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Comprendre les enjeux de création, de développement et du fonctionnement des organisations économiques.

Acquérir les outils de la théorie économique des contrats

Découvrir les modalités de construction des incitations et de la coordination des équipes

Comprendre les déterminants des choix des formes organisationnelles adaptées aux activités économiques.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Au terme de cet enseignement les étudiants comprendront pourquoi les organisations économiques fonctionnent ou pas.

Ils comprendront les problèmes de gestion hiérarchique, de principal agent, d'aléas moral et de sélection adverse.

Ils auront analysé des systèmes d'incitation et de rémunération et auront des outils analytiques pour comprendre les relations inter-industries.



# 2EL2230 – Maintenance et industrie 4.0

Responsables : **Zhiguo ZENG**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT GÉNIE INDUSTRIEL ET OPÉRATIONS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

La maintenance prédictive est un des piliers de l'industrie 4.0. Elle repose sur l'utilisation de données collectées en ligne, leur traitement et leur intégration dans des processus de décisions dynamiques. Elle repose aussi sur la mise à disposition d'agents connectés susceptibles d'exécuter des tâches en temps réel et d'en optimiser leur gestion. Concrètement, il s'agit d'anticiper les défaillances, arrêts, accidents des processus de production ou des systèmes de services et de planifier au mieux les opérations de remplacement, renouvellement, remise en service, etc...

L'objectif de ce cours est de donner à de futurs décideurs, la culture nécessaire qui permet de concevoir, modéliser et recommander des stratégies de maintenance prédictive. L'accent est mis sur les approches guidées par les données et les modèles probabilistes ou statistiques qui s'appliquent à tout système industriel. Ce bagage doit permettre d'interagir efficacement avec des ingénieurs « métier » très proche des applications et des « data scientist » en charge du traitement des données.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Connaissances de base en probabilité et statistique, analyse de données, modélisation et optimisation.

## Plan détaillé du cours (contenu)

- Introduction au cours ; Présentation du projet (1.5h);
- Fault detection and diagnosis through machine learning (9h)
- Planning maintenance activities through optimization (9h)
- Predictive maintenance (9h)
- Exame (2h)

## Déroulement, organisation du cours

- 14.5h de cours, 14h de travaux dirigés et mise en oeuvre pratique des modèles.
- Possibilité d'évolution en classe inversée partiellement.

## Organisation de l'évaluation

Examen avec étude de cas (2h, 50%) + Course project (50%)

## Support de cours, bibliographie

### Bibliographie

- System Reliability Theory, Models, Statistical Methods and Applications, Marvin Rausand, Anne Barros, Arnljolt Hoyland, 2020, Third Edition, Wiley
- Degradation Processes in Reliability, Waltraud Kahle, Sophie Mercier, Christian Paroissin, John Wiley & Sons, 2016
- Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications, Second Edition (Mechanical Engineering) 2nd edition by Jardine, Andrew K.S., Tsang, Albert H.C. (2013) Hardcover
- Case Studies in Reliability and Maintenance, Wiley Series in Probability and Statistics, Wallace R. Blischke, D. N. Prabhakar Murthy, John Wiley & Sons, 2003
- Reliability and Optimal Maintenance, Hongzhou Wang Hoang Pham, 2006, Springer Science & Business Media
- Reliability and Maintenance Engineering, R C Mishra, New Age International, 2006
- Models of Preventive Maintenance (Study in Mathematics & Managerial Economics), Ilya B. Gertsbakh, North Holland, 1977

### Supports de cours

Recueil de transparents, site Web, Jupyter notebook

## Moyens

- Equipe pédagogique (Cours et TD): Anne Barros, Zhiguo Zeng
- Outils informatiques: Python, Matlab

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Concevoir une stratégie de maintenance dans un contexte d'application donné
- Effectuer le choix de modélisation adéquat pour évaluer les performances d'une stratégie de maintenance
  - Savoir définir et formaliser des variables d'états pertinentes
  - Savoir définir et formaliser un critère de performance
  - Savoir élaborer un modèle avec le bon niveau d'abstraction à partir de la description de scénarios ou d'un ensemble états-transition
- Quantifier des performances à partir de modèles probabilistes ou guidés par les données
  - Savoir identifier le bon cadre de modélisation à base de processus stochastiques
  - Savoir identifier les bons algorithmes d'apprentissage et de machine learning en fonction d'un ensemble de données
  - Savoir calculer des lois de probabilités ou des grandeurs moyennes à partir d'un formalisme analytique ou en simulation de Monte Carlo
- Optimiser les performances d'une stratégie de maintenance
  - Savoir mettre en oeuvre des techniques d'optimisation paramétriques pour un critère de performance donné
  - Savoir formaliser un problème d'optimisation lorsque la stratégie de maintenance n'est pas fixée à priori

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Compétences validées:

- Concevoir, modéliser et recommander des stratégies de maintenance prédictive (C1.1 et C1.2)
- Etre capable d'interagir avec des ingénieurs métiers et des data scientists sur ce sujet (C1.5 - jalon 2)
- Superviser la mise en oeuvre d'une stratégie de maintenance prédictive depuis la collecte des données jusqu'à la mise en oeuvre pratique des activités de maintenance (C1.5, jalon 2)
- L'étude de cas finale s'inscrit dans C1.3 (jalons 1B, 2B, 3B), C6.5 et C7.1

Mode de validation

- Les compétences C1.1 (jalons 1 et 2) et C1.2 sont validées lors des séances de TD. La compétence C1.1 est validée lors de l'étude de cas finale pour le jalon 3.
- La compétence C1.5 est validée lors de l'étude de cas finale.

# 2EL2240 – Économie des systèmes de transport décarbonés

Responsables : **Yannick PEREZ**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT GÉNIE INDUSTRIEL ET OPÉRATIONS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Non**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Le cours consistera à étudier trois innovations qui sont en passe de transformer profondément l'industrie associée à la mobilité individuelle. Les deux premières sont d'abord de nature technologique, il s'agit du véhicule autonome et du véhicule électrique - à batterie ou hydrogène. La troisième est liée à la pénétration et la généralisation des nouvelles technologies de l'information et la communication et l'IoT dans la mobilité qui permette la mise en œuvre des principes de l'économie du partage.

La motivation pour étudier la combinaison de ces trois innovations est de déterminer les conditions de passage d'un modèle de propriété individuelle des biens de mobilités avec des externalités négatives considérables en termes de pollution, de congestion, de d'accidentologie vers des usages de services de mobilité autonomes, électriques et/ou partagés qui pourraient apporter des solutions aux problèmes susmentionnés.

Cette transformation des moyens de la mobilité est donc au croisement des approches de l'ingénieur (comment mettre en place de la mobilité autonome, quels usages de la 5G pour la mobilité, comment utiliser l'intelligence artificielle, comment inclure des véhicules électriques dans les réseaux électriques pour des recharges intelligentes à base de renouvelable...), de l'économiste industriel (quels modèles économiques sous-jacents, quelle réglementation des usages, quels jeux d'acteurs dans une industrie en profonde réorganisation) et des analyses des besoins de mobilités et des comportements des consommateurs (quelles incitations pour l'adoption des comportements, acceptation de l'auto-partage, nouveaux comportement et micro-mobilité, transferts multimodal...).

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Pas de prérequis nécessaire.

## Plan détaillé du cours (contenu)

Cours 1: Introduction à la transition énergétique et à la mobilité.

Cours 2: Véhicule électrique pour tout: cadre des flux de revenus

Cours 3: Tarif de conception pour les VE et les énergies renouvelables.

Cours 4: Théories et applications des déploiements d'infrastructures

Cours 5: Économie de l'autopartage

Cours 6: Economie de l'autopartage une application en région parisienne

Cours 7: Véhicules électriques autonomes et partagés: définitions, coût des technologies, mobilité partagée

Cours 8: Nouvelles technologies pour les livraisons urbaines et sur le dernier kilomètre

Cours 9: Mobilité en tant que service

Cours 10: Nouvelles perspectives de la mobilité urbaine

## Déroulement, organisation du cours

Pendant la session de 3h, la première heure et demie sera animée par un intervenant (professeur, chercheur, urbaniste, économiste...) spécialiste du thème. Les TDs seront organisés pendant l'heure et demie suivante. Dans les TDs, les étudiants, en groupe de 3, présenteront des exposés sur des articles de recherches mis à leurs dispositions par les intervenants.

## Organisation de l'évaluation

Le cours sera évalué en deux formats obligatoires : Pendant les travaux de groupes réalisés pendant les TDs. Ce travail de présentation comptera pour 60% de la note finale.

L'examen final en 2 h portera sur des questions, une par cours, comptera pour 40 % de la note finale

## Support de cours, bibliographie

- Sperling, Daniel (2018) Three Revolutions: Steering Automated, Shared, and Electric Vehicles to a Better Future. Island Press/Center for Resource Economics
- Icaro Silvestre Freitas Gomes, Yannick Perez, Emilia Suomalainen 2020 Coupling small batteries and PV generation: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 126 (2020) 109835.
- Andrew Thompson and Yannick Perez 2020, Vehicle-to-Anything (V2X) Energy Services, Value Streams, and Regulatory Policy Implications, Energy Policy 137 (2020) 111136
- Quentin Hoarau & Yannick Perez, 2019, Network tariff design with distributed energy resources and electric vehicles, Energy Economics, Volume 83, September, Pages 26-39.
- Olfa Tlili Christine Mansilla David Frimat Yannick Perez, 2019 Hydrogen market penetration feasibility assessment: Mobility and natural gas markets in the US, Europe, China and Japan, International Journal of Hydrogen Energy Volume 44, Issue 31, 21 June 2019, Pages 16048-16068.
- Ramírez Díaz Alfredo, Marrero Gustavo, Ramos-Real Francisco, Perez Yannick, 2018 Willingness to pay for the electric vehicle and their attributes in Canary Islands, Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 98, December 2018, Pages 140-149.
- Ramírez Díaz Alfredo, Ramos-Real Francisco Javier, Perez Yannick, Barrera Santana Josue, 2018, Interconnecting isolated electrical systems. What is the best strategy for the Canary Islands? Energy Studies Review- Vol. 22 (2018) pp. 37-46.
- Hoarau Quentin and Perez Yannick, 2018, Interactions Between Electric Mobility And Photovoltaic Generation: A Review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 94 (2018) 510-522.
- Rodríguez Brito Maria Gracia, Ramírez-Díaz Alfredo Jesús, Ramos-Real Francisco J., Perez Yannick, 2018, Psychosocial traits characterizing EV adopters' profiles: The case of Tenerife (Canary Islands), Sustainability 2018, 10, 2053.
- Codani Paul, Perez Yannick and Petit Marc 2018 Innovation et règles inefficaces : le cas des véhicules électriques, Revue de l'Énergie n° 638, Mai-Juin
- Borne Olivier, Yannick Perez and Marc Petit 2018, Market integration or bids granularity to enhance flexibility provision by batteries of Electric Vehicles, Energy Policy, Volume 119, August 2018, Pages 140-148.
- Borne Olivier, Korte Klaas, Perez Yannick, Petit Marc and Purkus Alexandra 2018, Barriers to entry in Frequency-Regulation Services Markets: Review of the status quo and options for improvements, Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 81, Part 1, January 2018, Pages 605-614.
- Codani Paul, Perez Yannick and Petit Marc 2016, Financial Shortfall for Electric Vehicles: economic impacts of Transmission System Operators market designs, Energy, Volume 113, pp 422-431.
- Eid Cherrelle, Codani Paul, Perez Yannick, Reneses Javier, Hakvoort Rudi, 2016, Managing electric flexibility from Distributed Energy Resources: A review of incentives for market design, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 64, pp 237-247.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Analyser les potentialités techniques, économiques et sociales de la mobilité électrique, autonome et partagée. Mettre en évidence les limites des solutions proposées, des business models en cours de développement et des besoins à pourvoir pour mettre en œuvre cette nouvelle mobilité décarbonnée dans des villes plus intelligentes.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.1 Étudier un problème dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un problème dans ses dimensions scientifiques, économiques et humaines

C2.4 Créer de la connaissance, dans une démarche scientifique

C3.6 Evaluer l'efficacité, la faisabilité et la robustesse des solutions proposées

C9.4 Faire preuve de rigueur et d'esprit critique dans l'approche des problèmes sous tous les angles, scientifiques, humains et économiques

# 2EL2250 – Enjeux du secteur public

Responsables : **Guillaume-Alexandre Collin, Éléonore MOUNOUD**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

L'objectif de ce cours est de sensibiliser les étudiants aux enjeux du secteur public pour leur permettre d'en comprendre les transformations et identifier comment, en tant qu'ingénieur CentraleSupélec, ils pourraient y contribuer.

Il s'agit notamment :

- d'acquérir une compréhension générale du fonctionnement du secteur public et du rôle de chacun des acteurs,
- de comprendre des grands enjeux de transformation du secteur public
- de traduire ces enjeux dans plusieurs domaines de politiques publiques : comment y contribuer, au sein du secteur public ou en entreprise

Secteur public français

Principalement zoomer sur les enjeux de la santé et de la transition écologique

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

Introduction

Compréhension générale du secteur public / fondamentaux

- Rôle, organisation et fonctionnement des acteurs publics (préciser)
- Hiérarchie des normes et la fabrique de la loi
- Budget public : dépenses et recettes publiques
- Fonctions publiques

Transformation de l'action publique

- LOLF
- Elaboration, pilotage et évaluation des politiques publiques
- Réforme de l'Etat
- Innovation publique

Transition numérique du secteur public

- Numérisation des services publics

- Data
- Inclusion numérique
- Souveraineté

Financements et marchés publics

- Financements publics
- Marchés publics

Les enjeux des politiques sociales

- Santé / Sécurité sociale
- Travail et emploi

Les enjeux de la transition écologique et de la cohésion des territoires

- Mobilités
- Résilience
- Accès au service public
- Etude de cas : MaaS

Les enjeux régaliens

- Police
- Armées
- Justice

Les enjeux démocratiques ?

Examen final

## Déroulement, organisation du cours

Introduction (1h30) + 9 séances de 3h incluant une présentation, des études de cas présentées par les étudiants et des interventions de grands témoins

## Organisation de l'évaluation

2h d'examen (forme étude de cas)

# 2EL2410 – Compression et débruitage des signaux

Responsables : **Gilles Chardon**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SIGNAL, INFORMATION, COMMUNICATION**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours est une introduction à la représentation, l'analyse, la compression et le débruitage des signaux et des images. Ces notions forment le socle des traitements modernes utilisés pour le stockage de musique, de vidéos, l'amélioration des images photographiques dans les téléphones portables, le traitement des images médicales ou issues de l'astrophysique...

Avec la quantité croissante de données collectées et stockées, la compression de signaux (images, sons, vidéos, etc.) reste un enjeu majeur en sciences des données, permettant de limiter la quantité de stockage nécessaire, ainsi que les flux de données sur les divers réseaux de télécommunications. Des méthodes de restauration de signaux (dont le débruitage est un exemple particulier) sont embarquées dans les smartphones récents permettant de pallier les limitations des capteurs photographiques en résolution et sensibilité.

Les méthodes présentées dans le cours auront pour point commun d'être frugales en calculs, énergie, et quantité de données nécessaires à leur conception et leur utilisation.

Après un rappel des notions fondamentales de signal et d'analyse harmonique (filtrage, série et transformée de Fourier, processus aléatoires), un premier aperçu du débruitage et de la compression de signaux sera donné par le filtrage de Wiener et le codage LPC de la parole.

L'introduction du codage entropique de source permettra ensuite de concevoir des codeurs sans perte d'images (type PNG) et de sons (type FLAC).

La compression avec perte, avec des taux de compression supérieurs (JPEG, MP3, etc.), sera ensuite abordée.

Enfin, les bases orthogonales d'ondelettes seront définies, avec pour applications la compression d'image (JPEG2000) et le débruitage non-linéaire d'images.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

1SL1000 CIP

1SL1500 EDP

1CC4000 Traitement du signal

## Plan détaillé du cours (contenu)

1- Introduction

- Filtrage, échantillonnage



- Série et transformée de Fourier
- Processus aléatoires

## 2- Filtrage de Wiener et codage de parole

- Débruitage linéaire de processus aléatoires
- Modèles de production de la parole
- Coefficients de prédiction linéaire
- Codage LPC

## 3 - Codage de source et quantification

- Codage de source, entropie
- Compression d'images sans perte (PNG)
- Codage universel et compression audio sans perte (FLAC)
- Quantification

## 4 - Représentations temps-fréquence

- Bases et frames temps-fréquence (Transformée de Fourier à court terme, bases de cosinus)
- Compression d'image JPEG
- Masquage audio et application au codage audio (MP3, Vorbis, etc.)

## 5 - Bases d'ondelettes

- Bases orthogonales d'ondelettes et transformée rapide en ondelettes
- Ondelettes de Daubechies
- Application à la compression d'image, JPEG2000
- Seuillage d'ondelettes pour la compression d'images

## Déroulement, organisation du cours

15h Cours  
13h5 TD/TP  
2h Contrôle final

## Organisation de l'évaluation

Compte rendus des TP 30% Absence à un TP = 0 points pour le TP Examen final écrit 2h sans documents. 70% Rattrapage : examen écrit 2h.

## Support de cours, bibliographie

A Wavelet Tour of Signal Processing, Stéphane Mallat, Academic Press

## Moyens

Ordinateurs personnels des étudiants, Python.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À la fin du cours, les étudiants pourront :

- Connaître les bases mathématiques de la représentation des signaux non stationnaires
- Analyser des signaux à l'aide de représentations temps-fréquence
- Choisir la représentation adaptée pour un modèle donné de signal.
- Mettre en oeuvre des techniques de compression de signaux.
- Connaître les limites des techniques de compression
- Concevoir, analyser, et mettre en oeuvre des méthodes d'estimation de signaux.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.2 Utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes pour traiter le problème

C6.5 Exploiter tout type de données, structurées ou pas, y compris massives.

C6.7 Comprendre la transmission de l'information

# 2EL2420 – Traitement d'images numériques

Responsables : **Elisabeth LAHALLE, Charles Soussen**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SIGNAL, INFORMATION, COMMUNICATION**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Dans de nombreux domaines tels que la santé, la vidéo-surveillance, la microscopie ou la télédétection, des systèmes simples ou sophistiqués d'acquisition d'image ont été conçus pour produire des images numériques de toutes sortes : images 2D, 3D, couleur, vidéos, images hyperspectrales. L'analyse d'image couvre un large spectre de traitements allant de la reconstruction d'images à partir de mesures indirectes (par exemple en imagerie scanner ou en IRM) à la reconstruction de scènes 3D en vision par ordinateur, au recalage d'images, à la segmentation d'objets dans des images, et à l'analyse d'images hyperspectrales en télédétection.

L'objectif du cours est double. Il s'agit d'une part de maîtriser les concepts fondamentaux du traitement d'images, incluant les analyses élémentaires pour traiter des images en niveaux de gris et des images couleurs (seuillage, histogramme, codage) et les opérations de filtrage linéaire et non-linéaire, effectuées dans le domaine spatial ou dans le domaine de Fourier. D'autre part, le cours aborde des traitements avancés permettant de dépasser les limites des approches de type filtrage. Ces traitements comprennent les méthodes de segmentation d'image utilisant des modèles géométriques pour décrire les régions et les contours d'objets, et les approches dites variationnelles, où la reconstruction d'image est formulée comme l'optimisation d'un critère en grande dimension. L'approche variationnelle est développée en détails et illustrée dans le cas du débruitage et de la déconvolution d'image.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

- Traitement du signal : convolution, transformée de Fourier
- Probabilités et statistiques
- Optimisation

## Plan détaillé du cours (contenu)

### Introduction:

Exemples de traitement d'images : reconnaissance de formes, recalage d'images, segmentation d'images, restauration et reconstruction d'images.

Systèmes d'acquisition d'images numériques, processus de formation de l'image et formats.

### Analyse élémentaire :

Histogramme, amélioration de contraste, seuillage.

Echantillonnage, quantification et interpolation d'image.

Format d'images couleur (RGB, HSV, etc.) et traitements associés.

## Filtrage :

Linéaire:

- Notion de séparabilité dans le domaine spatial.
  - Filtres de lissage et de contraste : filtres moyenneur, gaussien, dérivateurs, laplacien, filtres de Prewitt et Sobel, etc.
  - Filtrage dans le domaine fréquentiel.
- Non linéaire : filtre médian, filtrage d'ordre.

## Détection de contours et segmentation :

- Modèles géométriques pour l'image : voisinage entre pixels, connexité, notions de régions et frontières.
- Segmentation d'images : approches par partitionnement de régions, par détection de frontières, et par contours déformables (contours actifs)

## Approche variationnelle (basée optimisation numérique) pour les problèmes inverses en imagerie :

- Formulation de problèmes d'optimisation pour le traitement d'images
- Régularisation de Tikhonov
- Régularisations préservant les contours
- Cas d'étude : débruitage et déconvolution d'images

## Déroulement, organisation du cours

### Le cours s'organise en deux parties pour présenter :

- **Les concepts fondamentaux** : 4 CM, 3 TD
- **Les traitements avancés** : 5 CM, projet long (11h)

Les étudiants seront amenés à illustrer les concepts et à mettre en oeuvre les algorithmes à l'aide d'un outil de simulation et de traitement de données de type Matlab.

## Organisation de l'évaluation

L'évaluation consistera en :

- un partiel à mi-parcours, 25 % de la note finale
- une évaluation par mini-projet, 75 % de la note finale

## Support de cours, bibliographie

- H. Maître, *Le traitement des images*, édition Hermes, 2003.
- J.-P. Cocquerez et S.Philipp, *Analyse d'images: filtrage et segmentation*, éd. Masson, 1995.
- S. Bres, J.-M. Jolion, F. Lebourgeois, *Traitement et analyse des images numériques*, éd. Hermes 2003.
- A. Trémeau, *Image numérique couleur*, éd Dunod 2004.
- H. Maitre, *Du photon au pixel*, éd Iste 2016

## Moyens

Enseignants supplémentaires (un 3ème chargé de TD) pour les TD si le nombre d'étudiants excède 50 (plus de 2 groupes de 25).

Les supports de cours sont en anglais et en français. Les cours magistraux sont en français.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de cet enseignement, l'étudiant :

1. Possèdera quelques notions sur le fonctionnement des systèmes d'acquisition d'images numériques (caméras, microscopes, ...) et le processus de formation de l'image.

2. Sera capable d'analyser le contenu d'une image numérique.
3. Sera capable de mettre en oeuvre des traitements numériques élémentaires : détection de pixels par seuillage des niveaux de gris, calcul d'histogramme, filtrage linéaire ou non linéaire, lissage et détection de contours.
4. Sera capable de mettre en oeuvre des techniques avancées de traitement d'image pour la restauration d'image.
5. Aura assimilé des notions plus avancées comme la segmentation basée sur les modèles géométriques (contours et régions) et l'analyse d'images 3D.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Le partiel permet de participer à la validation des compétences C1 :

C1.2 : utiliser les modèles adaptés, les hypothèses simplificatrices pertinentes

Le projet long permet de participer à la validation des compétences C2, C6 et C8:

C8.1 : travailler en équipe/en collaboration

C6.1 : résoudre numériquement un problème

C2.2: importer des connaissances d'autres domaines ou disciplines

# 2EL2510 – Architecture et conception des systèmes numériques

Responsables : **Anthony Kolar**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT ÉLECTRONIQUE ET ÉLECTROMAGNÉTISME**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Dans une approche top-down, les élèves vont apprendre à spécifier et concevoir des systèmes de traitement numérique dédiés, dans un objectif d'intégration dans un FPGA ou un ASIC.

L'aspect back-end microélectronique (placement routage) sera réservé aux étudiants souhaitant se spécialiser dans le domaine et étudié en mention de troisième année.

Le cours aboutira à la création d'une application, en l'occurrence un petit processeur de traitement, et permettra ainsi de comprendre les différents concepts utilisés dans celui-ci.

De façon globale à l'issue de ce cours, les élèves seront capables de :

- Définir et concevoir l'architecture d'une chaîne de traitement numérique
- Décrire un modèle de ce traitement en langage HDL.
- Concevoir un processeur simple et savoir le programmer

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

Notions de base en Électronique Numérique

## Plan détaillé du cours (contenu)

Cours 1 : Architecture des unités de traitement : chemin de donnée et séquenceur – part. 1

1. Cours 2 : Architecture des unités de traitement : chemin de donnée et séquenceur – part. 2
2. Cours 3 : Description VHDL
3. Cours 4 : Analyse temporelle des systèmes synchrones
4. Cours 5 : Les GPUs : Architectures et chemin de données part. 1
5. Cours 6 : Les GPUs : Architectures et chemin de données part. 2
6. Cours\_TD 1 : Les Unités Logiques Algorithmiques part. 1
7. Cours\_TD 2 : Les Unités Logiques Algorithmiques part. 2
8. Cours\_TD 3 : Registres, mémoires et pipeline part. 1
9. Cours\_TD 4 : Registres, mémoires et pipeline part. 2
10. Cours\_TD 5 : Le jeu d'instruction
11. Cours\_TD 6 : Le décodage d'instruction part. 1
12. Cours\_TD 7 : Le cache et ses stratégies
13. Cours\_TD 8 : Le décodage d'instruction part. 2
14. Cours\_TD 9 : Exécutions et sauts conditionnel
15. Cours\_TD 10 : Le compilateur

## Déroulement, organisation du cours

### Définition de la notion d'un Cours TD :

Il s'agit d'une interaction très forte entre un cours classique et sa mise en application quasi immédiate, bien qu'ici la démarche soit inversée : les exercices ont pour objectifs de faire réaliser où sont les points critiques sans connaître la solution pour y remédier. Une fois conscient du problème, le cours apporte la solution aux étudiants qui y sont alors beaucoup plus sensible. Cette démarche n'est possible que sous la condition qu'il n'y est pas de coupure franche entre le cours et le PC, d'où cette notion de Cours\_TD.

**ATTENTION:** L'absence à cette partie rend quasiment impossible la bonne compréhension du sujet et de ce fait la validation du cours

### Projet à réaliser partiellement en homework et en équipe:

- 6 séances de projet (EL) de 1h30 en présence d'un encadrant
- 21h de homework (intercalées avec les séances de projet précédentes).
- 1 séance de 3H avec exposé oral puis démonstration devant le groupe du résultat

Le département fournira à chaque élève une carte de type FPGA (les mêmes que celles utilisées pour le cours de première année) qu'ils garderont jusqu'à la fin de leur projet.

## Organisation de l'évaluation

- Examen écrit - conception d'architecture de processeur
- Rapport du projet et présentation

**Ratio: 70% examen écrit - 30% Projet**

Les Compétences C1 seront validées si vous avez plus de 10/20 à la fois en examen et au projet

Les Compétences C2 validées si vous avez plus de 10/20 à la fois en examen et au projet

La Compétences C3 sera validée si vous avez plus de 10/20 à la fois en examen et au projet

La Compétences C6 sera validée si vous avez plus de 10/20 à la fois en examen et au projet

## Moyens

DE0 FPGA Board From Altera

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Le cours «Architecture des systèmes Numériques» apportera plus précisément aux élèves les notions nécessaire pour :

- Définir une architecture de traitement
  - Architecture des unités de traitement : chemin de donnée et séquenceur
  - Description de chacune des fonctions précédentes en langage VHDL
  - Analyse temporelle des systèmes synchrones
- Conception d'un processeur (Approche de type projet)
  - ALU, registres et pipeline
  - Construction d'un cœur de processeur
  - Jeu d'instruction
  - Décodage d'instruction, Sauts et pipeline
- Traitement de donnée sur processeur Graphique
  1. Architecture des GPU: chemin de donnée
  2. Langage de programmation parallèle via librairie de type CUDA

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C1.1 Étudier un problème dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un problème dans ses dimensions scientifiques, économiques et humaines.
- C1.3 : Résoudre le problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation.
- C2.3 Identifier et acquérir rapidement des nouvelles connaissances et Compétences nécessaires dans les domaines pertinents, qu'ils soient techniques, économiques ou autres.
- C2.5 Maîtriser les compétences d'un des métiers de base de l'ingénieur (au niveau junior).
- C3.6 : Évaluer l'efficacité, la faisabilité et la robustesse des solutions proposées.
- C6.3 : Spécifier, concevoir, réaliser et valider un logiciel.



# 2EL2520 – Électronique pour les applications biomédicales et de communication

Responsables : **Emilie Avignon-Meseldzija**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT ÉLECTRONIQUE ET ÉLECTROMAGNÉTISME**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

L'objectif de ce cours est d'introduire des concepts fondamentaux d'électronique en se basant sur des applications biomédicales, plus particulièrement l'électronique d'interface (acquisition ECG, EEG, EOG), de traitement biomédical (filtrage Gm-C) ou encore de stimulation (pacemaker).

Après plusieurs cours théoriques, l'étudiant développe ses compétences en électronique sur des cas pratiques comme la mesure de l'ElectroCardioGramm ou plus théorique comme un filtrage Gm-C pour des signaux EEG. Tout au long de ce cours l'étudiant est invité à simuler ses circuits avec des données biomédicales issues de bases de données en Open Access.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

L'objectif premier de ce cours est de sensibiliser les étudiants à l'électronique au travers d'applications pas à pas. Ainsi un haut niveau théorique en électronique n'est pas requis. Néanmoins, il est utile pour suivre ce cours d'avoir les toutes premières bases de calculs de circuits (lois des nœuds, loi des mailles, loi d'ohm...). Pour les étudiants de CS avoir suivi l'électif "Systèmes électroniques" en première année est un plus.

## Plan détaillé du cours (contenu)

Partie 1 : Introduction aux bases de l'électronique d'interface biomédicale (transistors, amplificateurs opérationnels, conception d'amplificateurs opérationnels), (12h00 HPE)

- 1.1 Introduction au cours, motivation
- 1.2 Le transistor MOS
- 1.3 Circuits de base pour interface à base de transistors MOS
- 1.4 Circuit à base d'opampes pour applications biomédicales : amplificateur d'instrumentation
- 1.5 Méthode de conception d'un amplificateur opérationnel au niveau du transistor

Partie 2 : Cas d'étude de circuits biomédicaux, (10h30 HPE)

- 2.1 Filtrage biomédical : Techniques Gm-C
- 2.2 Dispositifs biomédicaux embarqués : exemple de pacemakers, timers.
- 2.3 Différents circuits biomédicaux

Partie 3 : Travaux pratiques (6h00 HPE) :

- 3.1 Acquisition d'électrocardiogrammes (Filtres + Amplificateurs d'instrumentation)
- 3.2 Conception d'un filtre biomédical Gm-C

Partie 4 : Session d'entraînement (3h00 à la maison avec des heures de bureau pour les questions)  
Un ensemble d'exercices et d'examens précédents est fourni avec la correction. Le professeur reste disponible pour répondre aux questions pendant les heures de bureau.

## Déroulement, organisation du cours

L'électronique étant une matière pratique, l'apprentissage se fera par des démonstrations de raisonnement sur des cas typiques.

L'objectif étant que l'étudiant soit suffisamment familiarisé et entraîné pour pouvoir reproduire ces raisonnements sur d'autres cas.

## Organisation de l'évaluation

La présence en TP est obligatoire car le travail fourni en séance (calculs, recherche de solutions...) constitue une partie de l'évaluation. Chaque TP compte 20% de la note finale. L'examen final de 2h00 compte pour 60% de la note finale.

La compétence C6 sera évaluée sur la base du TP/projet où il y aura des résultats à obtenir à partir de simulateur électronique. Il faudra une note supérieur à 12/20 en TP pour valider cette compétence. Les compétences C1 et C2 seront évaluées sur toutes les activités, mais il faudra une note d'examen écrit supérieure à 10/20 et une note de TP supérieure à 12/20 pour valider ces compétences.

## Support de cours, bibliographie

Tony Cahn Carusone, David A. Johns, Kenneth W. Martin "Analog Integrated Circuit Design" Wiley  
R. Jacob Baker « CMOS Circuit Design, Layout and Simulation" IEEE Series on Microelectronics Systems and Wiley

## Moyens

L'électronique étant une matière difficile à maîtriser sans être confronté à des circuits, ce cours présente la particularité de se reposer sur des exemples pratiques pour déclencher l'apprentissage. De plus, la majorité des études de cas sont illustrées par des fichiers LtSpice que l'étudiant peut simuler en simultanéité avec les cours, PC et TP.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce cours les étudiants l'ayant suivi seront capables de:

- concevoir un schéma électronique réalisant une chaîne de traitement de signal pour une application biomédicale ou de communication
- analyser un schéma électronique combinant amplificateurs opérationnels, transistors et éléments passifs

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Compétences:

C1: Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

C2: Développer une compétence approfondie dans un domaine scientifique ou sectoriel et une famille de métiers

C6: Être à l'aise et innovant dans le monde du numérique

# 2EL2530 – Capteurs intégrés MEMS

Responsables : **Jerome Juillard**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT ÉLECTRONIQUE ET ÉLECTROMAGNÉTISME**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Non**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Dans de nombreux domaines applicatifs - automobile, médecine, aéronautique et défense, télécommunications ou électronique de grande consommation (smartphone, tablettes) - le développement ou l'intégration de capteurs miniaturisés MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) constitue désormais un passage obligé du déploiement d'applications connectées. Ces dispositifs sont utilisés comme capteurs (accéléromètres, gyroscopes, capteurs de pression, microphones, etc.), actionneurs (imprimantes jet d'encre, displays optiques) ou dans la conversion d'énergie. Ils présentent de tels avantages en termes de fiabilité, de consommation, de métrologie, de dimensions et de coût, qu'ils sont rapidement devenus, depuis les années 90, des éléments essentiels (mais invisibles) de notre quotidien, et sont appelés à jouer un rôle croissant dans notre avenir.

Ce cours couvre des aspects théoriques et pratiques, du point de vue de la modélisation (modélisation multi-physique / multi-domaine, réduction d'ordre de modèle), de la physique (mécanique, électrostatique, fluide, limites métrologiques fondamentales), de la technologie (techniques de micro-fabrication, intégration, packaging), et de l'économie (rentabilité). Il a pour ambition de proposer un tour d'horizon complet du domaine, qui intéressera à la fois les étudiants amoureux de "belle physique" et de conception de systèmes complexes, ou encore ceux qui souhaitent appréhender l'industrialisation à grande échelle de dispositifs intégrés.

Des stages de césure chez des grands noms des MEMS, français et internationaux, sont proposés chaque année.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

Pas de pré-requis particulier.

## Plan détaillé du cours (contenu)

CM = 13.5 HPE

CM 1 – Panorama des MEMS (applications : capteurs, actionneurs, transducteurs, acteurs principaux)

CM 2-3 – Capteurs Inertiels MEMS, Mécanique et modélisation

CM 4-5 – Transduction et Forces à l'échelle des MEMS

CM 6-7 – Fabrication, intégration et packaging

CM 8-9 – Industrialisation des MEMS

TDs = 6 HPE + 6 HEE

Homework - Accéléromètre pendulaire - modélisation et simulation (premiers pas avec Coventor) - 3HEE

TD papier - Magnétomètre résonant AM - 3 HPE

TD info - Gyroscopes vibrant MEMS - 3HPE (modes séparés) + 3HEE (modes dégénérés)

Projets = 9 HPE + HEE

Reverse engineering d'un accéléromètre 3 axes commercial

Etude d'un accéléromètre 2 axes résonant

Optimisation d'un magnétomètre résonant FM

Modélisation de switches d'accélération MEMS

etc.

## Déroulement, organisation du cours

Cours magistraux (13.5h), PC (6h), projets (9h)

Cours et supports en anglais. Polycoché disponible en français.

## Organisation de l'évaluation

QCM sur cours magistraux / PCs (50%) Rapport de projet (50%).

Compétences C1 et C2 évaluées via QCM + note projet (hors partie simu)

Compétence C6 évaluée sur note projet (partie simu exclusivement)

## Support de cours, bibliographie

Practical MEMS, V. Kaajakari, Small Gear Publishing, 2009

Inertial MEMS, principles and practice, V. Kempe, Cambridge University Press, 2011

Micro Mechanical Transducers, Pressure sensors, Accelerometers and Gyroscopes, M.-H. Bao, Elsevier, 2000

Micromachined Transducers Sourcebook, G. T. A. Kovacs, McGraw-Hill, 1998

## Moyens

Logiciel MEMS+ Coventor (accès à 50 licences gratuites accordé par l'entreprise)

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Connaître les principaux types de capteurs / actionneurs MEMS et leurs applications

Connaître les principaux procédés de fabrication, d'intégration et de packaging des dispositifs MEMS

Connaître les principaux phénomènes physiques mis en jeu à l'échelle micro (mécanique, transduction, dissipation, bruit)

Comprendre globalement le fonctionnement des capteurs inertiels MEMS (accéléromètres, gyroscopes), de la physique, à l'électronique et aux lois de commande.

Être capable de dimensionner un tel système, et de le simuler à l'aide d'un outil de conception métier

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 / C2 / C6

# 2EL2610 – Théorie des communications

Responsables : **Sheng Yang**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SIGNAL, INFORMATION, COMMUNICATION**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

[Ce cours est enseigné en anglais]

Les communications numériques entre les personnes étendues aux capteurs, machines, véhicules ou objets sont des vecteurs de transformation pour un grand nombre de secteurs avec des cas d'usages et des besoins spécifiques (télécommunications, spatial, transports, énergie, santé, industrie, villes...). Les quantités d'informations échangées et les besoins de connectivité augmentent de façon vertigineuse et les réseaux sont en grande mutation pour permettre l'échange d'informations dans des conditions reconfigurables et adaptables à de multiples scénarios applicatifs.

Ce cours donne les outils théoriques et méthodologiques pour modéliser, analyser, concevoir, évaluer et optimiser les éléments constitutifs d'une communication ou d'un système de communication. La théorie des communications permet de comprendre les limites asymptotiques de ce qui est possible. Elle donne également des outils méthodologiques pour construire des traitements tels que coder, protéger, transmettre un message via un canal physique et les restituer avec une qualité requise (fiabilité, latence...), en tenant compte des propriétés intrinsèques de la source, des propriétés intrinsèques du canal (distorsions, bruits, capacité...) et des limitations technologiques ou réglementaires (efficacité spectrale, complexité, capacité de stockage, coût, puissance, consommation...). De nombreux exemples d'application permettent de comprendre les paramètres à optimiser pour de multiples usages : maximiser l'efficacité spectrale de la diffusion sur câble pour par radio de contenus multimédias, obtenir du très haut débit sur fibre optique ou sur des liens radio, garantir une grande fiabilité, garantir une faible latence, privilégier une très faible consommation énergétique...

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

- Modélisation
- Traitement du Signal
- Statistiques et apprentissage

## Plan détaillé du cours (contenu)

### 1- Vue d'ensemble d'un système de communication

Éléments constitutifs d'une chaîne de communication numérique (source, émetteur, canal, récepteur, destinataire).

Interfaces et protocoles de communication.

### 2- Représentation des signaux, information et codage (compression)

Représentation de signaux à temps continu. Théorème de l'échantillonnage et quantification.

Espaces des signaux, formes d'onde et séquences numériques. Modèles de sources et propriétés.

Information, entropie et codage de source. Méthodes de construction de codes de source. Exemples d'algorithmes de compression de données, images et sons (Lempel-Ziv, JPEG, MP).

### 3- Communications numériques

Modèles de canaux de transmission à temps continu et propriétés.

Canal à bruit blanc additif gaussien.

Modulations numériques. Critère de Nyquist. Signaux modulés et équivalents en bande de base.

Règles de décision optimales. Architecture des émetteurs-récepteurs.

Analyse des performances : occupation spectrale, rapport signal à bruit, débit d'information et probabilité d'erreur.

### 4- Canaux de communication et codage canal (protection)

Modèles de canaux à temps discrets et équivalences.

Information mutuelle. Capacité d'un canal de communication au sens de Shannon.

Codes linéaires algébriques, codes convolutifs, codes LDPC, codes polaires.

Décodage à décisions dures ou souples. Algorithme de Viterbi.

Analyse des performances des codes (rendement, probabilité d'erreurs de décision résiduelles).

TP (avec Python notebook):

TP 1: Compression image avec l'algorithme de Huffman

TP 2: Compression audio avec sous-échantillonnage et l'analyse de Fourier

TP 3: Modulation et communication en bande de base

TP 4: Codage et décodage de codes QR

## Déroulement, organisation du cours

Cours (16,5 H)

TD (6 H)

TP (6H)

Contrôle final (2H)

## Organisation de l'évaluation

Compte Rendu TP (30%) Contrôle final : examen écrit (70%)

## Support de cours, bibliographie

- R.G. Gallager. Principles of digital communication. Cambridge University Press; 2008.
- A. Lapidoth. A foundation in digital communication. Cambridge University Press; 2017.
- T.M. Cover, J.A. Thomas. Elements of information theory, Wiley, 2nd edition, 2005.

## Moyens

Equipe enseignante:

- Sheng Yang pour les cours magistraux
- Sheng Yang, Richard Combes et Antoine Berthet pour les TD
- Sheng Yang et Richard Combes pour les TP

Taille des TD: 20 élèves par groupe (max. 3 groupes)

Outils logiciels: Python

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de ce cours, les élèves apprendront les principes mathématiques des systèmes de communication modernes, importants à la fois pour continuer leurs études dans le domaine et pour leurs carrières en tant qu'ingénieurs. En particulier, les élèves seront capable de

- modéliser, analyser, concevoir et optimiser les composants clés d'un canal de communication point à point,
- construire des codes simples avec des méthodes de codage de source et de canal dans diverses situations,
- construire un décodeur / détecteur optimal pour le récepteur,
- manipuler l'espace vectoriel des sources d'informations et des signaux de communication.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C6.7 Comprendre la transmission de l'information

C1.2 Utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pour traiter le problème

C1.4 Spécifier, concevoir, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe

C2.1 Avoir approfondi un domaine ou une discipline relative aux sciences fondamentales ou aux sciences de l'ingénieur

# 2EL2620 – Réseaux de communication mobiles et services

Responsables : **Mohamad Assaad**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SIGNAL, INFORMATION, COMMUNICATION**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Non**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Les réseaux de communication se sont déployés à l'échelle du globe en moins d'un demi-siècle. Suite à l'émergence de nouveaux concepts et services (smart cities, industrie 4.0, internet des objets, etc.), les réseaux sont en grande (r)évolution, surtout avec le développement de la 5G, pour accompagner la transformation de nombreux secteurs dits verticaux (télécommunications, transports, énergie, santé, agriculture, industrie...). Plusieurs types de services sont ainsi transmis sur les réseaux de communication actuels.

L'objectif de ce cours est de comprendre les architectures des réseaux actuels et une vision prospective des évolutions, ainsi que le concept cellulaire et les techniques radio principales pour permettre la transmission des données dans un réseau sans fil. Ce cours présente aussi les fondements théoriques et les outils utilisés pour la conception, l'optimisation, le déploiement et la gestion des systèmes et réseaux de communication. Il aborde le dimensionnement d'un réseau et la détermination de sa couverture en pratique, ainsi que le lien entre la capacité d'un réseau et la qualité de service à offrir à chaque usager, à l'aide d'outils d'ingénierie de trafic.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

- Introduction générale et architectures des réseaux mobiles
  - Normes et organismes de régulation. Allocation du spectre.
  - Services (téléphonie, VoIP, diffusion de contenus multimédia). Nouveaux services (IoT, usine du futur, etc).
  - Introduction aux réseaux cellulaires (GSM, UMTS, LTE, 5G).
- Concept Cellulaire
  - a. Concept Cellulaire : Modèles de propagation. Techniques d'accès radio
  - b. Gestion des ressources Radio: Contrôle de puissance. Gestion des interférences. Optimisation.
  - c. Dimensionnement de réseau, déploiement, optimisation.
- Ingénierie de trafic et Qualité de service
  - Trafic et Qualité de service. Qualité d'expérience. Qualité de la couverture et de la connectivité.
  - Modèles de trafic et dimensionnement : loi d'Erlang, modèle de file d'attente, etc.
  - Gestion de la mobilité : Transfert des communications (Handover), adressage et routage, Itinérance (Roaming).



## Déroulement, organisation du cours

Déroulement, organisation du cours (séquençage CM, TD, EL/TP...) :

- Introduction générale aux réseaux sans fil : 1h30 (CM)
- Concept Cellulaire et accès radio: 4h30 (CM) – 3h (TD) – 6h (TP)
- Ingénierie de trafic et Qualité de Service : 6h (CM) – 4h30 (TD) – 3h (TP)

TP 1 : Performance des techniques d'accès radio(3h)

TP 2: Capacité et couverture d'un réseau sans fil (3h)

TP 3 : Ingénierie de trafic et dimensionnement des réseaux (3h)

## Organisation de l'évaluation

Examen écrit (évaluation des acquis 1 à 4): 2h – 70% de la note finale - TP: 30% de la note finale

## Support de cours, bibliographie

- 1- Harri Holma, Antti Toskala, LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2011.
- 2- S. Stanczak, M. Wiczanoski and H. Boche, Fundamentals of Resource Allocation in Wireless Networks, Second edition, Springer 2009.
- 3- H. Holma and A. Toskala, WCDMA for UMTS, John Wiley & Sons, 2004.
- 4- R. Van Nee and R. Prasad, OFDM for Wireless Multimedia Communications, 2000.
- 5- T. Bonald, M. Feuillet, Network Performance Analysis, Wiley, 2011.
- 6- 3GPP Specifications.

## Moyens

- Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : Mohamad Assaad, Salah Eddine Elayoubi
- Taille des TD (par défaut 35 élèves) :25
- Outils logiciels et nombre de licence nécessaire : Matlab
- Salles de TP (département et capacité d'accueil) :

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de :

- connaître l'architecture et les différentes fonctions des réseaux sans fil
- modéliser un réseau cellulaire avec ses fonctions principales.
- dimensionner un réseau cellulaire
- connaître les principes de la gestion de réseau et de la qualité de service dans un réseau sans fil
- implémenter des modèles de réseaux cellulaires et de gestion de réseau sous Matlab

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

A l'issue de ce cours, les compétences suivantes seront validées

C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

C2 Développer une compétence approfondie dans un domaine scientifique ou sectoriel et une famille de métiers

C6 Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

# 2EL2630 – Applications de la physique statistique et quantique aux sciences de l'information

Responsables : **Zeno Toffano**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SIGNAL, INFORMATION, COMMUNICATION**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours constitue une ouverture aux théories et techniques mathématiques, informationnelles et statistiques issues de la physique quantique et statistique utilisées dans les sciences de l'information.

Ces techniques sont aujourd'hui couramment appliqués dans de nombreux domaines liés au traitement de l'information, les réseaux de neurones et l'apprentissage profond, le traitement d'images, les télécommunications, le web sémantique, l'intelligence artificielle, la biologie computationnelle... mais aussi d'une façon plus générale dans les sciences humaines et sociales avec par exemple des applications dans le traitement du langage naturel et en finance.

Les notions d'entropie et d'information sont centrales dans cette approche. Par exemple l'étude des systèmes désordonnés de spin est appliquée au traitement de l'information discrète et à l'inférence statistique avec des applications importantes par exemple en télécommunications. Plus récemment les techniques opérationnelles utilisant l'information quantique ont montré leur avantage par rapport aux méthodes classiques, l'exemple emblématique étant l'ordinateur quantique.

Le cours proposé, par nature transdisciplinaire, a pour but d'établir des connexions entre la formation en mathématique et en physique et les applications technologiques de pointe, tels que les communications numériques, le traitement des données, l'apprentissage algorithmique ou encore le calcul et l'information quantique.

Il est destiné aux étudiants désireux de se familiariser au travail de recherche et d'ingénieur dans des domaines scientifiques et technologiques de pointe dans un environnement numérique.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Analyse et probabilités, algèbre linéaire, physique quantique et statistique et modélisation.

Notions souhaitées en théorie de l'information, apprentissage, théorie des communications, algorithmique et complexité.

## Plan détaillé du cours (contenu)

### **Théorie classique de l'information et applications**

Mesures et inégalités en informatique - cas discret, cas continu. Principe d'entropie maximale.

Grandes déviations. Méthode des types. Entropie AEP/taux d'entropie, JAEP.  
Taux d'entropie des processus stochastiques. Chaîne de Markov. DPT. Deuxième loi de la thermodynamique.  
Compression et transmission de données. Principaux théorèmes de codage. Codage source et canal.

### **Théorie de l'information quantique**

Mesures quantiques, intrication quantique et entropyme quantique.  
Canaux quantiques  
Communications quantiques et cryptographie.  
Correction d'erreur quantique.

### **Informatique quantique et simulation quantique**

Portes quantiques.  
Codage superdense et téléportation quantique.  
Algorithmes quantiques I : Deutsch, Grover, Shor.  
Algorithmes quantiques II : Algorithmes NISQ (noisy intermediate scale quantum)  
Implémentations physiques.  
Évaluation des performances de l'informatique quantique

### **Physique statistique classique et quantique appliquée à l'apprentissage automatique**

Rappels de la physique statistique classique.  
Modèles d'Ising. Codage par analogie/Ising.  
Méthodes variationnelles.  
Machines de Boltzmann.  
Le principe de Landauer et le démon de Maxwell.  
Apprentissage automatique quantique.

## **Déroulement, organisation du cours**

28,5 HPE de cours magistraux et cours dirigés

## **Organisation de l'évaluation**

Examen de 2h

Travail personnel: présentation orale avec transparents d'un article scientifique récent

## **Support de cours, bibliographie**

Mézdard M., Montanari A., "Information, Physics, and Computation", Cambridge, 2009.  
Nielsen M., Chuang I., "Quantum Computation and Quantum Information", Cambridge, 2001  
Jaeger G., "Quantum Information: An Overview", Ed. Springer 2007.  
Djordjevic I.B., Quantum Information Processing, Quantum Computing, and Quantum Error Correction, An Engineering Approach, II Ed., Academic Press, 2021  
Nishimori H., "Statistical Physics of Spin Glasses", Clarendon 2001.

## **Moyens**

Equipe enseignante (noms des enseignants des cours) :

**Antoine Olivier BERTHET et Zeno TOFFANO**

## **Acquis d'apprentissage visés dans le cours**

A la fin de cet enseignement l'étudiant sera capable de:

- 1) Comprendre dans un contexte pluridisciplinaire l'importance et l'impact des concepts classiques ou quantiques d'information et d'entropie
- 2) Interpréter grâce à l'aide des outils mathématiques de la Physique Statistique et quantique des cas concrets par exemple dans le domaine des sciences des données, des télécommunications, de l'intelligence artificielle, de la biologie computationnelle ou de la finance.
- 3) Proposer des modèles mathématiques pour des applications innovantes tels que l'apprentissage machine, les réseaux de neurones, l'optimisation, les réseaux d'information, les ordinateurs quantiques... grâce aux moyens de la théorie de l'information, de l'inférence statistique, des critères d'optimisation, de la logique et de l'information

quantique appris pendant le cours.

4) Implémenter les modèles mathématiques sous forme d'algorithmes dans différents environnements informatiques.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Les acquis d'apprentissage 1 et 2 permettent d'atteindre le jalon 1 de la compétence C1.1, c'est à dire "Savoir faire la liste des paramètres influents sur le système étudié, la liste des éléments avec lesquels il est en relation" et "Savoir identifier les paramètres importants vis-à-vis du problème posé".

Les acquis d'apprentissage 3 et 4 permettent d'atteindre le jalon 1 de la compétence C 1.2, c'est-à-dire "Savoir utiliser un modèle présenté en cours de manière pertinente. Faire le choix d'hypothèses simplificatrices adaptées au problème étudié".

L'acquis d'apprentissage 4 permet aussi d'atteindre le jalon 2B de la compétence C 1.3, c'est-à-dire "Connaître les limitations des simulations numériques et ce qu'on peut attendre, savoir critiquer des résultats de simulations numériques".

# 2EL2720 – Engagement handicap - Tutorat auprès de jeunes en situation de handicap

Responsables : **Lionel Husson**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT DÉVELOPPEMENT PROFESSIONNEL ET MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Non**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Le module "engagement handicap" allie une formation théorique et pratique sur le handicap ainsi qu'une expérience de terrain auprès de personnes en situation de handicap. L'objectif est de sensibiliser et former les étudiants pour leur permettre de comprendre ce que recouvre le handicap, d'adopter les bons réflexes et les préparer aux sujets de la diversité, tout en développant plus globalement leurs capacités d'adaptation, de responsabilité et managériales. L'expérience de terrain organisée par le responsable du module est une action pédagogique et solidaire : un tutorat auprès de jeunes en situation de handicap (en collège, lycée ou université) afin de les aider à dépasser des obstacles et favoriser leur accès à la formation supérieure et à l'insertion professionnelle. Une autre expérience de terrain confrontant au handicap et constituant une situation d'apprentissage expérientiel peut être proposée et sous réserve d'être validée au préalable par le responsable du module

*Enseignement également accessible en 1A sans que cela ne donne lieu à un remplacement de module de sciences pour l'ingénieur*

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Pas de prérequis

## Plan détaillé du cours (contenu)

1. Comprendre le handicap et ses conséquences pour des élèves et sur la conduite de leurs études, ainsi que le handicap dans le monde professionnel
2. Savoir définir le cadre et adopter la bonne posture pour engager et conduire un tutorat, et plus globalement une interaction auprès de personnes en situation de handicap
3. Réaliser, vivre et adapter le tutorat avec un ou plusieurs jeunes en situation de handicap ou conduire une action de terrain et d'engagement confrontant au handicap
4. Prendre du recul sur l'expérience vécue, formaliser les acquisitions

## Déroulement, organisation du cours

Le tutorat se décline en 2 dispositifs :

- Tutorat individuel : en partenariat avec Sopra-Steria . Un tuteur accompagne un jeune, sous la forme soutien scolaire. Les séances se déroulent selon les disponibilités des tuteurs-tutorés
- Tutorat collectif : en partenariat avec l'association Fédé 100% handinamique. Un groupe de tuteurs accompagne un groupe de jeunes, pour les aider à préciser leurs projets de formation, prendre confiance en soi et s'épanouir dans un groupe.
  
- Formation théorique et pratique :
  - E-learning : SPOC « handicap »
  - 1 séance (3h) de sensibilisation et de mise en situation sur le handicap
  - 1 séance (3 h) d'atelier de formation et de mise en situation sur la conduite de tutorat
  - 1 séance (3 h) d'études de cas pratiques handicap en entreprise
- Environ 10-15 séances de tutorat (1h-1h30 chacune) à réaliser au sein des établissements partenaires pendant l'année scolaire selon un rythme typiquement hebdomadaire et adapté aux besoins des tutorés S'il s'agit une autre expérience d'engagement celle-ci comprendra une volumétrie équivalente.
- Points de suivi et échanges (1h) rythme mensuel
- 1 séance (3h) de partage d'expériences à mi-parcours
- 1 séance (3h) de bilan et présentation des tutorats réalisés

## Organisation de l'évaluation

Contrôle continu (participation aux séances de formation ; réalisation des séances de tutorat et compte rendu) 50% + évaluation finale (rapport « journal d'apprentissage » et présentation orale) 50%

Pour le premier acquis d'apprentissage seule la connaissance ou l'application simples sont requises, il sera évalué sous forme de questions de cours, de QCM en contrôle continu.

Les deux acquis d'apprentissage suivants nécessitent que les élèves mettent en pratique des séances de tutorat et prennent du recul par rapport aux situations rencontrées. Ils seront évalués dans deux situations : en contrôle continu sur la base du déroulement des séances sur le terrain (CR de préparation-déroulement et bilan de séance) et en évaluation finale en produisant un rapport (« journal d'apprentissage » illustrant les acquis au regard de situations rencontrées et d'une analyse réflexive) complété d'une présentation orale

## Support de cours, bibliographie

e-learning « handicap » , livret du tuteur et autres ressources sur le handicap

## Moyens

- Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : Lionel HUSSON et formateurs de Sopra-Steria et de la Fédé 100% handinamique
- Taille des TD (par défaut 35 élèves) : 35
- Outils logiciels et nombre de licence nécessaire : non
- Salles de TP (département et capacité d'accueil) : non

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Comprendre ce que recouvre le handicap : types de handicap, conséquences pour les personnes et les enjeux sociétaux pour l'école et le monde professionnel.
- Etre à l'aise pour interagir avec des personnes en situation de handicap

- Mobiliser des capacités pédagogiques, relationnelles et organisationnelles pour structurer et conduire une activité de travail efficace avec une ou plusieurs personnes
  - en travaillant sur la relation à l'autre. Comprendre les besoins et les attentes de ses interlocuteurs. En tenir compte de façon évolutive. Susciter des interactions. Créer un climat de confiance
  - en travaillant sur soi. Être à l'aise. Se montrer convaincu. Manifester l'empathie. Gérer ses émotions.
- Penser et agir en professionnel éthique responsable et intègre en prenant en compte les dimensions environnementales, sociales et sociétales.
  - Agir de façon inclusive face à des questions de diversité : identifier et comprendre des situations exigeant des actions d'intégration et participer à une action inclusive dans une démarche précise

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Ce module est contributif à l'acquisition des compétences suivantes :

**C9** : Penser et agir en professionnel éthique responsable et intègre en prenant en compte les dimensions environnementales, sociales et sociétales.

**C9.4** : Agir de façon inclusive face à des questions de diversité : identifier et comprendre des situations exigeant des actions d'intégration et participer à une action inclusive dans une démarche précise

**C7** : Savoir convaincre

**C7.1** : sur le fond : Structurer ses idées et son argumentation, être synthétique (hypothèses, objectifs, résultats attendus, démarche et valeur créée)

**C7.2** : sur la relation à l'autre : Comprendre de façon évolutive les besoins et attentes de ses interlocuteurs. Susciter des interactions, être pédagogue et créer un climat de confiance.

**C7.3** : sur soi : Être à l'aise et se montrer convaincu, manifester de l'empathie et gérer ses émotions

**C7.4** : sur les techniques de communication : Maîtriser le langage parlé, écrit et corporel, et maîtriser les techniques de base de communication

**C5** : Evoluer et agir dans un environnement international, interculturel et de diversité

**C5.2**: Écouter, se faire comprendre et travailler avec des acteurs de diversités, cultures, codes, formations, disciplines, etc. variés

## 2EL2730 – Electif associatif

Responsables : **Ludovic-Alexandre VIDAL, Guillaume Mainbourg, Géraldine Carbonel**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT DÉVELOPPEMENT PROFESSIONNEL ET MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR**

Langues d'enseignement :

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Non**

---

### Présentation, objectifs généraux du cours

L'électif associatif a quatre parcours distincts :

EA1 - Mettre en place une démarche de créativité dans son association

EA2 - Structurer son association : création de valeurs, processus et gestion des parties prenantes

EA3 - Mettre en place une démarche de management des risques dans son association

EA4 - Gestion de projets informatiques

D'autres parcours pourraient amenés à être créés à terme en fonction des problématiques rencontrées par les associations.

### Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

### Prérequis

Appartenance à une association / à un projet associatif précis.

### Plan détaillé du cours (contenu)

Travail sur la maîtrise de ces compétences / connaissances via l'établissement de livrables concrets définis dans le cadre du parcours EAx, ceux-ci devant permettre de bien évaluer l'acquisition de compétences.

### Déroulement, organisation du cours

Spécifique à chaque parcours EAx.

### Organisation de l'évaluation

Etablissement de livrables précis soumis régulièrement.



## **Moyens**

3 amphis de 1h plus livrables à rendre régulièrement sur la période du cours.  
Accompagnement méthodologique.

## **Acquis d'apprentissage visés dans le cours**

Spécifique à chaque parcours EAx.

## **Description des compétences acquises à l'issue du cours**

Spécifique à chaque parcours EAx, mais les compétences C4, C6, C7, C8 et C9 sont a priori validables dans cet électif.

# 2EL5010 – Introduction à l'ingénierie des applications mobiles

Responsables : **Virginie Galtier**

Département de rattachement : **CAMPUS DE METZ**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

De par leur facilité de manipulation et leur capacité à nous accompagner partout, les appareils mobiles (téléphones, tablettes) sont devenus des terminaux de tout premier choix et de très nombreuses entreprises ont pris le virage de la stratégie "web-first" à la stratégie "mobile-first".

Cet électif se concentre sur la phase de développement d'une application mobile, en aval de la spécification de ses fonctionnalités et avant son éventuelle publication sur un store. Deux stratégies principales seront présentées : l'application web, aux fonctionnalités limitées utilisable aussi bien sur Android que sur iOS, et l'application native, plus performante mais demandant des développements plus spécifiques. Le cours fait une large part à la mise en pratique, sur Android pour illustrer le développement d'applications mobiles natives et avec Ionic et Angular (par exemple) pour illustrer le développement de site réactif. Optionnellement, les étudiants pourront aussi s'initier à la sécurisation des applications Android.

Les connaissances et savoir-faire acquis durant ce cours pourront être utiles à la réalisation de certains projets liés au cursus, aux associations des campus ou en entreprise.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

1CC1000 –Systèmes d'Information et Programmation

## Plan détaillé du cours (contenu)

Introduction

- Présentation des différentes stratégies de développement d'applications pour mobiles
- Présentation des concepts de la programmation orientée objet en Java

Développement d'applications Android

- Présentation du système Android
- Outils de développement
- Conception et implémentation d'applications à base d'Activities, Layouts et Intents

Introduction au développement d'applications web

- Découverte d'HTML5, JavaScript et CSS
- Conception et implémentation d'une application web simple

Selon avancement: Introduction à la sécurisation des applications Android

- Présentation de vulnérabilités classiques
- Mécanismes de protection

## Déroulement, organisation du cours

La ventilation "TD + CM" est administrative car l'électif est en réalité essentiellement constitué de séances de "learning by doing" animées par les enseignants et par des industriels. L'introduction à la sécurisation des applications android se fera sous forme d'un escape game.

## Organisation de l'évaluation

Les compétences acquises par l'élève durant l'électif seront évaluées sur la base d'un contrôle écrit individuel final (1/2) et de la réalisation et présentation en binôme d'une application Android personnelle mais avec quelques éléments imposés (1/2).

Modalités de rattrapage : examen oral de 20 minutes + nouveau projet avec un sujet imposé et à réaliser seul.

## Support de cours, bibliographie

- *Head First Android Development*. Dawn Griffiths, David Griffiths. O'Reilly. 2015
- *Building Progressive Web Apps: Bringing the Power of Native to the Browser*. Tal Ater. O'Reilly. 2017
- *HTML, CSS, and JavaScript All in One*. Julie C. Meloni. Pearson Education. 2014

## Moyens

Equipe enseignante: Virginie Galtier, Michel Ianotto et conférenciers extérieurs (InTech)

Taille des TD : 24 élèves

Salles de TP : salles d'informatique du campus de Metz, 24 élèves/salle

Outils logiciels : libres et gratuits

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce cours, les élèves devraient être capables de :

- comprendre et coder des programmes orientés objet en Java
- choisir une stratégie de développement selon les objectifs et les moyens
- développer une application web simple
- développer une application native Android simple
- éventuellement, appliquer quelques bonnes pratiques pour la sécurisation des applications Android

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

C2 : Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers

C6 : Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

# 2EL5020 – Introduction au développement d'applications multi tiers et aux services web

Responsables : **Michel Ianotto**

Département de rattachement : **CAMPUS DE METZ**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Les applications sont de plus en plus construites en assemblant des services. L'objectif du cours est de présenter les architectures sous-jacentes et d'initier les élèves au développement de solutions exploitant, créant et déployant des services.

Les applications d'entreprise accèdent à des données locales ou distantes, leur appliquent une logique métier, avant de présenter ou transmettre les résultats. Pour faciliter leur conception, leur implémentation et leur exploitation, elles peuvent être découpées en couches et composants. La plate-forme JEE (Java Entreprise Edition) est destinée à faciliter le développement de ces applications et leur intégration dans des systèmes d'informations existants. Le cours présentera les principes d'une architecture 3-tiers, avec une mise en œuvre exploitant les principaux composants de la plateforme JEE. L'application sera ensuite déployée dans le Cloud.

L'application peut nécessiter l'accès à des données en ligne. Les pages web constituent une importante source de données mais sont conçues pour des interactions avec un humain. Un processus un peu fastidieux (« web scraping ») doit être mis en place au cas par cas pour qu'une machine (un programme) puisse récupérer les données exposées par des pages web. Heureusement, à l'instar d'Amazon ou eBay par exemple, de nombreux acteurs proposent une autre interface d'accès aux données, centrée sur les ressources ou les traitements et non sur leur présentation graphique. Ces « services web » simplifient la phase de collecte des données et permettent à leurs consommateurs de se concentrer sur leurs cœurs de métier. Ce cours présentera comment découvrir un service, comment l'invoquer, et éventuellement comment construire une composition de plusieurs services. Il peut également être pertinent d'ouvrir l'application développée à des partenaires (clients, fournisseurs...). Le cours présentera comment leur offrir un tel service : comment concevoir un service, le développer et le déployer, le décrire et le faire connaître.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

1CC1000 –Systèmes d'Information et Programmation

## Plan détaillé du cours (contenu)

Les bases de la programmation en Java

Introduction

- Les architectures n-tiers

- Les serveurs d'applications
- Le modèle MVC

La persistance des données en Java

- Les SGBD
- La spécification JPA
- Mapping objet-relationnel (ORM)

Implémentation de la couche métier

- Conteneurs d'Entreprise-Java-Beans (EJB)
- Implémentation de la couche présentation
- Les JSP et les Servlet

Présentation des services orientés traitement

- Principes architecturaux
- Introduction à XML
- Présentation du protocole SOAP
- Langage de description WSDL
- Mise en pratique : définition d'un contrat de service, développement d'un serveur, publication de l'interface sous forme d'un kit de développement fourni au client

Présentation des services orientés ressources

- Style architectural REST
- Introduction à JSON et OpenAPI
- Mise en pratique : développement d'un client exploitant des services en ligne, développement d'un service, test et déploiement sur le cloud

## Déroulement, organisation du cours

La répartition approximative des "heures présence élève" sera la suivante : 24h de cours et 9h de TD sur machine.

La ventilation "16 CM + 6TD" est administrative car l'électif est en réalité essentiellement constitué de séances de "learning by doing" animées par les enseignants.

## Organisation de l'évaluation

L'acquisition des connaissances et compétences sera évaluée régulièrement par de rapides interrogations écrites individuelles pendant les cours et sur la base d'un petit projet réalisé en binôme et présenté à la fin du cours. Pondérations : contrôle continu individuel : 50%, réalisation du projet : 30%, soutenance du projet : 20%. L'examen de rattrapage se fera sous la forme d'un oral avec exercices sur ordinateur. En cas d'absence justifiée à l'un des contrôles intermédiaires, la note de ce dernier est remplacée par celle du contrôle final.

## Support de cours, bibliographie

- *Java EE : Développez des applications web en Java*. Thierry Richard. ENI. 2017
- *Web Services Foundations*. Athman Bouguettaya, Quan Z Sheng. Springer. 2014

## Moyens

Equipe enseignante: Virginie Galtier, Michel Ianotto, Patrick Mercier

Taille des TD : 24 élèves

Salles de TP : salles d'informatique du campus de Metz, 24 élèves/salle

Outils logiciels : libres et gratuits

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce cours, les élèves devraient être capables de :

- utiliser un environnement de développement intégré pour développer une application
- réaliser une application en langage Java mettant en œuvre les concepts liés à la programmation orientée objet
- composer des programmes en Java utilisant quelques annotations
- concevoir et développer une application d'entreprise avec la plateforme JEE
- choisir une stratégie de développement d'un service et la mettre en œuvre
- manipuler des données structurées en XML et JSON
- développer un programme exploitant un ou plusieurs services
- déployer une application d'entreprise dans le Cloud

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

C2 : Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers

C6 : Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

# 2EL5030 – Programmer efficacement en C++

Responsables : **Frederic Pennerath**

Département de rattachement : **CAMPUS DE METZ**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Non**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Savoir coder efficacement un algorithme dans un langage de programmation donné suppose comprendre préalablement le modèle de calcul associé et la façon dont les instructions de ce langage sont traduites en instructions machine. Trop d'étudiants abordent encore la programmation de façon superficielle et hasardeuse, faute de connaître les notions de base nécessaires à l'écriture d'un code élégant et performant.

La force singulière du langage C++ est de permettre la production de codes compilés proches du code machine optimal tout en offrant différentes approches de programmation de haut-niveau comme le typage fort, la programmation objet, la programmation fonctionnelle et la méta-programmation (génération automatique de code à la compilation). Pour cette raison, C++ est devenu le langage incontournable pour développer des algorithmes optimisés. Son seul inconvénient tient à sa richesse qui n'a cessé de croître dans ses versions les plus récentes (C++11/14/17/20) et qui rend le langage difficile à appréhender dans sa totalité sans formation adéquate.

Ce cours est destiné aux étudiants, y compris débutants, désireux de maîtriser les différents aspects de la programmation en C++ pour pouvoir écrire du code qui concilie performance et élégance. Le cours adopte une approche bottom-up en partant des mécanismes d'exécution de programmes élémentaires pour aller progressivement vers les fonctionnalités les plus avancées du langage.

L'objectif est de transmettre aux étudiants un réel savoir-faire de la programmation, d'une part en illustrant les notions à travers des exemples d'utilisation pertinents, d'autre part en consacrant une part importante du volume horaire aux travaux de laboratoire.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Le cours ne suppose pas de prérequis autre qu'une exposition aux bases de la programmation dans un langage informatique quelconque.

## Plan détaillé du cours (contenu)

**Volume total de 15h de cours, 18h de TP et 3h d'examen**

### Partie magistrale (15h) :

- Gestion mémoire et cycle de vie des variables mémoire (1h30)
- Structure et smart pointers (1h30)
- Types (1h30)
- Programmation fonctionnelle : lambda fonctions, types appelables, exceptions (1h30)
- Classe et héritage (1h30)
- Mécanisme de base des templates (1h30)
- Programmation générique à base de templates (1h30)
- Programmation générique versus programmation orientée objet (1h30)
- Bibliothèque standard : contenu et concepts (1h30)
- Programmation système : threads et mécanismes de synchronisation (1h30)

### Partie pratique (18h) :

- TP sur la manipulation mémoire (3h)
- TP sur la programmation objet et l'héritage (3h)
- TP sur la programmation fonctionnelle (3h)
- TP sur la programmation générique (3h + 1h30)
- TP sur la bibliothèque standard (1h30)
- TP sur la programmation système (3h)

### Examen sous forme de TP (3h)

## Déroulement, organisation du cours

- Cours basé sur des exemples de code
- Partie importante (50%) consacrée aux travaux pratiques de programmation

## Organisation de l'évaluation

L'évaluation se fera sur la base d'un seul examen prévu à la fin du cours.

Cet examen d'une durée de deux heures consistera à réaliser de courts exercices de programmations. Chaque étudiant travaillera seul sur sa machine sans avoir accès à Internet mais disposera de toute la documentation nécessaire pour réussir l'épreuve (supports de cours, documentation technique). L'examen de rattrapage aura lieu selon les mêmes modalités que l'examen initial.

## Support de cours, bibliographie

- Site web réalisé par les professeurs
- Effective Modern C++, Scott Meyers, 2014
- Professional C++, Marc Greddore, 2014
- A Tour of C++, Bjarne Stroustrup, 2013

## Moyens

- Deux enseignants : Hervé Frezza-Buet et Frédéric Pennerath
- Pas de TD mais uniquement des travaux pratiques sur machine
- Un poste de travail par élève
- Un ou deux groupes de TP d'au maximum 15 étudiants chacun.
- Les TP seront réalisés dans l'environnement Linux et reposeront exclusivement sur des logiciels libres (g++, CMAKE, etc).



## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Savoir écrire un programme en C++ utilisant différents paradigmes de programmation comme la programmation objet, la programmation fonctionnelle et la programmation générique.
- Connaître certains aspects du langage C++ qui ont une influence déterminante sur les performances des programmes lors de leur exécution.
- Connaître les fonctionnalités offertes par les spécifications les plus récentes du langage C++ (C++11, C++14, C++17 et C++20).
- Savoir utiliser un environnement de compilation et de débogage C++

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C2 : Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers.
- C6 : Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique.

# 2EL5040 – Big Data : collecte, stockage et analyse de données sur clusters et sur Cloud

Responsables : **Stephane Vialle**

Département de rattachement : **CAMPUS DE METZ**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

La baisse du coût des capteurs favorise leur utilisation fréquente dans tous les environnements (industriels, urbains, transports...), et provoque l'émergence de flux de données brutes. De même les données structurées accessibles sur le web ou dans des archives privées d'entreprises ne cessent d'augmenter. Des technologies "Big Data" ont vu le jour, et ont évolué rapidement, pour gérer, analyser et tirer parti ces sources de données.

Ce cours présente les environnements du Big Data qui ont émergé pour stocker et interroger ces nouvelles masses de données : notamment des BdD NoSQL et des environnements distribués comme Hadoop et Spark. Ces environnements sont nés dans les industries innovantes du web, et ont amenés de nouveaux paradigmes de programmation comme Map-Reduce (implanté selon plusieurs variantes).

Une partie importante du cours est consacré à la conception d'algorithmes de filtrage, d'enrichissement et d'analyse des données stockées dans les environnements du Big Data. La plupart de ces algorithmes sont basés sur le paradigme de programmation Map-Reduce et seront expérimentés lors de TP. Des métriques de performance et des critères de passage à l'échelle de systèmes distribués seront également présentés et utilisés en TP.

La dernière partie du cours présente des algorithmes de *Machine Learning*, utilisés pour traiter et analyser des ensembles de données, et qui demandent parfois d'avoir recours à du calcul parallèle massif sur GPU.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Cours commun "Systèmes d'Information et Programmation" de la SG1 (1CC1000)

- Cours commun "Algorithmique & Complexité" de la ST2 (1CC2000)
- Cours commun "Statistique et Apprentissage" de la ST4 (1CC5000)

## Plan détaillé du cours (contenu)

- **Introduction et terminologie (1CM – 1h30):** *Data Engineering vs Data Science*, architectures distribuées matérielles et logicielle, analyse de données à haute performances, parallélisation SMPD vs Map-Reduce.

- **Environnement et technologie Hadoop (1CM – 1h30):** Système de fichiers distribué (HDFS), principe du *Map-Reduce* d'Hadoop, gestion de ressources version 1 avec limite d'échelle, et version 2 optimisée (YARN).
- **Environnement et technologie Spark (3CM – 4h30):** Architecture et mécanismes orientés performances de Spark, algorithmique Map-Reduce simple, algorithmique Map-Reduce pour l'analyse de graphes, bibliothèques Spark-SQL et de traitements de flux.
  - **TD1 & TD2 (3h00)**
  - **TP1 & TP2 (6h00)** sur clusters de PC
- **Métriques et limites de passage à l'échelle (1CM - 1h30):** métriques d'accélération et d'efficacité, critères de passage à l'échelle.
- **Exploration et préparation des données (1CM - 1h30):** problèmes classiques rencontrés avec les données, besoin d'exploration et de préparation des données
- **BdD NoSQL (2CM – 3h00):** Emergence des BdD NoSQL, technologies NoSQL, utilisation de MongoDB
  - **TP3 (3h00)**
- 1. **Introduction aux technologies de Machine Learning (ML) (3CM : 4h30):** classification des algorithmes de ML, algorithmes de clustering, exemples de bibliothèques de ML en Python
  - a. **TP4 (3h00)**
- **Examen Ecrit (1h30)**

## Déroulement, organisation du cours

Les concepts vus en cours seront mis en oeuvre lors de TP sur des clusters Big Data du *Data Center d'Enseignement* de CentraleSupélec. Ces plateformes permettront de manipuler et d'interroger des environnements Spark et MongoDB distribués sur des clusters de PC, et hébergeant de gros volumes de données. Des serveurs de calcul permettront également la mise en oeuvre de bibliothèques de *Machine Learning* dans la dernière partie du cours. Des mesures de performances compléteront l'évaluation des solutions développées en TP.

**Composition du cours :** 12 CM (18h00), 2 TD (3h00), 4 TP (12h00) et 1 EE (1h30)

**Séquencement possible du cours :**

- 3CM, 1TD, 1TP, 1CM, 1TD, 1TP, 6CM, 1TP, 2CM, 1TP
- Examen écrit de 1h30

## Organisation de l'évaluation

Poids relatifs des différents examens :

- 40% : Rapports de TP. Une absence injustifiée à un TP entraînera une note de 0/20 à ce TP. Une absence justifiée à un TP neutralisera la note de ce TP et augmentera le poids des autres TP.
- 60% : examen écrit final de 1h30, avec documents.

Examen de rattrapage : En cas de rattrapage, 100% de la note viendra d'un examen écrit de 1h30, dans la même modalité que l'examen écrit initial.

## Support de cours, bibliographie

**Supports fournis aux étudiants :**

- Slides et polycopié du cours.

**Livres suggérés :**

- Pirmin Lemberger, Marc Batty, Médéric Morel et Jean-Luc Raffaëlli. Big Data et Machine Learning. Dunod. 2015.
- Eric Biernat et Michel Lutz. Data Science : Fondamentaux et études de cas. Eyrolles. 2015.

- Bahaaldine Azarmi. Scalable Big Data Architecture. Apress. 2016.
- Kristina Chodorow. MongoDB. The Definitive Guide. 2nd edition. O'Reilly. 2013.
- H. Karau, A. Konwinski, P. Wendell and M. Zaharia. Learning Spark. O'Reilly. 2015.
- Rudi Bruchez. Les bases de données NoSQL et le Big Data. 2ème édition. Eyrolles. 2016.
- Tom White. Hadoop. The definitive Guide. 3rd edition. O'Reilly. 2013.
- Donald Miner and Adam Shook. MapReduce Design Patterns. O'Reilly. 2013.
- Matthew Kirk. Thoughtful Machine Learning with Python. O'Reilly. 2017.

## Moyens

- 18h00 de cours de *Data Engineering*, incluant la présentation d'environnements standards et distribués de Big Data, et la conception de solutions performantes et passant à l'échelle.
- 3h00 de TD de dimensionnement d'architecture et d'algorithmique *Map-Reduce*.
- 12h00 de TP de mise en oeuvre de logiciels Big Data standard et Opensource (Hadoop HDFS, Spark, MongoDB, bibliothèques de *Machine Learning*), sur des serveurs et clusters de calculs à haute performants (ressources du *Data Center d'Enseignement* de CentraleSupélec).

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de :

- **[Acquis d'Apprentissage 1\* (AA1\*)]** Spécifier, concevoir et présenter un système complexe et cohérent d'analyse de données large échelle (contribuant aux compétences **C2 C6 C7**) :
  - spécifier et dimensionner une architecture matérielle Big Data
  - choisir un environnement Big Data adapté (ex : Spark et certains de ses modules, ou un certain type de BdD NoSQL...)
  - concevoir un algorithme et une chaîne logicielle Map-Reduce, selon la variante du paradigme Map-Reduce qui est disponible (permettant de nettoyer, préparer, filtrer et interroger de gros volumes de données)
  - optimiser un algorithme Map-Reduce dans un objectif de performance et de passage à l'échelle
  - spécifier et dimensionner une architecture matérielle de Machine Learning (ex : CPU, cluster de CPU, GPU, cluster de GPU...)
  - présenter un résumé convaincant de l'architecture logicielle et matérielle mise au point
- **[Acquis d'Apprentissage 2\* (AA2\*)]** Evaluer et présenter les performances et la robustesse d'une architecture Big Data (contribuant aux compétences **C2 C6 C7**) :
  - définir une métrique et une procédure de test de passage à l'échelle adaptée au cas d'utilisation
  - identifier et présenter les goulots d'étranglement de l'architecture matérielle et logicielle (en cas d'augmentation du volume de données)
  - identifier et présenter les points faibles de l'architecture en cas de panne (*single point of failure*)
  - identifier et présenter les types d'imperfections de données perturbant la chaîne d'analyse

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- **C2** : Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers
- **C6** : Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique
- **C7** : Savoir convaincre

# 2EL5050 – Méthodes d'estimations et introduction à la théorie moderne du codage

Responsables : **Michel Barret**

Département de rattachement : **CAMPUS DE METZ**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **35,00**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours présente deux problèmes clés de la théorie de la décision : l'estimation pure et la détection. Les notions suivantes seront présentées et mises en œuvre numériquement : formalisation de ces problèmes, influence de la fonction coût, du point de vue (bayésien ou non), de l'information à priori. Les problèmes de l'estimation de la densité spectrale de puissance et de la prédiction d'une série temporelle ergodique seront étudiés en détail. Quatre théorèmes fondamentaux de codage pour des systèmes discrets sans mémoire seront énoncés et démontrés.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

- Cours de *Probabilités* de 1A (CIP, 1SL1000)
- Cours de *Traitement du Signal* de 1A (1CC4000)

Il est conseillé d'avoir également suivi

- Cours de *Statistique et apprentissage* de 1A (1CC5000)
- Cours *Système d'information et Programmation* de 1A (1CC1000).

## Plan détaillé du cours (contenu)

- Notions d'estimation (6h de cours)
  - 1.1 Introduction (objectifs de l'estimation, modélisation, point de vue bayésien / non bayésien, exemples)
  - 1.2 Éléments d'estimations bayésiennes (rappel sur les espaces de Hilbert, théorème de projection orthogonale, estimation en moyenne quadratique avec contrainte linéaire)
  - 1.3 Éléments d'estimation non bayésienne (Inégalité de Cramer-Rao, Estimateur du maximum de vraisemblance)
- Estimation d'un signal dans un bruit additif (3h de TD)
- Analyse spectrale non paramétrique (3h de TD)
- Détection (3h de cours)
  - 4.1 Test des hypothèses (présentation du problème, théorie bayésienne, stratégie de Neyman-Pearson,

courbes COR)

4.2 Application à la détection d'un signal dans un bruit (décomposition de Karhunen-Loève, détection d'un signal déterministe dans un bruit gaussien)

- Détection (3h de TD)
- Filtrage linéaire statistique (1h30 de cours)
  - 6.1 Introduction et préliminaires
  - 6.2 Filtrage de Wiener
- Filtrage de Wiener avec contrainte linéaire (3h de TD)
- Prédiction à un pas et passé infini (3h de cours)
  - 8.1 Cas d'un signal dont la densité spectrale de puissance est bornée et admet une factorisation forte
  - 8.2 Cas général, décomposition de Wold
- Interpolation d'un signal stationnaire (3h de TD)
- Prédiction à un pas et passé fini (1h30 de cours)
- Primitives de la théorie de l'information (3h de cours)
  - 11.1 Introduction (source d'information discrète, canal discret, message)
  - 11.2 Quatre problèmes clés de codage (codage canal, approximation canal, codage source distribuée, extraction d'aléa)
  - 11.3 Théorèmes fondamentaux (codage aléatoire (*random coding*), compartimentage aléatoire (*random binning*))
- Exercices sur les quatre problèmes clés de codage (2h TD)

## Déroulement, organisation du cours

18h de cours magistraux + 17h de travaux dirigés + contrôle continu (devoirs à la maison et en classe)

## Organisation de l'évaluation

Contrôle continu (devoirs à la maison et en classe): une évaluation en binôme (ou trinôme) sous la forme Devoir à la maison + TD (analyse spectrale) + compte-rendu. Cela donne une note1.

Deux évaluations individuelles (qcm courts): note2 et note3.

L'absence non excusée à une évaluation individuelle donne la note 0, l'absence non justifiée en TD donne une pénalité standard du règlement des études.

Note finale =  $(1/2) * \text{note1} + (1/6) * (\text{note2} + 2 * \text{note3})$ .

Rattrapage: un examen oral.

## Support de cours, bibliographie

M. Barret, *Traitement Statistique du Signal*, ELLIPSES, 2009.

M Bloch et J. Barros, *Physical-Layer Security*, Cambridge University Press, 2011.

## Moyens

Une partie des travaux dirigés se fera avec un ordinateur (utilisation de Matlab ou de Python)

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À l'issue de ce cours, les élèves devront être en mesure de traiter une large gamme de problèmes concrets d'estimations et de détection, rencontrés dans un contexte scientifique ou industriel. Partant d'un tel problème, ils seront capables :

- de le modéliser en introduisant une fonction coût convenable ;
- de proposer une solution adéquate (i.e., adaptée à l'information a priori disponible) ;
- de prouver l'optimalité de la solution sous certaines conditions qu'ils sauront expliciter ;

- de mettre en œuvre la méthode sur des données et
- de critiquer les résultats obtenus.

De plus, les élèves devront avoir acquis des connaissances de base de la théorie moderne du codage de systèmes discrets sans mémoires (canal, source avec information adjacente au décodeur).

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Compétences développées par le cours :

- C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques
- C2 : Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers

# 2EL5060 – Analyse et traitement de données audio ( parole et musique)

Responsables : **Stephane Rossignol**

Département de rattachement : **CAMPUS DE METZ**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Le but de cet enseignement est d'exposer le corpus des méthodes d'analyse spectrale non-paramétriques et paramétriques, ceci dans le cadre de l'analyse des signaux sonores musicaux et de parole.

L'analyse spectrale est l'un des éléments des chaînes de traitement du signal ; de ce fait elle n'est pas que la simple visualisation des spectres. L'objectif principal est de décider et/ou d'estimer. Quelques exemples : Quelle était la partition originale ? Ou encore : quels instruments sont présents dans l'orchestre ? Quelle est la fréquence fondamentale de tel ou tel son ? Que dit telle personne ? Où se trouve telle autre personne ? Etc. Le choix de telle ou telle méthode d'analyse spectrale est crucial, selon le problème traité.

L'accent est mis sur les différents concepts sous-jacents à chacune des méthodes et leurs performances sont comparées. Cette dernière approche met aussi en relief le concept de modélisation (physique/signal/...), inhérent à une démarche d'ingénierie efficace.

De plus, les outils étudiés le sont dans le cadre de l'observation de l'être humain, qui communique avec ses semblables et son environnement grâce à ses sens. Parmi ceux-ci, la vue et l'ouïe sont les mieux connus, et seuls eux autorisent une approche à distance de l'environnement. Les systèmes de communication (humain à humain, humain à machine ou machine à humain) sont conçus afin d'acquiescer et de restituer le plus fidèlement possible ces perceptions. Il est donc utile de connaître et de pouvoir modéliser en détails d'une part le système de perception humain, c'est-à-dire le récepteur (l'oreille, ici), mais également le système de production du signal concerné par la perception (parole humaine, musique, sons divers), c'est-à-dire l'émetteur.

Les plateformes sonores du campus de Metz (salle d'holophonie et chambre sourde) sont mises à contribution pour les aspects pratiques de ce cours.

Ce cours compte de nombreux domaines d'application : analyses approfondies des séries temporelles ; analyse des sons pour la reconnaissance et le codage ; codeurs phonétiques pour la téléphonie ; outils pour les arts.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

### Prérequis

- Traitement du Signal : 1CC4000
- Statistique et Apprentissage : 1CC5000

- Expérience de programmation :
- Système d'Information et Programmation : 1CC1000



## Plan détaillé du cours (contenu)

- 1. Première partie : les méthodes d'analyse spectrale non-paramétriques (basées principalement sur la transformée de Fourier)
  - a. 1.1. Approfondissement concernant ces méthodes, déjà vues
  - b. 1.2. Revue de leurs limites
  - c. 1.3. Moyens statistiques utilisés pour tirer le maximum de ces méthodes
- 2. Deuxième partie : les méthodes d'analyse spectrale paramétriques
  - 2.1. Introduction à certaines d'entre elles
  - 2.2. Apports par rapport aux méthodes non-paramétriques
  - 2.3. Coût de ces méthodes
- 3. Troisième partie : les sons
  - 3.1. Modèles de perception (l'oreille) et de production (la voix, principalement)
  - 3.2. Localisation des sons
  - 3.3. Virtualisation des sources sonores (holophonie)

## Déroulement, organisation du cours

17.5h Cours magistral

9h Travaux dirigés (3 heures par partie du cours ; séquençement Cours/TD : 6h C; 3h TD; 6h C; 3h TD; 6h C; 3h TD)

8h Travaux pratiques (sur machines). Un sujet courant sur la séquence.

## Organisation de l'évaluation

Contrôle continu (50% de la note, sous forme de 2/3 QCM en début de TD ; note individuelle) et exposé oral à la toute fin du long TP (50% de la note). TP : note par binôme ; différenciée en cas d'anomalie dans un binôme.

## Support de cours, bibliographie

Transparents.

## Moyens

- Equipe enseignante : Stéphane Rossignol
- Taille des TD : 34
- Taille max des TP : 34
- Outils logiciels et nombre de licence nécessaire : Matlab (34 licences)/Octave (Python)
- Salles de TP (département et capacité d'accueil) : salles sur le campus de Metz

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Concevoir une chaîne de traitement du signal complète.
- Comparer les performances des divers outils à notre disposition pour l'analyse des séries temporelles compliquées, afin de choisir celui qui conviendra le mieux pour tel ou tel signal à analyser.
- Programmer dans un langage interprété (matlab/octave/python/...).
- Connaître les principes de base et approfondis du traitement du signal analogique et du signal numérique.
- Connaître les principes de base de la perception des sons (perception cognitive).

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques
- C2 : Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers
- C6 : Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

# 2EL5070 – Traitement d'image

Responsables : **Jean-Luc Collette**

Département de rattachement : **CAMPUS DE METZ**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Le traitement d'image rencontre de nombreux domaines d'activité, comme l'imagerie médicale, satellitaire ou la robotique pour la localisation dans un environnement. L'étape préalable au traitement d'image est son acquisition. La modélisation des capteurs d'image est donc cruciale pour exploiter au mieux les informations qui pourront en être extraites. Les images peuvent aussi provenir d'un processus de reconstruction comme celui mis en œuvre dans un scanner. La transmission et la compression des images interviennent dans la qualité des résultats de leurs analyses. Il faut donc comprendre ses principes pour les prendre en compte dans ces analyses. Les différents traitements qui peuvent être envisagés sont alors présentés. De nombreuses applications viendront illustrer ce cours afin d'avoir une vue d'ensemble sur les moyens d'exploiter l'information dans l'image.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

- Traitement du signal : 1CC4000
- Système d'Information et Programmation : 1CC1000

## Plan détaillé du cours (contenu)

### 1. Photométrie, colorimétrie, perception visuelle

- 1.1. Grandeurs radiométriques et photométriques
- 1.2. Modèles perceptuels de l'œil
- 1.3. Synthèse additive et soustractive

### 2. Les capteurs d'image couleur et les dispositifs de restitution

- 2.1. Modélisation physique
- 2.2. Modélisation géométrique
- 2.3. Calibration
- 2.4. Correction de gamma

### 3. Les autres types d'image

- 3.1. Imagerie multi et hyper spectrale
- 3.2. Imagerie SAR
- 3.3. Imagerie LIDAR
- 3.4. Aperçu des techniques de reconstruction tomographique (scanner)

### 4. Codage et compression

- 4.1. Aperçu des transformations orthogonales
- 4.2. Aperçu des transformations en ondelettes
- 4.3. Codage d'image fixe
- 4.4. Codage de séquence d'image

### 5. Amélioration, restauration d'image

- 5.1. Amélioration du contraste

- 5.2. Atténuation du bruit
- 5.3. Filtrage de Wiener
- 6. Éléments de morphologie mathématique**
- 6.1. Opérateurs élémentaires
- 6.2. Ligne de partage des eaux
- 7. Transformations géométriques et recalage d'images**
- 7.1. Nature des transformations
- 7.2. Métriques pour le recalage
- 7.3. Méthodes spécifiques d'optimisation
- 8. Segmentation d'image et caractérisation des formes**
- 8.1. Approche régions ou contours
- 8.2. Extraction d'attributs
- 8.3. Classification non supervisée

## Déroulement, organisation du cours

15h de CM, 6h de TD et 14h de TP.  
35 élèves pour les groupes de TD/TP

## Organisation de l'évaluation

Un rapport écrit sur les TP sera demandé et une présentation orale de cette activité sera également organisée (prévu pendant les heures de TP). Toute absence injustifiée à une séance de TP sera sanctionnée par une note zéro. La note finale sera la moyenne à part égales de la note individuelle de la présentation orale et de la note du compte-rendu de travaux pratiques.

Le rattrapage se déroulera selon les mêmes modalités que l'examen initial, avec un travail complémentaire demandé en TP et une présentation orale de ce travail.

## Support de cours, bibliographie

Polycopié Supélec "Traitement des images", Jean-Luc COLLETTE (réf. 10409)  
"Digital Image Processing", William K. Pratt

## Moyens

Des cours magistraux seront donnés pour présenter les concepts principaux.  
Les applications seront testées sur ordinateur au cours de travaux dirigés.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Savoir identifier les imperfections et les limitations de fonctionnement d'un système d'acquisition d'image.
- Savoir modéliser et caractériser ce système dans le domaine optique.
- Savoir programmer ou utiliser des algorithmes élémentaires de traitement (filtrage, transformations) sur les images numériques en maîtrisant leur complexité.
- Avoir une vue d'ensemble sur les moyens d'exploiter l'information dans l'image.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques  
C2 : Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers  
C7 : Savoir convaincre

# 2EL5090 – Conception de systèmes électroniques complexes : du composant au système hétérogène

Responsables : **Yves Houzelle**

Département de rattachement : **CAMPUS DE METZ**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Depuis une décennie, l'électronique française s'est investie dans des domaines à forte valeur ajoutée et des secteurs de pointe comme l'aéronautique, la défense, le médical, le paiement par cartes à puces, les télécommunications à fibre optique..., abandonnant les produits grand public comme les téléviseurs et les téléphones.

Les systèmes électroniques couvrent un vaste domaine d'utilisation, les applications allant de l'électronique analogique, avec l'amplificateur comme fonction de base, à l'électronique numérique qui implémente la part « intelligente » des systèmes. De plus, la gamme des fréquences s'étend sur un très large spectre allant des applications basses fréquences comme les traitements audio à des applications à très hautes fréquences comme les communications radio.

Les contraintes très différentes liées à ces thématiques très variées imposent des outils de conceptions différents et adaptés à chaque problématique.

Ce cours permettra aux étudiants d'acquérir les concepts de base et la connaissance des outils qui servent à concevoir des systèmes électroniques à la fois analogiques et numériques.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

Cours de Commande des systèmes dynamiques de la ST5. Avoir suivi le cours de sciences pour l'ingénieur 1A de Systèmes Électroniques (1EL8000) peut être un plus.

## Plan détaillé du cours (contenu)

Le cours présentera les composants et les méthodes de synthèses en utilisant les différents outils (et en appréhendant leurs limites) afin de donner aux futurs ingénieurs les moyens d'intervenir dans la conception de systèmes électroniques hétérogènes.

## Déroulement, organisation du cours

L'enseignement sera dispensé sous la forme de cours dirigés avec des présentations des concepts, des exercices d'applications et des travaux pratiques.

## Organisation de l'évaluation

Il sera demandé un rapport écrit concernant l'activité de TP. L'examen écrit final comptera pour 70% de la note finale. Le compte rendu de TP comptera pour 30% de la note finale. La session de rattrapage se fera sous la forme d'un examen oral.

Une absence injustifiée en TP sera sanctionnée d'un 0 pour la séance.

## Support de cours, bibliographie

- Documentations de composants disponibles sur internet.
- Modélisation des composants usuels pour la conception et l'analyse – Patrick Aldebert – 01134/01.
- Introduction à l'électronique analogique – Gilles Tourneur – 17189/01.
- Systèmes logiques et électronique associée – Volume 1 – Jacques Oksman, Jean-Philippe Szlowicz, Philippe Bénabès – 11121/01.

## Moyens

Enseignant : Yves Houzelle.

Logiciel LTspice pour la simulation analogique.

Logiciel Quartus pour la simulation numérique.

Carte de développement pour l'éducation pour la partie numérique.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Connaître les concepts de l'électronique analogique et numérique : modélisation des composants, polarisation, linéarisation, analyse en grands signaux, bouclage et rétroaction, adaptation d'impédance, logique séquentielle synchrone, comportement en fréquence.
- Maîtriser les principaux outils de CAO et de simulation.
- Savoir analyser des fonctions électroniques en utilisant les modèles appropriés.
- Savoir concevoir et dimensionner des fonctions électroniques en prenant en compte les interfaces entre composants et avec l'extérieur.
- Savoir spécifier un système électronique, et rédiger un cahier des charges.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques.
- C2 : Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers.

# 2EL5110 – La lumière pour comprendre la matière

Responsables : **Ninel Kokanyan**

Département de rattachement : **CAMPUS DE METZ**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Il existe de nombreuses techniques de caractérisation différentes qui utilisent la *lumière*. Les techniques optiques de caractérisation sont généralement non destructives, rapides et simple à mettre en œuvre, ne nécessitant que très peu de préparation des échantillons. Ces méthodes explorent le changement d'intensité, d'énergie, de phase, de direction ou de polarisation de l'onde lumineuse après interaction avec l'objet étudié. Ces techniques sont aujourd'hui très demandées dans le monde industriel (contrôle qualité, caractérisation de surface, études atmosphériques, analyses alimentaires, biomedical et pharmaceutiques, ...).

Le but principal de ce cours est d'aborder les exemples les plus pertinents des techniques optiques (ellipsométrie, photoluminescence, spectroscopie infrarouge, spectroscopie Raman, etc...) en mettant l'accent sur leur applicabilité, leur utilité et leurs limites. Lors de ce cours, seront évoquées les techniques qui peuvent être utilisées de manière complémentaire et les obstacles qui sont fréquemment rencontrés lors de leur utilisation. Des exemples des applications pratiques et réelles viendront illustrer ces points, en proposant également des suggestions sur la manière dont nous pouvons éviter ces obstacles dans la mesure du possible.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

1SL3000 - Cours de physique quantique 1A

## Plan détaillé du cours (contenu)

1. Introduction
2. Diffusion de la lumière
3. Spectrophotométrie UV-VIS-NIR
4. Ellipsométrie
5. Interférométrie
6. Réflectométrie
7. Photoluminescence
8. Spectroscopie Infrarouge et spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)
9. Spectroscopie Raman
10. Applications des techniques optiques
11. Exemples d'applications dans industrie, biologie, médecine, nanomatériaux ...

## Déroulement, organisation du cours

20h de cours magistral, 6h de travaux dirigés et 8h de travaux laboratoire

## Organisation de l'évaluation

Contrôle continu : QCM (25%), projet (25%), examen final écrit (50%). En cas d'absence justifiée à l'un des contrôles intermédiaires, la note de ce dernier est remplacée par celle du contrôle final.

## Support de cours, bibliographie

Mauro Sardela, *Practical Materials Characterization*, Springer-Verlag New York (2014)  
Jin Zhong Zhang, *Optical Properties and Spectroscopy of Nanomaterials*, World Scientific (2009)  
Peter Lasch and Janina Kneipp, *Biomedical Vibrational Spectroscopy*, A JOHN WILEY & SONS, INC. (2007)

## Moyens

Equipement du laboratoire LMOPS  
Equipe pédagogique : Ninel Kokanyan, Thierry Aubert

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Connaître différentes techniques optiques
- Connaître les principes de fonctionnement de différents composants spectroscopiques
- Concevoir et réaliser un dispositif de mesure optique
- Savoir interpréter des résultats spectroscopiques obtenus
- Identifier la technique de caractérisation adaptée à la fois au matériau et à la grandeur étudiée

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.2 : Utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes pour traiter le problème.

C2.1 : Avoir approfondi un domaine ou une discipline relative aux sciences fondamentales ou aux sciences de l'ingénieur.

C3.4 : Prendre des décisions dans un environnement partiellement connu, gérer l'imprévu, savoir prendre des risques.

# 2EL5120 – Systèmes photoniques intelligents

Responsables : **Delphine Wolfersberger**

Département de rattachement : **CAMPUS DE METZ**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Non**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Dans le cadre des nouvelles technologies, la lumière est de plus en plus utilisée comme support pour calculer, transporter ou encore stocker de l'information. L'objectif de ce cours est de présenter aux étudiants les développements récents de la « photonique », notamment les lasers et leurs applications dans différents domaines : optique ultra-rapide, télécommunications, traitement tout optique de l'information.

Après quelques rappels de physique ondulatoire, les différents types de sources Lasers seront abordés ainsi que les différents composants d'une chaîne classique de transmission d'informations optiques : des émetteurs (LED et diodes lasers) aux récepteurs (photodiodes). Un TP sur la transmission de signaux (son ou vidéo) sera réalisé pour valider les acquis. Nous aborderons ensuite différentes applications que nous réalisons dans nos laboratoires autour de la lumière : notions de chaos dans les lasers, génération de nombres aléatoires, holographie pour le stockage de la lumière par la lumière... Des visites de laboratoires seront organisées pour permettre aux étudiants une immersion dans le monde de la recherche et de l'innovation.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

Propriétés physiques des lasers

Principes de base du laser. Cavity Fabry-Pérot, Conditions de seuil, Rendement. Dynamiques des lasers.

Optique ultra rapide

Génération d'impulsions ultra courtes : Lasers femto-secondes (Laser Ti:Saphir), Emission de longueur d'onde au moyen d'un Oscillateur Paramétrique Optique (OPO), Mesure d'impulsions au moyen d'un auto-corrélateur optique.

Composants et interfaces optoélectroniques

Émetteurs : Diodes Électroluminescentes (DEL), Diodes lasers, Interface optique d'émission (modulation, bruit, couplage laser-fibre) - Photo-détecteurs : photodiode PIN, photodiode à avalanche.



Principe des télécommunications

Structure des réseaux : réseaux d'accès, réseau de transport, modèles de référence - Répartition du trafic : transmission guidée, transmission non guidée - Accès aux ressources : TDMA, FDMA, CDMA...- Différents médias de communications : concurrence ou complémentarité.  
Propagation guidée, fibres optiques

Théorie du guidage : approche géométrique et ondulatoire dans la fibre optique, atténuation et dispersion - Multiplexage temporel - Multiplexage en longueur d'onde : WDM, DWDM - Connectique.

Composants de l'optique non linéaire

Propagation non linéaire et solitons : équation non linéaire de Schrödinger, stabilité - Effet électro-optique - Amplification paramétrique optique - Utilisation dans les systèmes.

Vers des réseaux de télécommunications tout optique

Multiplexage - Amplificateurs - Routage et commutation 100 % optique : micro-miroirs, cristaux liquides, solitons spatiaux.

## Déroulement, organisation du cours

30,5h CM et 3h de TP

## Organisation de l'évaluation

Evaluation orale (1h30) à la fin du cours sur base d'un exposé en groupes de 2-3 élèves (la note sera individuelle)

## Support de cours, bibliographie

Les Composants Optoélectroniques, François Cerf, Hermes Science Publications, Paris 2000.  
Fundamentals of photonics, E.A. Saleh, M.C. Teich (ISBN : 978-0-471-35832-9).

## Moyens

Equipe pédagogique : Delphine Wolfersberger - Nicolas Marsal

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À l'issue de ce module, les élèves seront capables de :

- comprendre le fonctionnement des lasers et des applications qui en découlent : l'holographie, la cryptographie à base de lasers...
- d'appréhender les phénomènes physiques qui sont à l'origine du fonctionnement des lasers : notions de seuil, de résonance, de mode, optique gaussienne, impulsion...
- se familiariser avec l'optique ultra rapide : Laser femto-seconde, Oscillateur Paramétrique Optique
- concevoir et réaliser une liaison de télécommunications tout optique de transmission de vidéos/son
- comprendre des notions d'optique non linéaire utilisées pour la réalisation de nouveaux composants optoélectroniques pour les communications optiques.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

C2 Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers

C7 Savoir convaincre

# 2EL5130 – Chaos, Fractales et complexité

Responsables : **Damien Rontani**

Département de rattachement : **CAMPUS DE METZ**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Les réseaux de neurones, les oscillateurs électroniques et optiques, ou encore les réactions chimiques sont autant d'exemples de systèmes où les variables d'états décrivant leur évolution spatio-temporelle interagissent de façon non-linéaire. La non-linéarité de ces systèmes est à l'origine d'une grande richesse de leurs comportements dynamiques et permet l'observation de phénomènes nouveaux qui intéressent le scientifique et l'ingénieur. On citera par exemple les dynamiques chaotiques, à l'origine de l'impossibilité de fournir des prédictions météorologiques fiables sur le long terme, ou encore à l'origine de phénomènes collectifs dits émergents telles que la synchronisation dont les applications sont multiples notamment dans les neurosciences pour comprendre et le traiter des troubles cognitifs.

Ce cours donnera donc à l'étudiant les éléments de base de ce que l'on appelle plus généralement la science de la complexité. Il sera illustré par de nombreux cas concrets tirés des travaux de recherches à visée applicative, ce qui permettra à l'étudiant de comprendre et mettre en oeuvre les techniques analytiques et numériques nécessaires à la résolution de problèmes simples.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Notions d'Algèbre linéaire et d'Analyse réelle (niveau L2).

Physique générale (Electricité, mécanique, dynamique des fluides) (niveau L2)

Modélisation (1CC3000 : Théorie et Analyse des systèmes dynamiques linéaires, équations différentielles ordinaires et aux dérivées partielles ).

## Plan détaillé du cours (contenu)

### Perspective historique et Introduction (1.5h)

Découverte de la théorie du chaos de H. Poincaré à E. Lorenz

B. Mandelbrot et les Fractales

Observation de phénomènes « complexes » en physique, chimie, biologie, mécanique

### Introduction générales aux systèmes non-linéaires et théorie du chaos (9h)

Présentation des outils mathématiques (Map, ODE, analyse de stabilité)

Notion d'attracteurs : Points fixes, cycles limites, Tores

Bifurcations et diagramme de bifurcations

Route vers le Chaos et attracteurs étranges.

Systèmes à temps discrets. Notion d'exposants de Lyapunov. Analyse de Complexité : dimension et entropie.

Introduction aux automates cellulaires.

**Cas des systèmes non-linéaires à retard.** Description par équations différentielles à retard. Importance en biologie et physique. Application à des systèmes optoélectroniques.

### Introduction aux Fractales (1.5h)

Introduction à la théorie des fractales. Autosimilarité et notion de dimension fractale (Hausdorff). Ensemble de

Cantor, de Mandelbrot et de Julia.

### **Phénomènes Complexes – Introduction à la physique des réseaux (10,5h)**

Définition des réseaux physiques. Exemple en biologie (métabolisme, génétique, neurosciences) et ingénierie (transport, énergie)

Phénomènes collectifs et émergents. Notion de synchronisation.

Exemples de synchronisation en biologie et physique

Modèle simplifié de Kuramoto.

Phénomène épidémique (modélisation compartimentale et statistique sur les réseaux). Réseaux de contacts.

#### **TP/TD/BE (12h):**

Génération numérique de fractales (3h)

Analyse de complexité du chaos d'un système à temps discret (3h)

Etude d'un réseau d'oscillateurs couplés et conditions de synchronisation (3h)

Simulation numérique et analyse d'un système dynamique non-linéaire (3h)

## **Déroulement, organisation du cours**

Cours magistraux et interactifs avec démonstrations numériques / expérimentales. Priorité donnée aux interprétations physiques et aux exemples, présentations des outils mathématiques simplifiés et nécessaires à la compréhension du cours.

TD: (x2) seront organisés pour l'assimilation de notions clés

TPs: (x3) seront organisés pour la mise en pratique des notions vues en classe sur des problèmes d'inspirations de sujet de recherches récents.

Volume horaire:

Cours magistraux : 18h

TD/BE/TPs : 10.5h

## **Organisation de l'évaluation**

Organisation de l'évaluation (Modalités et poids de chaque évaluation dans la note finale : Contrôle final, intermédiaire, continu, écrit, oral, projet...):

- Compte-rendus de travaux pratiques 100% de la note finale (ceux sont des documents individuels).  
Absence en TP non justifiée et/ou absence de compte rendu : la note de 0 est attribuée pour ce TP.

## **Support de cours, bibliographie**

1. S. H. Strogatz, « Nonlinear Dynamics and Chaos : with Applications in Physics, Biology, Chemistry, and Engineering », Westview Press (2001), ISBN 978-0738204536
2. A. Pikovsky, M. Rosenblum, J. Kurths, « Synchronization: a Universal Concept in Nonlinear Sciences », Cambridge University Press, 2003, ISBN 978-0521533522
3. A.-L. Barabasi, "Network Science", Cambridge University Press, 2016, ISBN 978-1107076266

## **Moyens**

Equipe enseignante : Damien Rontani, Marc Sciamanna

Ressources information et Logiciels Matlab et/ou Python (pour TD et TPs)

## **Acquis d'apprentissage visés dans le cours**

Connaître les enjeux scientifiques et pluridisciplinaires des sciences du non-linéaire et la théorie des réseaux  
Reconnaître des situations où ce formalisme peut-être appliqué.

Connaître et savoir mettre en oeuvre des techniques d'analyse de systèmes dynamiques non-linéaires et des réseaux.

Simuler numériquement des systèmes dynamiques non-linéaires et des réseaux dynamiques.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, techniques, humaines et économique

C2 : Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers

C6 : Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

# 2EL5140 – Modélisation pour l'ingénierie des systèmes

Responsables : **Virginie Galtier**

Département de rattachement : **CAMPUS DE METZ**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Non**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Les systèmes complexes mettent en jeu de nombreux éléments hétérogènes (mécanique, logiciel, économique...). L'ingénierie des systèmes est une démarche interdisciplinaire permettant de les concevoir, vérifier, faire évoluer de manière maîtrisée. Selon l'INCOSE (International Council on Systems Engineering), *des recherches montrent qu'une utilisation efficace de l'ingénierie des systèmes peut permettre d'économiser 10 à 20 % du budget du projet. Il n'est pas difficile de savoir quand l'ingénierie des systèmes échoue, car lorsque quelque chose d'important se passe mal, cela fait généralement la une des journaux. Des gens sont blessés, les programmes sont retardés et le budget est dépassé : problèmes du télescope spatial Hubble au crash des deux Boeing 737 Max, en passant par les dépassements de budgets de 80 % du tunnel sous la Manche. Mais lorsque l'ingénierie des systèmes fonctionne bien, personne ne s'en aperçoit - ce qui est normal.* L'objet de ce cours est la modélisation, sur laquelle reposent les méthodologies et les outils de l'ingénierie des systèmes.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

Aucun prérequis

## Plan détaillé du cours (contenu)

### Introduction

- définition(s) d'un modèle
- cycle de vie d'un système
- objectif et principes du MBSE (Model-Based Systems Engineering)
- introduction à SysML

### Modélisation des exigences

- identification des parties-prenantes
- définition de cas d'utilisation
- diagramme d'exigences

### Modélisations fonctionnelle et structurelle

- principes de décomposition, notions d'interfaces
- diagrammes de définition des blocs, d'activités et d'états
- allocation et traçabilité
- animation de modèle

### Aide à la décision

- approche matricielle de la gestion de la complexité
- analyse des compromis

## Ouverture

un point de vue industriel, sur un sujet pouvant varier (exemple en 2022 : le langage Modelica et l'échange de Modèle en utilisant la norme FMI)

## Déroulement, organisation du cours

La ventilation "6 TD + 16 CM" est administrative car l'électif est en réalité composé de séances comportant :

- une partie de cours présentant des concepts généraux qui pourront être ré-exploités par les étudiants dans de nombreux contextes,
- un QCM permettant aux élèves de vérifier qu'ils ont bien intégré les notions les plus importantes,
- une mise en pratique individuelle et guidée sur un exemple commun.

## Organisation de l'évaluation

Evaluation individuelle par contrôle continu (50 %) et exposé sur un sujet d'ouverture au choix parmi plusieurs à préparer en binôme (50 %, qui pourra être individualisée en cas de déséquilibre manifeste)

Examen de rattrapage : oral individuel avec une partie pratique sur ordinateur

## Support de cours, bibliographie

p.western { font-family: "Liberation Serif", serif; font-size: 12pt; so-language: fr-FR } p.cjk { font-family: "Noto Sans CJK SC"; font-size: 12pt; so-language: zh-CN } p.ctl { font-family: "Lohit Devanagari"; font-size: 12pt; so-language: hi-IN } a.link { so-language: zxx }

Guide to the SEBoK ([https://www.sebokwiki.org/wiki/Main\\_Page](https://www.sebokwiki.org/wiki/Main_Page))

INCOSE SE Vision 25 ([https://www.incose.org/docs/default-source/aboutse/se-vision-2025.pdf?sfvrsn=b69eb4c6\\_4](https://www.incose.org/docs/default-source/aboutse/se-vision-2025.pdf?sfvrsn=b69eb4c6_4))

SysML Distilled, Lenny Delligatti, Addison-Wesley, 2014 (<https://app.ute.edu.ec/content/4915-114-4-1-6-19/SysML%20Distilled%20A%20Brief%20Guide%20-%20Lenny%20Delligatti.pdf>)

## Moyens

Equipe enseignante : Virginie Galtier, et un intervenant extérieur

Logiciel : chaque élève devra installer sur son PC Cameo Systems Modeler selon les instructions et la licence fournies au premier cours ; utilisation ponctuelle d'autres outils, libres et gratuits

Note : les supports écrits sont majoritairement rédigés en anglais.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de ce cours, les élèves :

- sauront envisager une démarche de modélisation d'un système et seront familiarisés avec une méthodologie (Magic Grid),
- connaîtront les concepts de la modélisation des systèmes,
- seront capables de déployer une modélisation d'un système en se basant sur les différents diagrammes SysML,
- se seront familiarisés avec un outil de modélisation industriel (Cameo Systems Modeler),
- seront capables d'exploiter quelques techniques de modélisation comportementale d'un système afin de prédire son comportement,
- seront capables d'intégrer des modèles issus d'un domaine spécifique grâce au standard FMI.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques
- C2 : Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers
- C4 : Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients

# 2EL5150 – Transitions et symbiose socio-économique

Responsables : **Ninel Kokanyan**

Département de rattachement : **CAMPUS DE METZ**

Langues d'enseignement :

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

## Présentation, objectifs généraux du cours

La 4e révolution industrielle, l'innovation, les chaînes de valeurs, la compétitivité, la mondialisation, l'écologie, le social, autant de mots qui sont aujourd'hui sur toutes les lèvres, et qui semblent, de prime abord, des sujets distincts. Pour autant, il existe un lien bien réel qui les relie. Une vision d'ensemble qui à la fois dépeint le contexte actuel mais permet d'imaginer le futur. Ce cours a pour objectif de répondre à la nécessité de comprendre les liens entre tous ces éléments pour mesurer l'ampleur des défis que notre société rencontre aujourd'hui.

Premier volet : Les enjeux majeurs de la 4e révolution industrielle (les grandes transitions, l'innovation ouverte, le réseau, ...), avec une rétrospective depuis première révolution industrielle, sur certains éléments majeurs (les 3 précédentes révolutions, mais aussi les travaux de Marshall, Becattini, Bagnasco, Porter, ... sur la localisation des industries par exemple) qui ont pu influencer et orienter notre économie.

Deuxième volet : L'état actuel de nos écosystèmes d'innovation, nos moyens de création de valeur (chaîne de valeurs, TRL, intersectorialité), et la compétitivité européenne (je passe sur les KETs et les déséquilibres pointés par le HLG KET), les risques de guerres économiques et les facteurs amplifiants. Les leviers mis en place à différentes échelles (régionale, nationale, européenne) que sont les outils de soutien (RTOs, fédérations, alliances, ...) et les financements publics. Cela permet notamment d'illustrer l'intérêt stratégique des financements publics dédiés à la RDI.

Troisième volet : plutôt orienté « prospective ». Après avoir pointé les risques pesant sur notre compétitivité, nous parcourons ce qui pourrait être une autre alternative. Ce bloc est l'occasion de revoir quels sont les liens entre politique, social et économie, et leur état actuel. Etude des grands enjeux pour notre société sur le plan social (cela permet de faire écho à la transition sociétale) et également sur le plan environnemental (je souligne l'étendue et la complexité de ce sujet, j'offre quelques clés de lecture, mais il ne s'agit pas d'un cours sur le sujet). La fin du cours est une ouverture quant à la « nouvelle infrastructure » (pour reprendre l'expression de Rifkin), ce à quoi elle pourrait ressembler, et comment elle pourrait être l'avenir de notre compétitivité.

## Plan détaillé du cours (contenu)

Partie 1 : La vapeur et le nuage – *De la première révolution industrielle à l'innovation ouverte*

- Retour sur les révolutions industrielles ...
- ... pour comprendre pourquoi celle-ci est différente.
- Les grandes transitions

Partie 2 : Le grand carré de Pégase – *De la notion « d'écosystème » au cube économique, ou comment créer de la valeur.*

- Le jargon de l'écosystème, chronique de l' « open-innovation »
- Les trois dimensions de la création de valeur (chaîne de valeur, TRL et intersectorialité)

Partie 3 : La chaîne, le pendule et le maillon – *Anharmonie économique et paradoxe européen de la compétitivité.*

- L'économie est un pendule
- Le paradoxe européen : le cas des Key Enabling Technologies

- Les deux grands leviers de soutien à la compétitivité
- Et si les transitions étaient la clé de la compétitivité européenne de demain ?

Partie 4 : La symbiose économique – *Les quatre piliers de la 4<sup>e</sup> révolution industrielle*

- Comprendre les liens entre politique, social, économie.
- Le quaternaire, une vision élargie des secteurs d'activités.
- Etat des lieux et enjeux de la transition écologique



# 2EL5160 – Economie sociale et solidaire, transitions et modèles socio-économiques

Responsables : **Cynthia Colmellere**

Département de rattachement : **CAMPUS DE METZ**

Langues d'enseignement :

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

# 2EL5170 – Les outils du management de l'innovation au service d'une innovation responsable

Responsables : **Cynthia Colmellere**

Département de rattachement : **CAMPUS DE METZ**

Langues d'enseignement :

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

# 2EL6010 – Conception de systèmes embarqués critiques de contrôle-commande

Responsables : **Nabil Sadou**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Les systèmes embarqués critiques de contrôle-commande se trouvent dans différents domaines industriels (usine 4.0, Avionique, Ferroviaire...) mais aussi dans notre vie quotidienne (domotique, automobile, médical...).

Ces systèmes, souvent critiques, sont soumis à des contraintes de robustesse, de sûreté de fonctionnement et de qualification. Ceci impose de faire appel à des méthodes de spécification qui, au-delà de l'optimisation du processus de conception, garantissent formellement le respect de l'ensemble des propriétés et plus particulièrement les propriétés de sûreté. Le développement de langages et outils certifiés permet de réduire considérablement les coûts de certification des projets en simplifiant la conception et en automatisant la vérification et la génération de code (qualifié/certifié par différentes normes).

L'objectif de cet électif est de former les étudiants aux méthodes de spécification de haut niveau et à la conception dirigée par les modèles en utilisant des méthodes/modèles formels adaptés aux systèmes critiques.

Les activités pédagogiques permettront de définir un modèle formel du comportement du système et de prendre en compte les exigences de sûreté. En effet, la traduction de ces exigences en termes de propriétés vérifiables permettra de faire la preuve du respect de ces dernières.

L'enseignement abordera la génération de code « certifié » et comment embarquer ce dernier sur une plateforme matérielle en prenant en compte les performances d'exécution (performances temporelles, dimensionnement...). Le dernier point concernera les phases d'intégration de vérification et de validation.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

Représentations et analyse des modèles

## Plan détaillé du cours (contenu)

Introduction (systèmes critiques, norme de conception, de qualification, contrôle commande, cycle de développement...)

Modélisation dirigée par les modèles et transformation de modèle

Système temps réel

Modélisation système et spécification

Langage formels, langages synchrones,

Implémentation d'une application de contrôle de commande (Contrôle d'un système d'aiguillage de trains) (voir : <https://youtu.be/BxieOtRYb9U>)

## Déroulement, organisation du cours

Cours (12h), TD et TP (21h)

## Organisation de l'évaluation

Examen écrit 1H (30%) et évaluation de projet (70%)

## Support de cours, bibliographie

M. Klein, "A Practitioners's Handbook for Real-Time Analysis : Guide to Rate Monotonic Analysis for Real-Time Systems", Kluwer Academic, Boston, 1993, ISBN 0-7923-9361-9.

Sanford Friedenthal , Alan Moore, Rick Steiner. « A Practical Guide to SysML, Second Edition: The Systems Modeling Language » (The MK/OMG Press), 2012

C. Bonnet et I. Demeure, "introduction aux systèmes temps réel", Hermes sciences. Paris 1999.

Richard Zurawski (Editor). Embedded Systems Handbook, Second Edition 2-Volume. June 25, 2009 by CRC Press Reference - 837 Pages - 225 B/W Illustrations ISBN 9781439807613

## Moyens

Cours. Projet.

Ce cours contient peu de cours magistraux. La grande partie du volume concerne le projet de conception d'un système de contrôle commande d'un réseau de chemin de fer qui servira pour la mise en œuvre des notions théoriques vues en cours.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce module, les élèves seront capables

- à partir d'un cahier des charges, d'identifier les aspects temps de réel d'une application, de la spécifier et proposer une solution de conception.
- de faire des choix de structuration logicielle et de mise en œuvre.
- d'évaluer l'impact de ces choix pour démontrer que le système respecte les différentes exigences et contraintes
- de mettre en œuvre des différentes étapes du cycle de développement
- de mettre en oeuvre une démarche de conception dirigée par les modèles.
- de gérer un projet de conception
- de communication orale et écrite

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- à partir d'un cahier des charges, d'identifier les aspects temps réel d'une application, de la spécifier et proposer une solution de conception s'inscrit dans la compétence C1.1
- Étudier un problème dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un problème dans ses dimensions scientifiques, économiques et humaines faire des choix de structuration logicielle et de mise en œuvre s'inscrit dans la compétence C1.2 - Utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes pour traiter le problème.
- évaluer l'impact de ces choix pour démontrer que le système respecte les différentes exigences et contraintes s'inscrit dans la compétence C3.6 - Evaluer l'efficacité, la faisabilité et la robustesse des solutions proposées
- de mettre en œuvre des différentes étapes du cycle de développement s'inscrit dans la compétence C1.4 - Spécifier, concevoir, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe et la compétence C6.3 – Spécifier, concevoir, réaliser et valider un logiciel
- de mettre en œuvre une démarche de conception dirigée par les modèles s'inscrit dans la compétence C6.3 – Spécifier, concevoir, réaliser et valider un logiciel
- gestion de projet de conception s'inscrit dans la compétence C8.1 - Travailler en équipe/en collaboration

# 2EL6020 – Architecture des ordinateurs

Responsables : **Ruben Salvador Perea**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Cet électif est ouvert à tous les étudiants qui le souhaitent et il est également obligatoire pour le parcours InfoSec.

Les microprocesseurs sont omniprésents dans la société actuelle. Toutefois, leur conception, implémentation et construction restent un défi à relever qui a un impact majeur sur les performances et la sécurité globale des systèmes informatiques.

L'objectif principal de ce cours est de donner aux étudiants toutes les connaissances de base nécessaires pour comprendre le fonctionnement des processeurs modernes. Nous aborderons les différents concepts et techniques fondamentaux permettant de s'initier à l'architecture des ordinateurs, en mettant l'accent sur l'interface matériel/logiciel ainsi que sur l'approche de conception "bottom-up" pour comprendre comment les microprocesseurs fonctionnent et comment ils peuvent être réellement conçus.

Ce cours s'inspire largement de livre de Patterson et Hennessy « Computer Organization and Design, The Hardware/Software interface, RISC-V Edition, Morgan Kaufmann, 2018 ». Ce livre sera utilisé comme ouvrage de référence dans le cadre de cet électif. Les deux auteurs ont fait un travail pionnier en matière d'architecture des ordinateurs, notamment dans les architectures « Reduced Instruction Set Computer » (RISC). David Patterson a conçu le terme RISC, alors que John L. Hennessy a été l'inventeur du microprocesseur MIPS. Ces deux auteurs ont reçu le prix « 2017 Turing Award » pour leurs excellent travail de recherche sur les architectures RISC.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

Ce cours s'appuie sur les concepts fondamentaux de :

- 1CC1000 – Systèmes d'Information et Programmation
  - 1EL8000 – Systèmes Electroniques (particulièrement la partie "électronique numérique")
- Certaines notions d'algorithmique & complexité sont également intéressantes.

## Plan détaillé du cours (contenu)

### Conception de circuits numériques à partir d'un langage de description du matériel (Hardware Description Language, HDL) (4,5h CM + 6h TD)

- Conception de circuits logiques combinatoires
- Conception de circuits logiques séquentiels, machines à états finis (FSM, Finite State Machine), analyse temporelle
- Circuits reconfigurables : le Field-Programmable Gate Array (FPGA)
- Flot de conception en HDL pour les FPGA (description HDL, simulation, synthèse)

## Architecture des ordinateurs et RISC-V (10,5h CM + 12h TP)

- Le modèle Von Neumann des architectures de processeurs
- Les paradigmes d'architecture RISC/CISC
- Architecture du jeu d'instructions RISC-V (Instruction Set Architecture, ISA), modes d'adressage
- Les éléments de base d'un processeur : chemin de données, registres, unité arithmétique et logique (ALU), unité de commande, mémoire, périphériques
- Interruptions et exceptions
- Performances : pipeline, hiérarchie mémoire et caches, prédiction de branchement, exécution dans le désordre
- Notions sur la sécurité de l'architecture des ordinateurs

### TD et TP

- Flot de conception en VHDL pour les FPGA
- Programmation en assembleur RISC-V
- Conception d'une sous-partie d'un processeur RISC-V en VHDL

## Déroulement, organisation du cours

Cours magistraux : 15h

TD : 6h

TP : 12h

## Organisation de l'évaluation

Contrôle final (écrit ou oral) : 40%

Examen de laboratoire (réalisation technique, démonstration et oral de présentation du projet) : 40%

Devoirs de cours (exercices, lectures...) : 20%

## Support de cours, bibliographie

- **Polycopié** mis à disposition des élèves
- **Ouvrages principaux pour le cours**: Il y a quelques exemplaires de ces livres à la bibliothèque et ils sont également disponibles sur la plateforme ebook de l'école à: <https://www.vlebooks-com.ezproxy.universite-paris-saclay.fr/>
  - D. A. Paterson, J. L. Hennessy, Computer Organization and Design: The Hardware/Software Interface, RISC-V Edition, Morgan Kaufmann, 2018. [AO]
  - S. L. Harris, D. M. Harris, Digital Design and Computer Architecture (MIPS ou ARM Edition), Morgan Kaufmann. [CNAO]
- **Autres ouvrages**
  - W. J. Dally, R. C. Harting, T. M. Aamodt, Digital Design Using VHDL: A Systems Approach, First Edition, Cambridge University Press, 2016 [CN]
  - B. J. LaMeres, Introduction to Logic Circuits & Logic Design with VHDL, Second Edition, Springer, 2019 [CN]
  - M. M. Mano, C. R. Kime, T. Martin, Logic and Computer Design Fundamentals, Fifth edition, Pearson, 2015 [CNAO]
  - P. J. Ashenden, J. Lewis, The Designer's Guide to VHDL, Third Edition, Morgan Kaufmann, 2008 [CN]
- **PDFs disponibles librement**
  - B. Mealy, F. Tappero, Free Range VHDL : <http://www.freerangefactory.org> [CN]
  - P. J. Ashenden, The VHDL Cookbook : <https://tams.informatik.uni-hamburg.de/vhdl/doc/cookbook/VHDL-Cookbook.pdf> [CN]

*Légende:*

[AO] : Architecture des ordinateurs

[CN] : Conception de systèmes numérique

[CNAO] : Conception de systèmes numériques et architecture des ordinateurs

## Moyens

Equipe enseignante : Rubén Salvador, Guillaume Hiet

- Taille des TD : 25
- Outils logiciels : Xilinx Vivado
- Carte Xilinx Pynq-Z1
- Salles de TP : Campus de Rennes Niveau 5, 25 étudiants

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'étudiant sera capable de :

- expliquer les principes fondamentaux de la conception d'architecture des microprocesseurs modernes
- concevoir des blocs d'un microprocesseur simple correspondant à un jeu d'instruction RISC-V
- simuler et synthétiser ce microprocesseur sur un FPGA
- développer des programmes en langage d'assembleur en utilisant le jeu d'instruction RISC-V

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.4 - Spécifier, concevoir, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe

# 2EL6030 – Systèmes d'exploitation

Responsables : **Pierre Wilke**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Cet électif fait partie du parcours InfoSec. L'objectif de cet électif est de donner les connaissances et les compétences afin de réaliser un système d'exploitation multitâche gérant la mémoire des différents processus, gérant des interruptions et capable de réaliser des entrées-sorties.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Les prérequis pour ce cours sont les suivants:

- Bonne maîtrise du langage C (par exemple en ayant suivi le cours de compilation du parcours Infosec)
- Un plus serait utile de connaître l'assembleur RISC-V (par exemple en ayant suivi le cours d'architecture des ordinateurs du parcours Infosec)

## Plan détaillé du cours (contenu)

Les différents cours sont organisés de la manière suivante:

Cours 1 :

- Histoire des systèmes d'exploitation

Cours 2 :

- Démarrage du système d'exploitation
- Programmation des registres de contrôle
- Niveaux de privilège
- Gestion des interruptions
- Appels système

Cours 3 :

- Ordonnancement des processus
- Algorithmes d'ordonnancement
- Changement de contexte

Cours 4 :

- Primitives de synchronisation en espace noyau et utilisateur
- Problème de concurrence
- Concurrence réelle et pseudo-concurrence

Cours 5 :

- Gestion de la mémoire virtuelle
- Segmentation
- Pagination
- Protection mémoire
- Chargement de binaire
- Algorithme d'allocation mémoire



## Déroulement, organisation du cours

CM 15h  
TP 18h

## Organisation de l'évaluation

Contrôle final: oral sur un sujet

Évaluations obligatoires: Comptes-rendu de TP n°1 et 2, incluant le code produit pour répondre aux questions, et le nombre de tests fonctionnels passés par le code.

NF=0.5 CF + 0.5 EO

La compétence C2.1 est validée au jalon 2 par la validation de ce cours.

La compétence C6.2 est validée au jalon 2 après avoir validé les TP (avoir la moyenne sur les 2 TPs)

La compétence C7.1 est validée au jalon 2 sur la performance lors de la présentation orale.

## Support de cours, bibliographie

- Andrew Tanenbaum, " Systèmes d'exploitation ", 3eme Edition, Pearson.
- Russinovich, Mark, Solomon, David, Ionescu, Alex, "Windows Internals", 6eme edition, Microsoft Press.
- Daniel Bovet, Marco Cesati, "Understanding the Linux Kernel", 2nd Edition, O'Reilly.
- Love, Robert , "Linux Kernel Development: A thorough guide to the design and implementation of the Linux kernel (Developer's Library) ", Addison-Wesley.

## Moyens

Enseignants : Frédéric Tronel et Pierre Wilke

Matériel nécessaire : un ordinateur équipé d'un système d'exploitation Linux.

Logiciels nécessaires : chaîne de cross-compilation gcc pour RISC-V, qemu-riscv64, docker (Un guide d'installation de ces différents outils sera fourni en introduction du cours)

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Comprendre les concepts mis en oeuvre lors de la conception d'un système d'exploitation.

Comprendre l'impact des services offerts par un système d'exploitation sur les performances et la sécurité des applications.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C2.1 Avoir approfondi un domaine ou une discipline relative aux sciences fondamentales ou aux sciences de l'ingénieur.

C6.2 Concevoir un logiciel

C7.1 Structurer ses idées et son argumentation, être synthétique (hypothèses, objectifs, résultats attendus, démarche et valeur créée)

# 2EL6040 – Programmation système sous linux et windows

Responsables : **Pierre-François Gimenez**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Cet électif fait partie du parcours InfoSec, mais est pour autant accessible à tout étudiant de deuxième année le souhaitant.

Le langage C reste un des langages les plus utilisés pour programmer des applications dans les couches basses du logiciel telles que des systèmes d'exploitation ou des applications proches de celui-ci. En particulier, il est encore très largement utilisé pour programmer les services tournant en tâche de fond dans les systèmes GNU/Linux et Microsoft Windows (serveurs Web, serveurs de bases de données, serveur de messagerie électronique, serveurs de fichiers, etc). Bien que de conception très ancienne (années 70), cet état de fait s'explique par les performances inégalées des programmes écrits dans ce langage grâce aux progrès constants des chaînes de compilation disponibles actuellement. Les inconvénients d'écrire dans un langage peu abstrait sont donc (partiellement) compensés par des performances quasiment optimales au prix d'un effort substantiel lors de la mise au point des programmes.

Ce cours s'adresse donc à des étudiants désireux d'approfondir leur pratique de la programmation au travers de l'apprentissage du langage C, en écrivant des applications proches du système d'exploitation en utilisant les interfaces standards d'un système Unix (norme POSIX, gestion des entrées-sorties, communications interprocessus, programmation multiprocessus et multithreads, gestion des signaux systèmes, déverminage et mise au point d'une application) et leurs équivalents pour l'API Win32/Win64 de Microsoft Windows.

Ce cours sera aussi l'occasion de se rendre compte des difficultés inhérentes à la programmation en langage C (notamment la gestion explicite de la mémoire et les conséquences de choix de conception discutables sur l'implémentation des tableaux et des chaînes de caractères) et des problèmes de fiabilité et de sécurité qu'elles engendrent.

Nous profiterons de cette expérience pour introduire un nouveau langage de programmation (Rust) qui permet de garantir à la fois plus de sécurité et de fiabilité par la conception même du langage (qui fait usage des derniers progrès en matière de système de typage) et qui dans le même temps permet d'obtenir les mêmes performances qu'un programme écrit en langage C. À notre connaissance, c'est la première fois que cette synthèse est assurée par un langage de programmation (les autres tentatives butant toujours sur soit des problèmes de performances à l'exécution, soit des erreurs durant le fonctionnement aboutissant généralement à des mises en défaut de la sécurité de l'application pouvant se répercuter sur celle de la plateforme qui l'exécute). Le langage Rust est déjà actuellement utilisé par les équipes de Mozilla pour refondre entièrement le code de leur navigateur Web Firefox. L'électif permettra aux étudiants de mettre en pratique les connaissances acquises au cours de travaux de laboratoires, qui consisteront en la programmation de services systèmes sous Unix et Windows en C.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Systèmes d'information et programmation, Algorithmique & Complexité, réalisation préalable d'un projet de développement logiciel (1A)

## Plan détaillé du cours (contenu)

Part 1 : Le langage C

Part 2 : The Rust language

Part 3 : APIs Système Unix et Windows, standard POSIX

## Déroulement, organisation du cours

50% cours magistraux, 50% TP, mini-projet

## Organisation de l'évaluation

Examen Final (présentation orale du projet): 33%

Examen de la réalisation: 33%

TP noté: 33%

## Support de cours, bibliographie

- Le langage C - 2e édition - Norme ANSI (August 20, 2014) , Brian W. Kernighan and Dennis M. Ritchie.
- The Rust Programming Language, May 2018, Steve Klabnik and Carol Nichols.
- Programming Rust (August 2016), Jim Blandy.
- La norme POSIX.
- Windows System Programming, (4th Edition) (Addison-Wesley Microsoft Technology) by Johnson M. Hart (2015-10-01).

## Moyens

Un environnement Linux et Windows

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Créer des programmes efficaces en C et Rust sur les plateformes Linux et Windows.  
Sélectionner et utiliser les fonctions du noyau d'un système d'exploitation et ses API.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C2 - Avoir approfondi un domaine ou une discipline relative aux sciences fondamentales ou aux sciences de l'ingénieur.

C6 - Spécifier, concevoir, réaliser et valider un logiciel

C7 - Convaincre

# 2EL6050 – Modelica et bond graph : modélisation multi-domaine, analyse et simulation

Responsables : **Pierre Haessig**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Non**

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours propose d'enrichir votre savoir-faire, ainsi que votre réflexion théorique, sur la modélisation, l'analyse et la simulation des systèmes multiphysiques complexes (ex. : simulation de drones, performance thermique du bâtiment, bioréacteurs...).

Contexte : Les systèmes techniques sont généralement des **assemblages de composants** (ex. dans une voiture : moteur, alternodémarreur, direction, freins...) et leurs lois de comportement sont souvent issues de **disciplines différentes** (électricité, mécanique, thermique...). Ainsi, ces composants sont souvent maîtrisés par des **personnes différentes**. L'ingénierie des systèmes complexes pose donc des difficultés **d'échange et de capitalisation des modèles**. Cet électif vise à s'approprier deux outils de modélisation couramment utilisés pour répondre à ces besoins : Modelica et les graphes de liaison (bond graphs).

Le bond graph est une description graphique des *liens énergétiques* entre les composants d'un système. Cette représentation se fonde sur les analogies entre domaines physiques (ex. : inertie mécanique ~ inductance électrique). Avec la modélisation par bond graph, il devient possible de réaliser des *analyses structurelles* du système modélisé, en particulier à travers la notion centrale de *causalité*. Ces analyses mettent en lumière le *fonctionnement physique* et les *échanges d'énergie* du système.

Modelica est un langage non propriétaire\* pour répondre aux besoins suivants :

- Modéliser des systèmes appartenant à plusieurs domaines physiques
- Structurer aisément un modèle en composants réutilisables
- Collaborer efficacement et capitaliser les modèles au sein d'une équipe

\*à l'inverse de Simulink/Simscape par exemple

Modelica permet de décrire simplement (graphiquement), puis simuler temporellement des systèmes complexes (quelques milliers de variables). Il gagne donc en popularité dans l'industrie (bâtiment, transport, réseaux électriques...).

Grâce au caractère open source du logiciel utilisé (OpenModelica), vous pourrez réutiliser librement le savoir-faire de ce cours des contextes différents. Au-delà de Modelica, vos compétences acquises sur la structure des modèles et la collaboration seront transposables à bien d'autres environnements.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

Déroulement du cours :

**Bond graph** (5 h + 2 h travail personnel)

- Principes du formalisme bond graph, analogies entre les domaines
  - a. procédure d'assignation de la causalité
- Analyse des propriétés structurelles
- Extraction des équations d'état

#### Modelica (14 h + 6 h travail personnel)

- Introduction à Modelica : bref historique, utilisation dans l'industrie, principes
- Prise en main de Modelica
  - Premiers exemples pratiques : ODE, circuit électrique, mécanique.
  - Analogies entre les variables : flux et potentiel
  - Systèmes hybrides, discontinuité, événements (exemple d'un redresseur à diode)
- Structuration de modèles
  - Héritage et composition
  - Packages
  - Création d'un composant physique personnalisé

#### Versionnement (3 h + 1 h travail personnel, selon le besoin)

Selon le besoin des étudiants, il y aura des exercices d'aide à la prise en main de Git (logiciel de versionnement) et GitLab (plateforme de développement collaboratif).

#### Projet de modélisation (9 h + 18 h travail personnel)

("M<sup>3</sup> project": *Multiphysics Modeling with Modelica*) en groupes de 3-4.

- Exemples de sujets de projets : usine marémotrice, drone, fusible, interrupteur électromagnétique.  
*Nouveauté 2020-2021: modélisation de la dynamique des épidémies (e.g. COVID-19)!*

#### Évaluation finale (2 h, cf. §Méthodes d'évaluation)

## Déroulement, organisation du cours

Pour le bond graph, l'enseignement est sous forme de cours-TD.

Pour Modelica, l'enseignement se fait par des séances d'exercices pratiques sur ordinateur avec des points de cours condensés pour introduire les notions clés.

Dans le but de permettre une maîtrise concrète de ces deux outils, l'accent est mis sur la pratique au travers de petits exercices en séances, de petits exercices en travail personnel entre les séances et enfin avec le projet final.

## Organisation de l'évaluation

L'évaluation de l'électif repose sur deux activités :

- **Examen final théorique**, sans documents, sur le bond graph et les fondements de Modelica (50% de la note finale)
- **Projet de modélisation** (50% de la note finale)
  - Une fiche détaillant les objectifs du projet est fournie au démarrage du projet. En regard de ces objectifs, les critères d'évaluation y sont listés précisément.
  - La note de projet peut être individualisée au sein d'un groupe

Par ailleurs, cet électif se déroule sous forme de cours appliqués où l'essentiel de l'apprentissage se fait dans les échanges en séance. La participation en classe est donc incontournable pour acquérir les savoirs et compétences de cet électif. La **participation** et le respect des échéances comptent donc pour une partie de la note finale.

## Support de cours, bibliographie

Support du cours Modelica : <http://éole.net/courses/modelica/> (en anglais)

- bibliographie détaillée incluse : <http://éole.net/courses/modelica/90-references.html>

Support du cours Bond graph : diaporama de l'enseignant "*Bond Graphs - A graphical language for the analysis of multiphysical systems*". <https://cel.archives-ouvertes.fr/hal-03602684>

Michael M. Tiller "*Modelica by Example*", livre en ligne, publié en 2014 et mis à jour continuellement depuis. URL: [mbe.modelica.university](http://mbe.modelica.university).

Geneviève Dauphin-Tanguy et al. "*Les bond graphs*", livre Hermès, 2000.

## Moyens

Enseignant : Pierre Haessig

Séances sur ordinateur, avec logiciel libre [OpenModelica](#)

À noter que l'installation sous macOS est difficile. Il peut être nécessaire de travailler avec une machine virtuelle Linux. En alternative, [Parallels Desktop](#) (payant) a été testé avec succès en 2021-2022.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Pour le bond graph, il s'agit d'apprendre les concepts de cette représentation pour être capable, sur des exemples simples, de :

- modéliser le système par un bond graph
  - y compris en appliquant la procédure d'assignation de la causalité
- analyser les propriétés structurelles du système
- extraire les équations d'états

Pour Modelica, il s'agit de :

- utiliser le langage Modelica et l'environnement de développement OpenModelica pour modéliser et simuler des systèmes dynamiques
- savoir réutiliser des modèles Modelica standards
- structurer un modèle complexe en composants réutilisables
- travailler en équipe sur un même modèle complexe, avec un système de versionnement (git)

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Les acquis décrits plus haut permettent de valider les compétences ingénieur CentraleSupélec suivantes :

- **C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes** à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques. En particulier :
  - C1.2 : **Modéliser** : utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes
  - C1.4 : **Concevoir** : spécifier, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe (dans ce cours, le "système complexe" à concevoir est en fait le *modèle Modelica* d'un système complexe)
- **C6** : Être opérationnel, responsable et innovant dans le **monde numérique**. En particulier :
  - a. C6.1 : Résoudre numériquement un problème (en particulier la simulation des systèmes dynamiques)
  - b. C6.2 : **Concevoir un logiciel** (le modèle Modelica étant vu comme un logiciel)

# 2EL6060 – Serious Game

Responsables : **Gwendal Fouché**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

## Présentation, objectifs généraux du cours

### Et si vous saviez le monde depuis votre console ?

Le jeu, et en particulier le jeu vidéo, est un média fascinant. Vous avez certainement déjà fait l'expérience d'une concentration maximale, face à un écran ou un plateau, d'heures que l'on ne sent plus passer, de défis et de limites qu'on franchit puis dépasse. Le jeu n'annonce pas ses idées, il les fait vivre. Le jeu n'explique pas, il implique.

Aujourd'hui, cette force du jeu nous montre qu'il est possible d'aller plus loin que le simple divertissement : de plus en plus, il permet de transmettre des connaissances, des savoir-faire, des prises de conscience écologiques ou sociales, ... Bref, le jeu devient sérieusement utile, de l'industrie aux salles de classe.

Dans cet électif, vous découvrirez comment le *serious game* a permis de transformer la transmission d'idées dans de nombreux domaines, de l'apprentissage de la lecture à la réparation automobile, en passant par l'éducation aux gestes de soin. Ces exemples vous permettront de devenir concepteur de votre propre *serious game*, car vos idées aussi méritent d'être jouables.

### Highlights

Découvrez et analysez plusieurs cas d'usage et leur efficacité

Présentez un des grands thèmes du *serious game* en réalisant une vidéo de vulgarisation YouTube

Construisez et développez en projet de groupe votre propre *serious game* à l'aide d'une plateforme de développement de jeux vidéos telle que *Unity*

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Informatique :

- Algorithmes
- Langage de programmation (bases)

## Plan détaillé du cours (contenu)

### Contexte (10%)

- Introduction à l'électif et aux grandes problématiques autour du serious game.
- Découvertes de problématiques industrielles et de cas spécifiques tout au long de l'électif.
- DragonBox : Comment des enfants de 5 ans apprennent l'algèbre en 50 minutes ?

### Vidéo de vulgarisation YouTube (25%)

- Sujet au choix parmi plusieurs thèmes proposés (game design vs gameplay, rôle du score, boucle d'interaction, ...)
- Réalisation d'une vidéo YouTube d'explication sur les enjeux du thème choisi (1 réalisation par étudiant).
- Partage et visionnage des vidéos sur la chaîne Youtube dédiée à l'électif.

### Réalisation d'une preuve de concept de serious game (65%)

- En groupe de 3 à 5 personnes.
- Accompagné par un professionnel de l'industrie du jeu vidéo.
- Sur un sujet de votre choix.
- La conception, tout comme l'encadrement se fera en deux ensemble distincts mais complémentaires :
  - l'aspect serious, l'objectif utile à atteindre, le message ou la connaissance à transmettre ;
  - l'aspect game, les mécaniques de jeu mises en oeuvre pour que l'interaction avec le joueur fonctionne.
- Testez votre création auprès de vos camarades et de votre entourage, et faites-la évoluer en mode itératif !

## Déroulement, organisation du cours

- Cours présentiel : 10% (6 HEE)
- TD et évaluation présentiel : 40% (24 HEE)
- Projet et vidéo Youtube non présentiel : 50% (30 HEE)

## Organisation de l'évaluation

Vidéo Youtube sur un aspect théorique des serious game : 1/4 de la note et C3

Analyse d'un exemple de serious game : 1/4 de la note et C2

Pitch et Soutenance du projet de réalisation d'un serious game : 1/2 de la note et C2, C3, C6, C8

## Support de cours, bibliographie

Introduction au Serious Game, de Julian Alvarez et Damien Djaouti

Concevoir un serious game pour un dispositif de formation, de Béatrice Lhuillier

Les serious games. Une révolution, de Yasmine Kasbi

La Gamification: Ou l'art d'utiliser les mécaniques du jeu dans votre business, de Clément Muletier et Guilhem Bertholet

Serious Game : Révolution pédagogique, de Valérie Lavergne Boudier et Yves Dambach

## Moyens

Equipe enseignante :

- Catherine SOLADIE
- Intervenants extérieurs

Taille des TD : <= 30

Outils logiciels et nombre de licences nécessaires :

- Unity (gratuit pour étudiants) : <https://unity3d.com/fr/unity>

Salles de TP :

- 251 et 252, Campus de Rennes (jusqu'à 30 étudiants dans chaque salle / 15 postes par salle)

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, vous serez capable de :

- Définir les principales notions relatives aux *serious game* (C2.1)
- Argumenter les pratiques mises en oeuvre dans des *serious game* existants (C2.3)
- Implémenter un jeu vidéo (C6.2)
- Combiner vos compétences en développement logiciel avec de nouvelles compétences (telles que la pédagogie ou la médecine) dans une approche pluridisciplinaire (C2.2)
- Imaginer et concevoir un *serious game* (C3.3)
- Etre proactif et vous impliquer dans la création d'une vidéo Youtube et d'un POC (C3.3)



- Prendre en compte le game play et l'UX dans la création d'un *serious game* (C4.2)
- Faire appel à l'expertise et les connaissances personnelles d'au moins un membre du groupe (ex : musique, art, science, écologie) pour la conception d'un *serious game* (C8.1)

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C2 Jalon 2
  - C2.2 **Importer** : Réutiliser concrètement des connaissances issues d'un autre domaine ou discipline dans un problème donné
- C6 Jalon 2
  - C6.2 **Concevoir un logiciel** : Par le biais d'une réalisation pratique, modéliser un logiciel complexe
- C3 Jalon 2
  - C3.3 **Innover** : Etablir des POC ou équivalent
- C8 Jalon 2
  - C8.1 **Travailler en équipe** : Associer chaque membre de l'équipe en fonction de ses forces

# 2EL6090 – Intelligence artificielle et Deep Learning

Responsables : **Catherine Soladie**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

### ADN ou ligne de code ?

*Homo Sapiens* est taillé pour marcher sur deux pieds, et pourtant, il lui faut apprendre un an avant de se relever. Les créatures des fonds sous-marins peuvent se déplacer dans une obscurité totale, et leurs espèces ont évolué durant des millions d'années pour atteindre ce résultat. L'adaptation à un milieu, à un problème, ou encore l'intelligence, ne sont pas des notions statiques mais le résultat d'un effort constant : l'apprentissage.

Ainsi, l'émergence de systèmes technologiques capables de prédiction, d'expertise, pose rapidement la question de l'apprentissage. Comment un programme peut-il acquérir, assimiler, organiser des savoirs ? Sur ce point, s'inspirer du vivant est un point de départ plutôt fructueux. Comment imiter le comportement de nos neurones ? Celui de l'évolution et de la sélection naturelle ? A quels résultats s'attendre ?

Dans cet électif, vous découvrirez les grandes méthodes d'Intelligence Artificielle et leur fonctionnement. Vous pourrez prendre en main les algorithmes les plus récents sur des cas concrets, et vous aurez l'occasion de pousser l'étude sur un sujet de votre choix. À vous d'apprendre comment faire apprendre !

### Highlights

Vie artificielle : automates cellulaires, réseaux de neurones, algorithmes génétiques

Deep Learning : Réseaux de convolutions et transformers, Traitement temporel des données (RNN, LSTM), Modèles génératifs (type VAE ou GAN).

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

Statistiques et apprentissage.

## Plan détaillé du cours (contenu)

### Contexte (5%)

- Introduction à la matière
- Mise en contexte historique.
- Lien avec les matières du programme.

### Vie artificielle (15 %)

- Alternance théorie/pratique sous forme de cours appliqué
- Vie Artificielle
  - Automates cellulaires et notion d'émergence
  - Algorithmes génétiques
  - Systèmes multi-agents
  - Apprentissage par renforcement

### Machine Learning et Deep learning (40%)

- Alternance théorie/pratique sous forme de cours appliqués
- Machine Learning
  - Réseaux de neurones
  - Rétro propagation du gradient
- Deep Learning
  - Auto-encodeurs
  - Réseaux de neurones récurrents
  - Réseaux convolutionnels et transfert learning
  - Modèles d'attention et Transformers

### Projet de construction d'un cours appliqué (40%)

- Projet individuel
- Approfondissement d'un sujet choisi librement
- Présentation sous forme d'un cours appliqué (modalités pouvant être adaptées)
  - 5 min d'introduction sous forme d'une vidéo
  - 20 min de pratique sous forme d'un notebook

## Déroulement, organisation du cours

- Cours présentiel : 13% (8 HEE)
- Cours appliqué et évaluation présentiel : 37% (22 HEE)
- Tutoriel non présentiel : 20% (12 HEE)
- Projet de réalisation d'un cours appliqué non présentiel : 30% (18 HEE)

## Organisation de l'évaluation

QCM de connaissances théoriques sur l'IA et le Deep Learning : 7 pts

Soutenance du projet de réalisation d'un cours appliqué : 7 pts

Video de la partie introduction du cours appliqué : 7 pts

Respect des deadlines et participations aux activités : +/-2 bonus pts

## Support de cours, bibliographie

Tutoriels de Yann Lecun

*Machine Learning avec Scikit-Learn - Mise en oeuvre et cas concrets*, Aurélien Géron

*Deep Learning with Python*, Francois Chollet

*Pattern Recognition and Machine Learning*, Christopher Bishop, Springer, 2006. The best book on Machine Learning, it covers a lot of topics! Freely available online.

*Deep Learning*, Ian Goodfellow et al., MIT Press, 2016. A reference book on Deep Learning. Freely available online.

*Dive into Deep Learning*, Aston Zhang et al., 2019 An interactive deep learning book with code, math,...

## Moyens

Equipe enseignante :

- Catherine SOLADIE
- Simon LEGLAIVE

Taille des cours appliqués : 30

Outils logiciels et nombre de licences nécessaires :

- Jupyter Notebook, python, Pytorch ou équivalent (gratuit)

Salles de cours :

- Connection WIFI, branchement des ordinateurs personnels

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Connaître un grand panel d'outils de *machine learning* et *deep learning* pour le traitement des données, y compris massives (C2.1, C6.3)
- Connaître les notions fondamentales du *machine learning* (C2.1)
- Savoir lister et donner des exemples des différentes familles de *machine learning* (C2.1)
- Tester, analyser et faire évoluer différents algorithmes de *machine learning* et de *deep learning* (C1.4, C6.1)
- Evaluer les performances d'un algorithme de machine learning (C2.2, C6.3)
- Concevoir et proposer un logiciel de traitement de données illustrant un concept spécifique ou algorithme spécifique de machine learning ou deep learning (C1.4, C2.1, C2.2, C6.1, C6.3)

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C1 Jalon 2
  - C1.4 **Concevoir** : Rédiger soi-même un cahier des charges ou élaborer une approche agile à partir d'un besoin donné
- C2 Jalon 2
  - C2.1 **Approfondir** : Approfondir l'ensemble de ses connaissances sur un domaine choisi, via les enseignements de 2A
  - C2.2 **Importer des connaissances** : Réutiliser concrètement des connaissances issues d'un autre domaine ou discipline dans un problème donné
- C6 Jalon 2
  - C6.1 **Résoudre** numériquement un problème
  - C6.3 Traiter des **données**

# 2EL6100 – Communication Systems Engineering

Responsables : **Haïfa Jridi**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

## Présentation, objectifs généraux du cours

Toutes les communications aujourd'hui (téléphonie mobile, satellites, réseaux locaux WiFi, réseaux filaires ADSL, etc. ) permettent de transporter des débits de plus en plus élevés grâce aux traitements numériques dont les grands principes de base ont été énoncés dans la théorie de l'information de *Claude Shannon* (1948) :

- Compression de l'information pour supprimer toutes les redondances inutiles dans les messages à transmettre. On parle alors de codage de source.
- Protection de l'information pour réduire au maximum les erreurs dans la transmission du signal. On parle alors de codage de canal.

Dans le contexte d'une transmission idéale sur canal Gaussien, c'est l'association de ces deux principes qui permet d'approcher la limite théorique du débit prédit par la théorie de l'information en utilisant des algorithmes toujours plus performants entre émetteur et récepteur.

D'autre part, pour un large spectre d'applications, le canal peut être beaucoup plus contraignant avec des phénomènes tels que la sélectivité, la transmission multi-trajets, l'effet doppler... Cependant, même dans ce type de canaux, il existe heureusement d'autres moyens de protection de l'information (outre que le codage de canal) faisant appel principalement à la notion de diversité (temporelle, fréquentielle, spatiale...)

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

- Notions de probabilités
- Traitement numérique des signaux (transformation de Fourier, Analyse spectrale)

Ces pré-requis représentent des acquis d'apprentissage visés par les cours de traitement de signal (1CC4000) et modélisation (1CC3000) dispensés en 1ère année.

## Plan détaillé du cours (contenu)

### Partie 1 : Théorie de l'information

- Définition de l'information, l'information mutuelle, modèles de canaux
- Capacité du canal
- Théorème de Shannon : codage de source et codage de canal

### Partie 2 : Compression de l'information et codage de source

- Extension d'une source discrète
- Codes à longueurs fixes et variables
- Codage de Huffman
- Applications : JPEG, MPEG, H264, MP3

### **Partie 3 : Protection de l'information (codage de canal, diversité et protocoles de retransmission)**

- Codes en blocs (matrices génératrices, distance et poids de Hamming, matrice de contrôle, codes de Hamming)
- Codes convolutifs (principes, polynômes générateurs, fonction de transfert, diagramme d'états, représentation en treillis)
- Décodage de Viterbi
- Applications : codes pour les normes DVB, pour les normes de téléphonie mobiles
- Extensions : codes LDPC, turbo-codes, codes polaires, cryptographie
- Notion de diversité (temporelle, fréquentielle, spatiale, coopérative)
- Protocoles de retransmission (ARQ, HARQ, IR)

## **Déroulement, organisation du cours**

Les notions de base sont présentées dans des cours magistraux avec des exemples précis. Les TDs assurent la bonne compréhension du cours et permet de corriger les mauvaises interprétations du cours. Les travaux personnels représentent des compléments de cours demandés aux élèves (applications et extensions).

## **Organisation de l'évaluation**

L'évaluation se fait sous trois formes : Contrôle final (écrit ou oral) : coefficient 0.5 Examen d'EL : coefficient 0.25 Travail personnel : coefficient 0.25. En cas d'absence justifiée à l'un des contrôles intermédiaires, la note de ce dernier est remplacée par celle du contrôle final. La note de l'examen de l'EL est basée principalement sur le niveau de l'implication fournie durant les séances et en seconde mesure sur le compte-rendu obligatoire.

## **Support de cours, bibliographie**

- Polycopié mis à disposition des élèves
- G. Battai, "Théorie de l'information - Application aux techniques de communication", Ed. Masson, 1997.
- W. Peterson, E. Weldon, "Error correcting codes", Ed. MIT Press, 1972.
- S. Lin, D. Costello, "Error control coding: Fundamentals and Applications", Ed. Prentice Hall, 1983.
- G. Cohen, J. L. Dornstetter, P. Godlewski, "Codes correcteurs d'erreurs", Ed. Masson, 1992.
- J. Proakis, "Digital communications", 4e édition, Ed. McGraw-Hill, 2001.
- J. C. Bie, D. Duponteil, J. C. Imbeaux, "Eléments de communications numériques", Ed. Dunod, 1986.
- R.Boite, M. Kunt, "Traitement de la parole", Ed. Polytechniques et Universitaires Romandes, 1987.
- J. Deller, J. Hansen, J. Proakis, "Discrete time processing of speech signals", Ed. IEEE Press, 1999.
- T. M. Cover, J. A. Thomas, "Elements of Information Theory", Wiley New York, 1991.

## **Moyens**

- Equipe enseignante assurant les cours magistraux : Haïfa Farès, Yves Louët, Georgios Ropokis.
- Groupes de 20 élèves pour les TDs
- Outil logiciel : MatLab pour les EL et travail personnel
- Salles de TP

## **Acquis d'apprentissage visés dans le cours**

L'objectif de cet électif est de maîtriser les fondements de la théorie de l'information, ses principes de base et ses applications au monde des télécommunications. A l'issue de ce cours, les étudiants seront en mesure de comprendre les enjeux actuels liés à la transmission de l'information, les compromis à faire (entre efficacité spectrale, énergétique et erreurs de transmission).

En particulier, ils seront capables de :

- appréhender une chaîne de communication numérique
- maîtriser les différents blocs de la chaîne
- maîtriser les métriques d'évaluation de performance d'une transmission numérique
- optimiser le dimensionnement d'une chaîne de transmission sous contraintes (compromis de performances)
- générer, analyser, traiter des signaux numériques avec MatLab

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

En termes de compétences :

- Les trois premiers acquis permettent de développer la compétence C1.2 "**Utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes pour traiter le problème**"
- Les acquis 4 et 5 permettent de répondre à la compétence C1.3 "**Résoudre le problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation**"
- L'acquis 5 en particulier contribue à la compétence C1.4 "**Spécifier, concevoir, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe**"
- Les TPs et le travail personnel aident à développer les compétences C8.1 "**Travailler en équipe/en collaborations**" et C3.1 "**Etre proactif, prendre des initiatives, s'impliquer**"
- Le travail personnel sous forme d'exposé répondra à la compétence C7.1 "**Convaincre sur le fond. Être clair sur les objectifs et les résultats attendus. Être rigoureux sur les hypothèses et la démarche. Structurer ses idées et son argumentation. Mettre en évidence la valeur créée**"

# 2EL6110 – Réseaux informatiques avancés

Responsables : **Jean-Francois Lalande**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Cet électif fait partie du parcours InfoSec, mais est pour autant accessible à tout étudiant de 2<sup>ème</sup> année validant les prérequis. Il a pour objectif de présenter des concepts avancés d'architecture des réseaux informatiques et s'appuie sur les concepts fondamentaux présentés dans l'électif « Réseau et sécurité » de 1<sup>ère</sup> année.

Les paradigmes classiques des réseaux informatiques liés à la création d'Internet (modèles en couches, protocoles TCP/IP, modèle client/serveur, etc.) se sont largement imposés. Toutefois, les évolutions des besoins des utilisateurs en termes de disponibilité et de volumétrie des données ainsi que l'émergence de nouvelles applications et de nouveaux services (portage des applications « lourdes » sous formes d'applications Web, informatique en nuage, cryptomonnaie, etc.) conduisent à des évolutions importantes des architectures traditionnelles des systèmes d'information. Ces évolutions architecturales, ainsi que l'essor des technologies associées, s'expliquent également par deux tendances actuelles :

- l'externalisation des infrastructures réseau et d'hébergement, voire des applications elles mêmes ;
- l'optimisation de l'utilisation de ces infrastructures.

Cela implique en particulier :

- des capacités d'adaptation dynamique à la demande, impliquant notamment de pouvoir distribuer le stockage et les traitements mais également de reconfigurer rapidement les infrastructures ;
- des capacités de partage des ressources (processeur, stockage et réseau), reposant généralement sur la virtualisation des infrastructures ;
- le recours à des modèles décentralisés, de type pair-à-pair ;
- des modèles de répartition des ressources aptes à passer à une grande échelle, etc.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

1CC1000 – Systèmes d'Information et Programmation

1EL6000 – Réseaux et Sécurité

## Plan détaillé du cours (contenu)

Cours 1 à 5 (7,5h) :

- Informatique en nuage
- Réseaux de Data Center
- Software-Defined Networking (SDN)

Cours 6 et 7 (3h) :

- IPv6

Travaux pratiques (3h) :

- IPv6

Cours 8 et 9 (3h) :

- Architectures distribuées (cluster)
- Systèmes de fichiers distribués



- Gestion de cluster, orchestration
  - Équilibrage de charge
- Cours 10 et 11 (3h) :
- Communication par files de messages

Etude de laboratoire (15,5h) : configuration d'un réseau logiciel et mise en place d'un service distribué avec OpenStack

## Déroulement, organisation du cours

Une large place est laissée aux aspects pratiques dans cet enseignement. Les cours magistraux sont notamment ponctués de démonstrations et de manipulations. Une étude de laboratoire de longue durée, incluant une part de travail personnel hors présentiel, permet de progressivement mettre en oeuvre les technologies présentées en cours.

## Organisation de l'évaluation

Examen écrit : coefficient 0,5. Restitution de l'étude de laboratoire : coefficient 0,5. L'étude de laboratoire est toujours prise en compte dans la note finale (N1), même si elle est inférieure à la note de l'examen écrit.

## Support de cours, bibliographie

- Polycopiés des transparents
- Paul Goransson, Chuck Black, Timothy Culver, « Software Defined Networks A Comprehensive Approach », 2nd Edition, Morgan Kaufmann
- William B. Norton, The 2014 Internet Peering Playbook: Connecting to the Core of the Internet

## Moyens

Logiciels utilisés sur le PC des étudiants (tous gratuits et multi-plateforme) : VirtualBox, client OpenVPN, connexion SSH graphique ;  
Logiciels introduits ou utilisés (tous gratuits et sous licence libre) : OpenLDAP, OpenStack, Open vSwitch, HAProxy, ONOS/OpenDaylight, RabbitMQ...  
Moyens matériels : grappe OpenStack de cinq serveurs accessible via VPN.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À l'issue de ce cours, les étudiants seront capables de :

- concevoir une architecture de système d'information s'appuyant sur une plate-forme d'informatique en nuage de type Infrastructure as a Service ;
- déployer un réseau IPv6 en utilisant les mécanismes spécifiques d'attribution d'adresses ;
- déployer et configurer un agent de message (message broker) pour des applications distribuées ;
- d'expliquer les principes d'élasticité et de gestion des ressources dans l'informatique en nuage ;
- d'expliquer les principes et les avantages/inconvénients de la virtualisation des ressources ;
- d'expliquer le principe des réseaux pair-à-pair pour échanger des données ou gérer une Blockchain.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.1 - Analyser : étudier un système dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un système dans le cadre d'une approche transdisciplinaire avec ses dimensions scientifiques, économiques, humaines, etc.

C2.1 - Approfondir un domaine des sciences de l'ingénieur ou une discipline scientifique

C7.1 - Savoir convaincre sur le fond : Structurer ses idées et son argumentation, être synthétique (hypothèses, objectifs, résultats attendus, démarche et valeur créée)

# 2EL6120 – Accès sans fil intelligent et expérimentation

Responsables : **Haïfa Jridi**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

L'objectif du cours est de présenter les connaissances essentielles pour comprendre les caractéristiques des systèmes et des normes de communications sans fil. Dans ce cadre, le cours se concentre sur les aspects suivants des systèmes de communication:

1. techniques de transmission utilisées dans les normes actuelles et futures, y compris 4G et 5G
2. techniques d'accès multiple utilisées dans les normes actuelles et futures (à partir de la 2G, passant à la 5G et au-delà de la 5G),
3. les bases et les caractéristiques du matériel de télécommunications, y compris l'architecture des équipements informatiques utilisés en communication et le comportement des chaînes RF,
4. architectures de processeurs mobiles
5. le processus d'expérimentation et de prototypage des systèmes de communication sans fil.

Le cours couvre tous les éléments techniques essentiels pour les étudiants qui souhaitent comprendre les principes fondamentaux des communications sans fil et ses applications, et peut servir comme première étape pour ceux qui souhaitent poursuivre des études en ingénierie des communications sans fil. De plus, comme le cours expose les étudiants à plusieurs aspects de l'ingénierie des communications sans fil, il constitue une excellente opportunité pour ceux d'entre eux intéressés à poursuivre une carrière en gestion de projets / équipes dans le domaine de l'ingénierie des communications. Le cours aidera les étudiants à se familiariser avec les aspects les plus importants de l'ingénierie sans fil, y compris les normes de communication sans fil et leurs caractéristiques, le matériel sans fil et le prototypage. La présentation du matériel suivra une approche orientée vers les normes de télécommunications afin de satisfaire aussi bien les étudiants intéressés par les principes des communications sans fil que les étudiants principalement intéressés par une approche plus appliquée aux communications.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

- Notions de probabilités
- Traitement numérique du signal (transformée de Fourier, analyse spectrale)
- Compétences de base en programmation

Ces prérequis correspondent aux cours de traitement du signal (1CC4000), de modélisation (1CC3000) et de programmation (1CC1000).

## Plan détaillé du cours (contenu)

Partie 1: Fondements de la transmission sans fil

- Modélisation physique du canal sans fil
- Détection dans un canal d'évanouissement
- Les modulations numérique mono-porteuses
- Les modulations numériques multi-porteuses
- Techniques de diversité

Partie 2: Schémas d'accès multiples et normes de télécommunications (Schémas d'accès multiples pour les réseaux 2G, 3G, 4G, 5G et au-delà de 5G):

- TDMA, FDMA, CDMA, SDMA
- FDD, TDD, half duplex et full duplex
- Gestion de l'interférence
- Applications dans les normes de réseau GSM / UMTS / 4G / 5G
- Autres normes d'accès sans fil: WLAN, WPAN et LPWAN
- Normes IoT et objets connectés

Partie 3: Architectures informatiques pour les communications sans fil

- Architecture de communication sans fil adaptable: la radio logicielle (Software Defined Radio - SDR)
- Frontaux analogiques / numériques et convertisseurs de données ADC / DAC
- Architectures informatiques embarquées: des processeurs ARM mobiles aux DSP, FPGA et GPU
- Plates-formes informatiques intégrées pour les communications sans fil

Partie 4: Implémentation matérielle des systèmes sans fil utilisant la radio GNU et les plates-formes USRP

- Tutoriel sur GNU Radio
- Mise en place d'un simple récepteur FM
- Implémentation d'une application de transfert de fichiers sur GNU Radio et USRP avec modulation et démodulation basées sur QPSK

## Déroulement, organisation du cours

Déroulement, organisation du cours (séquençage CM, TD, EL/TP) en heures:

Principes fondamentaux des communications sans fil: 4,5 h

Schémas d'accès multiple et conférences sur les normes: 4,5h

Travaux pratiques sur les fondamentaux des communications sans fil et les schémas d'accès multiple: 4,5h

Architectures informatiques pour les communications sans fil CM: 6h

Tutoriel GNU Radio CM: 1.5h

Expérimentation / Travaux pratiques avec GNU Radio et USRP: 9h

Examen: 30min (QCM)

Total (HPE): 30,5h

## Organisation de l'évaluation

Examen final (écrit) et évaluation des travaux pratiques

## Support de cours, bibliographie

- Polycopié mis à la disposition des élèves.
- Tse, D., & Viswanath, P., "Fundamentals of Wireless Communication". Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- Holma H., & Toskala A., "LTE for UMTS: OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access", Wiley Publishing, 2009.
- Vaezi M., Ding Z., & Poor H. V., "Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond", Springer 2018.
- Yannick Bouguen, Eric Hardouin, François-Xavier Wolff, "LTE et les réseaux 4G", Eyrolles, 2012
- A. Elnashar, M. A. El-saidny, M. Sherif, K. Abdulla, "Design, deployment and performance of 4G networks", Wiley-Blackwell 2014,
- Fattah Hossam, "5G LTE narrowband Internet of Things (NB-IoT)", CRC Press in 2019.
- A. Pacaud, "Électronique radiofréquence", Ellipses, 2000, B. Razavi

- "RF microelectronics, communication electronics", Prentice Hall, 1997
- P.L.D. Abrie, "Design of RF and microwave amplifiers and oscillators", Artech House, 1999,
- S.C. Cripps, "RF power amplifiers for wireless communications", Artech House, 2006,
- Gernot Hueber, Robert Bogdan Staszewski "Multi-Mode/Multi-Band RF Transceivers for Wireless Communications: Advanced Techniques, Architectures, and Trends", John Wiley & Sons, Inc, 2010
- Peter B. Kenington, "RF and Baseband Techniques for Software Defined Radio", Artech House, 2005.
- Collins, T.F.; Getz, R.; Pu, D.; Wyglinski, A.M. Software-Defined Radio for Engineers; Artech House: Norwood, MA, USA, 2018.

## Moyens

Équipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : Haïfa Farès, Amor Nafkha

- Taille des TD (par défaut 35 élèves) : 20
- Outils logiciels et nombre de licence nécessaire : Matlab et GNU radio pour les EL et travail personnel
- Salles de TP (département et capacité d'accueil) :

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À la fin du cours, les étudiants devraient être capables de:

- appréhender les bases de la transmission numérique et des schémas d'accès multiple utilisés dans les normes existantes
- appréhender le fonctionnement d'une chaîne RF complète de communications sans fil (domaines radio, analogique et numérique)
- se familiariser avec plusieurs plates-formes de traitement numérique différentes disponibles pour la construction de systèmes de communication sans fil et leur impact sur les exigences du système (coût, performance, durée de vie, efficacité énergétique, etc.)
- maîtriser la terminologie, la structure et les caractéristiques des normes modernes de communications sans fil et mobiles
- se familiariser avec la construction d'un véritable système de communication sans fil

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Le cours aborde les compétences suivantes:

C1.2 "Développer et utiliser des modèles appropriés, choisir la bonne échelle de modélisation et simplifier les hypothèses lors de la résolution d'un problème"  
Travaux pratique adresse la compétence C1.4 "Concevoir, détailler et corroborer tout ou partie d'un système complexe" et la compétence C3.1-Être proactif et impliqué" et "C8.1-Travailler en équipe"

# 2EL6130 – Systèmes embarqués et internet des objets

Responsables : **Ruben Salvador Perea**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Cet électif fait partie du parcours InfoSec, mais est pour autant accessible à tout étudiant de deuxième année le souhaitant qui maîtrise la programmation en langage C et en Java. Il a pour objectif de découvrir les spécificités du développement d'applications sur des systèmes embarqués et des objets connectés de différentes natures.

Les contraintes pour développer ces objets connectés sont variés : limite énergétique, capacités de calcul, connectivité réseau, déluge de données, temps réel, etc. Ainsi, l'électif s'attachera dans un premier temps à dégager les grands principes qui sont communs à ces objets connectés, par exemple, le déport des données dans le cloud, l'économie des traitements logiciels, la gestion de la connectivité réseau par intermittence.

Dans un second temps, l'électif illustrera ces principes en choisissant certains systèmes embarqués pour lesquels on approfondira le développement logiciel. En particulier, nous détaillerons l'écosystème informatique qui est propre à chacun de ces systèmes embarqués. Cet écosystème informatique a pour objectif de répondre aux contraintes particulières et de faciliter le développement des applications. D'un point de vue des langages, il peut s'agir de l'utilisation d'un langage très proche du système d'exploitation comme le C.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

- Savoir programmer en langage C
- Avoir des connaissances de base en ligne de commande Linux

## Plan détaillé du cours (contenu)

CM 1-2 Introduction aux systèmes embarqués et à l'IoT

CM 3-4 Systèmes temps-réels

CM 5-6 RIOT et réseaux IoT

CM 7-8 Prise en main de RIOT

CM 9-10 Prise en main de FreeRTOS

TP 11-14 RIOT

TP 15-18 FreeRTOS

## Déroulement, organisation du cours

- 15h de cours
- 12h de TP

## Organisation de l'évaluation

- Contrôle continu : Evaluation des TP (0.5)
- Contrôle continu : Exposés d'approfondissement (0.5)

## Moyens

- Emulateur ou périphériques réels
- Plateforme lot labs

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Connaitre les spécificités et contraintes des systèmes embarqués et objets connectés  
Programmer des logiciels sur de tels systèmes

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

1. C6.3 Spécifier, concevoir, réaliser et valider un logiciel

# 2EL6140 – Microréseaux : composants et pilotage

Responsables : **Pierre Haessig**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

## Présentation, objectifs généraux du cours

L'approvisionnement en électricité des sites isolés tels que les îles présente des spécificités dues à la petite taille de leur réseau. Cela entraîne un fort risque d'instabilité et donc le pilotage d'un microréseau, ce qui inclut le contrôle de tous ses composants électriques, est crucial pour son bon fonctionnement.

Cet électif propose d'étudier cet enjeu du point de vue de deux matières :

- **Électrotechnique** : présentation des composants électriques essentiels d'un microréseau alternatif
- **Automatique** : application des techniques de régulation à ces composants et ouverture vers la régulation des systèmes de grande taille (c'est-à-dire comment aller au-delà de l'automatique « classique » qui ne traite que 2–3 variables).

Remarque : le programme d'électrotechnique de cet électif est proche de l'électif « Conversion d'Énergie » proposé à Paris-Saclay. La partie automatique est l'originalité de cet électif.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Notions d'énergie électrique à connaître (par exemple en ayant suivi l'électif 1A « Énergie Électrique (ENE) ») :

- Puissances en régime alternatif : P (active), Q (réactive) et S (apparente)
- Système électrique **triphase** : tensions simples et composées

Notions d'Automatique à connaître (par exemple en ayant suivi le cours commun de Commande des systèmes dynamiques de ST5)

- Modélisation d'un système par une fonction de transfert
- Régulation d'un système linéaire par un contrôleur PID

Avoir suivi la ST7 « Smart grids et défi énergétique : gestion de l'énergie en site isolé » serait un plus, mais n'est pas un prérequis, car les problématiques abordées sont très différentes :

- cours « Énergies renouvelables et microgrids » de ST7 : modélisation de haut niveau (flux énergétiques), avec optimisation économique.
- cet électif : modélisation tension/courants et analyse plus détaillée des composants électriques et de leur régulation bas niveau.

## Plan détaillé du cours (contenu)

Cet électif relève à la fois de l'*électrotechnique* et de l'*automatique*, avec en supplément un apport méthodologique *transversal et pratique* sur l'analyse et la régulation des systèmes grâce à l'usage intensif d'un logiciel de modélisation et de simulation.

Pour la partie électrotechnique, il s'agit de comprendre le fonctionnement et la modélisation des *composants de conversion d'énergie* d'un microréseau :

- convertisseurs à électronique de puissance (hacheurs et onduleurs)
- machines électriques alternatives (synchrones et asynchrones)

Ces connaissances sont exposées sous forme de cours et de séances d'exercices (TD).

Pour la partie automatique, il s'agit de comprendre les stratégies de *commande et de régulation* des composants du microréseau, en particulier l'électronique de puissance. Par ailleurs, cette partie comporte une introduction à la régulation des systèmes de grande taille (le microréseau avec ses nombreux composants).

Cette partie automatique se déroule essentiellement sous forme de sessions pratiques sur ordinateur. Ces séances sont l'occasion de *pratiquer intensivement* un outil de modélisation et de simulation temporelle (Simulink/Simscape). Un des enjeux abordés est le choix d'un niveau de détail de modélisation adapté à l'objectif visé (compromis entre simplicité, rapidité, fidélité...). Ce savoir-faire transversal a vocation à être transposable à d'autres domaines d'ingénierie.

Remarque : l'optimisation des flux de puissance (power dispatch) d'un réseau pour assurer un fonctionnement économiquement optimal n'est pas abordée. En effet, cette problématique relève du projet d'optimisation de la ST7 « Smart grids et défi énergétique : gestion de l'énergie en site isolé ».

## Déroulement, organisation du cours

Les séances de cours visent à acquérir les connaissances de base en électrotechnique. Ces séances incluent des périodes d'exercices sur papier (TD).

Les séances pratiques se font sur ordinateur (Matlab/Simulink) Le travail sur ordinateur peut se faire en binômes. Le temps alloué à ces séances est important pour pouvoir pleinement s'approprier l'outil de simulation.

Cours : 9 heures, TD : 9 heures, TP : 15 heures, Évaluation (examen écrit) : 2 heures.

## Organisation de l'évaluation

L'évaluation de la partie cours se fait par un examen écrit final.

L'évaluation de la partie pratique se fait par validation de l'avancement au fur et à mesure ainsi que par un rapport final.

La pondération entre la partie cours et la partie pratique est 50%, 50%.

## Support de cours, bibliographie

Page du cours sur Edunao: <https://centralesupelec.edunao.com/course/view.php?id=1494>

## Moyens

Équipe pédagogique :

- Pierre Haessig : Responsable de cours
- Alexandros Charalampidis : sessions pratiques sur ordinateur
- Loïc Matel : cours sur les machines électriques et l'électronique de puissance

Logiciels utilisés : Matlab, avec Simulink et la toolbox [Simscape Electrical](#). Les licences académiques de ces produits sont gratuites pour tous les étudiants de CentraleSupélec.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À l'issue de la partie cours, les élèves seront capables de :

- *Décrire le fonctionnement et réaliser des analyses théoriques simples* des machines électriques et des convertisseurs à électronique de puissance abordés dans le cours

À l'issue de la partie pratique, les élèves seront capables de :

- *Implémenter* des modèles de convertisseurs électroniques dans un simulateur (Simulink) avec une complexité adaptée aux phénomènes à étudier.
- *Décrire* la structure de contrôle d'un convertisseur électronique et *régler* certaines boucles de régulation de cette structure
- *Évaluer/analyser* le bon fonctionnement de la régulation par des simulations judicieusement choisies



## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Les acquis d'apprentissage permettent de valider les compétences ingénieur CentraleSupélec suivantes :

- C1.2 Utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes pour traiter le problème
- C1.3 Résoudre le problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation
- C1.4 Spécifier, concevoir, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe

# 2EL6150 – Commande prédictive

Responsables : **Romain Bourdais**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

## Présentation, objectifs généraux du cours

La commande prédictive, de l'anglais **Model Predictive Control (MPC)**, est la technique de commande avancée la plus utilisée dans l'industrie. Son utilisation industrielle est en plein essor, car elle permet d'optimiser le fonctionnement d'un process industriel, son efficacité énergétique tout en intégrant des contraintes de fonctionnement. Pour autant, elle fait encore l'objet d'un grand nombre de publications scientifiques, même si les dernières préoccupations de la communauté scientifique restent très théoriques.

Cet électif présente les grands principes de la commande prédictive dans un formalisme mathématique clair, lisible et intuitif et qui n'est pas réservé aux ingénieurs automaticiens - *La commande prédictive sera traitée en profondeur et sous tous les aspects de l'automatique dans la mention de 3ème année « Control Engeneering »* - Après une introduction aux concepts de base du MPC, l'électif est construit autour de nombreux cas d'étude, où ils seront appliqués tant en simulation qu'en pratique pour différents processus industriels. Il est donc question dans cet électif d'apporter des outils de décisions et de commande qui exploitent un modèle du système afin d'en améliorer son efficacité. Les attentes en termes d'efficacité sont traduites en un multicritère mathématique qu'il faut chercher à minimiser. Le modèle peut être issu d'une représentation mathématique du système considéré, auquel cas des méthodes classiques (déterministe, programmation linéaire par exemple, ou résolution explicite) d'optimisation peuvent être utilisées. Le process d'optimisation peut aussi exploiter un simulateur du système étudié, celui-ci doit alors utiliser des techniques heuristiques.

Les applications seront focalisées autour du pilotage sous contrainte énergétique (puissance limitée, demande d'effacement, ...) et sur l'exploitation de telles techniques pour le dimensionnement de systèmes de production ou de stockage de l'énergie.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Cours de commande des systèmes dynamiques  
Cours d'Optimisation

## Plan détaillé du cours (contenu)

- **Introduction à la commande prédictive (15h de Cours dirigés, 9h de TP)**
  - Concepts de base
    - a. Modèle de prédiction
    - b. Principe d'horizon glissant
    - c. Cahier des charges et formalisation d'objectifs en optimisation multicritère
    - d. Résolution d'un problème d'optimisation en boucle ouverte et implémentation en boucle fermée
    - e. Paramètres de réglage
    - f. Résolution explicites et implicites

- Commande prédictive à critère économique
- Intégration des contraintes de fonctionnement et leur relaxation
- Intégration d'incertitudes et optimisation par co-simulation et algorithmes métaheuristiques

**Challenge : Comment améliorer l'efficacité énergétique d'un bâtiment : combinaison rénovation et pilotage actif (6h réservées à l'emploi du temps, +12 heures de travail en autonomie). Ce cas d'étude intègre une dimension économique doublée d'une prise de risque quant à la gestion des incertitudes.**

- Analyses de données et analyse bibliographique
- Intégration de l'incertitude (phénomènes météorologiques, consommations aléatoires)
- Recherche de compromis : investissement dans l'infrastructure et capacité de pilotage actif performant
- Calcul de retour sur investissement
- Evaluation des confort (satisfaction des demande)
- Analyse de risques
- Challenge inter équipe – Exposé et évaluation par les pairs

## Déroulement, organisation du cours

Ce module est construit sur très peu de cours théoriques et mise en apprentissage par la pratique, combinant à la fois des expérimentations sur maquette (soufflerie industrielle) et des études technico-économiques où les contenus théoriques servent de support à la prise de décision.

## Organisation de l'évaluation

- Contrôle des connaissances : 30%
- Rapport de TP : 30%
- Présentation du challenge : 40%

## Support de cours, bibliographie

- Model-based Predictive Control – A practical approach, J.A. Rossiter, CRC Press, 2003
- Model Predictive Control: Theory and Design, J. Rawlings and D. Mayne, Nob Hill Pub, 2009
- Model Predictive Control, E. Camacho and A. Bordons, Springer-Verlag London, 2007

## Moyens

- Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : Romain Bourdais, Pierre Haessig
- Taille des TD (par défaut 35 élèves) : 25 élèves
- Outils logiciels et nombre de licence nécessaire : Matlab/Simulink/Optimization Toolbox
- Salles de TP (département et capacité d'accueil) : 25 élèves, Maquette Soufflerie (disponible sur le campus de Rennes)

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de :

- Spécifier les enjeux technico-économiques du problème de contrôle-commande sous un formalisme de commande prédictive :
  - Faire le choix d'un critère d'optimisation
  - Intégrer les contraintes de fonctionnement et d'usage
- Choisir et utiliser un outil d'optimisation pour la résolution du problème de commande prédictive considéré.
- Choisir les paramètres de réglage adapté à la situation et d'argumenter quant à ces choix, par le biais de simulation.
- Maîtriser la communication scientifique et technique (lors des compte-rendu ou lors des exposés).

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- "Spécifier les enjeux du problème de contrôle-commande sous un formalisme de commande prédictive " s'inscrit dans **C1.1 "Etudier un problème dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un problème dans ses dimensions scientifiques, économiques et humaines"**.
- "Choisir et utiliser un outil d'optimisation adapté pour la résolution du problème de commande prédictive considéré" s'inscrit dans **C1.2 "Utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes pour traiter le problème"**.
- "Choisir et utiliser un outil d'optimisation pour la résolution du problème de commande prédictive considéré" s'inscrit dans **C2.3 "Identifier et acquérir de façon autonome les nouvelles connaissances et compétences nécessaires"**

# 2EL6170 – Management de la production et des flux

Responsables : **Vincent Hovelaque**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Non**

## Présentation, objectifs généraux du cours

Le but de ce cours est d'abord d'initier les étudiants aux principaux concepts de la gestion de production et des flux, afin de

- mieux comprendre les enjeux actuels et le rôle de la gestion de production dans les organisations
- parler le même langage que les dirigeants d'entreprise

Son second objectif est de familiariser les étudiants aux méthodes et outils applicables en gestion de production et des flux, principalement :

- les méthodes de pilotage des flux et des stocks
- les méthodes d'amélioration de la performance industrielle (lean manufacturing)

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

- Produits et ressources, flux et capacité dans l'entreprise
  - Gérer des produits et des ressources dans l'entreprise
    - Gérer des produits : les décisions de flux
    - Gérer des ressources : les décisions de capacité
    - Assurer la synchronisation des flux et des capacités dans le temps
  - Les données associées aux produits et aux ressources
    - Les données techniques
    - Les données d'activités
- Le pilotage des flux et des stock
  - La gestion des stocks
    - Les modèles de gestion des stocks pour une demande indépendante
    - Choix d'un modèle
  - La planification des flux
    - La planification globale : élaboration du PIC
    - La planification détaillée : élaboration du PDP
  - La programmation des flux
    - Logique MRPO de calcul des besoins
    - Logique MRP1 : adéquation charge-capacité
  - L'ordonnancement des flux
    - L'ordonnancement centralisé

- L'ordonnancement décentralisé (Kanban...)
- Les approches Demand Driven – une synthèse crédible ?
- Amélioration de la performance industrielle (logique lean)
  - Mesurer la performance industrielle
    - Les critères de calculs
    - Les TRS et les autres indicateurs
  - Le Juste-A-Temps (logique lean)
    - Actions au niveau des produits
    - Actions au niveau des ressources
    - Actions au niveau des relations avec les partenaires – lien avec le Supply Chain Management et les méthodes partenariales (GPA, GMA, CPFR...) + les nouveaux outils (Blockchain)

## Déroulement, organisation du cours

Le cours est composé d'alternance entre des cours magistraux et des travaux dirigés

## Organisation de l'évaluation

Ce module sera évalué par un examen écrit.

## Moyens

Le cours (mélange de cours magistraux et de travaux dirigés) est assuré par une équipe de professeurs de l'Institut de Gestion de Rennes.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de ce cours, les élèves seront capables de :

1. Établir les liens entre la fonction Gestion de production et au sens large logistique avec les différents services de l'entreprise.
2. Identifier les principales problématiques de la logistique (notamment industrielle) dans les organisations
3. Utiliser les principales méthodes de gestion des stocks et de pilotage des flux et analyser leurs conséquences pour l'entreprise.
4. Identifier les méthodes de gestion des stocks et de pilotage des flux les plus adaptés à un environnement donné
5. Utiliser quelques indicateurs de productivité en logistique industrielle (TRS...)

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.1 Étudier un problème dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un problème dans ses dimensions scientifiques, économiques et humaines

C2.5 Maîtriser les compétences d'un des métiers de base de l'ingénieur (au niveau junior)

C3.7 Choisir les solutions et agir de façon pragmatique, en vue d'obtenir des résultats tangibles

# 2EL6180 – Marketing digital

Responsables : **Maud Daniel Chever**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Non**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

L'objectif de ce cours est de présenter la démarche marketing et ses enjeux, et de montrer l'impact de la transformation digitale sur l'entreprise et plus précisément sur la fonction marketing.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

**Introduction** : Qu'est-ce que le marketing ?

Le marketing dans un contexte de transformation digitale et de globalisation

### I. Les fondamentaux du marketing

1. Etablir une stratégie marketing
2. Mettre en œuvre la stratégie marketing : le mix marketing

### II. L'impact du digital sur le marketing

1. De la digitalisation à la transformation digitale : définitions et représentations de la transformation digitale des entreprises
2. Digitalisation et optimisation de la démarche marketing
  - a) Digitalisation et étude marketing
  - b) Digitalisation et mix marketing

- La digitalisation de l'offre
- La communication omnicanale
- La distribution omnicanale
- La co-création avec les clients

### Conclusion

## Déroulement, organisation du cours

Les différents cours sont assurés par des maîtres de conférences de l'IGR IAE Rennes - université de Rennes 1. Les concepts vus en cours seront illustrés et mis en perspective lors d'une rencontre avec un praticien du marketing digital (3h d'intervention de Marianne Auffret, ancienne responsable marketing du stade rennais sur la communication digitale)

## Organisation de l'évaluation

Un dossier écrit individuel sera demandé à l'issue du module.

## Support de cours, bibliographie

Ferrandi F., Lichtlé M.C. (2014), Marketing, Dunod, 352p.

Aurélié Dudezert A. (2018), La transformation digitale des entreprises. Paris, La Découverte, « Repères ». URL : <https://www.cairn.info/la-transformation-digitale-des-entreprises--9782348036019-page-57.htm>

Hagberg J., Sundstrom M., Egels-Zandén N., (2016) "The digitalization of retailing: an exploratory framework", International Journal of Retail & Distribution Management, 44, 7, 694-712

## Moyens

L'équipe pédagogique est constituée de Maud Daniel, Jacques Diouf et Marianne Auffret, enseignants chercheurs à l'université de Rennes 1.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce cours, les élèves seront capables de :

- Etablir le diagnostic stratégique/marketing d'une marque/d'une enseigne
- Savoir construire et mettre en œuvre un plan d'action marketing
- Savoir situer la stratégie d'une entreprise dans un contexte de transformation digitale
- Optimiser l'utilisation des nouvelles technologies dans la mise œuvre de la stratégie marketing
  - savoir monter une stratégie de communication omnicanale
  - penser l'omnicanalité de la distribution
  - impliquer le client via des processus de co-création

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C4.1 : Penser client. Identifier/analyser les besoins, les enjeux et les contraintes d'autres parties prenantes, notamment sociétales et socio-économiques.

C7.4 : Maitriser le langage parlé, écrit et corporel. Maitriser les techniques de base de communication



# 2EL6190 – Méthodes bayésiennes pour l'apprentissage automatique

Responsables : **Simon Leglaive**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Les techniques de modélisation, d'inférence et de prédiction bayésienne sont devenues courantes en apprentissage automatique (ou machine learning en anglais). Les modèles bayésiens sont utilisés en analyse de données pour décrire par l'intermédiaire de facteurs latents le processus de génération de données complexes (images médicales, audio, documents, etc.) La découverte de ces variables latentes ou cachées à partir des observations repose sur la notion de distribution de probabilité a posteriori, dont le calcul correspond à l'étape d'inférence bayésienne.

Prenons l'exemple d'une technique appelée « allocation de dirichlet latente » (de l'anglais Latent Dirichlet Allocation) ou LDA. Il s'agit d'une méthode bayésienne, permettant notamment de découvrir des thématiques cachées dans un ensemble de documents observés. Si l'on applique cette technique pour analyser un ensemble de 1102 résumés d'articles scientifiques portant sur des approches bayésiennes en machine learning, publiés dans *Journal of Machine Learning Research (JMLR)*, il en ressort les thématiques suivantes :

*Topic #1: model models data process latent bayesian dirichlet hierarchical nonparametric inference*

*Topic #2: features learn problem different knowledge learning image object example examples*

*Topic #3: method neural bayesian using linear state based kernel approach model*

*Topic #4: belief propagation nodes local tree posterior node nbsp given algorithm*

*Topic #5: learning data bayesian model training classification performance selection prediction sets*

*Topic #6: inference monte carlo markov sampling variational time algorithm mcmc approximate*

*Topic #7: function optimization algorithm optimal learning problem gradient methods bounds state*

*Topic #8: learning networks variables structure network bayesian em paper distribution algorithm*

*Topic #9: bayesian gaussian prior regression non estimation likelihood sparse parameters matrix*

*Topic #10: model information bayesian human visual task probability sensory prior concept*

(source : Rémi Bardenet, [https://github.com/rbardenet/bml-](https://github.com/rbardenet/bml-course/blob/master/notebooks/00_topic_modelling_for_Bayesian_ML_papers.ipynb)

[course/blob/master/notebooks/00\\_topic\\_modelling\\_for\\_Bayesian\\_ML\\_papers.ipynb](https://github.com/rbardenet/bml-course/blob/master/notebooks/00_topic_modelling_for_Bayesian_ML_papers.ipynb))

Des thématiques reconnaissables se détachent, comme le *Topic #6* sur les méthodes d'inférence bayésienne approchées ou le *Topic #8* sur l'apprentissage dans les réseaux bayésiens.

L'approche bayésienne en machine learning a pour avantage d'être interprétable, et elle permet d'inclure facilement des connaissances expertes à travers la définition des a priori sur les variables latentes d'intérêt. De plus, elle offre naturellement une information d'incertitude sur la prédiction, ce qui peut être particulièrement important dans certains contextes applicatifs, comme pour la pose de diagnostic médical ou pour la conduite autonome par exemple.

Ce cours est construit comme un « voyage vers les autoencodeurs variationnels (VAE) ». Introduits en 2014, les VAEs se situent à l'intersection des techniques de modélisation et inférence bayésienne et de l'apprentissage profond par réseaux de neurones artificiels. Ce type de modèles est au cœur de nombreuses problématiques actuelles en intelligence artificielle (apprentissage faiblement supervisé, causalité, etc.). Les différentes séances de ce module visent à introduire des notions fondamentales permettant à la fin une compréhension en profondeur des VAEs, tout en restant généralisable à de nombreux autres contextes applicatifs. Après deux séances de cours sur les fondamentaux de la méthodologie bayésienne et de l'apprentissage statistique, nous étudierons les réseaux bayésiens et les techniques d'inférence exacte pour les modèles à variables latentes. L'inférence exacte n'étant pas toujours possible, nous passerons aux techniques approchées, de type variationnelle et Monte Carlo

par chaîne de Markov. Nous terminerons par les modèles génératifs par apprentissage profond de type VAE, exploitant des méthodes récentes d'inférence variationnelle permettant de passer à l'échelle pour des grands jeux de données ou pour des données en grande dimension.

Les notions théoriques seront mises en pratique sur des données concrètes, notamment lors de travaux pratiques en Python. Différents modèles d'apprentissage bayésien supervisé et non-supervisé seront implémentés (modèle de mélange de Gaussiennes, régression linéaire bayésienne et parcimonieuse, autoencodeur variationnel). Ces exemples permettront notamment d'étudier l'influence des a priori sur les paramètres du modèle et sur la prédiction obtenue par rapport à une approche non bayésienne.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

Notions de bases en statistiques et probabilités. Fondamentaux de l'apprentissage automatique : minimisation du risque empirique, maximum de vraisemblance, apprentissage supervisé (modèles linéaires pour la régression et la classification), apprentissage non-supervisé (réduction de dimension, partitionnement). Le cours de 1ère année « Statistiques et apprentissage » fournit l'ensemble de ces prérequis.

## Plan détaillé du cours (contenu)

Cours :

- Fondamentaux en modélisation et inférence bayésienne
- Fondamentaux en apprentissage statistique
- Modèles à variables latentes et inférence exacte
- Inférence variationnelle
- Méthodes de Monte Carlo par chaîne de Markov
- Modèles génératifs par apprentissage profond

Travaux pratiques :

- Modèle de mélange de gaussiennes
- Régression linéaire bayésienne

## Déroulement, organisation du cours

Le module est organisé en 7 séances de cours magistraux de 3 heures, 3 séances de travaux pratiques (TP) de 3 heures sur Python et 1 séance de révisions. La plupart des cours magistraux inclue également une mise en pratique ponctuelle (en Python) des concepts théoriques. Il sera demandé aux élèves d'effectuer un travail préparatoire théorique avant les séances de TP.

## Organisation de l'évaluation

Les travaux préparatoires aux TPs et les notebooks Jupyter complétés seront évalués et comptent pour 30% de la note finale. Les 70 % restants correspondent à un examen final sur table de 2 heures.

## Support de cours, bibliographie

Les supports de cours (présentations, notebooks Jupyter, code Python et activités pédagogiques) seront mis à disposition sur Edunao.

Références :

- Christopher M. Bishop, « *Pattern Recognition and Machine Learning* », Springer, 2006 (disponible en ligne gratuitement)
- Marc Peter Deisenroth, A. Aldo Faisal, and Cheng Soon Ong, « *Mathematics for Machine Learning* » Cambridge University Press, 2020 (disponible en ligne gratuitement)
- Kevin P. Murphy, « *Machine Learning, A Probabilistic Perspective* », MIT Press, 2012 (disponible à la bibliothèque)

## Moyens

Equipe enseignante : Simon Leglaive

Outils logiciels : Anaconda (gestionnaire de packages Python).

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin du cours, les élèves sont censés :

- savoir quand il est utile ou nécessaire d'avoir recours à une approche bayésienne en machine learning ;
- avoir une vue d'ensemble des principales approches de modélisation et d'inférence bayésienne ;
- savoir identifier et dériver un algorithme d'inférence bayésienne à partir de la définition d'un modèle ;
- être capable d'implémenter des méthodes standards d'apprentissage bayésien supervisé ou non-supervisé.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1. Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

C6. Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

# 2EL6200 – Finance d'entreprise avancée

Responsables : **Maxime Guymard**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Le cours permet dans un premier temps d'approfondir la gestion financière d'une entreprise ; il fait suite au cours d'initiation de première année de tronc commun. Dans un deuxième temps, le cours vise à donner une compréhension plus large du monde de la finance, en comprenant le fonctionnement du système financier, son rôle, son histoire et les principaux acteurs intervenant dans ce secteur.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

## Prérequis

Cours de Gestion de l'Entreprise 1A

Cours de Finance d'entreprise 1A

NB : il est déconseillé aux élèves ayant suivi l'électif de 2A Corporate Finance and Law sur le campus de Gif (période décembre-janvier) de suivre également cet électif de Finance d'entreprise avancée. Bien que le périmètre de ce cours de Finance d'entreprise avancée soient plus larges, il y aurait en effet des redites importantes sur la partie du socle du cours.

## Plan détaillé du cours (contenu)

### Pour le socle du cours :

- Rappels et approfondissements des bases de comptabilité : bilan, compte de résultat, le tableau de flux de trésorerie
- Solvabilité de l'Entreprise
- Rentabilité de l'Entreprise (ROCE, ROE)
- Coût Moyen Pondéré des Capitaux (WACC)
- Critères financiers pour sélectionner des investissements (VAN, TRI)

Une fois le socle maîtrisé :

- Méthodes d'estimation de la valeur d'une entreprise
- Gestion financière des Start-Up
- Faillites et restructurations
- Introduction à la Finance de Marché (actions, obligations, produits dérivés)
- Compréhension du rôle de quelques acteurs-clé du monde financier (Banques, Assurances, Agences de Notation)
- Histoire de la finance

## Déroulement, organisation du cours

Cours en classe intégrée (9.5\*3h), Examen Final (2h). La classe intégrée consiste à alterner sur un même créneau cours magistral, exercice simple d'application et étude de cas plus complexe (TD). Quelques sessions (peu nombreuses) pourront être animées à distance via Microsoft Teams.

## Organisation de l'évaluation

L'évaluation sera composée de 3 parties :

- o Travail d'équipe : Courte présentation orale à l'ensemble du groupe sur un sujet sur l'histoire de la Finance ou les acteurs clé du monde financier (20% de la note)
- o Travail d'équipe : Analyse financière d'une entreprise au choix, remise d'une note écrite (20% de la note)
- o Travail individuel : devoir sur table d'évaluation finale de 2 h, composé de questions de cours, d'exercices d'application et d'une étude de cas (60% de la note)

## Support de cours, bibliographie

- Corporate Finance. Pierre Vernimmen, Pascal Quiry, Yann Le Fur.
- La gestion financière de l'entreprise. Christian Pierrat
- Manuel de Finance d'Entreprise. Georges Legros
- Dessine-moi la comptabilité. Isabelle de Kerviller

## Moyens

Equipe enseignante: Maxime GUYMARD

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de ce module, l'élève sera capable de :

- Lire et interpréter les états financiers d'une entreprise
- Mener l'analyse financière d'une entreprise
- Estimer la valorisation d'une entreprise
- Déterminer sur des critères quantifiables financiers si un projet doit être entrepris ou non
- Mobiliser ses connaissances du monde financier (métiers, acteurs, histoire) pour appréhender des problèmes de finance d'entreprise

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C3- Agir, entreprendre, innover en environnement scientifique et technologique

C4- Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients

# 2EL6210 – Géopolitique des ressources et des objets

Responsables : **Raphael Danino-Perraud**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Non**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Dans leurs futures carrières d'ingénieurs, les élèves de CentraleSupélec seront amenés à inscrire leurs pratiques dans des mondes économiques et politiques globalisés. Ceux-ci se caractérisent par une interconnexion des différentes parties du globe et une intensification des flux de capitaux, de biens et de services à l'échelle mondiale, notamment permises par le développement des moyens de transports et des technologies de l'information et de la communication. Si les réseaux de production et d'échanges mondialisés paraissent s'affranchir de toute contrainte matérielle, ils demeurent pourtant fortement dépendants de ressources naturelles et d'objets techniques.

Depuis la fin du XXe siècle, les activités humaines et leurs impacts (urbanisation, changements climatiques et environnementaux) contribuent à accentuer la pression sur les ressources et leur disponibilité. La géopolitique des ressources et des objets influence les rapports de force internationaux et soulève des enjeux de pouvoir à diverses échelles (locale, nationale, régionale, mondiale).

Comprendre les enjeux de notre système politico-économique globalisé nécessite donc d'adopter une lecture critique des techniques et des ressources. Pour cela, nous adoptons une perspective centrée sur un certain nombre de ressources (minières, agricoles et énergétiques, mais aussi les déchets) et d'infrastructures (pipeline, réseau électrique, barrage hydroélectrique). C'est à partir de ces thématiques géopolitiques que les élèves seront amenés à identifier des rapports de force entre acteurs et les enjeux économiques qui y sont associés.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

Plan détaillé du cours (contenu) : 11 séances de 3h, 1 examen de 1h30

Séance 1 – Introduction : une brève épistémologie des ressources – Raphaël Danino-Perraud et Angélique Palle (TD)

Séance 2 – Une infrastructure transnationale de transport énergétique comme objet géopolitique – Noémie Rebière (CM)

Séance 3 – Méthodologie de la cartographie géopolitique – Léa Gobin et Noémie Rebière (TP)

Séance 4 – Impacts géopolitiques induits par la transition énergétique : risques sur les objets et circulations des ressources – Angélique Palle (CM)

Séance 5 – Accompagnement de projets – Raphael Danino-Perraud et David Juilien (TP)

Séance 6 – Exercice appliqué : jeu de rôle – Wahel Rashid et David Juilien (TP)

Séance 7 - Produire et se nourrir : conflictualités sur les ressources – Matthieu Brun (CM)  
Séance 8 - Les barrages hydroélectriques, un objet géopolitique – David Juilien et Wahel Rashid (TD)  
Séance 9 – Les matières premières minérales, des ressources mondialisées : l'exemple du lithium – Audrey Sérandour (CM)  
Séance 10 – Le déchet, un objet géopolitique – Wahel Rashid et Raphaël Danino-Perraud (TD)  
Séance 11 – L'application contrastée du devoir de vigilance pour les ressources et conclusion du cours – Raphaël Danino-Perraud (CM)

Séance 12 – Devoir sur table (1h30)

## Organisation de l'évaluation

Les acquis des étudiants seront évalués selon deux modalités :

1. Un dossier d'analyse cartographique, réalisé en groupe (de 3-4 étudiants) équivalent à 50 % de la note. Tout au long de la séquence, les étudiants devront construire une réflexion géopolitique autour d'une ressource ou d'un objet mondialisé. Ils devront identifier les principaux acteurs et enjeux soulevés par cette ressource ou cet objet, porter un regard critique sur la matérialité des ressources et techniques étudiées (aucune technologie n'est neutre) et construire une réflexion à différentes échelles (mondiale, régionale, nationale, locale).

À partir d'une recherche bibliographique, les étudiants devront réaliser deux cartes analytiques présentant un raisonnement géopolitique autour d'une ressource ou d'un objet mondialisé. Au moins l'une des deux cartes devra être réalisée à l'échelle mondiale. L'encadrement de ce travail débutera lors de la séance sur la méthodologie de la cartographie géopolitique (séance 3), puis nous aurons une séance dédiée à l'accompagnement de projets (séance 5).

La restitution prendra la forme d'un dossier écrit, comprenant les deux cartes, une description de la légende problématisée (en 1 page) et une analyse des cartes (en 5 pages maximum). C'est ce dossier écrit qui sera noté. Des moments de suivis du projet seront organisés au cours du semestre à travers des exposés d'état des lieux (non notés).

2. Un devoir sur table, réalisé en séance 12 (durée : 1h30) équivalent à 50 % de la note.

Il s'agira de faire un commentaire de documents (corpus composé d'extraits d'articles, d'une carte et d'un graphique). Le corpus présentera un cas d'étude, qu'il s'agira d'analyser en mobilisant les concepts étudiés en cours.

## Support de cours, bibliographie

- ABIS Sébastien, BRUN Matthieu (2020), « Géopolitique de l'agriculture européenne », *Études*, 2020/2 (Février), pp. 17-28.
- LACOSTE Yves (2008), « La géographie, la géopolitique et le raisonnement géographique », *Hérodote*, 2008/3, n°130, pp.17-42. [En ligne] URL : <https://www.cairn.info/revue-herodote-2008-3-page-17.htm>
- PITRON Guillaume (2018), *La guerre des métaux rares : la face cachée de la transition énergétique et numérique*, Paris, Éditions Les liens qui libèrent, 296 pages.
- REBIERE Noémie, « Énergie et géopolitique régionale : quel avenir pour le hub turc ? », *Orients Stratégiques* (n°6), L'Harmattan, Paris, 01/2018, pp.1-15.
- ROTILLON Gilles (2010), *Économie des ressources naturelles*. Collection Repères, Paris, Édition La Découverte, Collection Repères, 128 pages.

## Moyens

Equipe enseignante : Raphaël DANINO-PERRAUD (docteur en économie, Ministère des armées), David JUILIEN, Wahel RASHID, Audrey SÉRANDOUR, Matthieu BRUN, Léa GOBIN, Angélique PALLE, Noémie REBIERE

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de :

- d'adopter un regard critique sur les ressources, de discuter les enjeux d'accès, de répartition et de contrôle de ces ressources, de problématiser les enjeux soulevés par leur exploitation et leur circulation ;
- disposer de connaissances factuelles sur une variété de cas d'études, situés sur plusieurs continents (Europe, Asie, Amérique latine) et analysés à diverses échelles (mondiale, régionale, nationale, locale) ;
- maîtriser les bases de la méthode d'analyse géopolitique et ses concepts clés (acteurs, rapports de pouvoirs,

représentations, territoires). Il saura identifier les acteurs pertinents et déceler les rapports de force cristallisés autour d'une ressource ou d'un objet, à diverses échelles ;

- lire une carte et l'appréhender dans une perspective géopolitique et critique. Il aura également acquis les bases de la réalisation cartographique à main levée.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C1.1 : Analyser : étudier un système dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un système dans le cadre d'une approche transdisciplinaire avec ses dimensions scientifiques, économiques, humaines, etc.
- C2.2 : Importer des connaissances d'autres domaines ou disciplines
- C5.3 : Analyser les enjeux globaux et/ou locaux à l'international et adapter des projets ou solutions à ceux-ci



# COURS SEQUENCE THEMATIQUE 5

# ST5 - 51 - PILOTAGE ET CONTROLE DE VOL DANS LE TRANSPORT AERONAUTIQUE ET SPATIAL

**Dominante :** GSI (Grands Systèmes en Interaction) et CVT (Construction, Ville et Transports)

**Langues d'enseignement :** FRANCAIS

**Campus où le cours est proposé :** CAMPUS DE PARIS - SACLAY

---

## Problématique d'ingénieur

Cette séquence aborde la problématique de la conception de lois de pilotage et du contrôle dynamique de vol de véhicules (avion, satellite et lanceur). Elle vise à donner aux élèves les notions de base associées à la conception de systèmes de contrôle d'un objet volant autour de ses 6 degrés de liberté afin de garantir une stabilité de fonctionnement et les performances requises. Les technologies dans les domaines de l'aéronautique et du spatial étant en constante évolution (propulsion, structure, matériaux, etc.), les lois de pilotage doivent s'adapter pour garantir les meilleures performances tout en tenant compte des nouvelles contraintes, notamment réglementaires, environnementales et économiques.

L'enseignement d'intégration permet de mettre en œuvre les compétences et connaissances acquises dans le cas d'un avion, d'un nanosatellite et/ou d'un lanceur. Ces véhicules connaissent un engouement ces dernières années du fait de la réduction du coût associé à la construction et au fonctionnement. Cependant, il soulève de nouvelles problématiques notamment pour le contrôle d'attitude et des performances dus à la miniaturisation des composants et donc de la réduction de leurs capacités d'action et leur efficacité.

L'intervention d'industriels du secteur de l'aéronautique et du spatial dans cette séquence permet de mieux appréhender les enjeux associés à la conception et l'exploitation de systèmes de plus en plus contraints.

## Prérequis conseillés

Deux grandes thématiques sont abordées dans cette séquence : la modélisation d'objets indéformables et la modélisation de systèmes linéaires (fonctions de transfert, représentation d'état, équations différentielles) pour le contrôle. Ces prérequis conseillés font partie du cours commun de Modélisation (ST2) et du cours de SPI de Mécanique et milieux continus. Le reste des compétences nécessaires s'appuie sur une capitalisation des connaissances de CPGE et l'autoformation.

## Modules contexte et enjeux

L'introduction de la séquence s'organise autour de trois demi-journées de formation visant à présenter la séquence, l'enseignement d'intégration et à introduire les enjeux des différents secteurs du spatial et de l'aéronautique. Différentes actions seront proposées, par exemple :

- Présentation de la séquence thématique et introduction aux enseignements d'intégration
- Conférences sur le secteur aéronautique civil et militaire : de la conception des avions de ligne jusqu'à l'exploitation et la gestion du trafic (exemples d'intervenants : Air France, Dassault aviation).
- Conférences sur les applications et les usages dans le spatial (exemple d'intervenants : CNES, Thalès Alinea Space)
- Conférence d'introduction au Droit des activités spatiales (intervenant : Institut du Droit de l'Espace et des Télécommunications, IDEST). Conférence d'introduction à la surveillance de l'espace (intervenant : ArianeGroup). Conférence sur l'économie dans le spatial (intervenant : CNES).
- Conférence concernant le développement durable dans l'aéronautique et le spatial (exemples d'intervenants : Safran, Parrot, ESA).

## Cours spécifique (60 HEE) : Performances et trajectoires de vol

**Brève description :**

Le cours spécifique de la séquence a pour objectifs de :

---

- modéliser le comportement d'un engin en vol dans le cadre de la mécanique des corps rigides,
- décrire la dynamique des véhicules dans le cas de vols dans et hors de l'atmosphère (trajectoire, modes propres, instabilités),
- choisir et déployer des stratégies de contrôle et pilotage.

Il est organisé en deux temps. Premièrement, en s'appuyant sur le cours de mécanique proposé en première année, la mécanique de corps rigides est introduite pour donner les outils nécessaires à la construction de modèles d'avion, de lanceur, satellites, drone... Pour cela, deux cours permettront de donner les notions de base en mécanique du vol et en mécanique spatiale. Dans un deuxième temps, le cours décrira la dynamique et les stratégies de contrôle d'un avion, d'un satellite et d'un lanceur. Ces trois phases de cours feront intervenir plusieurs acteurs des secteurs de l'aéronautique et du spatial. Les séances permettent de comprendre les modèles utilisés et les stratégies de contrôle à utiliser. Les étudiants prendront en main les outils de contrôle sur un système spécifique et pourront mettre en place une stratégie de pilotage dans une phase d'avant-projet lors de l'enseignement d'intégration.

## Enseignement d'intégration

**Préambule :** Les trois enseignements d'intégration sont construits de la même façon et couvrent les mêmes objectifs d'apprentissage. Il s'agit de partir d'un cahier des charges de performances pour un avion, un nanosatellite ou un lanceur et d'opérer des choix d'architecture et de pilotage pour assurer les performances attendues. Les objectifs communs sont donc :

- Comprendre les contraintes des systèmes volants, et les différents niveaux de modélisation du comportement dynamique
- Choisir les solutions techniques pertinentes pour le contrôle de trajectoire, de stabilité et d'orientation (capteurs/actionneurs...)
- Concevoir un système complet par modélisation, y compris des actionneurs et des capteurs, dimensionnement des actionneurs, génération d'énergie et capacité de calcul de CPU
- Implémentation d'une loi de commande optimale, avec prise en compte des aspects économiques
- Validation de la loi de commande sur un modèle réaliste

### Enseignement d'intégration n°1 : Stratégie de contrôle d'un nanosatellite

- **Partenaire associé :** Thalès Alenia Space via le Centre spatial de CentraleSupélec
- **Lieu :** Campus Paris-Saclay
- **Brève description :** Cet enseignement d'intégration se fera en lien avec Thalès Alenia Space. L'objectif est de concevoir un nanosatellite (Cubesat). Pour une mission spécifique définie par un cahier de charges, les participants proposeront une orbite, choisiront les composants du satellite, concevront les modes d'opération et développeront une loi de commande.

### Enseignement d'intégration n°2 : Définition et conception de mission d'un lanceur

- **Partenaire associé :** CNES Direction des Lanceurs
- **Lieu :** Campus Paris-Saclay
- **Brève description :** Cet enseignement d'intégration a pour objectif d'amener les élèves, au travers d'un projet de conception de lanceur spatial, à faire l'expérience d'une boucle de dimensionnement multi-disciplinaire. A cette fin, le projet est articulé en modules reflétant le déroulement d'une boucle de conception, des ingénieurs du CNES DLA (Direction des Lanceurs) accompagnant les élèves au cours de chacun de ces modules.

### Enseignement d'intégration n°3 : Conception et pilotage d'un avion d'affaires

- **Partenaire associé :** Dassault Aviation
- **Lieu :** Campus Paris-Saclay
- **Brève description :** L'objectif de cet enseignement d'intégration est de faire découvrir les différentes étapes du processus de conception d'un avion d'affaires, à la fois d'un point de vue théorique et d'un point de vue pratique. L'étude s'intéressera à la conception de l'avion et amélioration de ses performances, au développement d'une loi de pilotage, et l'analyse de risque et certification associées à la solution développée.

# 2SC5110 – Performances et trajectoires de vol

Responsables : **Sihem Tebbani**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ENERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Cours ST**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Le cours spécifique de la séquence thématique 5 « Pilotage et contrôle de vol dans le transport aéronautique et spatial » permet d'acquérir les compétences et connaissances nécessaires pour la modélisation et commande d'un engin en vol (dans et hors de l'atmosphère) en vue d'améliorer les performances du système. Il est divisé en deux parties.

La première partie de ce cours est un tronc commun dont les objectifs sont d'apporter un socle commun de connaissances et de compétences nécessaires pour cette séquence thématique. Ce tronc commun est organisé en trois temps. Premièrement, en s'appuyant sur le cours de mécanique proposé en première année, la mécanique du solide est introduite pour donner les outils nécessaires à la construction de modèles d'avion, de lanceur, satellites, drone... Dans un deuxième temps, le cours décrira la dynamique et les stratégies de contrôle d'un avion. Enfin la mécanique spatiale est introduite pour donner les outils nécessaires à la description du mouvement, des perturbations et des manœuvres hors atmosphère.

La seconde partie du cours correspond aux cours d'introduction aux enseignements d'intégration. Dans cette partie, chaque partenaire industriel intervient auprès des élèves qui auront choisis son enseignement d'intégration. Les objectifs sont d'apporter de nouvelles connaissances et compétences nécessaires pour réussir la semaine d'intégration mais également de renforcer des notions vues dans le tronc commun de ce cours. Ces cours seront axés sur la conception et pilotage de trois systèmes : un avion, un lanceur et un satellite.

Plusieurs experts des secteurs aéronautique et spatial interviendront dans ce cours.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Il n'y a pas de prérequis spécifique

## Plan détaillé du cours (contenu)

**Tronc commun :**

**1. Mécanique générale :**

Cette partie du cours propose de donner les notions de base en mécanique du solide. Elle abordera les points suivants :

- Mouvement de solide indéformable (éléments « succincts » de cinématique et de dynamique pour un solide indéformable, théorèmes fondamentaux de la dynamique pour un solide indéformable).
- TD 1 : Mesure des paramètres d'inertie d'un microsatellite
- Liaisons entre solides indéformables (composition des mouvements, efforts de liaison).

- TD 2 : mouvement de Cubli
- Actionneurs dans le domaine aérospatial (stabilité de la rotation autour d'un axe principal d'inertie, effet gyroscopique, application aux actionneurs gyroscopiques, roues de réaction).
- TD 3 : attitude d'un satellite

## 2. Mécanique du vol :

Cette partie du cours propose d'illustrer la notion de stabilité dynamique à travers l'étude de stabilité d'un avion en vol. L'objectif est d'identifier les mouvements induits par de petites perturbations autour d'un état d'équilibre et de déterminer l'amortissement ou l'amplification de ces mouvements en fonction des propriétés de l'avion. La partie en cours magistral donne tous les outils mathématiques de modélisation pour aborder l'étude de stabilisation. Il abordera les points suivants :

- Définition des angles d'Euler
- Formulation matricielle
- Équations linéarisées dynamiques du mouvement
- Résolution des équations linéarisées
- Présentation de mouvements caractéristiques : phugoïde, oscillation d'incidence, roulis hollandais, roulis pur et spirale.

Les séances de TD serviront à mettre en pratique la démarche et à réaliser une étude de stabilité dynamique exhaustive.

## 3. Mécanique spatiale

L'objectif de cette partie est d'appréhender le mouvement libre d'un corps dans un champ gravitationnel, de concevoir des manœuvres orbitales permettant de mener à bien une mission donnée, et de modéliser l'influence de différentes perturbations orbitales sur le mouvement d'un corps. Il abordera les points suivants :

- Mouvement d'un corps dans un champ de pesanteur
- Notion d'orbite képlérienne. Cas des orbites elliptiques
- Perturbations orbitales
- Manœuvres orbitales

## Cours électif (un au choix en fonction de l'enseignement d'intégration choisi)

Dans la deuxième partie, trois cours seront proposés, et correspondant à des cours d'introduction des enseignements d'intégration.

### 1. Pilotage d'un avion

Ce cours a pour objectif de détailler la modélisation et pilotage d'un avion. Il abordera les points suivants :

- Présentation d'un cahier des charges pour les performances en vol d'un avion
- Modélisation des forces (dont poussée, portance et traînée)
- Coefficients et ratio pour l'étude des performances des trajectoires.

### 2. Pilotage d'un lanceur

Le cours de pilotage des lanceurs vise à aborder les fondamentaux du contrôle d'attitude d'un lanceur, en phases propulsées et balistiques. Les exigences à respecter par la fonction pilotage ainsi que les perturbations physiques à gérer au cours du vol seront abordées. Des principes de synthèse de commande seront présentés, ainsi que des aspects relatifs aux actionneurs

### 3. Pilotage d'un satellite

Ce cours a pour objectif de détailler la modélisation et pilotage d'un satellite. Il abordera les points suivants :

- Architecture d'un système SCAO,
- Missions typiques, familles de SCAO, types d'orbites, couples perturbateurs,
- Capteurs et actionneurs pour un satellite
- modes et algorithmes de contrôle, contribution du SCAO dans les trade-offs
- Cahier des charges pour un système de SCAO ( stabilité, performances, robustesses, différents contrôleurs,
- Exemples d'application

## Déroulement, organisation du cours

Cours magistraux et travaux dirigés.

Plusieurs exemples de systèmes aéronautiques et spatiaux réels seront présentés.

Pour le cours de mécanique générale, la pédagogie est de type classe inversée. Les cours sont sous forme de vidéos à étudier avant la séance en présentiel qui est une mise en pratique (via un TD).

## Organisation de l'évaluation

Le cours spécifique sera évalué individuellement par un examen final d'une durée de 1H30. Cette évaluation se fera par QCM.

## Support de cours, bibliographie

- Techniques et technologies des véhicules spatiaux , CNES, Cépaduès Editions, 1998.
- Trajectoires spatiales , O. Zarrouati, Cépaduès Editions, 1987.
- Orbital Mechanics for Engineering Students, H. D. Curtis, Butterworth-Heinemann. 2013.
- Practical Methods for Aircraft and Rotorcraft Flight Control Design: An Optimization-Based Approach, Mark B. Tischler, Tom Berger, Christina M. Ivler, Mohammadreza H. Mansur, Kenny K. Cheung and Jonathan Y. Soong. ISBN: 978-1-62410-443-5.
- Advances In Aircraft Flight Control, M B Tischler, CRC Press, 28 jun. 1996.
- Aircraft Control and Simulation: Dynamics, Controls Design, and Autonomous Systems Brian L. Stevens, Frank L. Lewis, Eric N. Johnson, John Wiley & Sons, 2 oct. 2015 - 768 pages
- Performance, Stability, Dynamics and Control of Airplanes, Third Edition 2015, Bandu N. Pamadi, ISBN: 978-1-62410-274-5.

## Moyens

- Equipe enseignante : F. Gatti, E. Bourgeois, Ch. Betrancourt, intervenant du CNES, TAS et Dassault Aviation, S. Tebbani (coordination)
- Taille des TD : 35 élèves
- Outils logiciels : Matlab

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Les objectifs sont d'acquérir les connaissances et compétences pour :

- Modéliser le comportement d'un engin en vol dans le cadre de la mécanique du solide, de la mécanique du vol et de la mécanique spatiale.
- Décrire la dynamique des véhicules dans le cas de vols dans et hors de l'atmosphère (trajectoire, modes propres, instabilités).
- Choisir et déployer des stratégies de contrôle et pilotage.

Ce cours permettra également d'acquérir une vision globale des systèmes de pilotage pour les véhicules en vol et des exigences en termes de performance et des contraintes associées.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

A l'issue du cours, les élèves auront une compréhension opérationnelle des outils de conception d'un véhicule en vol via l'acquisition :

1. des notions de base en mécanique du solide, la mécanique du vol et la mécanique spatiale
2. d'une bonne connaissance des exigences et contraintes du système de pilotage de véhicule en vol
3. d'une bonne connaissance de différents systèmes et véhicules en vol (avion, drone, satellite, lanceur).

Ils seront capables de :

- modéliser des véhicules dans le cas de vols dans et hors de l'atmosphère (trajectoire, modes propres, instabilités).
- choisir et déployer des stratégies de contrôle et pilotage.
- évaluer les performances du vol d'un véhicule en vol et proposer des solutions efficaces et économiques pour les améliorer.

Plus spécifiquement, les compétences validées sont :

- Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques (C1).
- Développer une compétence approfondie dans un domaine scientifique ou sectoriel et une famille de métiers (C2).
- Etre opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique (C6).
- Savoir convaincre (C7).

# 2SC5191 – Stratégie de contrôle d'un nanosatellite

Responsables : **Giorgio Valmorbida**

Département de rattachement : **DOMINANTE - GRANDS SYSTÈMES EN INTERACTION, DOMINANTE - CONSTRUCTION VILLE TRANSPORTS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Cet enseignement d'intégration se fera en lien avec Thalès Alenia Space. L'objectif est de concevoir un nanosatellite (Cubesat). Pour une mission spécifique définie par un cahier de charges les participants proposeront une orbite, choisiront les composants du satellite, concevront les modes d'opération et développeront une loi de commande.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Cours "Conception et pilotage d'un satellite: Systèmes de contrôle d'attitude et d'orbite" du cours spécifique "performances et trajectoires de vol".

## Plan détaillé du cours (contenu)

Définition des méthodes pour le suivi et la validation du projet : construction de la matrice de traçabilité. Définition du scénario de la mission, définitions des modes possibles pendant la mission, sélection du type d'équipement. Allocation du budget de pointage. Sélection de l'orbite. Évaluation du couple perturbateur. Dimensionnement, sélection et aménagement des capteurs et actionneurs. Modélisation de la dynamique du système et simulation avec couples perturbateurs. Définition des budgets de pointage, de masse et de puissance. Rédaction de la note technique.

## Déroulement, organisation du cours

L'EI se fera sous forme de travail en groupe, avec une répartition des sous-problèmes à traiter et tâches à réaliser. Chaque groupe devra proposer une solution pertinente au cahier des charges proposé, avec validation régulière de l'état d'avancement du projet et des solutions proposées.

## Organisation de l'évaluation

L'évaluation se fera sous la forme d'un livrable (rapport, logiciel et soutenance) par équipe de travail (5 élèves). Une note de contrôle continu sera également attribuée. Le contrôle continu se fera à partir des présentations courtes à la fin de chaque séance pendant laquelle les groupes présenteront les résultats de la journée.



## Support de cours, bibliographie

Support de cours "Guidage et Pilotage d'un Satellite"

### Moyens

- Cahier des charges dans un format industriel
- Logiciels pour simulation de trajectoire et logiciel d'instrumentation de satellite.
- Encadrement par des Ingénieurs de Thalès Alenia Space et enseignants-chercheurs de CentraleSupélec.

### Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Les objectifs généraux sont :

- Comprendre les contraintes d'un NanoSatellite et les différents niveaux de modélisation et de son comportement dynamique
- Choisir l'orbite du satellite en fonction de sa mission
- Concevoir le satellite dans sa construction physique, avec le choix et dimensionnement d'actionneurs et capteurs et des générateurs d'énergie
- Concevoir le satellite dans ses aspects logiciel : proposition des modes d'opération, développement des modes d'opération et de lois de commande pour répondre aux cahiers de charges en termes de performance.

La validation de chaque étape se fera à l'aide des simulateurs : on utilisera les simulateurs d'orbite pour valider les choix des capteurs pour la mission et des simulateurs de systèmes dynamiques pour l'étude et validation des lois de commande proposées (GMAT, VTS Timeloop, Matlab/Simulink).

À la fin de ce module les participants auront acquis les connaissances sur les étapes de la conception d'un satellite, sur les choix d'orbite, le choix de matériel et architecture du satellite ainsi que le projet et validation de lois de commande.

### Description des compétences acquises à l'issue du cours

- Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques (C1).
- Développer une compétence approfondie dans un domaine scientifique ou sectoriel et une famille de métiers (C2).
- Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients (C4).
- Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique (C6).
- Savoir convaincre (C7).

# 2SC5192 – Définition et conception de mission d'un lanceur

Responsables : **Sihem Tebbani**

Département de rattachement : **DOMINANTE - CONSTRUCTION VILLE TRANSPORTS, DOMINANTE - GRANDS SYSTÈMES EN INTERACTION**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Cet enseignement d'intégration a pour objectif d'amener les élèves, au travers d'un projet de conception de lanceur spatial, à faire l'expérience d'une boucle de dimensionnement multi-disciplinaire. Il s'agit ainsi d'appréhender les interactions entre les différentes disciplines techniques impliquées, et de développer une logique de travail permettant d'assurer le bon déroulement des itérations associées.

Un autre enjeu est également d'appréhender les enjeux techniques propres à chaque discipline, et d'acquérir des méthodes de dimensionnement adaptées à une boucle préliminaire de conception.

A cette fin, le projet est articulé en modules reflétant le déroulement d'une boucle de conception, des ingénieurs du CNES DLA (Direction des Lanceurs) accompagnant les élèves au cours de chacun de ces modules. Ce projet comporte notamment un module "pilotage des lanceurs" mettant en œuvre l'enseignement académique délivré dans le cours spécifique "Performances et trajectoires de vol", et qui permettra aux élèves d'apprécier dans quelle mesure l'élaboration de la fonction pilotage est en lien étroit avec les besoins de la mission, les enjeux physiques associés, et les performances du lanceur spatial.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Cours "Pilotage d'un lanceur" du cours spécifique "performances et trajectoires de vol".

## Plan détaillé du cours (contenu)

Cet enseignement d'intégration s'articulera autour des modules suivants :

- Analyse de mission – étagement
- Trajectoire
- Propulsion liquide
- Propulsion solide
- Aérodynamique et charges mécaniques
- Dimensionnement de structures
- Pilotage des lanceurs

Chaque module fera l'objet d'une séance (une demi-journée par module) dédiée au cours de laquelle les élèves, répartis en binôme, devront concevoir et consolider un projet de lanceur spatial répondant à un cahier des charges spécifique.

## Déroulement, organisation du cours

Les intervenants CNES DLA encadreront ces travaux au travers d'un ensemble de questions posées aux élèves visant à les amener à faire des choix de conception, tout en s'assurant de la bonne compréhension des enjeux (techniques, programmatiques) et des problèmes physiques afférents. Des outils analytiques et numériques devront être mis en œuvre par les élèves afin de répondre aux problèmes soulevés. Les hypothèses et données considérées devront être questionnées afin notamment de bien appréhender les enjeux d'une boucle de conception multi-disciplinaire ; ces éléments amèneront notamment les élèves à devoir itérer sur leurs choix de conception afin d'obtenir des solutions techniques pertinentes.

## Organisation de l'évaluation

L'évaluation se fera sous la forme d'un livrable (rapport final, notes d'état d'avancement du projet à l'issue de chaque module).

## Support de cours, bibliographie

- Énoncé (format papier) structurant les développements à mener par les étudiants.
- Outils de dimensionnement préliminaires simplifiés (sous WINDOWS 10).

## Moyens

- cahier des charges et énoncé structurant les développements à mener par les élèves.
- Outils informatiques de dimensionnement préliminaires simplifié
- Encadrement : Ingénieurs du CNES Direction des Lanceurs.
- Travail en binôme.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce projet, les élèves auront une compréhension opérationnelle des outils de conception d'un lanceur via l'acquisition :

- d'une bonne connaissance des exigences et contraintes pour la conception d'un lanceur
- d'une bonne connaissance de différents systèmes constituant un lanceur
- d'appréhender les interactions entre les différentes disciplines techniques impliquée dans la conception d'un lanceur et les enjeux associés

Ils seront capables de :

- modéliser la trajectoire d'un lanceur et mettre en oeuvre des méthodes de dimensionnement de lanceur
- choisir et déployer des stratégies de pilotage d'un lanceur
- évaluer les performances du vol du lanceur et proposer des solutions efficaces et économiques pour les améliorer.
- savoir répondre aux exigences de la boucle de conception multi-disciplinaire d'un lanceur

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques (C1).
- Développer une compétence approfondie dans un domaine scientifique ou sectoriel et une famille de métiers (C2).
- Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients (C4).
- Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique (C6).
- Savoir convaincre (C7).

# 2SC5193 – Conception et pilotage d'un avion d'affaire

Responsables : **Christopher Betrancourt**

Département de rattachement : **DOMINANTE - CONSTRUCTION VILLE TRANSPORTS, DOMINANTE - GRANDS SYSTÈMES EN INTERACTION**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

L'objectif de ce cours est de faire découvrir les différentes étapes du processus de conception d'un avion, à la fois d'un point de vue théorique et d'un point de vue pratique. Les méthodes types utilisées dans les bureaux d'étude seront présentées puis appliquées à la conception d'un avion choisi par l'étudiant.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Avoir suivi le cours électif « Pilotage d'un avion » du cours spécifique « Performances et trajectoires de vol ».

## Plan détaillé du cours (contenu)

Lorsqu'une équipe s'engage à dessiner un nouvel avion ou à modifier un avion existant, elle le fait toujours suivant le même schéma. Le processus commence par une analyse des produits existants. Viennent ensuite les phases d'étude conceptuelle, d'étude préliminaire et d'étude de détail. Les plans de réalisation sont ensuite envoyés à l'atelier qui réalise le prototype. Plusieurs itérations sont bien sûr nécessaires à chaque étape avant de passer à l'étape suivante. Le cours commence par une approche du design plus ou moins globale ou synthétique avant d'entrer plus avant dans les détails. Nous irons du concept de base jusqu'à l'optimisation complète, en commençant par utiliser des paramètres issus de données statistiques simples pour aller progressivement vers l'utilisation d'algorithmes sophistiqués.

## Organisation de l'évaluation

L'évaluation se fera lors de la dernière journée de cours. Elle consistera dans un premier temps à une présentation orale de 5 minutes pour présenter le projet suivi par une séance de questions/réponses.

## Moyens

Enseignant : partenaire industriel.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Les étudiants apprennent dans ce cours à :

- Définir la configuration générale du nouvel appareil.
- Estimer le poids à vide et le poids maximal au décollage.
- Evaluer les performances aérodynamiques de l'appareil.

- Estimer les performances (décollage, montée, croisière, atterrissage).
- Analyser la stabilité et le contrôle sur les 3 axes de l'appareil.
- Estimer les coûts (design, production, opérations).

Il est à préciser que les concepts généraux présentés dans ce cours s'appliquent non seulement à la conception des avions, mais aussi à la conception et au développement de nombreux autres produits ou services.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques (C1).

- Développer une compétence approfondie dans un domaine scientifique ou sectoriel et une famille de métiers (C2).
- Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients (C4).
- Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique (C6).
- Savoir convaincre (C7).

# ST5 - 52 - COMMANDE DE BIOPROCEDES POUR L'ENVIRONNEMENT ET LES BIOFABRICATIONS

**Dominante : VSE (Vivant-Santé-Environnement) et GSI (Grands Systèmes en Interaction)**

**Langues d'enseignement : FRANCAIS**

**Campus où le cours est proposé : CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

## Problématique d'ingénieur

Le développement soutenable tient une place grandissante dans la consolidation et l'évolution des différents secteurs industriels. Des solutions de modernisation et de transformation des moyens de production sont à l'étude afin de limiter les émissions de gaz à effet de serre, notamment en proposant des alternatives aux énergies fossiles. Parmi les solutions étudiées, cette séquence thématique s'intéresse aux bioprocédés, performants et respectueux de l'environnement, comme technologie de substitution.

Les bioprocédés sont l'un des piliers de la transition vers une économie soutenable. Leur développement, basé sur l'utilisation de systèmes vivants ou de leurs constituants pour la production des biens et des services, requiert la mise en œuvre de connaissances pluridisciplinaires, notamment pour l'optimisation de leur fonctionnement, à savoir la maximisation de la productivité et/ou de la dégradation de polluants.

Cette séquence thématique se propose de donner des éléments de réponse pour la mise au point de bioprocédés à travers la conception de systèmes automatiques pour répondre aux problématiques de :

- Énergie (ex. production de biocarburants),
- Traitement de pollutions (ex. traitement des eaux usées),
- Contrôle de gaz à effets serre (ex. captage de CO<sub>2</sub>),
- Production de molécules à haute valeur ajoutée (ex. production de médicaments, cosmétiques).

Dans cet enseignement, le dimensionnement de bioprocédés est abordé ainsi que la conception de systèmes automatisés pour maintenir le bioprocédé dans des conditions opératoires optimales afin de maximiser sa productivité. La démarche peut s'étendre à d'autres applications de bioprocédés non traitées dans la ST dans le secteur des biotechnologies (par exemple la culture de cellules souches pour des applications médicales). Les concepts présentés peuvent également être appliqués à des secteurs d'application élargie, tels que pharmaceutique, génie génétique, cosmétique, agroalimentaire, etc.

L'intervention d'industriels du secteur permet de mieux comprendre les enjeux associés à l'utilisation et optimisation des bioprocédés dans un contexte de développement soutenable.

## Prérequis conseillés

Non obligatoires mais fortement conseillés : Thermodynamique, Sciences des transferts

## Modules contexte et enjeux

Cette partie s'organise autour de demi-journées de formation visant à présenter la séquence thématique, les enseignements d'intégration et à introduire les enjeux associés aux bioprocédés en lien avec développement soutenable. Les activités suivantes sont proposées :

- Conférence d'introduction aux biotechnologies, donnant un aperçu de l'évolution des biotechnologies et des besoins actuels et futurs de ce secteur.
- Conférence sur le lien entre les biotechnologies et le développement soutenable.

- Conférence sur les applications énergétiques dressant un bilan sur les sources d'énergies (fossiles, nucléaire, renouvelable) et permettant de mettre en évidence l'intérêt et le rôle des bioprocédés dans la production et le stockage de l'énergie, ainsi que des enjeux associés.
- Conférence sur les applications environnementales dressant un bilan des problématiques environnementales (raréfaction des ressources, pollution, risques sanitaires, etc.) et permettant de mettre en évidence l'intérêt et le rôle des bioprocédés dans la valorisation des déchets et la conversion de la biomasse en produits à valeur ajoutée.
- Conférence sur l'apport des bioprocédés pour les missions spatiales de longue durée. Ces bioprocédés sont une solution pertinente pour une autonomie nutritionnelle et pour un recyclage de l'eau, de l'air et des matières organiques en milieu confiné. Leur contrôle est une des clefs de leur fiabilité, qui s'avère absolument nécessaire compte-tenu des besoins auxquels ils répondent et de l'isolement en milieu spatial.
- Conférence sur l'Automatique et les bioprocédés s'intéressant spécifiquement à la place de l'automatique dans la conception et optimisation de bioprocédés pour la valorisation des ressources.
- Conférence sur la bioéthique, montrant que l'utilisation des bioprocédés fait ressurgir des questions sur l'éthique des solutions proposées, notamment lorsque ces solutions font appel à la conception d'organismes dont le génome est modifié. Cette conférence est une introduction aux questionnement liés à l'utilisation des biotechnologies et, plus généralement, à la place de l'Homme dans la biosphère et au respect de la nature et de l'environnement.

## Cours spécifique (60 HEE) : Génie des procédés : application à l'environnement et aux biofabrications

**Brève description :** Le Génie des Procédés moderne consiste à concevoir, mettre en œuvre et optimiser des procédés, destinés à l'élaboration de produits et services variés dans de nombreux secteurs industriels et de l'environnement (pharmacie, chimie fine, agroalimentaire, cosmétique, traitement de l'eau et des déchets, matériaux, biotechnologies, etc.) ainsi qu'à la production d'énergies traditionnelles, décarbonées et renouvelables.

Ce cours est une introduction au Génie des Procédés et des Bioprocédés et à ses méthodologies. Les fondamentaux enseignés permettent aux élèves d'acquérir des outils généralistes, transposables aisément à de multiples domaines. La soutenabilité des procédés est un enjeu majeur.

Certains procédés s'inscrivent intrinsèquement comme des outils de choix dans la stratégie de développement soutenable aux différentes échelles (locale et mondiale), tel que le recyclage et la valorisation de nombreux produits ou la purification d'effluents liquides et gazeux. Il n'en demeure pas moins que, de manière générale, de nouveaux procédés doivent être développés et que les procédés existants doivent être optimisés (intensification), afin de réduire les impacts du secteur industriel. Les défis associés à cette dynamique sont multiples : réduction des coûts, des risques et dangers, des déchets, des consommations en énergie et en matières premières.

En outre, les bioprocédés connaissent un très fort développement, pour deux raisons : (i) l'emploi du vivant pour transformer la matière, épurer des systèmes pollués (liquide, solide), les microorganismes se comportant comme des usines et (ii) l'emploi de biomasse renouvelable en remplacement de ressources fossiles.

Ce cours s'appuie sur des études de cas concrètes (simplifiées afin de les rendre accessibles), pour permettre aux étudiants d'appliquer et de s'approprier les fondamentaux du cours, tout en s'intéressant à des procédés orientés vers le développement soutenable.

Le bioprocédé est étudié à l'échelle du bioréacteur. La description et compréhension détaillées des processus biologiques (métabolisme, maintenance, etc.) à l'échelle de la cellule ne sont pas abordées. Les agents biologiques sont donc considérés comme des catalyseurs cellulaires transformant des matières premières en des produits selon de lois cinétiques fournies, dont l'application ne nécessite aucun prérequis en biologie..

### Enseignement d'intégration

Les trois enseignements d'intégration couvrent les mêmes objectifs d'apprentissage et possèdent une structure similaire. Il s'agit de partir d'un cahier des charges de performances pour un bioprocédé donné, d'effectuer des choix de conception du bioprocédé et de loi de commande pour assurer les performances attendues et pour maximiser la productivité du système ainsi conçu.

### Enseignement d'intégration n°1 : Traitement biologique optimisé des eaux résiduaires urbaines

- **Partenaire associé :** VEOLIA
- **Lieu :** Campus Paris-Saclay

- **Brève description** : Dans les stations de traitement des eaux résiduaires urbaines, les procédés biologiques sont destinés à l'élimination de la pollution carbonée et azotée, sous l'action de microorganismes qui se développent de manière spontanée en milieu aérobie ou anaérobie. Les polluants éliminés sont concentrés sous forme de suspensions aqueuses de biomasse ou boues, constituant des déchets volumineux avec des matières fermentescibles et toxiques. Le traitement des boues constitue donc une phase importante des systèmes d'épuration devant assurer la réduction de leur volume et des nuisances olfactives. Un des procédés les plus répandus pour ce traitement est la digestion anaérobie, laquelle produit des liquides à forte concentration en azote qui doivent être à nouveau traités. La quantité d'azote contenue dans ces effluents peut représenter jusqu'à 20% d'augmentation de la charge d'azote à éliminer par la station. Deux solutions s'offrent à cette problématique : (1) une dite classique, dans lequel ces effluents concentrés sont directement renvoyés en tête de station ou (2) le procédé d'oxydation anaérobie d'ammonium, ou Anammox, une alternative innovante aux procédés de nitrification/dénitrification traditionnels, permettant la transformation directe de nitrite et d'ammonium en diazote gazeux.

L'objectif de cet EI est de proposer des stratégies de contrôle pour les deux solutions mentionnées afin de respecter les exigences épuratoires minimales des eaux traitées et de comparer leur performance en matière de coûts d'exploitation et de production de biogaz comme vecteur de valorisation énergétique des boues.

## Enseignement d'intégration n°2 : Système de support de vie pour le spatial

- **Partenaire associé** : Agence Spatiale Européenne (ESA)
- **Lieu** : Campus Paris-Saclay
- **Brève description** : L'ESA développe un système de support de vie biorégénératif permettant aux astronautes de vivre de façon autonome, sans ravitaillement de la Terre, lors de missions spatiales de longue durée. Cet enseignement d'intégration porte sur le bioprocédé qui permet de régénérer l'atmosphère de l'habitacle. Il s'agit d'un photobioréacteur mettant en œuvre des microalgues qui consomment le CO<sub>2</sub>, produisent O<sub>2</sub> et des compléments nutritifs.

L'objectif est de modéliser et dimensionner le photobioréacteur pour 5 astronautes en autonomie totale pendant 1000 jours, assurer le contrôle de la production en O<sub>2</sub> via le transfert de lumière pour des critères de performance raisonnables. Ces critères sont en lien avec la fiabilité de fonctionnement, la sécurité et les risques pour l'équipage, le taux et l'efficacité du recyclage, les activités requises pour l'équipage, la consommation d'énergie, l'encombrement et la masse du système.

## Enseignement d'intégration n°3 : Supervision avancée de la production de biogaz à partir de déchets

- **Partenaire associé** : Bio En Tech
- **Lieu** : Campus Paris-Saclay
- **Brève description** La digestion anaérobie est un procédé naturel de dégradation de substances organiques par des micro-organismes (bactéries et archaées) en l'absence d'oxygène (conditions anaérobies). Ce procédé permet de récupérer une fraction de l'énergie contenue dans les déchets sous forme de biogaz, mélange de méthane et de CO<sub>2</sub>. La généralisation de ces technologies permettrait de réduire considérablement la demande énergétique nécessaire pour traiter les déchets (10% de l'énergie utilisée sur la planète) mais pourrait à terme constituer une source d'énergie. Le procédé de digestion anaérobie est toutefois complexe, et implique plusieurs centaines d'espèces de microorganismes. Par ailleurs, il est instable, et des composés intermédiaire (acides gras volatils) peuvent, dans certaines conditions s'accumuler et conduire à l'arrêt total du réacteur. Pour éviter ce type d'accident, un suivi très précis et coûteux est nécessaire. L'objectif de l'EI est de proposer et développer des stratégies de supervision et de contrôle pour réduire le risque d'acidification du réacteur et pour optimiser la production d'énergie à partir des déchets.



# 2SC5210 – Génie des procédés : application à l'environnement et aux biofabrications

Responsables : **Cristian-Felipe Puentes Mancipe**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ENERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Cours ST**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Le Génie des Procédés moderne consiste à concevoir, mettre en œuvre et optimiser des procédés, destinés à l'élaboration de produits et services variés dans de nombreux secteurs industriels et de l'environnement (pharmacie, chimie fine, agroalimentaire, cosmétique, traitement de l'eau et des déchets, matériaux, biotechnologies, etc.) ainsi qu'à la production d'énergies traditionnelles, décarbonées et renouvelables. Ce cours est une introduction au Génie des Procédés et des Bioprocédés et à ses méthodologies. Les fondamentaux enseignés permettent aux élèves d'acquérir des outils généralistes, transposables aisément à de multiples domaines.

La soutenabilité des procédés est un enjeu majeur.

Certains procédés s'inscrivent intrinsèquement comme des outils de choix dans la stratégie de développement soutenable aux différentes échelles (locale et mondiale), tel que le recyclage et la valorisation de nombreux produits ou la purification d'effluents liquides et gazeux. Il n'en demeure pas moins que, de manière générale, de nouveaux procédés doivent être développés et que les procédés existants doivent être optimisés (intensification), afin de réduire les impacts du secteur industriel. Les défis associés à cette dynamique sont multiples : réduction des coûts, des risques et dangers, des déchets, des consommations en énergie et en matières premières.

En outre, les bioprocédés connaissent un très fort développement, pour deux raisons : (i) l'emploi du vivant pour transformer la matière, épurer des systèmes pollués (liquide, solide), les microorganismes se comportant comme des usines et (ii) l'emploi de biomasse renouvelable en remplacement de ressources fossiles.

Ce cours s'appuie sur des études de cas concrètes (simplifiées afin de les rendre accessibles), pour permettre aux étudiants d'appliquer et de s'approprier les fondamentaux du cours, tout en s'intéressant à des procédés orientés vers le développement soutenable.

Le bioprocédé est étudié à l'échelle du bioréacteur. La description et compréhension détaillées des processus biologiques (métabolisme, maintenance, etc.) à l'échelle de la cellule ne sont pas abordées. Les agents biologiques sont donc considérés comme des catalyseurs cellulaires transformant des matières premières en des produits selon de lois cinétiques fournies, dont l'application ne nécessite aucun prérequis en biologie.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Prérequis non obligatoires mais fortement conseillés : Thermodynamique, Sciences des transferts. Les études de cas traitées impliquent des réactions biochimiques ou chimiques. Pour autant, aucune connaissance préalable en chimie ou biologie n'est requise.

## Plan détaillé du cours (contenu)

1. Introduction au génie des procédés ; Bilan matière

Étude de cas : Procédé de production de bioéthanol (conversion des matières premières renouvelables par biotechnologie industrielle)

2. Modèles de réacteur idéaux (parfaitement agité et piston)

Étude de cas : Dimensionnement de bassins de traitement biologique d'une station d'épuration des eaux usées

urbaines (bioprocédé pour l'environnement)

### 3. Bilan énergie thermique

Étude de cas : Dimensionnement d'un bioréacteur pour la production de levure de boulanger en mode batch (production de biomasse par biotechnologie industrielle)

### 4. Équilibres liquide-vapeur, distillation simple

Exercice d'application : Distillation simple du mélange éthanol-eau (purification de biocarburant, alternative aux carburants fossiles)

### 5. Distillation multi-étagée

Étude de cas : Distillation multi-étagée de bioéthanol (purification de biocarburant, alternative aux carburants fossiles)

### 6. Transfert de Matière : Diffusion et Convection

Étude de cas : Production en Raceway de Microalgues Spirulina (production de nutriments pour alimentation humaine et animale par biotechnologie industrielle)

### 7. Transfert de Matière : technologie à contact permanent

Étude de cas : Traitement d'un effluent gazeux avec élimination d'un polluant (procédé pour l'environnement)

### 8. Contrôle continu.

Étude de cas : modélisation et simulation d'un bioprocédé de production de polymère (production de molécules à valeur ajoutée par biotechnologie industrielle)

## Déroulement, organisation du cours

Le module est organisé en cours magistraux (10,5 h), pour introduire les connaissances et outils méthodologiques, et en TD (10,5 h) afin d'appliquer les acquis dans le cadre d'études de cas.

## Organisation de l'évaluation

- Contrôle continu en groupe : Solution d'une étude de cas de modélisation et simulation d'un bioprocédé. Rédaction d'un rapport écrit incluant le code informatique et une analyse des résultats. (40 % de la note).
- Contrôle final individuel écrit, sur table : Étude de cas de 1,5 h (60 % de la note).

## Support de cours, bibliographie

### • Diaporamas

### • Techniques de l'ingénieur :

- + Charpentier J., Génie des procédés, développement durable et innovation – Enjeux et perspectives, 2013
- + Moulin J.P., Pareau D., Rakib M., Stambouli M., Transfert de matière – Méthodologie, 2000
- + Moulin J.P., Pareau D., Rakib M., Stambouli M., Isambert A., Transfert de matière – Distillation compartimentée idéale, 2001
- + Moulin J.P., Pareau D., Rakib M., Stambouli M., Transfert de matière – Autres opérations compartimentées, 2002
- + Buch A., Rakib M., Stambouli M., Transfert de matière – Cinétique du transfert de matière entre deux phases, 2008
- + Sun L.M., Thonnellier J.Y., Perméation gazeuse, 2004
- + Vuillermans J., Réacteurs chimiques – Principes, 1994
- + Boullinguez B., Le Cloirec P., Purification de biogaz – Élimination des COV et des siloxanes, 2011

### • Ouvrages généraux : Perry Chemical Engineer's Handbook, 8th edition, 2007, McGraw-Hill, New York

### • Ouvrages spécifiques :

#### - Génie des réacteurs et bioréacteurs

- + Coulson and Richardson's Chemical Engineering – Volume 3A: Chemical and Biochemical Reactors and Reaction Engineering, 4th Edition, 2017, Elsevier, Oxford
- + Fogler H.S., Elements of chemical reaction engineering, 5th Edition, 2016, Pearson Education, Englewood Cliffs
- + Levenspiel O., Chemical Reaction Engineering, 3rd edition, 1999, John Wiley and Sons, New York
- + Villadsen J., Nielsen J., Lidén G., Bioreaction Engineering Principles, 3rd Edition, 2011, Springer, New York

#### - Transferts de chaleur et de matière

- + Bergman T.L., Lavine A.S., Incropera F.P., Dewitt F., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th Edition, 2011, John Wiley and Sons, New York
- + Coulson and Richardson's Chemical Engineering – Volume 1B: Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Application, 7th Edition, 2018, Elsevier, Oxford

- + Cussler E.L., Diffusion Mass Transfer in Fluid systems, 3rd Edition, 2009, Cambridge University Press, Cambridge
- + Treybal R., Mass Transfer Operations, 4th Edition, 1982, McGraw Hill, New York
- *Production de bioéthanol*
- + Cardona C.A., Sanchez O.J., Gutierrez L.F, Process synthesis for fuel ethanol production, 2010, CRC Press, Boca Raton
- + Naik S.N., Goud V.V., Rout P.K., Dalai A.K, Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 14, 2010, 578–597
- + Vohra M., Manwar J., Manmode R., Padgilwar S., Patil S. Bioethanol production: Feedstock and current technologies, Journal of Environmental Chemical Engineering 2, 2014, 573–584

## Moyens

- Équipe enseignante : Cristian PUENTES, François PUEL, Victor POZZOBON, Irma LIASCUKIENE
- Taille des TD : 30 à 35 étudiants
- Outils logiciels et nombre de licences nécessaires : Excel, Python, Matlab

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À l'issue de cet enseignement, les étudiants seront capables de :

- Lister les modes de transfert de matière,
- Identifier les différents modes de transfert de matière (diffusion / convection) à l'œuvre dans une configuration donnée et les éventuels couplages entre transferts de matière et thermique,
- Écrire les bilans de matière, en prenant en compte, si nécessaire, des cinétiques réactionnelles chimiques ou biochimiques,
- Simplifier un problème en apparence compliqué, où plusieurs phénomènes de transfert coexistent, en ne retenant que les modes de transfert significatifs (qui ont un impact),
- Traduire les phénomènes en équations en utilisant les bilans fondamentaux,
- Dimensionner des technologies de conversion chimique/biochimique et de séparation, sur la base de considérations thermodynamiques et cinétiques.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C1.1 : Analyser : étudier un système dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un système dans le cadre d'une approche transdisciplinaire avec ses dimensions scientifiques, économiques, humaines, etc. Jalon 2.
- C1.2 : Modéliser : utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes. Jalon 2.
- C1.3 : Résoudre : résoudre un problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation. Jalon 1.

# 2SC5291 – Traitement biologique optimisé des eaux résiduaires urbaines

Responsables : **Cristian-Felipe Puentes Mancipe**

Département de rattachement : **DOMINANTE - VIVANT, SANTÉ, ENVIRONNEMENT, DOMINANTE - GRANDS SYSTÈMES EN INTERACTION**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Dans les stations de traitement des eaux résiduaires urbaines, les procédés biologiques sont destinés à l'élimination de la pollution carbonée et azotée, sous l'action de microorganismes qui se développent de manière spontanée en milieu aérobie ou anaérobie.

Les polluants éliminés sont concentrés sous forme de suspensions aqueuses ou de boues, constituant des déchets volumineux avec des matières fermentes cibles et toxiques. Le traitement des boues constitue donc une phase importante des systèmes d'épuration devant assurer la réduction de leur volume et des nuisances olfactives. Un des procédés les plus répandus pour ce traitement est la digestion anaérobie, laquelle produit des liquides à forte concentration en azote qui doivent être traités avant leur rejet en milieu naturel. La quantité d'azote contenue dans ces effluents peut représenter jusqu'à 20% d'augmentation de la charge d'azote à éliminer par la station. Deux solutions s'offrent à cette problématique : (1) une dite classique, dans lequel ces effluents concentrés sont directement renvoyés en tête de station ou (2) le procédé d'oxydation anaérobie d'ammonium, ou Anammox, une alternative innovante aux procédés de nitrification/dénitrification traditionnels, permettant la transformation directe de nitrite et d'ammonium en diazote gazeux.

L'objectif de cet EI est de proposer des stratégies de contrôle pour les deux solutions mentionnées afin de respecter les exigences épuratoires minimales des eaux traitées et de comparer leur performance en matière de coûts d'exploitation et de production de biogaz comme vecteur de valorisation énergétique des boues.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Il n'y a pas de prérequis spécifique

## Plan détaillé du cours (contenu)

- Introduction sur la pollution, les technologies de traitement des eaux et des boues résiduaires.
- Présentation sur la modélisation des ouvrages de traitement d'eau : focus sur la formulation du modèle de réacteur à boues activées et le réacteur à biofilm mobile (MBBR).
- Simulation de la filière classique à débit d'alimentation constant et variable. Compréhension du fonctionnement des procédés unitaires, impact des paramètres opératoires sur la composition de l'effluent, dynamique des populations microbiennes.
- Simulation de la filière Anammox à débit d'alimentation constant et variable. Compréhension du fonctionnement des procédés unitaires, impact des paramètres opératoires sur la composition de l'effluent, dynamique des populations microbiennes.
- Proposition de régulation PID afin de respecter le cahier de charges de dépollution imposé. Ajustement des paramètres des régulateurs PID par une méthode empirique de calage essai-erreur. Evaluation de la qualité des régulations (erreur statique, temps de réponse, dépassement, absorption des perturbations).

– Comparaison des deux filières sur la base des coûts d'exploitation (apport supplémentaire de carbone et consommation d'électricité pour les besoins en aération), production de boues et production de biogaz par digestion anaérobie.

## Déroulement, organisation du cours

L'équipe pédagogique et l'industriel réaliseront une première séance d'introduction à la problématique. Une présentation sur l'approche de modélisation des ouvrages de traitement d'eau sera proposée avec un focus sur les réacteurs de traitement biologique. Ensuite, les étudiants seront répartis en équipes. Toutes les équipes travailleront sur le même cahier de charges, afin qu'ils puissent traiter les aspects génie des procédés et automatique de l'enseignement. Des articles scientifiques et de la documentation technique sera mise à disposition des élèves pour approfondissement des notions traitées. Une procédure écrite pour l'ajustement empirique de paramètres PID dans le logiciel de simulation utilisé de l'EI sera également fournie. Finalement, chaque équipe fera une proposition de contrôle-commande PID au partenaire, comportant la comparaison et l'analyse critique des deux filières.

## Organisation de l'évaluation

L'évaluation se base sur : un rapport écrit, une présentation orale et un contrôle continu avec des échanges courts avec le partenaire industriel.

## Support de cours, bibliographie

Support pdf de l'industriel partenaire

Ouvrages de références en automatique de bioréacteurs :

- Bastin G., Dochain D., On-line Estimation and Adaptive Control of Bioreactors, Elsevier, 1990.
- D. Dochain (éditeur). Automatic Control of Bioprocesses, Wiley-ISTE, 2008.

Techniques de l'ingénieur :

- BOEGLIN J.C., Traitement biologique des eaux résiduaires, Techniques de l'Ingénieur, J3942 V1, Décembre 1998.
- BOEGLIN J.C., Traitements et dispositions finales de boues résiduaires, Techniques de l'Ingénieur, J3944 V1, Septembre 2000.
- GAÏD A., Traitement des eaux résiduaires, Techniques de l'Ingénieur, C5220 V1, Février 2008.
- SPERANDIO M., HERAN M., GUILLOT S., Modélisation biologique des procédés biologiques de traitement des eaux, Techniques de l'Ingénieur, W6500 V1, Août 2007.

Articles procédés Anammox :

- NSENGA KUMWIMBA M., LOTTI T., SENEL E., LI X., SUANON F. Anammox-based processes: How far have we come and what work remains? A review by bibliometric analysis, Chemosphere 238 (2020) 1-17.
- VAN DER STAR W.R.L., ABMA W.R., BLOMMERS D., MULDER J.W., TOKUTOMI T., STROUS M., PICIOREANU C., VAN LOOSDRECHT M.C.M., Startup of reactor for anoxic ammonium oxidation: Experiences from the first full-scale anammox reactor in Rotterdam, Water Research 41 (2007) 4149–4163.
- TAO C., HAMOUDA M.A., Steady-state modeling and evaluation of partial nitrification-anammox (PNA) for moving bed biofilm reactor and integrated fixed-film activated sludge processes treating municipal wastewater, Journal of Water Process Engineering 31 (2019) 1-9.
- LACKNER S., GILBERT E.M., VLAEMINCK S.E., JOSS A., HORN H., VAN LOOSDRECHT M.C.M., Full-scale partial nitritation/anammox experiences – An application survey, Water Research 55 (2014) 292-303.
- BIASE A., KOWALSKI M.S., DEVLIN T.R., OLESZKIEWICZ J.A., Moving bed biofilm reactor technology in municipal wastewater treatment: A review, Journal of Environmental Management 247 (2019) 849–866.
- VEUILLET F., LACROIX S., BAUSSERON A., GONIDEC E., OCHOA J., CHRISTENSSON M., LEMAIRE R. Integrated fixed-film activated sludge ANITATMMox process – a new perspective for advanced nitrogen removal, Water Science and Technology 69.5 (2014), 915-922.

## Moyens

- Outils logiciels : SUMO ; simulateur complet de la filière classique
- Documentation décrivant les procédés unitaires de traitement (eaux résiduaires et boues)
- Encadrement :

o Enseignants: Cristian Puentes (enseignant-chercheur, CS, LGPM), Sette Diop (chercheur, L2S), Nicolas Brunet (PhD student, CS, LGPM)  
o Partenaire industriel

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de cet enseignement, l'élève sera capable de :

- Simuler une station d'épuration d'eaux résiduaires urbaines avec traitement des effluents secondaires ou boues.
- Comprendre le fonctionnement du procédé Anammox comme alternative au traitement traditionnel de la pollution azotée.
- Concevoir des boucles de régulation PID pour maintenir le système à des conditions souhaitées de fonctionnement (exigences réglementaires sur la concentration d'azote et carbone).
- Déterminer et analyser de manière critique la meilleure solution au traitement des effluents à forte concentration en ammoniacale en matière de coûts d'exploitation et de valorisation énergétique des boues.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

– C.1.1 Analyser : étudier un système dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un système dans le cadre d'une approche transdisciplinaire avec ses dimensions scientifiques, économiques, humaines, etc.

o Jalon 1 : Analyser les aspects scientifiques du comportement global d'un système à envergure limitée (par exemple partie isolée d'un système complexe), incluant l'identification des facteurs qui influencent son comportement

– C.2.3 Identifier et acquérir de façon autonome les nouvelles connaissances et compétences nécessaires

o Jalon 2 : Assimiler les nouvelles connaissances au sein d'outils ou méthodes opérationnels et efficaces pour le problème donné

– C.4.2 Proposer une ou des solutions répondant à la question reformulée en termes de création de valeur et compléter par l'impact sur les autres parties prenantes et par la prise en compte des autres dimensions.

Quantifier la valeur créée par ces solutions. Arbitrer entre des solutions possibles

o Jalon 1 : Définir et présenter une ou des solutions qui répondent au besoin (re)formulé en qualifiant et quantifiant la valeur créée

– C.7.1 Sur le fond : Structurer ses idées et son argumentation, être synthétique (hypothèses, objectifs, résultats attendus, démarche et valeur créée)

o Jalon 2 : Adapter le fond et son argumentation en fonction d'interlocuteurs ou de contextes élargis, « avoir du répondant » pour défendre sa solution (maîtrise du sujet des interlocuteurs, valeurs, engagements, disponibilité, attention, etc.).

– C.7.2 Sur la relation à l'autre : Comprendre de façon évolutive les besoins et attentes de ses interlocuteurs.

Susciter des interactions, être pédagogue et créer un climat de confiance.

o Jalon 2 : Adapter le fond et son argumentation en fonction d'interlocuteurs ou de contextes élargis, « avoir du répondant » pour défendre sa solution (maîtrise du sujet des interlocuteurs, valeurs, engagements, disponibilité, attention, etc.).

# 2SC5292 – Système de support de vie pour le spatial

Responsables : **Hervé Duval**

Département de rattachement : **DOMINANTE - VIVANT, SANTÉ, ENVIRONNEMENT, DOMINANTE - GRANDS SYSTÈMES EN INTERACTION**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

L'enseignement Système de support de vie pour le spatial est l'un des 3 Enseignements d'Intégration (EI) qui concluent la Séquence Thématique n°5 (ST5) Commande de bioprocédés pour l'environnement et les biofabrications.

L'Agence spatiale Européenne (ESA) développe un système de support de vie biorégénératif permettant aux astronautes de vivre de façon autonome, sans ravitaillement de la Terre, lors de missions spatiales de longue durée. Cet enseignement d'intégration porte sur le bioprocédé qui permet de régénérer l'atmosphère de l'habitable. Il s'agit d'un photobioréacteur mettant en œuvre des microalgues qui consomment le CO<sub>2</sub>, produisent O<sub>2</sub> et des compléments nutritifs.

L'objectif est de modéliser et dimensionner le photobioréacteur pour 5 astronautes en autonomie totale pendant 1000 jours, assurer le contrôle de la production en O<sub>2</sub> via le transfert de lumière pour des critères ALiSSE raisonnables (en lien avec la fiabilité de fonctionnement, la sécurité et les risques pour l'équipage, le taux et l'efficacité du recyclage, les activités requises pour l'équipage, la consommation d'énergie, l'encombrement et la masse du système).

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Il n'y a pas de prérequis spécifique.

## Plan détaillé du cours (contenu)

- Suivi de culture de microalgues et caractérisation de la cinétique de croissance
- Pré-dimensionnement du photobioréacteur
- Modélisation multi-physique du photobioréacteur
- Implémentation du modèle sur Simulink
- Implémentation du couplage physique entre le photobioréacteur et l'habitable
- Stratégie de commande du photobioréacteur
- Implémentation de régulation sur Simulink
- Tests de robustesse
- Optimisation du dimensionnement et de la régulation



## Déroulement, organisation du cours

Cette activité pédagogique est de type Problem solving. Elle permet de se confronter au caractère multiphysique des bioprocédés, en mettant en œuvre les concepts introduits dans le cours spécifique de génie des procédés et dans le cours commun d'automatique.

L'enseignement est programmé sur une semaine "bloquée". Il commence par une demi-journée de lancement de projet. Pendant la semaine, les étudiants travaillent par groupes de 4, encadrés par une équipe d'enseignants-chercheurs des laboratoires LGPM (génie des procédés) et L2S (automatique). Chaque groupe aborde les différentes facettes de la démarche de modélisation et de contrôle d'un bioprocédé et se familiarise avec la culture cellulaire dans le cadre de travaux pratiques.

Des points d'avancement seront réalisés quotidiennement : mise en commun des informations, apport méthodologique, compléments de cours. La semaine se termine par une séance de restitution l'après-midi du dernier jour devant des ingénieurs de l'ESA.

## Organisation de l'évaluation

L'évaluation prendra en compte : l'assiduité individuelle, l'implication du groupe, la pertinence du modèle multiphysique, la stratégie de contrôle-commande, le dimensionnement optimal proposé, la présentation orale, le rapport.

## Support de cours, bibliographie

Diapositives des différentes présentations, articles scientifiques et techniques seront fournis lors du cours.

## Moyens

Equipe enseignante : H. Duval (PR, CS, Département MEP, LGPM), S. Tebbani (PR, CS, Département MEP, L2S), B. Taidi (PR, CS, Département MEP, LGPM)

Taille de l'effectif : 30

Outils logiciels et nombre de licence nécessaire : Matlab Simulink (30)

Salles de TP (département et capacité d'accueil) : salle de culture cellulaire (LGPM)

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue du cours, les étudiants seront capables de :

1. dimensionner un bioréacteur ;
2. établir un modèle multiphysique en agrégeant des connaissances provenant de champs disciplinaires différents (biologie, génie des procédés, science des transferts) ;
3. établir une stratégie de commande de bioréacteur ;
4. avoir un regard critique sur un modèle et tester sa robustesse ;
5. déterminer expérimentalement la vitesse de prolifération d'une souche de microorganismes ;
6. présenter de façon structurée et argumentée une démarche complète d'automatique intégrant modélisation, observation et contrôle-commande.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C1. Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques
- C2. Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers
- C4. Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients
- C6. Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique
- C7. Savoir convaincre



# 2SC5293 – Supervision avancée de la production de biogaz à partir de déchets

Responsables : **Julien Colin**

Département de rattachement : **DOMINANTE - VIVANT, SANTÉ, ENVIRONNEMENT, DOMINANTE - GRANDS SYSTÈMES EN INTERACTION**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

La digestion anaérobie est un procédé naturel de dégradation de substance organique par des micro-organismes (bactéries et archaea) en l'absence d'oxygène (conditions anaérobies). Ce procédé permet de récupérer une fraction de l'énergie contenue dans les déchets sous forme de biogaz, mélange de méthane et de CO<sub>2</sub>. La généralisation de ces technologies permettrait d'une part de réduire considérablement la demande énergétique nécessaire pour traiter les déchets (10% de l'énergie utilisée sur la planète) mais pourrait à terme constituer une source d'énergie.

Le procédé de digestion anaérobie est toutefois complexe, et implique plusieurs centaines d'espèces de microorganismes. Par ailleurs, il est instable, et des composés intermédiaire (acides gras volatils) peuvent, dans certaines conditions s'accumuler et conduire à l'arrêt total du réacteur. Pour éviter ce type d'accident, un suivi très précis et couteux est nécessaire.

L'objectif de l'EI est de proposer et développer des stratégies de supervision et de contrôle pour réduire le risque d'acidification du réacteur et pour optimiser la production d'énergie à partir des déchets.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Il n'y a pas de prérequis spécifique.

## Plan détaillé du cours (contenu)

Les élèves devront tout d'abord comprendre un modèle de digestion anaérobie qui sera fourni et le simuler pour différentes conditions. Ils devront notamment simuler l'acidification du réacteur en conditions de trop forte charge du réacteur. Ils doivent proposer un simulateur avec un modèle simple pour ce système complexe, pour les besoins de la mise en œuvre des lois de commande et d'estimation.

Dans un second temps, ils devront développer des observateurs pour évaluer certains composés intermédiaires, et en particulier les acides gras volatils. Il est souhaitable qu'une dynamique d'auto-calibration soit introduite pour prendre en compte les dérives lentes de certains paramètres du modèle.

D'autres groupes utiliseront les modèles pour développer des stratégies de commande. Différentes approches seront mises en œuvre (par exemple PID, commande par retour d'état).

Au final, un superviseur sera proposé en associant un (ou des) observateur(s) à une loi de commande. Les performances des différents superviseurs seront comparées pour différents scénarii de fonctionnement du réacteur.

## Déroulement, organisation du cours

Les étudiants seront répartis en groupe. Le projet sera réalisé en organisant le travail en interne de chaque groupe afin d'aborder les différentes thématiques du cahier des charges . Des outils analytiques et numériques devront être mis en œuvre par les élèves afin de répondre aux problèmes soulevés.

Les hypothèses et données considérées devront être questionnées; ces éléments amèneront notamment les élèves à devoir itérer sur leurs choix de conception afin d'obtenir des solutions pertinentes.

## Organisation de l'évaluation

L'évaluation se fera à partir d'un contrôle continu, rapport et d'une évaluation orale.

## Support de cours, bibliographie

- Anaerobic Digestion Model No. 1, IWA Publishing, 2002.
- Dynamical model development and parameter identification for an anaerobic wastewater treatment process, O. Bernard et al., *Biotechnology and bioengineering*, 75(4), 424–438, 2001.
- Nonlinear adaptive control for bioreactors with unknown kinetics, L. Mailleret, O. Bernard, and J.-P. Steyer, *Automatica*, 40(8), 1379–1385, 2004.
- On-line Estimation and Adaptive Control of Bioreactors, G. Bastin, D. Dochain, Elsevier, 1990.
- Automatic Control of Bioprocesses, éditeur D. Dochain. Wiley-ISTE, 2008.

## Moyens

- Simulateur complet du bioprocédé à étudier.
- Etat de l'art et documentation décrivant le bioprocédé.
- Encadrement : chercheurs de l'INRIA (Sophia-Antipolis), Enseignants-chercheurs de l'Ecole, avec contact régulier avec le partenaire industriel.
- Travail en groupe.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de cet enseignement, les élèves seront capables de :

- Modéliser un bioprocédé de culture d'un micro-organisme pour une application environnementale
- Concevoir des capteurs logiciels pour reconstruire les variables non disponibles en temps réel
- Concevoir des lois de commande pour maintenir le système à des conditions souhaitées de fonctionnement (pH, température, concentrations, etc), pour maximiser la productivité du bioprocédé
- Analyser la solution proposée (y compris analyse économique et empreinte écologique) et être critique vis-à-vis des résultats obtenus.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

– C.1.1 Analyser : étudier un système dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un système dans le cadre d'une approche transdisciplinaire avec ses dimensions scientifiques, économiques, humaines, etc.

o Jalon 1 : Analyser les aspects scientifiques du comportement global d'un système à envergure limitée (par exemple partie isolée d'un système complexe), incluant l'identification des facteurs qui influencent son comportement

– C.1.2 Modéliser : utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes

o Jalon 1 : Choisir le modèle adapté (parmi plusieurs possibles) pour un problème donné grâce aux bons choix d'échelle de modélisation et d'hypothèses simplificatrices

o Jalon 2 : Assimiler les nouvelles connaissances au sein d'outils ou méthodes opérationnels et efficaces pour le problème donné

– C.4.2 Proposer une ou des solutions répondant à la question reformulée en termes de création de valeur et compléter par l'impact sur les autres parties prenantes et par la prise en compte des autres dimensions.

Quantifier la valeur créée par ces solutions. Arbitrer entre des solutions possibles

o Jalon 1 : Définir et présenter une ou des solutions qui répondent au besoin (re)formulé en qualifiant et quantifiant la valeur créée

– C.7.1 Sur le fond : Structurer ses idées et son argumentation, être synthétique (hypothèses, objectifs, résultats attendus, démarche et valeur créée)

o Jalon 2 : Adapter le fond et son argumentation en fonction d'interlocuteurs ou de contextes élargis, « avoir du répondant » pour défendre sa solution (maîtrise du sujet des interlocuteurs, valeurs, engagements, disponibilité, attention, etc.).

– C.7.2 Sur la relation à l'autre : Comprendre de façon évolutive les besoins et attentes de ses interlocuteurs.

Susciter des interactions, être pédagogue et créer un climat de confiance.

o Jalon 2 : Adapter le fond et son argumentation en fonction d'interlocuteurs ou de contextes élargis, « avoir du répondant » pour défendre sa solution (maîtrise du sujet des interlocuteurs, valeurs, engagements, disponibilité, attention, etc.).

# ST5 - 53 - VEHICULE AUTONOME ET CONNECTE

Dominante : **SCOC (Systèmes Communicants et Objets Connectés)**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

---

## Problématique d'ingénieur

Aujourd'hui, le véhicule embarque une multitude de capteurs et de traitements électroniques qui permettent une aide à la conduite voire même un certain niveau d'autonomie dans des contextes bien définis. Le véhicule actuel est également connecté pour fournir notamment des informations sur l'état du trafic et sur sa navigation. D'après les roadmaps du domaine, à l'horizon 2030, le véhicule devrait être soumis à une connectivité complète via des systèmes de communication intelligents et des technologies adaptées pour permettre une autonomie totale réduisant le conducteur à un simple passager qui n'aura plus qu'à indiquer sa destination avant son départ. Mais avant d'en arriver là, les ingénieurs devront contribuer à répondre à de nombreuses questions dont on peut donner un avant-goût. Tout d'abord sur le plan technique, la technologie pourra-t-elle totalement remplacer le conducteur ? Ou encore, comment concevoir et valider de tels systèmes en garantissant la fiabilité et la sécurité ? Du point de vue éthique et réglementaire, comment protéger les données personnelles sachant que le véhicule sera à tout instant connecté à un réseau et donc susceptible de communiquer des informations à l'extérieur de l'habitacle ? Sur le plan économique, des bouleversements sont à prévoir dans la chaîne de valeur du secteur automobile avec la montée en puissance des GAFAM dans le domaine et la gestion future des systèmes de véhicules par des opérateurs. Au niveau sociétal ensuite, quels nouveaux services pourront voir le jour ? Du point de vue environnemental enfin, comment faire pour que le véhicule autonome et connecté permette de minimiser notre empreinte écologique ?

Au cours de ce sujet de séquence thématique, les élèves seront formés aux méthodes de modélisation fonctionnelle, étape préliminaire à toute conception de système complexe, et aux techniques de contrôle-commande. Un cours spécifiquement décliné sur la problématique apportera un panorama des technologies utilisées dans ce contexte comme les méthodes numériques de modélisation, simulation et validation véhicules ; les architectures électroniques embarquées ; les traitements de fusion de données multi-capteur ; l'intelligence artificielle pour le véhicule ; et les protocoles de communication V2V et V2X. Au cours de l'enseignement d'intégration, les élèves devront mettre en perspective l'ensemble des connaissances acquises en partant d'un cahier des charges et en allant jusqu'à la validation sur plateforme physique, constituée ici d'un système de robots roulants.

## Prérequis conseillés

Il est conseillé d'avoir suivi le cours de SPI de Systèmes Electroniques et le cours de SPI de Réseaux et Sécurité.

## Modules contexte et enjeux

Cette partie se structure en conférences et table ronde permettant d'appréhender la problématique, les technologies et les enjeux liés au véhicule autonome et connecté, à savoir les enjeux sociétaux associés comme la sécurité, l'environnement, la fluidification du trafic, les enjeux sociaux-économiques et industriels.

## Cours spécifique (60 HEE) : Architecture et technologie du véhicule autonome

### Brève description :

Une première partie s'intéresse à définir un système de mobilité du véhicule autonome et en particulier son architecture fonctionnelle (perception, traitement, communication, actionnement mais aussi propulsion et

---

conversion d'énergie) ainsi que les méthodes de développement et validation des systèmes de conduite autonome ou d'aide à la conduite (AD/ADAS). Le cours se focalise ensuite sur l'architecture électrique et électronique du véhicule (réseau d'alimentation, calculateurs, bus de communication et capteurs embarqués). Il s'agit également de comprendre les contraintes physiques et environnementales auxquelles est soumise l'électronique embarquée, appréhender les problématiques de sûreté de fonctionnement et de traitements en temps réel cruciales dans le domaine automobile. Une partie de ces concepts sont abordés et approfondis via une séance de type atelier en petit groupe autour d'une étude de cas d'un véhicule autonome de niveau 4. Aussi, une séance de travaux pratiques permet de mettre en œuvre un traitement d'image embarqué temps réel avec des outils de génération automatique de code sur des cartes électroniques.

Une deuxième partie adresse les traitements et algorithmes mis en œuvre pour le véhicule autonome. Les lois de contrôle spécifiques au véhicule autonome sont abordées (Linear Quadratic Regulator, filtrage de Kalman, réseaux de neurones, logique floue...) ainsi que les techniques d'intelligence artificielle (IA) pertinentes pour le véhicule autonome (apprentissage supervisé, IA connexionniste). Sur ce volet traitement, une séance de travaux pratiques permet d'étudier et tester une loi de commande pour parking automatique, une autre vise à étudier les techniques de base de traitement d'image et une troisième étudie des algorithmes de deep learning dans un contexte automobile.

Une troisième partie s'intéresse aux technologies de communications véhiculaires avec une comparaison des moyens de communications existantes. L'évaluation des performances d'un réseau de communications pour véhicules sera abordée et ceci comporte une étude du bilan de liaison pour la couverture ainsi qu'une analyse des différents mécanismes d'accès au canal (Aloha, Slotted-Aloha et CSMA/CA). Une séance de travaux pratiques permet la simulation et la mise en pratique et de concepts vus dans cette partie.

## Enseignement d'intégration : Conception d'un système de livraison urbaine "dernier kilomètre" par véhicules autonomes et connectés

- **Partenaire associé** : Renault, Mathworks
- **Lieu** : Campus Paris-Saclay
- **Brève description** : Les enjeux du véhicule autonome et connecté ne concernent pas uniquement le secteur de l'automobile. L'enseignement d'intégration proposé ici vous permettra d'appréhender d'une part la démarche de conception d'un système complexe et critique, et d'autre part la pluralité des problématiques du véhicule autonome et connecté, au travers d'un scénario industriel dans un contexte adapté. Le scénario retenu est celui d'une livraison dite "dernier kilomètre", précisé ci-dessous.  
Le coût et le délai de livraison d'un colis par transporteur est fortement impacté par le dernier kilomètre, notamment en milieu urbain. En raison des embouteillages et du stationnement, les camions de livraison pourraient avantageusement être relayés à l'entrée des grandes villes par des moyens de transport plus légers et adaptés à l'environnement urbain.  
L'utilisation de vélos s'avère trop coûteuse ; les transporteurs envisagent à court terme une livraison entièrement automatisée sur le dernier kilomètre de la livraison. La solution consiste en la gestion d'une flotte de robots autonomes et connectés effectuant les trajets de livraison en fonction des arrivages, des adresses de livraison et des caractéristiques des robots.  
Les camions de livraisons déposent les robots à l'entrée des centres-villes. Chaque robot a en charge un ou plusieurs colis et un trajet à effectuer pour livrer le plus rapidement et le plus efficacement possible l'ensemble des colis. En plus d'être capables de se déplacer efficacement en milieu urbain en évitant obstacles, piétons et autres véhicules, les robots doivent communiquer entre eux (V2V) et avec l'infrastructure (V2I) afin par exemple d'éviter les points de congestion (manifestations, zones de travaux, etc.) et avoir leur trajet replanifié en temps réel.  
Vous travaillerez dans une équipe en charge de concevoir un tel système de livraison. Vous suivrez une démarche d'ingénierie système orientée modèle pour spécifier les fonctionnalités du système. Vous adopterez une méthodologie de modélisation pour développer les algorithmes nécessaires (contrôle/commande, fusion de capteurs, fusion de données, prise de décision et télécommunications) pour répondre aux spécifications. Une plateforme de test à échelle réduite vous permettra d'évaluer la qualité du système de livraison obtenu et perfectionner les algorithmes.
- Au cours de ce travail, vous serez amenés à prendre différentes hauteurs de vue : système en établissant la stratégie de contrôle/commande et de communication entre les véhicules ; fonctions au travers des algorithmes ; composants par vos choix d'implémentation de ces algorithmes afin de prendre en compte les contraintes spécifiques à l'application (latence, ressources limitées, etc.)

# 2SC5310 – Architecture et technologie du véhicule autonome

Responsables : **Caroline Lelandais Perrault**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT ÉLECTRONIQUE ET ÉLECTROMAGNÉTISME**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours a pour objectif de familiariser les étudiants avec les architectures et technologies mises en œuvre pour le véhicule autonome et connecté (VAC) ainsi que les moyens de développement.

Pour cela, il est nécessaire de définir ce qu'est un système de mobilité dans lequel s'insère le véhicule puis de comprendre l'architecture fonctionnelle du VAC. Les fonctions du VAC étant essentiellement composées de systèmes électriques et électroniques, l'architecture matérielle électrique et électronique est présentée ainsi que ses spécificités et contraintes dues à l'environnement dans lequel évolue l'automobile. Au niveau matériel également, les capteurs intelligents et les aspects temps réel embarqués des traitements sont étudiés. Au niveau des traitements, les lois de contrôle classiques ou plus avancées, le traitement d'image et l'intelligence artificielle sont abordés. Au niveau de la communication, sont étudiées les technologies « véhicule-to-vehicle/véhicule-to-infrastructure » (V2X), les protocoles associés, les caractéristiques et les contraintes des canaux de communication pour l'application. Enfin, au niveau de la validation d'un véhicule, le processus de développement tel que déroulé chez les constructeurs est présenté.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Pour suivre cette séquence thématique, il est recommandé d'avoir suivi un des cours de sciences pour l'ingénieur Systèmes Electroniques (deux occurrences en SG1 et deux occurrences en SG3) et un des cours de sciences pour l'ingénieur de Réseaux et Sécurité (une occurrence en SG1 et deux occurrences en SG3). Le cours de Modélisation donné en ST2 est également un prérequis.

## Plan détaillé du cours (contenu)

I Système de mobilité et électronique embarquée

- Définition du système de mobilité (infrastructure/ véhicule) et architecture du véhicule autonome et connecté (perception, traitement, communication, actionnement mais aussi propulsion et conversion d'énergie).
- Processus de développement des AD/ADAS
- Architecture électrique et électronique du véhicule (réseau d'alimentation, calculateurs, bus de communications).
- Spécificités « hardware » en électronique automobile (environnement physico-chimique, CEM, fiabilité, procédé de fabrication des cartes, sûreté de fonctionnement)

II Algorithmes et traitement embarqués

- Traitement d'images
- Développement embarqué sur cartes
- Lois de contrôle pour le véhicule autonome (LQR, filtrage de Kalman, réseaux de neurones, logique floue...)
- Intelligence artificielle pour véhicules autonomes

### III Communication du véhicule avec son environnement

- Technologies V2X
- Accès au canal, trafic et performances

Remarque : ce plan ne reflète pas systématiquement la chronologie du cours

## Déroulement, organisation du cours

Ce cours est constitué pour moitié de cours magistraux et pour moitié de travaux pratiques

## Organisation de l'évaluation

L'examen final du cours spécifique est un examen écrit d'une heure et demi et permet d'évaluer les compétences C1 et C6. Certains travaux pratiques sont également évalués et contribuent à évaluer la compétence C6.

## Moyens

Les cours seront enseignés par des professeurs de CentraleSupélec et par des industriels experts exerçant pour des constructeurs automobiles ou pour des acteurs de l'électronique automobile.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de comprendre l'architecture électrique et électronique d'un véhicule autonome et connecté, les contraintes physiques auxquelles le véhicule doit faire face, les technologies de communication entre le véhicule et son environnement et la méthodologie de développement de tels systèmes. Il sera capable de modéliser et simuler des fonctions du véhicule autonome et connecté dans un contexte simplifié, en particulier au niveau des fonctions de perception, de contrôle et de communication. Il sera capable d'implémenter et tester un algorithme de détection sur un système physique de cartes électroniques.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

C6 : Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

# 2SC5390 – Conception d'un système de livraison urbaine "dernier kilomètre" par véhicules autonomes et connectés

Responsables : **Morgan Roger**

Département de rattachement : **DOMINANTE - SYSTÈMES COMMUNICANTS ET OBJETS CONNECTÉS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Les enjeux du véhicule autonome et connecté ne concernent pas uniquement le secteur de l'automobile. L'enseignement d'intégration proposé ici vous permet d'appréhender d'une part la démarche de conception d'un système complexe et critique, et d'autre part la pluralité des problématiques du véhicule autonome et connecté, au travers d'un scénario industriel dans un contexte adapté.

Le scénario retenu est celui d'une livraison dite "dernier kilomètre". Le coût et le délai de livraison d'un colis par transporteur est fortement impacté par le dernier kilomètre, notamment en milieu urbain. En raison des embouteillages et du stationnement, les camions de livraison pourraient avantageusement être relayés à l'entrée des grandes villes par des moyens de transport plus légers et adaptés à l'environnement urbain.

L'utilisation de vélos s'avère trop coûteuse ; les transporteurs envisagent à court terme une livraison entièrement automatisée sur le dernier kilomètre. La solution consiste en la gestion d'une flotte de robots autonomes et connectés effectuant les trajets de livraison en fonction des arrivages, des adresses de livraison et des caractéristiques des robots.

Vous travaillez dans une équipe en charge de concevoir un tel système de livraison. Dans ce cadre, vous suivez une démarche d'ingénierie système orientée modèle pour spécifier les fonctionnalités du système. Vous adoptez une méthodologie de modélisation pour développer les algorithmes nécessaires (contrôle/commande, fusion de capteurs, fusion de données, prise de décision et télécommunications) pour répondre aux spécifications. Une plateforme de test à échelle réduite vous permet d'évaluer la qualité du système de livraison obtenu et perfectionner les algorithmes.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Cours de sciences pour l'ingénieur 1A "Systèmes électroniques" conseillé

Cours de sciences pour l'ingénieur 1A "Réseaux et sécurité" conseillé

Cours spécifique de la ST "Architecture et technologies pour le Véhicule intelligent et communicant"

## Plan détaillé du cours (contenu)

Les aspects techniques suivants sont mis en oeuvre dans cet enseignement d'intégration :

- analyse fonctionnelle du besoin, spécifications système
- modélisation système
- machines d'état



- loi de commande
- télécommunications
- protocole de communications
- traitement d'image
- fusion de capteurs
- traitement embarqué et temps réel
- répartition calculatoire hardware/software

## Déroulement, organisation du cours

L'objectif est de réaliser une preuve de concept technique sur une plateforme à échelle réduite constituée de robots roulant sur un support adapté représentant schématiquement l'environnement urbain. Les équipes de 5 ou 6 étudiants sont constituées au préalable de façon à présenter un large spectre de compétences. Après une première analyse fonctionnelle du système basée sur un *brainstorming*, les équipes décident de leur organisation interne afin de traiter en parallèle et avec cohérence les différents aspects : matériel, modélisation, intelligence embarquée, connectivité. Chaque équipe se voit confier un robot et peut accéder aux salles de test afin de valider en situation le comportement du système et affiner ses fonctionnalités. La dernière journée de la semaine est consacrée à la préparation de l'évaluation et à l'évaluation en elle-même.

## Organisation de l'évaluation

L'évaluation est faite par des points d'avancement réguliers avec l'équipe d'encadrement pendant la semaine (un par demi-journée), ainsi que lors d'une évaluation en fin de projet constituée d'une présentation orale décrivant les choix de conception et les innovations du système, et de démonstrations des performances obtenues à la fois en simulation et en situation réelle sur la plateforme de test, devant un panel d'enseignants et d'experts industriels. Elle se base sur l'ensemble des critères suivants : maîtrise technique, conformité des résultats aux attentes, qualité de la communication, originalité du travail et sérieux du travail.

## Moyens

*Moyens humains* : une équipe d'enseignants spécialistes des différents domaines d'ingénierie concernés (électronique, télécommunications, modélisation, traitement du signal) présents 100% du temps ; des experts industriels du domaine automobile (Renault) et de la modélisation (Mathworks) en visite pendant la semaine et présents pour l'évaluation.

*Moyens logistiques* : salles de travail pour les équipes d'étudiants, salles d'envergure pour les plateformes de test et d'évaluation, un QG enseignant.

*Moyens matériels* : robots roulants (incluant 4 roues motrices, une carte Arduino, un nano-ordinateur Raspberry Pi, une caméra et plusieurs autres capteurs embarqués, batteries).

*Moyens logiciels* : Matlab/Simulink, Linux, Python, C++, OpenCV, ...

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Les compétences suivantes seront évaluées lors de cet enseignement : C2, C4 et C7. L'évaluation de ces compétences sera basée à la fois sur les points d'avancement avec l'équipe d'encadrants (un par demi-journée), sur la démonstration des performances du système, et sur la soutenance finale

# ST5 - 54 - L'ECO-QUARTIER, UN SYSTEME COMPLEXE. AMENAGEMENT DURABLE & MAGAGEMENT DE PROJET COMPLEXE.

**Dominante : CVT (Construction, Ville, Transport) et GSI (Grands Systèmes en Interaction)**

**Langue d'enseignement : Français**

**Campus où le cours est proposé : Paris Saclay**

---

## Problématique d'ingénieur

L'éco-quartier est un cas intéressant de système complexe. Il nécessite une approche pluridisciplinaire en combinant l'immobilier et la construction, les mobilités (flux et infrastructures), les réseaux urbains, les problématiques de consommation des ressources naturelles (eaux, énergies, déchets) mais aussi la géographie, la sociologie et l'histoire des lieux et des gens. Il implique une mise en œuvre à des échelles variées depuis les décisions politiques nécessaires à son émergence et à sa réalisation, en passant par l'inscription géographique dans le territoire, jusqu'au choix des modes de chauffage et d'éclairage de chaque logement.

- Le marché de l'aménagement est en pleine transformation, les aménageurs publics cèdent du terrain aux aménageurs privés qui émergent chez les différents promoteurs immobiliers.
- La problématique d'ingénieur de ce sujet de séquence thématique est la suivante : comment aborder de front l'ensemble des études nécessaires à la fabrication d'un éco-quartier afin de prendre un ensemble cohérent de décisions ?

Les différentes activités pédagogiques permettront aux étudiants d'acquérir différentes compétences techniques et managériales :

Savoir concevoir ou transformer les systèmes complexes que sont les éco-quartiers en intégrant les nombreuses parties prenantes ayant des rôles et intérêts différents, voire divergents,

Prendre en compte des paramètres de développement durable pour garantir d'aller vers la notion d'éco-quartier

Savoir concevoir et planifier de grands projets complexes, qui peuvent être considérés comme de multiples projets interdépendants les uns des autres

## Prérequis nécessaires

Niveau de français suffisant pour pouvoir lire et comprendre des textes / articles en français et suivre des cours délivrés en français sans traduction simultanée et sans support écrit

## Modules contexte et enjeux :

Cette partie implique des acteurs majeurs du domaine qui partageront leur vision et leur feuille de route. Elle comporte la présentation du projet d'aménagement du plateau de Saclay par l'EPA Paris Saclay, la visite d'un projet d'aménagement réalisé / en cours de réalisation en Ile de France (et si possible à Paris), la présentation de projets internationaux par des acteurs variés.

## Cours spécifique (60 HEE) : Aménagement et urbanisme durable

Le cours spécifique permet d'aborder les principales disciplines qui constituent le projet urbain, et de préparer la réalisation des différents livrables du projet développé dans le cadre de l'EI.

Disciplines : Initiation au jeu d'acteurs et à la chaîne de valeur de l'immobilier, smart city, ville durable, agriculture urbaine et péri-urbaine, économie circulaire, enjeux de l'énergie, Grand Paris Express et mobilité, planification urbaine et référentiel éco-quartier, coordination de décisions interdépendantes (scénario).

---

Modalités pédagogiques : les cours disciplinaires sont le plus souvent organisés avec une séance de TD qui permet d'approfondir les concepts vus en cours, et de mettre en pratique des outils spécifiques à chaque discipline : cartographie, formalisation de scénarii, analyse territoriale.

## **Enseignement d'intégration : Projet de conception d'un éco-quartier – le cas de Corbeville**

- **Partenaire associé :**
- **Lieu :** Campus Paris-Saclay – visite de site obligatoire
- **Brève description :**

Comment construire la ville ? La ville est constituée de différents ouvrages : les rues et les espaces publics, les réseaux urbains et l'énergie en particulier, les transports en commun et individuels, les immeubles et équipements... Des outils de management de projets complexes sont ici appliqués pour décortiquer le jeu d'acteurs qui permet la transformation de la ville et aborder de front l'ensemble des disciplines et des échelles de territoires permettant de réaliser ces grands projets.

La mise en situation correspond à un ou plusieurs scénario(s) modificatif(s) majeur(s) (imaginaire(s)): décalage de 20 ans de la ligne 18 du métro ou bien remplacement du métro par un tramway ou tout autre scénario... . Un concours de maîtrise d'œuvre urbaine est lancé pour prendre en compte cette modification fondamentale.

Les objectifs pédagogiques sont les suivants :

- Manipuler sur un cas concret les principaux concepts, méthodes et outils liés à un projet complexe d'aménagement et de construction durable. Le caractère générique et réutilisable à d'autres contextes sera également important.
- Acquérir un premier ensemble de connaissances relatif aux champs sectoriels de la planification urbaine, du montage immobilier, des smart grids et autres réseaux urbains, des mobilités (intermodalité et infrastructures notamment).

Au terme de l'EI, les étudiant(e)s auront expérimenté les systèmes de décision propres aux projets d'aménagement urbain en ayant analysé les étapes clés de spécification, conception et planification de tels projets.

Livrables : Diagnostic du territoire, modélisation et exploration d'alternatives, bilan économique de l'aménagement et de promotion immobilière, convergence de multiples décisions coordonnées, schématisation / représentation, scénarisation de situations d'usage, macro-plan.

# 2SC5410 – Aménagement et urbanisme durable

Responsables : **Frédérique Delmas-Jaubert**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ENERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Cours ST**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Le cours spécifique intitulé Aménagement et Urbanisme Durable – AMUD - apportera les connaissances de base relatives à la chaîne de valeur de l'immobilier et de la construction, aux référentiels de ville durable et construction durable. On s'intéressera également à la façon dont les modèles traditionnels de création de valeur sont bouleversés, aux relations entre économie circulaire, ville et environnement, et aux impacts sur les ressources naturelles.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

Les êtres humains évoluent dans un cadre qu'ils contribuent à façonner : cadre bâti, espaces naturels aménagés, infrastructures de transport et espaces publics constituent les ingrédients du cadre de vie que nous proposons d'étudier. Ces aménagements et les comportements des hommes et des femmes qui y vivent ont un impact sur les ressources naturelles que sont l'eau, l'air et l'énergie. L'ensemble de ces pratiques sont aujourd'hui bousculées par la montée en puissance de l'économie numérique.

- Le référentiel Ecoquartier, porté par le ministère de la Transition écologique
- Introduction à la chaîne de valeur et management d'une opération de construction
  - Promotion immobilière
  - Bilan de ZAC
  - Concepteurs, entreprises de travaux et autres prestataires : qui fait quoi ?
  - Valeur économique et valeur environnementale
- Management des systèmes complexes : des outils pour construire des scénarios comprenant des décisions interdépendantes
- Économie circulaire
  - Les 5 piliers de l'économie circulaire appliqués à la construction seront présentés en cours puis utilisés en format TD.
- Smart city et Transports, le Grand Paris Express
- Les enjeux de l'agriculture en lien avec l'urbanisation : l'agriculture de plein champs, l'agriculture urbaine et suburbaine
- Impact sur la ressource Eau de l'urbanisation
  - Effets de l'urbanisation sur la ressource eau

- Techniques traditionnelles et innovantes : installations industrielles et gestion alternative
  - Résilience urbaine et gestion des risques liés à l'eau
  - un aperçu historique du territoire de Milan
- Energie
- Les consommations des bâtiments et les nouveaux usages digitaux
  - La question de l'échelle et la mutualisation : réseaux de chaleur <> chaudières individuelles
  - Les ressources naturelles et leurs limites

## Déroulement, organisation du cours

Cet enseignement comprend :

- Des cours magistraux, délivrés par des enseignants de l'école et des vacataires sur le campus de Gif
- Des cours in situ, dans le cadre de visites, sur les thématiques de morphologie urbaine, typologies des espaces publics, frontières entre espaces publics et espaces privés
- Des TD par petits groupes pour approfondir un sujet

## Organisation de l'évaluation

- Rédaction en petit groupe d'un diagnostic territorial, en s'appuyant sur les séances de TD (noté sur 9 points)
- Examen final : exercices et rédaction, QCM (noté sur 11 points) durée de l'examen final : 1h30

## Support de cours, bibliographie

<http://www.modeleseconomiquesurbains.com/>

<https://www.iau-idf.fr/>

<https://www.apur.org/fr>

<https://www.societedugrandparis.fr/sgp>

<https://www.epaps.fr/>

<https://www.urw.com/fr-fr>

<https://www.urbanera.fr/>

<https://www.citelum.fr/>

<https://www.ibicity.fr/blog/>

## Moyens

Les cours sont dispensés par des Professeurs Chargés de Cours (Frédérique Delmas, François Cointe, Arnaud Lafont), des enseignants-chercheurs (Franck Marle, Yann Leroy, François Cluzel, Flore Vallet), et des vacataires (Olivier Ledru, Romain Iliou).

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Trois objectifs principaux qui concernent les acteurs, les enjeux et la transformation numérique de la ville :

- A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable d'identifier les parties prenantes d'une opération immobilière et d'un projet urbain (C1.1), d'analyser un projet urbain sous plusieurs points de vue en comparant les intérêts des acteurs (C4.1), de lister les responsabilités sociales, et environnementales de chacun, au-delà de l'analyse de leur modèle économique (C9.2).
- A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de relier entre eux les principaux enjeux économiques, environnementaux, techniques et humains d'une opération urbaine (C1.1) et de comparer les différentes propositions de solutions (C3.6 et C9.4).
- A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de rendre compte des transformations de l'économie des services urbains avec la montée en puissance de l'économie numérique (C6.6).

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.1 : Etudier un problème dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un problème dans ses dimensions scientifiques, économiques et humaines

C2.1 : Avoir approfondi le domaine de l'aménagement urbain, dans l'ensemble de ses disciplines et de ses échelles

C3.6 : Evaluer l'efficacité, la faisabilité et la robustesse des solutions proposées et comparer aux solutions écartées

C4.1 : Identifier/analyser les besoins, les enjeux et les contraintes de plusieurs parties prenantes : habitants, usagers, industriels, fournisseurs de service, politiques, électeurs, ...

C6.6 : Comprendre l'économie numérique liée au concept de smart city et le bouleversement de l'économie traditionnelle de la ville

C9.2 : Percevoir le champ de responsabilité des structures auxquelles on contribue, en intégrant les dimensions environnementales, sociales et éthiques

C9.4 : Faire preuve de rigueur et d'esprit critique dans l'approche des problèmes sous tous les angles, scientifiques, humains et économiques

# 2SC5490 – Projet de conception d'un éco-quartier

Responsables : **Frédérique Delmas-Jaubert, Franck MARLE**

Département de rattachement : **DOMINANTE - GRANDS SYSTÈMES EN INTERACTION, DOMINANTE - CONSTRUCTION VILLE TRANSPORTS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

L'enseignement d'intégration a pour objet la conception préliminaire d'un éco-quartier.

Les projets sont menés principalement en sous-groupes de 4 à 5 étudiants, et un projet "Ecoquartier" est un assemblage de 4 sous-groupes.

Chaque sous-groupe doit trouver des solutions pour satisfaire un certain nombre d'objectifs (relatifs au référentiel éco-quartier). Certains objectifs sont à l'échelle du quartier et donc du groupe complet (forme urbaine, équilibre économique, etc...).

Différents livrables sont attendus au long de la semaine, au niveau individuel, des sous-groupes et du groupe entier.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Cours spécifique Aménagement et Urbanisme Durables de la ST5

## Plan détaillé du cours (contenu)

(sous réserve de confirmation du cas)

La ZAC de Corbeville : quel avenir à court, moyen et long terme pour l'espace autour de l'échangeur de la N118 sur le plateau du Moulon ? Un projet de ZAC a été soumis par l'EPAPS à enquête publique au printemps 2019. Pour les besoins du cas d'étude, nous modifierons un ou plusieurs paramètres majeurs des études déjà réalisées (orientation politique, solutions de mobilité, ambition de densité, ...) et il vous est proposé d'en étudier les conséquences sur le projet urbain.

Données d'entrée :

- Photo aériennes historiques
- Cartes disponibles sur géoportail (notamment IGN avec topographie, cours d'eau, et bâti existant)
- Données insee disponibles en ligne
- Programme et plan guide EPAPS du quartier de Moulon

## Déroulement, organisation du cours

Fonctionnement à base de sprints de 2 ou 3 1/2 journées.

Auto-organisation pendant le sprint, équipes interconnectées entre elles à l'intérieur du groupe, réunion de fin de sprint avec l'encadrant référent dédié au groupe.

Possibilité de recourir à des expertises spécifiques pendant certaines séances.  
Livrables à rendre au fur et à mesure de l'EI (calendrier donné le 1er jour).

## Organisation de l'évaluation

Contrôle continu, basé sur les livrables du sous-groupe et du groupe. Un livrable individuel récapitulatif est également évalué.

## Moyens

Encadrement et expertise par une équipe d'enseignants, architectes, urbanistes, ingénieurs, chercheurs, ...  
Franck Marle, Frédérique Delmas, Ulisse Vizzardi, Romain Iliou, François Cointe, François Cluzel, Arnaud Lafont,

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de l'enseignement d'intégration, les élèves auront progressé sur :

- la manipulation de connaissances scientifiques, techniques, mais aussi sociales et économiques pour concevoir et valider un tel système.
- l'utilisation d'une approche trans-disciplinaire de la conception, notamment au niveau des prises de décision.
- le travail en mode collaboratif multi-échelles pour arriver au résultat annoncé sur un projet d'une telle complexité.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.4 Spécifier, concevoir, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe  
C1.5 Mobiliser un large socle scientifique et technique dans le cadre d'une approche transdisciplinaire.  
C3.6 Evaluer l'efficacité, la faisabilité et la robustesse des solutions proposées  
C7.1 Convaincre sur le fond. Être clair sur les objectifs et les résultats attendus. Être rigoureux sur les hypothèses et la démarche. Structurer ses idées et son argumentation. Mettre en évidence la valeur créée.  
C9.4 Faire preuve de rigueur et d'esprit critique dans l'approche des problèmes sous tous les angles, scientifiques, humains et économiques



# ST5 - 55 - LUMIERE ET MATIERE : DEVELOPPEMENT D'INSTRUMENTS DE HAUTE TECHNOLOGIE

Dominante : **PNT (Physique & NanoTechnologie)**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

---

## Problématique d'ingénieur

La physique moderne trouve de nombreux débouchés à travers la maîtrise des propriétés de la matière et son ingénierie fonctionnelle. Dans cette ST il s'agira notamment de confronter les étudiants à la problématique d'innovation et développement produit lorsque celui-ci est un instrument de haute technologie mettant en œuvre la physique, développé en petit série pour la recherche ou la R&D. En particulier les étudiants répondront à :

- comment qualifier et répondre à un besoin client dans ce contexte ?
- quelle approche de conception, réalisation et évolution mettre en œuvre ?
- comment concevoir une solution pour un client intermédiaire qui lui-même a des clients aux besoins variés ?

Les enseignements d'intégration concernent des dispositifs à la pointe de la physique nécessitant une réelle approche d'ingénierie puisque les concepts théoriques sont appliqués à des dispositifs réels qui doivent intégrer des éléments de faisabilité à la fois technique et économique.

## Prérequis conseillés

Il est conseillé d'avoir suivi le cours de SPI de physique des Ondes ou de Sciences des transferts

## Modules contexte et enjeux

Cette partie s'articule autour de demi-journées de formation visant à présenter la séquence, les enseignements d'intégration et à introduire la thématique. Ainsi seront organisées les conférences/présentations suivantes :

- Présentation de la thématique et de ses enjeux
- Table-ronde métiers : C'est quoi un ingénieur physicien ?
- Visite d'une entreprise
- Présentation des EI

## Cours spécifique (60 HEE) : Physique de la matière

### Brève description :

Le cours donnera aux élèves les connaissances de base de la physique de la matière à l'état solide. On y abordera la cristallographie et la diffraction des ondes (notamment rayons X), les vibrations du réseau (phonons, effets thermiques), les états électroniques (modèle de Sommerfeld, théorie des bandes), ainsi que des sujets spécifiques : les semi-conducteurs, les défauts, la supraconductivité. Le but est de montrer aux élèves que la compréhension et la maîtrise des propriétés des matériaux passe par des études à l'échelle microscopique..

## Enseignement d'intégration : Synchrotron Beamline Design

– **Partenaire associé** : European Synchrotron Radiation Facility (ESRF, Grenoble), synchrotron SOLEIL (Gif-sur-Yvette), synchrotron NSLS (Brookhaven, USA)

– **Lieu** : Campus Paris-Saclay

– **Brève description** : les objectifs visés sont les suivants :

Dimensionner un dispositif à l'aide de notions de physique (moderne) de base et en faire la modélisation fonctionnelle.

Identifier les transferts thermiques pertinents, les modéliser, et dimensionner ces systèmes.

Connaître les points clés d'une étude d'avant-projet dans un contexte multidisciplinaire

Avoir des ordres de grandeurs réalistes sur les propriétés mécaniques et physiques standards des matériaux « courants ».

Réaliser un avant-projet de conception des instruments scientifiques étudiés en justifiant les choix opérés.

Travailler en équipe, connaître et pouvoir identifier les différents rôles des membres d'une équipe, animer, coordonner un groupe de travail, collecter et partager l'information, mettre en forme et exposer le travail réalisé (s'exprimer devant un auditoire / soutenance)

# 2SC5510 – Physique de la matière

Responsables : **Hichem Dammak**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT PHYSIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Cours ST**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

L'objectif du cours est de permettre aux élèves d'acquérir les connaissances de base de la physique des solides. Il s'agira, en s'appuyant sur des exemples spécifiques dans des secteurs de pointe comme les nanosciences ou l'opto-électronique:

- de les initier à ce vaste et riche domaine de la physique
- de leur donner les outils qui leur permettront de se confronter avec aisance aux nombreux enjeux qu'ouvre ce domaine dans les applications de demain.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Physique Quantique

Physique Statistique

Electromagnétisme dans le vide

## Plan détaillé du cours (contenu)

Plan du cours:

- L'ordre dans les solides : le réseau cristallin.
- Diffusion d'une onde électromagnétique par la matière – Diffraction.
- Métaux et conductivité : modèles de Drude et de Sommerfeld.
- Structure de bandes – Electrons dans les solides massifs et dans les nano-matériaux.
- Semiconducteurs – Puits quantiques : applications à l'opto-électronique.
- Jonction P-N (diode)
- Vibrations des solides – Phonons – Propriétés thermiques.

## Déroulement, organisation du cours

Cours magistraux (13,5 heures), travaux dirigés (15 heures)

## Organisation de l'évaluation

Contrôle final (CF) : Contrôle écrit (1h30) sans documents avec formulaire fourni.

Contrôle continu (CC) : 3 Quiz de 10 minutes en début d'une séance de cours

Note finale :  $NF=0,35 CC + 0,65 CF$

Note Session 1 :  $Max(NF,CF)$

Validation de la compétence C1 : Note brute à l'un des deux exercices indiqués du contrôle final est supérieure ou égale à 50%.

Validation de la compétence C2 : Note de la session 1 est supérieure ou égale à 50%.

Session 2 : Contrôle écrit (1h30) sans documents avec un formulaire fourni. Les notes du CC ne seront pas pris en compte.

## Support de cours, bibliographie

Polycopié

Physique de l'état solide, Ashcroft et Mermin

Physique du l'état solide, Kittel

## Moyens

Equipe enseignante : H. Dammak, B. Dkhil, J.M. Gillet

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin du cours les élèves sont censés savoir :

- 1) Déterminer le système cristallin et le réseau de Bravais d'un cristal et préciser la multiplicité de la maille choisie à partir de données géométriques d'un réseau d'atomes.
- 2) Exprimer les distances inter-réticulaires à l'aide des indices de Miller.
- 3) Appliquer la loi de Bragg pour interpréter les résultats d'une expérience de diffraction de rayonnement (X, neutron, électrons).
- 4) Identifier, parmi les courbes de relations de dispersion de phonons suivant une direction du réseau réciproque, les branches optiques, acoustique longitudinale et acoustique transversale ainsi que sa dégénérescence.
- 5) Appliquer le modèle des électrons libres pour déterminer les états électroniques dans un puits quantique en 1D ou 2D.
- 6) Appliquer le modèle des électrons libres pour calculer la densité des états électroniques et l'énergie de Fermi.
- 7) Appliquer le modèle des électrons libres pour déterminer la contribution des électrons à la chaleur spécifique.
- 8) Identifier, à partir des relations de dispersion d'énergie électronique, le caractère métallique, isolant ou semi-conducteur d'un cristal.
- 9) Déterminer la densité des porteurs dans un semi-conducteur intrinsèque ou dopé à partir d'un modèle des courbes de densités électroniques des bandes de valence et de conduction.
- 10) Décrire l'équilibre d'une jonction P-N (diode).
- 11) Déterminer la densité des états de phonons dans le modèle de Debye que ce soit en 1D, 2D ou 3D.
- 12) Calculer la contribution des phonons à la chaleur spécifique en utilisant le modèle de Debye.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.2 : Modéliser : utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes (acquis 5-9)

C1.3 : Résoudre : résoudre un problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation (acquis 1-4,10-12)

C2.1 : Approfondir un domaine des sciences de l'ingénieur ou une discipline scientifique

# 2SC5591 – Conception d'un faisceau Synchrotron

Responsables : **Pierre-Eymeric Janolin**

Département de rattachement : **DOMINANTE - PHYSIQUE ET NANOTECHNOLOGIES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours pluridisciplinaire est construit sur trois équipes d'une vingtaine d'élèves en charge de comprendre, concevoir et dimensionner les aspects physique, mécanique, thermique et matériaux des éléments technologiques clés d'une ligne de lumière synchrotron. L'utilisation d'outils de CAO est encouragée et une formation pourra être dispensée aux élèves qui ne seraient pas familiers avec ces outils.

Les équipes seront accompagnées par des experts travaillant dans des synchrotrons français et européen sous la forme d'entretiens par vidéoconférence.

Une équipe concevra une ligne de lumière permettant de réaliser une angiographie sur un patient humain, une autre concevra une ligne de lumière permettant de détecter un isotope cancérogène du chrome dans des cellules ovariennes de grenouille et la troisième équipe concevra une ligne de lumière permettant de résilier de la diffraction du rayonnement synchrotron sur des panneaux solaires à base de pérovskites hybrides.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Connaissances de base en physique moderne et transferts thermiques. Notions de mécanique.

## Plan détaillé du cours (contenu)

- Cristallographie, rayonnement d'une particule accélérée, fluorescence, absorption des rayonnements, diffusion, diffraction
- Transferts thermiques : convection, rayonnement, conduction, stationnaire et instationnaire, mécanique des fluides
- Conception Assistée par Ordinateur (CAO), maquette numérique, avant-projet de conception, pré-dimensionnement de systèmes mécaniques
- Choix des matériaux, propriétés mécaniques standards, résistance en milieu extrême, état de surface, méthodes d'élaboration et de mise en forme
- Travail en équipe dans le cadre d'une conduite de projet, animation de réunion, expression orale

## Déroulement, organisation du cours

Les élèves travailleront en mode projet pendant la semaine réservée.

Les élèves inscrits à ce cours doivent être présents à la soutenance finale, qui se fait habituellement au synchrotron SOLEIL dont une visite est prévue.

## Organisation de l'évaluation

1/2 travail de la semaine (évaluation des enseignants et des autres élèves de la ligne) et évaluation des compétences C1, C2, C4, C6

1/4 présentation (un membre du groupe présente et tous les membres du groupe ont la même note) et évaluation de la compétence C7

1/4 rapport final (note commune à toute la ligne), évaluation de la compétence C7

## Support de cours, bibliographie

Ouvrages de référence et bases de données informatiques seront mises à disposition lors de la semaine.

## Moyens

L'utilisation d'outils de CAO sera encouragée et pourra être valorisée lors de l'activité synchrotron :

- les élèves ayant déjà des connaissances en CAO (SPACECLAIM, SOLIDWORKS ...) pourront utiliser un de ces outils comme support à leur démarche de conception et de modélisation.
- Les élèves souhaitant se former à un outil de CAO pourront s'autoformer dans les semaines précédant le cours Synchrotron via des tutoriaux en ligne et la mise à disposition d'une licence du logiciel SPACECLAIM.

Il est à noter que des moyens alternatifs à la CAO et tout aussi pertinents pourront être utilisés pour modéliser les systèmes étudiés (dessins, maquettes ...). Cela sera le cas notamment pour certains éléments des lignes considérées.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Dimensionner à l'aide de notions de physique (moderne) de base
- Identifier des transferts thermiques pertinents, modéliser, dimensionner des systèmes
- Connaître les points clés d'une étude d'avant-projet dans un contexte multidisciplinaire
- Ordres de grandeurs réalistes sur les propriétés mécaniques et physiques standards des matériaux « courants ».
- Travailler en équipe, connaître et pouvoir identifier les différents rôles des membres d'une équipe, animer, coordonner un groupe de travail, collecter et partager l'information, mettre en forme et exposer le travail réalisé (s'exprimer devant un auditoire / soutenance)

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

C2 : Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers

C4 : Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients

C6 : Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

C7 : Savoir convaincre

# ST5 - 56 - SYSTEMES COMPLEXES INDUSTRIELS ET CRITIQUES A LOGICIELS PREPONDERANTS

Dominante **Info&Num (Informatique et Numérique)**

Langue d'enseignement : **Français**

Campus où le cours est proposé : **Paris-Saclay**

---

## Problématique d'ingénieur

Les objectifs de réduction de la consommation d'énergie et des émissions polluantes rendent nécessaire l'utilisation de systèmes énergétiques faisant appel à des sources dont les rendements et les caractéristiques sont complémentaires. Il en va ainsi des systèmes de production d'électricité où l'essor de la production renouvelable intermittente nécessite plus de flexibilité de la part des moyens de production classiques, et aussi du secteur des transports où les motorisations électrique et thermique se complètent avantageusement.

Ces systèmes multi énergie requièrent des modes de commande avancés pour tirer parti de la complémentarité des sources d'énergies, et satisfaire les besoins des usagers et les contraintes économiques, techniques et environnementales.

## Prérequis conseillés

Il est fortement conseillé d'avoir suivi au moins un des cours de SPI Sciences des Transferts ou Energie Electrique.

## Modules contexte et enjeux :

Cette partie s'organise autour de demi-journées de formation visant à présenter la séquence, l'enseignement d'intégration et à introduire les enjeux et verrous associés, en particulier sous les aspects économiques et liés à l'environnement social et géopolitique de la thématique.

## Cours spécifique (60 HEE) : Introduction à la production d'énergie

### Brève description :

Le cours se structure en deux parties :

Production d'énergie mécanique

- Moteurs à combustion interne : introduction aux moteurs à combustion interne (architecture, cycle thermodynamique, fonctionnement et contrôle, émissions polluantes, grandeurs basiques de dimensionnement)
- Turbomachines (éoliennes, turbines hydrauliques, turbines à gaz) : introduction aux turbomachines (architecture, fonctionnement, modes de contrôle, intérêt)

Conversion d'énergie électrique

- Structure des machines à courant alternatif, fonctionnement moteur/générateur
  - Convertisseurs électroniques.
  - Principes pour la variation de vitesse des machines (système machines et convertisseurs)
-

## Enseignement d'intégration n°1 : Régulation et commande de systèmes de production et de conversion d'énergie

**Partenaire associé :** EDF, GE Converteam

**Lieu :** Campus Paris-Saclay

### **Brève description :**

Les objectifs visés sont :

- Etre capable de modéliser un système physique industriel pour un objectif de commande
- Comprendre l'impact de la régulation d'une installation sur le fonctionnement global du système électrique
- Faire la modélisation fonctionnelle pour déterminer la stratégie de commande d'un système
- Etre en mesure de développer une loi de commande satisfaisant le cahier des charges
- Prendre en compte les spécificités des éléments de conversion pour les associer et créer un système

## Enseignement d'intégration n°2 : Groupe motopropulseur hybride

**Partenaire associé :** à confirmer

**Lieu :** Campus Paris-Saclay

### **Brève description :**

Les objectifs visés sont :

- Mettre en œuvre un modèle systémique de la chaîne de traction hybride
- Mettre en œuvre les outils de traitement numérique sous Matlab/Simulink
- Mettre en œuvre une démarche de contrôle de l'ensemble de la chaîne hybride du conducteur aux roues
- Introduction au dimensionnement sur cycle : complexité du système et contradiction de plusieurs objectifs à atteindre

## Enseignement d'intégration n°3 : Propulsion aéronautique hybride

**Partenaire associé :** Safran Tech

**Lieu :** Campus Paris-Saclay

### **Brève description :**

L'enseignement d'intégration traite de la gestion de la puissance dans le cadre d'un petit avion monomoteur doté d'une architecture énergétique hybride batteries/pile à combustible. L'avion est propulsé par une hélice alimentée par un moteur électrique et l'électricité est soit directement puisée dans des batteries soit générée par la combinaison de H<sub>2</sub> et O<sub>2</sub> dans une pile à combustible. Les objectifs sont les suivants :

- Réaliser une partie puis assembler l'ensemble du modèle systémique de l'architecture énergétique de l'avion hybride considéré
- Mettre en œuvre les outils de résolution numérique via Simulink et analyser les données recueillies
- Elaborer la stratégie de régulation du système en fonction de contraintes données
- Critiquer le modèle utilisé par rapport à l'état de l'art



# 2SC5610 – Introduction à la production d'énergie

Responsables : **Adrien Voldoire, Romaric Landfried**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SYSTÈMES D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Cours ST**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Les objectifs de réduction de la consommation d'énergie et des émissions polluantes rendent nécessaire l'utilisation de systèmes énergétiques faisant appel à des sources dont les rendements et les caractéristiques sont complémentaires. Il en va ainsi des systèmes de production d'électricité où l'essor de la production renouvelable intermittente nécessite plus de flexibilité de la part des moyens de production classiques, et aussi du secteur des transports où les motorisations électrique et thermique se complètent avantageusement. Ces systèmes multi énergie requièrent des modes de commande avancés pour tirer parti de la complémentarité des sources d'énergies, et satisfaire les besoins des usagers et les contraintes économiques, techniques et environnementales.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Sciences des Transferts, Energie Electrique : cours de sciences pour l'ingénieur conseillés

## Plan détaillé du cours (contenu)

### 1. Conversion d'énergie thermique

Turbomachines (turboréacteurs, turboalternateurs)

Moteurs à combustion interne

### 2. Conversion d'énergie électrique

Introduction aux machines à courant alternatifs, fonctionnement moteur/générateur

Convertisseurs électroniques.

Principes pour la variation de vitesse des machines (système machines et convertisseurs)

## Déroulement, organisation du cours

Conversion d'énergie thermique, séances 1 à 9

Conversion d'énergie électrique, séances 10 à 19

CM : Cours Magistral durée 3h

TD : Travaux Dirigés durée 1h30

## Organisation de l'évaluation

Contrôle des connaissances de 1 heure et demi à la fin du cours.

## Support de cours, bibliographie

Supports en ligne sur Edunao

## Moyens

- Equipe enseignante : Antoine Renaud, Pierre Duquesne (Centrale Lyon), Adrien Voltaire, Romaric Landfried, Maya Hage-Hassan
- Taille des TD (par défaut 35 élèves) : 25
- TD en salle classique et salle informatique

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de ce cours, les élèves seront capables de :

- Comprendre une vue d'ensemble des systèmes de conversion d'énergie en mécanique et électrique.
- Connaître différents moyens de conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique (moteur à combustion interne, turbomachine).
- Identifier les atouts et contraintes de ces différents modes de production d'énergie ainsi que de proposer des premiers éléments de pré-dimensionnement.
- Proposer une modélisation rapide des machines synchrones et les convertisseurs et d'identifier quelques systèmes machines/convertisseurs pour des applications d'hybridation.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Étudier un problème dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un problème dans ses dimensions scientifiques, économiques et humaines

Utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes pour traiter le problème

Résoudre le problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation

Spécifier, concevoir, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe

Créer de la connaissance, dans une démarche scientifique

Maîtriser les compétences d'un des métiers de base de l'ingénieur

Etre proactif, prendre des initiatives, s'impliquer

Agir avec éthique, intégrité et dans le respect d'autrui

Faire preuve de rigueur et d'esprit critique dans l'approche des problèmes sous tous les angles, scientifiques, humains et économiques

# 2SC5691 – Régulation et commande de systèmes de production et de conversion d'énergie

Responsables : **Guillaume Sandou**

Département de rattachement : **DOMINANTE - ENERGIE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Cet Enseignement d'Intégration "Production et conversion d'énergie" se propose d'aborder la régulation de diverses installations de production d'énergie électrique raccordées au réseau de distribution et de transport. Les systèmes d'étude proposés aux étudiants seront constitués par exemple (liste à affiner en fonction des sujets proposés) d'une installation de production hydroélectrique, d'une ferme éolienne, d'une cogénération, ou encore d'une installation de production photovoltaïque.

Le travail demandé comportera les étapes principales suivantes :

- Développement d'un modèle de l'installation de production d'énergie à partir de documents et données fournis
- Calcul d'une loi de commande pour l'installation en réponse à un cahier des charges adapté à la problématique particulière de l'installation de production considérée
- Validation en simulation des performances de régulation

Les travaux seront réalisés en partie en partenariat avec EDF, notamment le Centre d'Ingénierie Hydraulique situé au Bourget-du-Lac.

Selon les cas, il s'agira de reproduire en simulation le comportement observé sur l'installation, d'en améliorer le fonctionnement, ou bien d'investiguer une stratégie de commande innovante pour l'installation.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

- Commande des systèmes dynamiques (cours commun de séquence 5)
- Introduction à la production d'énergie (cours spécifique à la ST5 "Systèmes Multi-Energies")

## Plan détaillé du cours (contenu)

Déroulé de l'Enseignement d'Intégration :

- Première demi-journée : présentation et répartition des sujets d'étude
  - Demi-journées 2 à 8 : réalisation du projet
    - a. Prise en main de la problématique et des données fournies
    - b. Réalisation d'un simulateur non linéaire de l'installation en boucle ouverte
    - c. Détermination d'un modèle exploitable pour la commande
    - d. Calcul de la loi de commande en fonction du cahier des charges de l'installation considérée

- e. Définition, si possible, d'une stratégie de commande innovante
  - f. Validation sur le simulateur non linéaire
  - Dernière demi-journée : restitution, présentation orale des résultats
- La demi-journée n°4 sera réalisée en autonomie par les étudiants

## Déroulement, organisation du cours

Fonctionnement en mode projet par groupe de 4 ou 5 étudiants.  
Encadrement par les enseignants de l'école.

## Organisation de l'évaluation

Chaque groupe de 4 ou 5 étudiants devra fournir :

- un simulateur complet du travail effectué, incluant un simulateur non linéaire du système, la loi de commande et les fichiers de validation;
- un rapport exposant l'approche proposée et en particulier le mode d'emploi pour utiliser le simulateur et les codes;
- une présentation orale de l'étude.

Les compétences C1, C2 et C6 seront spécifiquement évaluées

"C1 Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques", notamment par la justification de la démarche adoptée

"C2 Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers", notamment par l'analyse des résultats obtenus vis à vis de l'application considérée

"C6 Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique", notamment par la fourniture des simulateurs

## Support de cours, bibliographie

- N. Gionfra, H. Siguerdidjane, G. Sandou, D. Faille, and P. Loevenbruck. Combined Feedback Linearization and MPC for Wind Turbine Power Tracking. 2016 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, International Conference on Control Applications, Buenos Aires, Argentina, September 19th-22nd, 2016.
- Boubekeur Boukhezzar and Houria Siguerdidjane. Nonlinear Control of a Variable-Speed Wind Turbine Using a Two-Mass Model. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 26, no. 1, Mars 2011.
- Morten Hartvig Hansen and Lars Christian Henriksen. Basic DTU Wind Energy controller. DTU Wind Energy E-0018. January 2013.
- Gérard Robert, Frédéric Michaud. Reduced Models for Grid Connected Hydro Power Plant Application to Generation Control. International Conference on Communications, Computing and Control Applications. 3-5 March 2011. Hammamet, Tunisia
- Nicola Femia, Giovanni Petrone, Giovanni Spagnuolo, and Massimo Vitelli. Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method. IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 20, No. 4, July 2005
- Rae-Young Kim, and Jih-Sheng Lai. Seamless Mode Transfer Maximum Power Point Tracking Controller For Thermoelectric Generator Applications. IEEE Transaction on Power Electronics, vol. 23, no. 5, September 2008

## Moyens

- Équipe d'enseignants du Département Automatique et du Département Energie;
- Contacts avec des ingénieurs de recherche d'EDF;
- Mise à disposition de documents et de données sur les installations de production d'énergie électrique;
- Utilisation des PCs des étudiants

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce module, les étudiants seront capables de

- Modéliser un système physique industriel pour un objectif de commande ;
- Comprendre l'impact de la régulation d'une installation sur le fonctionnement global du système électrique ;
- Modéliser d'un point de vue fonctionnel le système afin d'en déterminer la stratégie de commande ;
- Développer une loi de commande satisfaisant un cahier des charges ;
- Prendre en compte les spécificités des unités de conversion d'énergie ;
- Valider le comportement d'un système régulé de production d'énergie électrique.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Cet enseignement d'intégration sera l'occasion de travailler les compétences suivantes :

C1.1 Étudier un problème dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un problème dans ses dimensions scientifiques, économiques et humaines

C1.2 Utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes pour traiter le problème

C1.3 Résoudre le problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation

C1.4 Spécifier, concevoir, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe

C2.1 Avoir approfondi un domaine ou une discipline relative aux sciences fondamentales ou aux sciences de l'ingénieur

C3.6 Évaluer l'efficacité, la faisabilité et la robustesse des solutions proposées

C3.7 Choisir les solutions et agir de façon pragmatique, en vue d'obtenir des résultats tangibles

C7.1 Convaincre sur le fond. Être clair sur les objectifs et les résultats attendus. Être rigoureux sur les hypothèses et la démarche. Structurer ses idées et son argumentation. Mettre en évidence la valeur créée

C8.1 Travailler en équipe/en collaboration

# 2SC5692 – Groupe motopropulseur hybride

Responsables : **Adrien Voldoire, Romaric Landfried**

Département de rattachement : **DOMINANTE - ENERGIE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

L'objectif de cet EI est de proposer un modèle et une régulation d'une chaîne de traction hybride (électrique et thermique) pour véhicule.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Energie électrique : cours de sciences pour l'ingénieur conseillé

## Plan détaillé du cours (contenu)

1. Présentation des différents éléments de la chaîne de traction hybride :  
Introduction aux contraintes environnementales, économiques  
Présentation des moyens pour augmenter le rendement global du groupe moto-propulseur et la structure d'une chaîne de traction hybride  
Présentation moteur thermique, structure de l'industrie automobile  
Commande des machines électriques (choix entre MCC et machine synchrone), pour l'intégration dans un modèle système
2. Application et mise au point d'un modèle numérique :  
Présentation du modèle système hybride sous Simulink :  
Mise en place des différents du schéma bloc : modèle voiture, moteur thermique, boîte de vitesse, couplage moteur électrique, batteries.  
Présentation d'une stratégie de gestion de flux sur cycle de consommation WLTP.

## Déroulement, organisation du cours

Projet par groupe de 4 ou 5 étudiants

## Organisation de l'évaluation

Soutenance finale et rapport

## Support de cours, bibliographie

Supports donnés en cours et durant l'enseignement

## Moyens

Modélisation sur Matlab/Simulink  
Articles scientifiques

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Mettre en œuvre un modèle systémique de la chaîne de traction électrique puis une chaîne de traction hybride
- Mettre en œuvre les outils de traitement numérique sous matlab/Simulink
- Mettre en œuvre une démarche de contrôle de l'ensemble de la chaîne de traction
- Introduction au dimensionnement sur cycle : complexité du système et contradiction de plusieurs objectifs à atteindre

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Étudier un problème dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un problème dans ses dimensions scientifiques, économiques et humaines

Utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes pour traiter le problème

Résoudre le problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation

Spécifier, concevoir, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe

Créer de la connaissance, dans une démarche scientifique

Maîtriser les compétences d'un des métiers de base de l'ingénieur

Etre proactif, prendre des initiatives, s'impliquer

Agir avec éthique, intégrité et dans le respect d'autrui

Faire preuve de rigueur et d'esprit critique dans l'approche des problèmes sous tous les angles, scientifiques, humains et économiques

# 2SC5693 – Propulsion aéronautique hybride

Responsables : **Antoine Renaud**

Département de rattachement : **DOMINANTE - ENERGIE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

L'électrification de l'aviation est un sujet d'actualité, compte tenu des enjeux de réduction des émissions polluantes auxquelles la communauté du transport aérien s'est engagée : d'ici la moitié du 21<sup>e</sup> siècle, il s'agit de diminuer par deux les émissions de CO<sub>2</sub> de l'ensemble du trafic aérien alors que dans le même temps on estime que le volume de passagers transportés va pratiquement doubler.

Dans ce contexte, il est légitime de s'intéresser à des avions à propulsion électrique ce qui pose le problème du stockage de l'énergie : les batteries sont encore très lourdes et suffisent à peine à mouvoir des appareils légers de deux passagers sur quelques centaines de kilomètres.

Dans le cadre de cet enseignement d'intégration, nous allons nous intéresser à un avion léger de la classe ULM haut de gamme. Pour cette catégorie d'aéronefs on peut envisager dès aujourd'hui une électrification de la propulsion avec les technologies existantes. Nous considérerons en outre une architecture hybride associant une batterie à une pile à combustible à hydrogène.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Cours de sciences pour l'ingénieur conseillé : Sciences des Transferts ou Energie électrique

## Plan détaillé du cours (contenu)

Un template Simulink général du modèle sera fourni, avec un certain nombre de sous-modèles vierges qu'il s'agira de compléter. Il faudra ensuite procéder aux tests de validation de chacun des sous-systèmes.

1. Pile à combustible
  1. Electrochimie du coeur de pile
  2. Management thermique
  3. Logique de séquençement
2. Distribution électrique et motorisation
  - Moteur et sa régulation
  - Batterie et son système de management
  - Régulation de la puissance
3. Cellule avion
  - Mécanique du vol et roulage
  - Boucles de contrôle et pilotage
4. Préparation des essais
  - Définition des profils de mission
  - Pré- et post-traitements

Dans une seconde partie, les groupes seront redistribués en trois équipes et les modèles des sous-systèmes seront mis en commun. Chaque équipe sera chargée d'assembler son avion et de le tester.



## Déroulement, organisation du cours

L'activité sera encadrée par des intervenants de SafranTech ainsi que des enseignants CentraleSupélec. Les étudiants seront divisés en groupes et sous-groupes en fonction des différentes tâches à accomplir. Des reconfigurations auront lieu en cours de semaine en fonction de l'avancement du travail.

## Organisation de l'évaluation

L'évaluation se base sur l'assiduité, la motivation et l'efficacité tout au long de la semaine ainsi que sur deux soutenances en groupe, l'une en milieu de semaine et la seconde le dernier jour.

## Moyens

L'ensemble de l'activité se déroulera en utilisant le logiciel Matlab/Simulink pour simuler le problème.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de la semaine, les étudiants auront acquis des notions sur la mécanique du vol, le pilotage d'un avion, le fonctionnement de moteurs électriques et de piles à combustible. Ils auront surtout appris à gérer les contraintes liées à ces différents éléments lorsqu'ils sont assemblés dans un système complexe. Enfin, l'étendue et la complexité du problème demandent nécessairement un travail en équipe avec différents cœurs de métiers, répliquant en cela des situations réelles du monde du travail.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.3: Résoudre le problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation

C1.4: Spécifier, concevoir, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe

C2.3: Identifier et acquérir rapidement des nouvelles connaissances et compétences nécessaires dans les domaines pertinents, qu'ils soient techniques, économiques ou autres

C7.1: Convaincre sur le fond. Être clair sur les objectifs et les résultats attendus. Être rigoureux sur les hypothèses et la démarche. Structurer ses idées et son argumentation. Mettre en évidence la valeur créée.

C8.1: Travailler en équipe/en collaboration.

# ST5 - 57 - CONTROLE DE LA POLLUTION ACOUSTIQUE ET ELECTROMAGNETIQUE

**Dominante** : MDS (Mathématique, Data Science) et Info&Num (Informatique et Numérique)

**Langue d'enseignement** : Français

**Campus où le cours est proposé** : Paris Saclay

---

## Problématique d'ingénieur

La pollution acoustique est aujourd'hui considérée comme une gêne majeure par la population, alors que la pollution électromagnétique soulève pour sa part de nombreuses questions et interrogations liées aux problèmes de santé. Les réalisations pratiques permettant de contrôler cette pollution représentent un défi technique et industriel de premier plan, mais ne bénéficient pas encore des nouveaux développements que peut lui apporter l'analyse mathématique, la simulation numérique et l'informatique.

Cet enseignement s'intéresse à la conception de produits innovants (revêtement acoustique ou électromagnétique) destinés à contrôler la pollution acoustique/électromagnétique. Ayant introduit le contexte physique, il vise à donner aux élèves les notions en mathématique et informatique associées à la conception et la fabrication de tels produits. Cet enseignement propose deux voies de formation :

### Voie Méthodes mathématiques :

Une voie basée sur la théorie mathématique (EDPs, analyse fonctionnelle, dérivée de Fréchet) associée aux algorithmes numériques pour maîtriser le contrôle des ondes pour définir la forme d'un revêtement acoustique ou électromagnétique. En particulier, dans cette voie sont traitées les EDPs sur les bords irréguliers (fractales) et est développée la méthode d'optimisation des formes et la notion de la dérivée par rapport au bord.

### Voie Calcul Scientifique, méthodes numériques et algorithmique :

Cette voie a pour objectif l'approfondissement des méthodes numériques utilisées en voie mathématique, elle est orientée vers le calcul scientifique. En s'intéressant au même but commun que la voie mathématique, cette voie permet d'aller plus loin dans l'implémentation numérique de la méthode d'optimisation des formes.

Les deux voies étudient les méthodes (théoriques ou numériques) qui sont utiles au contrôle des ondes acoustiques extérieures (voisinage des autoroutes, des aéroports, des chantiers) ou intérieures (isolation phonique dans les bureaux par des panneaux perforés ou liners acoustiques dans les réacteurs des avions par exemple), ainsi qu'au contrôle de la pollution électromagnétique (chambres anéchoïques).

L'enseignement d'intégration permet de mettre en œuvre les compétences et connaissances acquises dans le cas d'une application choisie pour garantir les meilleures performances tout en tenant compte des contraintes réglementaires, environnementales et économiques.

L'intervention d'industriels (ONERA, SIEPEL) et des spécialistes concepteurs des murs anti-bruits permet de mieux appréhender les contraintes économiques et les enjeux associés à la conception et à l'exploitation de produits innovants.

## Prérequis conseillés

Pour la voie « Méthodes mathématiques » il est demandé une maîtrise du cours de première année EDPs. D'un point de vue général, avoir suivi le cours de SPI « Physique des Ondes » serait un plus.

## Modules contexte et enjeux :

Cette partie s'organise autour de demi-journées de formation visant à présenter la séquence, l'enseignement d'intégration et à introduire les enjeux et verrous associés. Ainsi les thèmes suivants seront abordés : les fractales pour l'innovation dans les applications acoustiques et électromagnétiques, le contrôle par des liners acoustiques dans les réacteurs en aéronautique, les défis actuels du contrôle des ondes électromagnétiques, la recherche et l'innovation dans le contrôle des ondes.

## Cours spécifique (60 HEE) : Le contrôle des ondes : la théorie et algorithmique

### Brève description :

Les deux voies proposées ont les mêmes objectifs. Les concepts du cours commun d'Automatique sont approfondis dans le contexte du contrôle de la dissipation de l'énergie d'une onde. L'observabilité dans ce cas dépend de la géométrie du bord absorbant. Pour illustrer les raisons pour lesquelles on a besoin de l'irrégularité géométrique, on introduit les notions de géométrie fractale avec des résultats connus en physique et, pour la voie théorique, en mathématiques. On présente en particulier les phénomènes de localisation et d'absorption des ondes (acoustiques ou électromagnétiques) qui sont reliées par l'analyse spectrale du modèle (théorique et numérique). Pour mieux comprendre les enjeux environnementaux et sociologiques des développements des barrières acoustiques, on présente quelques aspects psycho-acoustiques, qui montrent l'importance de la dissipation de certaines fréquences. Le cours étudie en particulier, pour une fréquence fixée, l'obtention d'une forme optimale pour un modèle fréquentiel via les équations de Helmholtz dans le but de permettre son utilisation dans l'EI sur deux types de contrôle : géométrique et topologique. Pour la voie numérique la partie algorithmique de cette méthode sera présentée en détail. Dans la voie mathématique on présentera également ces méthodes numériques mais beaucoup plus brièvement.

On considère ensuite la difficulté principale d'avoir une forme "presque optimale" sur une large bande de fréquences, importante d'un point de vue psycho-acoustique et des intérêts industriels. Le but final dans l'EI est de pouvoir déterminer rapidement et de manière robuste la forme optimale ou la forme « presque optimale » de la géométrie sur une bande de fréquence par la simulation numérique.

Les deux voies proposées prévoient un projet numérique commun sur la localisation des modes propres et deux sujets d'examen différents.

## Enseignement d'intégration n°1 : Conception d'un revêtement afin de contrôler la pollution des ondes. Contrôle de la pollution acoustique extérieure

**Partenaire associé :** ONERA

**Lieu :** Campus Paris-Saclay

### Brève description :

On se positionne sur les enjeux industriels qui imposent les contraintes économiques et les contraintes technologiques nécessaires pour l'amélioration des produits existants du marché, pour concevoir des revêtements innovants pour absorber le bruit des avions, des trains, des voitures. On vise à développer ces produits innovants de manière optimale en contrôlant l'énergie des ondes par la géométrie du mur tout en prenant en compte les contraintes économiques. Par exemple, COLAS et l'École Polytechnique ont développé un mur anti-bruit nommé "mur Fractal" TM, qui a été conçu empiriquement avec une géométrie complexe afin de dissiper les différentes longueurs d'ondes. Toutefois, ce mur même s'il est quatre fois plus performant que les murs classiques pour les basses fréquences, ne se vend quasiment pas... L'explication tient au fait que sa construction, se faisant par démoulage, risque de briser le mur, ce qui entraîne un coût élevé de fabrication. Cet EI se propose de trouver par des méthodes de contrôle des ondes, des formes optimales les plus absorbantes possibles (en décibel) qui satisfont les contraintes imposées par l'industriel, par exemple, le coût de fabrication le moins cher avec la réduction la plus importante des décibels. Des premiers résultats numériques dans ce contexte montrent l'existence de formes optimales "pas trop complexes" capables d'améliorer d'un facteur 6 les performances du "mur Fractal" TM.

## **Enseignement d'intégration n°2 : Conception d'un revêtement afin de contrôler la pollution des ondes. Contrôle de la pollution acoustique intérieure**

**Partenaire associé :** ONERA

**Lieu :** Campus Paris-Saclay

### **Brève description :**

On se positionne sur les enjeux industriels qui imposent les contraintes économiques et les contraintes technologiques nécessaires pour améliorer les produits existants sur le marché, dans le but de concevoir des revêtements intérieurs pour absorber le bruit à l'intérieur des bâtiments et également de liners acoustiques dans les réacteurs des avions. Dans ce contexte on s'intéresse à trois applications phares: (i) la conception des revêtements dans les chambres anéchoïques (jusqu'à présent les chambres anéchoïques acoustiques ont été conçues de manière empirique fondée sur des géométries utilisant des échelles différentes), (ii) la conception de panneaux absorbants perforés (les matériaux absorbants sont constitués de fibres qui ont de très bonnes propriétés acoustiques absorbantes, et qui sont habituellement couverts de panneaux en bois pour des raisons esthétiques, ce qui nuit malheureusement à leur efficacité) et enfin (iii) les isolants absorbants perforés dans les réacteurs des avions. Dans la dernière application il est important d'optimiser le diamètre et le positionnement des trous dans le matériau. Les objectifs sont de contrôler au mieux les ondes par une analyse de la forme optimale de la surface de ces revêtements afin d'améliorer l'absorption acoustique en décibel en prenant en compte les enjeux et contraintes industrielles.

## **Enseignement d'intégration n°3 : Conception d'un revêtement afin de contrôler la pollution des ondes. Contrôle de la pollution électromagnétique**

**Partenaire associé :** ONERA

**Lieu :** Campus Paris-Saclay

### **Brève description :**

On se positionne sur les enjeux industriels, présentés par SIEPEL, qui imposent les contraintes économiques et les contraintes technologiques nécessaires pour améliorer les produits existants du marché, ceci afin d'absorber les ondes électromagnétiques. Comme domaines d'applications, on vise la conception et l'optimisation d'une chambre anéchoïque. On remarque que les matériaux absorbants pour les ondes électromagnétiques sont différents des matériaux dissipatifs pour les ondes acoustiques. La nature différente de ces ondes implique une adaptation du modèle vu en cours.

# 2SC5710 – Théorie et algorithmique pour le contrôle des ondes

Responsables : **Anna Rozanova-Pierrat**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MATHÉMATIQUES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Cours ST**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

La pollution acoustique est aujourd'hui considérée comme une gêne majeure par la population, alors que la pollution électromagnétique soulève pour sa part de nombreuses questions et interrogations liées aux problèmes de santé. Les réalisations pratiques permettant de contrôler cette pollution représentent un défi technique et industriel de premier plan, mais ne bénéficient pas encore des nouveaux développements que peuvent lui apporter l'analyse mathématique, la simulation numérique et l'informatique.

Cet enseignement s'intéresse à la conception de produits innovants (revêtement acoustique ou électromagnétique) destinés à contrôler la pollution acoustique/électromagnétique.

Ayant introduit le contexte physique dans le module "Contexte et enjeux", il vise à donner aux élèves les notions en mathématique et informatique associées à la conception et la fabrication de tels produits. Cet enseignement propose deux voies de formation :

1) Voie analyse théorique, dirigée par Mme Rozanova-Pierrat: une voie basée sur la théorie mathématique (EDPs, analyse fonctionnelle, dérivée de Fréchet) pour maîtriser le contrôle des ondes pour définir la forme d'un revêtement acoustique ou électromagnétique. En particulier, dans cette voie sont traitées les EDPs sur les bords irréguliers (fractales) et est développée la méthode d'optimisation de formes et la notion de la dérivée par rapport au bord.

2) Voie analyse numérique, méthodes numériques et algorithmique, dirigée par M. Magoulès : cette voie a pour objectif l'approfondissement des méthodes numériques, elle est orientée vers le calcul scientifique. En particulier, dans cette voie sont traitées les méthodes numériques et l'implémentation de celles-ci pour la propagation des ondes et la méthode d'optimisation de formes.

Les deux voies préparent aux trois EIs proposés par la suite. Plus précisément, elles étudient les méthodes (théoriques ou numériques) qui sont utiles aux thématiques des trois EIs: au contrôle des ondes acoustiques extérieures (voisinage des autoroutes, des aéroports, des chantiers) ou intérieures (isolation phonique dans les bureaux par des panneaux perforés ou liners acoustiques dans les réacteurs des avions par exemple), ainsi qu'au contrôle de la pollution électromagnétique (chambres anéchoïques).

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

La maîtrise des cours SG de la 1ère année: Algorithmique et complexité (pour la voie Calcul Scientifique) et EDPs (pour la voie Analyse théorique)

Le cours SPI "Physique des Ondes" est conseillé pour l'EI "Contrôle de la pollution électromagnétique"

## Plan détaillé du cours (contenu)

On développe sur le cours "Automatique et Contrôle" de la ST, les problèmes de contrôle décrits par des équations aux dérivées partielles (observabilité, commandabilité, dite contrôlabilité) qu'on approfondi dans le contexte du contrôle de la dissipation de l'énergie d'une onde. L'observabilité dans ce cas dépend de la géométrie du bord absorbant. Pour illustrer les raisons dans lesquelles on a besoin de l'irrégularité géométrique, on introduit les notions de géométrie fractale avec des résultats connus en physique et en mathématiques (voie Analyse théorique). On présente en particulier, les phénomènes de localisation et d'absorption des ondes (acoustiques ou électromagnétiques) qui sont reliées par l'analyse spectrale du modèle. Pour mieux comprendre les enjeux environnementaux et sociologiques des développements des barrières acoustiques, on présente quelques aspects psychoacoustiques, qui montrent l'importance de la dissipation des certaines fréquences. Le cours étudie en particulier, pour une fréquence fixée, l'obtention d'une forme optimale pour un modèle fréquentiel sur les équations de Helmholtz dans le but de permettre son utilisation dans l'EI sur deux types de contrôles : géométrique et topologique. On considère ensuite la difficulté principale d'avoir une forme "presque optimale" sur une large bande des fréquences, importante d'un point de vue psychoacoustique et des intérêts industriels. Dans ce contexte sont également présentées (de manière approfondie pour la voie Calcul Scientifique) les méthodes numériques les plus adaptées afin de pouvoir déterminer rapidement et de manière robuste la forme optimale ou la forme « presque optimale » de la géométrie sur une bande de fréquence par la simulation numérique.

Plan détaillé du cours par séance:

- 1) Cours/TD sur la thématique commune de deux voies avec des niveaux de la présentation adaptés: Introduction EDPs: opérateurs Delta, nabla, div, bord d'un domaine, une normale extérieure, intégration par parties. Modèles de la propagations des ondes.
- 2) Cours/TD a) voie Analyse Théorique: Traces, extensions, ensembles compacts, opérateurs compacts. Équation de Poisson.  
b) voie Analyse Numérique: Equation de Poisson, méthode éléments finis, méthode des différences finies, implémentation numérique.
- 3) Cours a) voie Analyse Théorique: Bords fractales. Analyse du problème de Poisson aux conditions au bord mixtes et du problème spectral associé.  
b) voie Analyse Numérique: Bords pré-fractales. Problème spectrale et méthodes numériques associées, implémentation des différentes conditions aux bords, erreur numérique.
- 4) Cours/TD a) voie Analyse Théorique: modèle de l'Helmholtz avec un bord absorbant, sa résolution théorique et dépendance de l'énergie acoustique des fréquences.  
b) voie Analyse Numérique: Méthodes numériques avancées dans le contexte des ondes.
- 5) Cours/TD sur la thématique commune à deux voies: Résolution numérique du problème de Helmholtz avec une dissipation par le bord et du problème spectrale associé. Lancement du projet numérique pour deux voies.
- 6) Cours a) voie Analyse Théorique: Optimisation paramétrique (existence d'une forme optimale).  
b) voie Analyse Numérique: Introduction de l'optimisation paramétrique, algorithmique et numérique associée.
- 7) Cours a) voie Analyse Théorique: Dérivée de Fréchet et la dérivée par rapport à un paramètre. Méthode de Lagrangien.  
b) voie Analyse Numérique: Notion de la dérivée de Fréchet. Implémentation numérique de l'optimisation paramétrique.
- 8) Cours/TD a) voie Analyse Théorique: Optimisation des formes. Dérivée par rapport à la forme.  
b) voie Analyse Numérique: Introduction à l'optimisation des formes. Implémentation numérique de l'optimisation des formes.
- 9) Cours avec une adaptation aux deux voies: Algorithme numérique de l'optimisation des formes et l'optimalité sur une plage des fréquences. Contrôle des ondes, lien avec le cours commun "Automatique".

## Déroulement, organisation du cours

Cours :15\*1h30, : TD 4\*1h30, projet (en dehors des TDs, aide avec office hours), polycopié du cours, calculs sur un cluster, solutions des exercices des TDs

## Organisation de l'évaluation

Contrôle final de 1h30 qui compte pour 70% dans la note finale et le projet issu du TP qui compte pour 30% dans la note finale dans la voie théorique.

Projet numérique qui compte pour 70% dans la note finale et le projet issu des TPs qui compte pour 30% dans la note finale dans la voie numérique.

## Support de cours, bibliographie

1. F. Magoulès, P.T.K. Ngyuen, P. Omnes, A. Rozanova-Pierrat, *Optimal absorption of acoustic waves by a boundary* SIAM J. Control Optim. Vol. 59, No. 1, (2021), pp. 561-583.
2. Kevin Arfi, Anna Rozanova-Pierrat. *Dirichlet-to-Neumann or Poincaré-Steklov operator on fractals described by  $d$ -sets*. Discrete and Continuous Dynamical Systems - Series S, American Institute of Mathematical Sciences, 2019, 12 (1), pp.1-26.
3. G. Allaire, *Conception optimale de structures*, Springer.
4. A. Henrot, M. Pierre *Variation et optimisation de formes. Une analyse géométrique*. Springer.
5. M. Filoche and S. Mayboroda, *Universal mechanism for Anderson and weak localization*, Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA 109, 14761 (2012).
6. M. Filoche and S. Mayboroda, *The landscape of Anderson localization in a disordered medium*, Contemporary Mathematics, 601 (2013), 113-121

## Moyens

Les étudiants sont divisés (par les souhaits des étudiants) en deux groupes correspondant à deux voies mentionnées avant le commencement du cours spécifique. Chaque groupe a des cours destinés à introduire des notions utilisées en TDs et à plus long terme en EI (les trois EIs proposés). Il y aura quelques cours sur les méthodes numériques dans la voie mathématique et il y aura quelques cours théoriques élémentaires (comme l'intégration par parties multidimensionnelle) dans la voie numérique. Il est prévu avoir une séance des TP (TDs sur l'ordinateur) de 1h30 pour 2 voies à l'issue desquels il y a un projet numérique à rendre (l'influence de la géométrie du mur sur la localisation des modes propres et la dissipation de l'énergie de l'onde). Les étudiants réaliseront la modélisation, la simulation, la visualisation et le rendu du phénomène. Les heures seront mises en place pour aider à finaliser ce projet.

La voie numérique: il y a un projet numérique à rendre pour valider le cours.

Pour valider la voie théorique il y a un examen écrit d'une heure et demie.

La voie Analyse théorique est basée sur le polycopié du cours, qui sera mis à disposition de tout le monde. Les étudiants ont également à leur disposition tous les sujets des TDs avec les corrections. Les calculs numériques seront effectués sur un cluster de calcul de CentraleSupélec en se connectant à Jupyter.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Voie Analyse Théorique :

- comprendre les techniques théoriques et des algorithmes numériques du contrôle des ondes acoustiques / électromagnétiques
- Valider les techniques théoriques de contrôle des ondes acoustiques / électromagnétiques (optimisation de forme)

Voie Analyse Numérique, calcul scientifique, méthodes numériques et algorithmique :

- techniques numériques de contrôle des ondes acoustiques / électromagnétiques
- Implémenter des méthodes numériques pour simuler des phénomènes de propagation d'ondes acoustiques de grandes dimensions (problèmes externes / internes et problèmes pour une large bande de fréquences)
- Valider les techniques numériques de contrôle des ondes acoustiques / électromagnétiques

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1, C2

Voie Analyse théorique (analyse fonctionnelle, optimisation de formes):

Pouvoir traiter les problèmes de contrôle décrits par les EDPs.

Savoir traiter l'irrégularité du bord y compris fractale pour montrer le caractère bien posé d'un problème décrit par des EDPs.

Savoir appliquer la méthode d'optimisation des formes et dériver une fonctionnelle d'énergie par rapport au bord du domaine.

Pouvoir déduire à partir des objectifs applicatifs les contraintes du contrôle et le fait d'une existence/non-existence d'une forme optimale.

Cibler les échelles géométriques d'intérêt par rapports aux longueurs d'ondes à dissiper.

Pouvoir traiter les aspects numériques.

Voie Analyse numérique (Calcul Scientifique, méthodes numériques et algorithmique) :  
Pouvoir traiter les problèmes de contrôle décrits par les EDPs.  
Pouvoir déduire à partir des objectifs applicatifs les contraintes du contrôle et l'importance d'une forme optimale.  
Cibler les échelles géométriques d'intérêt par rapports aux longueurs d'ondes à dissiper.  
Maîtriser la méthode des éléments finis et différences finies et leur implémentation.  
Connaissance des méthodes de résolutions liées à la simulation de la propagation des ondes.  
Maîtrise des difficultés numériques liées à la simulation.



# 2SC5791 – Conception d'un revêtement afin de contrôler la pollution des ondes : Contrôle de la pollution acoustique extérieure

Responsables : **Frédéric Magoules**

Département de rattachement : **DOMINANTE - MATHÉMATIQUES, DATA SCIENCES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

On se positionne sur les enjeux industriels qui imposent les contraintes économiques et les contraintes technologiques nécessaires pour l'amélioration des produits existants du marché, pour concevoir des revêtements innovants pour absorber le bruit des avions, des trains, des voitures. On vise à développer ces produits innovants de manière optimale en contrôlant l'énergie des ondes par la géométrie du mur tout en prenant en compte les contraintes économiques. Par exemple, COLAS et l'École Polytechnique ont développé un mur anti-bruit nommé "mur Fractal" TM, qui a été conçu empiriquement avec une géométrie complexe afin de dissiper les différentes longueurs d'ondes. Toutefois, ce mur même s'il est quatre fois plus performant que les murs classiques pour les basses fréquences, ne se vend quasiment pas... L'explication tient au fait que sa construction, se faisant par démoulage, risque de briser le mur, ce qui entraîne un coût élevé de fabrication. Cet El se propose de trouver par des méthodes de contrôle des ondes, des formes optimales les plus absorbantes possibles (en décibel) qui satisfont les contraintes imposées par l'industriel, par exemple, le coût de fabrication le moins cher avec la réduction la plus importante des décibels. Des premiers résultats numériques dans ce contexte montrent l'existence des formes optimales "pas trop complexes" capables d'améliorer d'un facteur 6 les performances du "mur Fractal" TM.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Les cours de ST5 et en particulier le cours "Théorie et algorithmique pour le contrôle des ondes" 2SC5710 (une des deux voies proposée)

## Plan détaillé du cours (contenu)

Travail en équipe "entreprise", définition des enjeux, recherche bibliographique, compréhension physique et de l'intérêt pratique, modélisation mathématique du problème, mise au point de la théorie mathématique correspondante si nécessaire (le problème bien ou mal posé, régularité de la solution, dérivation de l'énergie acoustique par rapport à la géométrie du mur, influence du choix du matériau poreux choisit sur l'absorption de l'énergie,...), développement/implémentation de la méthode numérique, l'analyse numérique des résultats, l'analyse de leurs pertinence, amélioration possible, obtention d'une forme efficace pour une large bande des fréquences.

## Déroulement, organisation du cours

Travail en équipe, projet, dialogue avec différents spécialistes du domaine.

## Organisation de l'évaluation

Rapport, livrables finaux et intermédiaires, soutenance.

## Moyens

Connexion au cluster de calcul à la distance

Les étudiants réaliseront la modélisation, la simulation, la visualisation et le rendu du phénomène choisi. Ils étudieront la chaîne de simulation avec un objectif de performance et de précision sous contraintes économiques (coût de fabrication) et environnemental (gain en décibel ou en potentiel).

Livrables : rapport, logiciel, transparents et soutenance

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Comprendre l'apport de la géométrie dans la conception et le développement de nouveaux produits
- Appréhender les techniques théoriques et numériques du contrôle des ondes acoustiques
- Implémenter les méthodes numériques pour simuler des phénomènes de propagation d'ondes acoustiques de grandes dimensions (problèmes extérieurs et problèmes pour une large bande des fréquences)
- Valider les techniques théoriques et numériques du contrôle des ondes acoustiques
- Confronter les étudiants à la réalisation d'un produit complexe par des techniques de simulation numérique

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C4.1 Penser client. Identifier/analyser les besoins, les enjeux et les contraintes d'autres parties prenantes, notamment sociétales et socio-économiques : étude de l'intérêt industriel, psychoacoustique et environnementale pour la détermination des contraintes du problème du contrôle.

C6.1 Identifier et utiliser au quotidien les logiciels nécessaires pour son travail (y compris les outils de travail collaboratif). Adapter son "comportement numérique" au contexte : utilisation et développement d'un code numérique en se basant sur des parties existantes.

C7.1 Convaincre sur le fond. Être clair sur les objectifs et les résultats attendus. Être rigoureux sur les hypothèses et la démarche. Structurer ses idées et son argumentation. Mettre en évidence la valeur créée. Convaincre en travaillant sur la relation à l'autre : en travaillant en équipe le choix stratégique est crucial pour avoir des bons résultats du projet, pour le faire il faut savoir convaincre les autres ; le travail en équipe lui-même ; la soutenance finale devant un jury multi-disciplinaire.

# 2SC5792 – Conception d'un revêtement afin de contrôler la pollution des ondes : Contrôle de la pollution acoustique intérieure

Responsables : **Frédéric Magoules**

Département de rattachement : **DOMINANTE - MATHÉMATIQUES, DATA SCIENCES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

On se positionne sur les enjeux industriels qui imposent les contraintes économiques et les contraintes technologiques nécessaires pour améliorer les produits existants sur le marché, dans le but de concevoir des revêtements intérieurs pour absorber le bruit à l'intérieur des bâtiments et également de liners acoustiques dans les réacteurs des avions. Dans ce contexte on s'intéresse à trois applications phares: (i) la conception des revêtements dans les chambres anéchoïques (jusqu'à présent les chambres anéchoïques acoustiques ont été conçues de manière empirique basée sur des géométries utilisant des échelles différentes), (ii) la conception de panneaux absorbants perforés (les matériaux absorbants sont constitués de fibres qui ont de très bonnes propriétés acoustiques absorbantes, et qui sont habituellement couverts de panneaux en bois pour des raisons esthétiques, ce qui nuit malheureusement à leur efficacité) et enfin (iii) les isolations absorbant perforés dans les réacteurs des avions. Dans la dernière application il est important d'optimiser le diamètre et le positionnement des trous dans le matériau. Les objectifs sont de contrôler au mieux les ondes par une analyse de la forme optimale de la surface de ces revêtements afin d'améliorer l'absorption acoustique en décibel en prenant en compte les enjeux et contraintes industrielles.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Les cours de ST5 et en particulier le cours "Théorie et algorithmique pour le contrôle des ondes" 2SC5710 (une des deux voies proposées)

## Plan détaillé du cours (contenu)

Travail en équipe "entreprise", définition des enjeux, recherche bibliographique, compréhension physique et de l'intérêt pratique, modélisation mathématique du problème, mise au point de la théorie mathématique correspondante si nécessaire (le problème bien ou mal posé, régularité de la solution, dérivation de l'énergie acoustique par rapport à la géométrie du mur, influence du choix du matériau poreux choisit sur l'absorption de l'énergie,...), développement/implémentation de la méthode numérique, l'analyse numérique des résultats, l'analyse de leurs pertinence, amélioration possible, obtention d'une forme efficace pour une large bande des fréquences.

## Déroulement, organisation du cours

Travail en équipe, projet, dialogue avec différents spécialistes du domaine.

## Organisation de l'évaluation

Rapport, livrables finaux et intermédiaires, soutenance

## Moyens

Connexion au cluster de calcul à la distance

Les étudiants réaliseront la modélisation, la simulation, la visualisation et le rendu du phénomène choisi. Ils étudieront la chaîne de simulation avec un objectif de performance et de précision sous contraintes économiques (coût de fabrication) et environnemental (gain en décibel ou en potentiel).

Livrables : rapport, logiciel, transparents et soutenance

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Comprendre l'apport de la géométrie dans la conception et le développement de nouveaux produits

Appréhender les techniques théoriques et numériques du contrôle des ondes acoustiques

Implémenter les méthodes numériques pour simuler des phénomènes de propagation d'ondes acoustiques de grandes dimensions (problèmes intérieur et problèmes pour une large bande des fréquences)

Valider les techniques théoriques et numériques du contrôle des ondes acoustiques

Confronter les étudiants à la réalisation d'un produit complexe par des techniques de simulation numérique

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C4.1 Penser client. Identifier/analyser les besoins, les enjeux et les contraintes d'autres parties prenantes, notamment sociétales et socio-économiques : étude de l'intérêt industriel, psychoacoustique et environnemental pour la détermination des contraintes du problème du contrôle.

C6.1 Identifier et utiliser au quotidien les logiciels nécessaires pour son travail (y compris les outils de travail collaboratif). Adapter son "comportement numérique" au contexte : utilisation et développement d'un code numérique en se basant sur les parties existantes.

C7.1 Convaincre sur le fond. Être clair sur les objectifs et les résultats attendus. Être rigoureux sur les hypothèses et la démarche. Structurer ses idées et son argumentation. Mettre en évidence la valeur créée. Convaincre en travaillant sur la relation à l'autre : en travaillant en équipe le choix stratégique est crucial pour avoir des bons résultats du projet, pour le faire il faut savoir convaincre les autres ; le travail en équipe lui-même ; la soutenance finale devant un jury multi-disciplinaire.

# 2SC5793 – Conception d'un revêtement afin de contrôler la pollution des ondes : Contrôle de la pollution électromagnétique

Responsables : **Anna Rozanova-Pierrat**

Département de rattachement : **DOMINANTE - MATHÉMATIQUES, DATA SCIENCES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

On se positionne sur les enjeux industriels qui imposent les contraintes économiques et les contraintes technologiques nécessaires pour améliorer les produits existants du marché, ceci afin d'absorber les ondes électromagnétiques. Comme domaines d'applications, on vise la conception/optimisation des chambres anéchoïques électromagnétiques. On remarque que les matériaux absorbants (il y aura une visite chambres anéchoïque dans le bâtiment Bréguet et éventuellement celle de Thales-Limours) pour les ondes électromagnétiques sont différents des matériaux dissipatifs pour les ondes acoustiques.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Cours "Ingénierie des Ondes" de la 1ère année serait un plus

Les cours de ST5 et en particulier le cours "Théorie et algorithmique pour le contrôle des ondes" 2SC5710 (une des deux voies proposées)

## Plan détaillé du cours (contenu)

Travail en équipe "entreprise", définition des enjeux, recherche bibliographique, compréhension physique et de l'intérêt pratique, modélisation mathématique du problème, mise au point de la théorie mathématique correspondante si nécessaire (le problème bien ou mal posé, régularité de la solution, dérivation de l'énergie électromagnétique par rapport à la géométrie du mur, influence du choix du matériau poreux choisit sur l'absorption de l'énergie,...), développement/implémentation de la méthode numérique, l'analyse numérique des résultats, l'analyse de leurs pertinence, amélioration possible, obtention d'une forme efficace pour une large bande des fréquences.

## Déroulement, organisation du cours

Travail en équipe, projet, dialogue avec différents spécialistes du domaine.

## Organisation de l'évaluation

Rapport, livrables finaux et intermédiaires, soutenance par équipe

## Moyens

Connexion au cluster de calcul à distance

Les étudiants réaliseront la modélisation, la simulation, la visualisation et le rendu du phénomène choisi. Ils étudieront la chaîne de simulation avec un objectif de performance et de précision sous contraintes économiques (coût de fabrication) et environnemental (gain en décibel ou en potentiel).

Livrables : rapport, logiciel, transparents et soutenance

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Comprendre l'apport de la géométrie dans la conception et le développement de nouveaux produits

Appréhender les techniques théoriques et numériques du contrôle des ondes acoustiques

Implémenter les méthodes numériques pour simuler des phénomènes de propagation d'ondes acoustiques de grandes dimensions (problèmes extérieurs et problèmes pour une large bande des fréquences)

Valider les techniques théoriques et numériques du contrôle des ondes acoustiques

Confronter les étudiants à la réalisation d'un produit complexe par des techniques de simulation numérique

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C4, C6, C7

# ST5 - 58 - SYSTEMES COMPLEXES INDUSTRIELS ET CRITIQUES A LOGICIELS PREPONDERANTS

Dominante : Info&Num (Informatique et Numérique)

Langue d'enseignement : Français

Campus où le cours est proposé : Paris-Saclay

---

## Problématique d'ingénieur

Cette séquence thématique aborde un axe des sciences du logiciel à travers la mise en place d'un cycle de développement permettant la conception de systèmes complexes industriels et critiques où le logiciel est prépondérant. Les systèmes industriels modernes sont souvent des systèmes composés de composants hétérogènes en interaction pouvant être définis comme des systèmes complexes (systèmes de systèmes). Ce qui caractérise de tels systèmes est qu'ils sont souvent à logiciels prépondérants (Ex. les systèmes cyber-physiques). De plus, leur comportement est souvent difficilement appréhendable du fait de l'émergence de comportements global que l'on ne peut anticiper à un niveau plus local. Enfin, ils sont critiques dans le sens où la moindre erreur de conception peut avoir des conséquences rédhibitoires sur le comportement global du système.

Plus précisément, ce sujet de séquence thématique vise à aborder à la fois la conception et la vérification de tels systèmes complexes et critiques en utilisant des techniques issues du Génie Logiciel. Les composants de tels systèmes étant hétérogènes (c.-à-d. à la fois physiques et logiciels), les méthodologies et les outils présentés dans ce sujet seront multiples et s'intègrent dans le cadre d'un cycle de développement. L'idée est de commencer la phase d'analyse en utilisant des outils semi-formels (UML, SysML, ...), souvent utilisés dans l'ingénierie des systèmes pour décrire la structuration du système et ses interactions, puis d'aborder scientifiquement les phases de conception et de validation en utilisant des techniques formelles du Génie Logiciel (modélisation temporisée et hybride, logique temporelle, model-checking). L'interaction du système avec son environnement externe (qui peut être l'utilisateur humain ou pas) est l'un des points principaux qui seront pris en compte.

L'objectif principal d'une telle démarche vise à montrer, à travers les modèles formels obtenus, que le système fait bien ce que l'on attend de lui tout en respectant les contraintes imposées par le cahier des charges et par l'environnement, ou dans le cas contraire, à extraire les états du système qui peuvent remettre en cause son bon fonctionnement. Dans ce dernier cas, le gain sur le plan économique est très intéressant et appréciable par les ingénieurs qui gagneront à corriger les problèmes détectés par la vérification du modèle avant de passer à l'étape de l'implémentation (programmation).

## Prérequis conseillés

Aucun

## Modules contexte et enjeux :

Cette partie s'articule autour de demi-journées de formation visant à présenter la séquence, l'enseignement d'intégration et à introduire la thématique. Ainsi seront organisées des conférences et tables rondes portant sur l'état actuel de l'ingénierie dirigée par les modèles dans le monde industriel et les défis dans du futur ; ou encore intitulée « The application of Formal Methods to Railway Signalling Software ».

## Cours spécifique (60 HEE) : Conception et vérification des systèmes critiques

### Brève description :

Un système critique est un système dont la panne peut avoir des conséquences graves, comme les systèmes de transport (trains, avions, voitures ...) ou les systèmes de production d'énergie (nucléaire, éolien ...). Ces systèmes

sont complexes et afin de garantir leur bon fonctionnement, il est nécessaire de prendre en compte les aspects continus et événementiels de leur dynamique. Une part du cours sera donc dédiée à la conception et à la modélisation des systèmes critiques et complexes. Par ailleurs, leur sûreté de fonctionnement est porteuse d'enjeux économiques et sociétaux considérables. Une autre part du cours sera alors dédiée aux méthodes et outils (formels ou semi-formels) proposés pour garantir les propriétés de sûreté pendant la phase de conception.

## **Enseignement d'intégration n°1 : Conception d'un système de signalisation sûr pour le ferroviaire**

**Partenaire associé :** ClearSy

**Lieu :** Campus Paris-Saclay

### **Brève description :**

Dans un système ferroviaire, il est primordial que les aiguilles ne bougent pas lorsqu'un train les parcourt, sinon il risque fort de dérailler. À cette fin, un système de signalisation dispose de signaux (un peu comme les feux tricolores sur la route) qui permettent de demander aux trains de s'arrêter avant les aiguilles. Les choses se compliquent dans le cas où le train est trop proche du signal pour pouvoir s'arrêter (même problématique qu'un feu orange pour une voiture). L'objectif de cette étude de cas est de modéliser formellement un tel système et de montrer qu'il est sûr : les trains ne vont pas dérailler.

## **Enseignement d'intégration n°2 : Conception de systèmes intelligents pour le contrôle automatisé du trafic aérien**

**Partenaire associé :** à confirmer

**Lieu :** Campus Paris-Saclay

### **Brève description :**

Les systèmes d'informations critiques dans le domaine avionique sont soumis à des contraintes de temps et de fiabilité très importantes. Leur développement nécessite donc des techniques d'ingénierie prenant en compte ces caractéristiques dès les phases amont de leur cycle de vie. Cet EI s'intéresse donc à la conception des modèles des systèmes intelligents pour contrôler le trafic aérien et à la vérification des certaines propriétés de sûreté sur ces modèles. Ces systèmes mettent en œuvre de nombreux composants interagissant fortement, qui sont parallèles et asynchrones. Tous ces sous-systèmes sont soumis à la vérification et au test pour garantir leur propre fonctionnalité. Par exemple, il est primordial de démontrer l'absence de blocage et la possibilité pour chacun d'assurer un fonctionnement correct dans des délais compatibles avec leurs propres contraintes temporelles. Il est également important d'ordonnancer les actions de ces sous-systèmes et assurer un contrôle fiable de l'ensemble du système. A titre d'exemple, quelques propriétés (formulées en STL) importantes à vérifier : 1) Le trafic aérien ne devrait jamais être autorisé dans les deux sens simultanément sur le même itinéraire 2) L'aéronef doit répondre aux messages dans un délai limité 3) Pour deux aéronefs, il doit y avoir une séparation avec une distance minimale.

## **Enseignement d'intégration n°3 : Automatisation de la conception de la signalisation : de la spécification au code embarqué**

**Partenaire associé :** Prover

**Lieu :** Campus Paris-Saclay

### **Brève description :**

L'objectif principal de cette étude est le développement de système ferroviaire utilisant une approche en deux phases : Développement d'une application générique, et Instanciation de cette application générique pour produire une ou plusieurs applications spécifiques. L'approche développée sera mise en œuvre pour le développement des systèmes d'enclenchements d'une ligne ferroviaire complète en suivant les étapes suivantes :

- Une ligne est découpée en plusieurs postes d'enclenchement (interlockings), en général un par station.
- Les mêmes principes de signalisation sont utilisés tout le long de la ligne.
- Chaque poste d'enclenchement est une instanciation de ces principes génériques. L'étude sera finalisée par une simulation de la ligne entière en liant les différents postes d'enclenchement développés.



# 2SC5810 – Conception et vérification de systèmes critiques

Responsables : **Idir Ait Sadoune**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT INFORMATIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Cours ST**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours vise à aborder à la fois la conception et la vérification des systèmes complexes et critiques en utilisant des techniques issues du Génie Logiciel. Les composants de tels systèmes étant hétérogènes (c-à-d. à la fois physiques et logiciels), les méthodologies et les outils présentés dans ce cours seront multiples et s'intègrent dans le cadre d'un cycle de développement. L'idée est de commencer la phase d'analyse en utilisant des outils semi-formels (UML, SysML, ...), souvent utilisés dans l'ingénierie des systèmes pour décrire la structuration du système et ses interactions, puis d'aborder scientifiquement les phases de conception et de validation en utilisant des techniques formelles du Génie Logiciel (modélisation temporelle, stockastique et hybride, logique temporelle, model-checking). L'objectif principal d'une telle démarche vise à montrer, à travers les modèles formels obtenus, que le système fait bien ce que l'on attend de lui tout en respectant les contraintes imposées par le cahier des charges et par l'environnement, ou dans le cas contraire, à extraire les états du système qui peuvent remettre en cause son bon fonctionnement. Dans ce dernier cas, le gain sur le plan économique est très intéressant et appréciable par les ingénieurs qui gagneront à corriger les problèmes détectés par la vérification du modèle avant de passer à l'étape de l'implémentation (programmation).

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

- Système d'information et programmation,
- Algorithmique et complexité,
- Modélisation

## Plan détaillé du cours (contenu)

- Chapitre 1 - Présentation des logiques temporelles : LTL, CTL
- Chapitre 2 - La vérification avec le Model Checking
- Chapitre 3 - Les automates temporels : Modélisation et Vérification
- Chapitre 4 - Les modèles stochastiques : Modélisation et Vérification

## Déroulement, organisation du cours

- 10,5h de Cours
- 18h de TD : Travaux dirigés

## Organisation de l'évaluation

Examen écrit (1H30)

## Moyens

Les intervenants:

- Marc Aiguier, (Département informatique)
- Idir Ait Sadoune, (Département informatique)
- Paolo Ballarini, (Département informatique)
- Lina Ye (Département informatique)

La langue d'enseignement est le français, mais la majorité des ressources pédagogiques sont écrites en Anglais

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de :

- Modéliser un système à logiciels critiques en utilisant différentes approches formelles (Logique temporelle, Automates, Automates temporisés, modèles stochastiques, automates hybrides).
- Modéliser un système à logiciels critiques en prenant en considération différents types de contraintes (fonctionnelles, non-fonctionnelles, temporelles, ...)
- Analyser scientifiquement le modèle d'un système à logiciels critiques en utilisant des techniques issues du Génie Logiciel (Technique de Vérification formelle : Model Checking).
- Extraire les états d'un système à logiciels critiques qui peuvent remettre en cause son bon fonctionnement.
- Valider le modèle d'un système à logiciels critiques (le système fait bien ce qu'on attend de lui).

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C1 - Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques.
- C2 - Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers
- C4 - Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients
- C6 - Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique
- C7 - Savoir convaincre

# 2SC5891 – Conception d'un système de signalisation sûre pour le ferroviaire

Responsables : **Idir Ait Sadoune**

Département de rattachement : **DOMINANTE - INFORMATIQUE ET NUMÉRIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Il s'agit de découvrir des activités de modélisation de systèmes dit critiques dans un cadre ferroviaire, en mettant en œuvre la CLEARSY Safety Platform et en prouvant certains éléments de modélisation.

Au cours de ce projet, plusieurs fonctions de sûreté seront développées, mises en œuvre et améliorées, en ayant principalement recours à des équations booléennes. Un tel système comportant habituellement des centaines ou des milliers d'équations, il est bien entendu que ce projet n'adresse qu'un sous-ensemble de celles-ci.

Le contrôle commande de système de signalisation est une activité à risques puisqu'une erreur pourrait permettre  
- A un train de dérailler, en faisant bouger l'aiguillage au moment où le train le franchit ou en position inappropriée  
- A deux trains d'entrer en collision par rattrapage, par nez-à-nez ou par prise en écharpe.

Nous allons nous intéresser aux fonctions logiques permettant à un train d'effectuer un déplacement en sécurité pour la topologie de voie retenue.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

- Cours: Modélisation et Vérification des systèmes critiques (le cours spécifique de la ST)
- Introduction à la modélisation avec la méthode B (fait pendant la 1e journée de l'enseignement d'intégration)

## Plan détaillé du cours (contenu)

- - Introduction à la modélisation en utilisant la méthode B.
- - Introduction à l'utilisation de l'Atelier B
- - Introduction à l'utilisation de la Clearsy Safety platform
- - Modélisation d'un système ferroviaire.
- - Vérification des propriétés de sûreté d'un système ferroviaire.
- - Génération d'un programme informatique embraqué dans des cartes électroniques à partir d'un modèle B.

## Déroulement, organisation du cours

Projet sur une semaine (9 demi-journées)

## Organisation de l'évaluation

Les étudiants seront évalués à la suite d'une présentation de 15 à 20 minutes des résultats obtenus.

## Support de cours, bibliographie

Atelier B :

<https://www.clearsy.com/outils/atelier-b/>

Clearsy-Safety-Platform

<https://www.clearsy.com/outils/clearsy-safety-platform/>

<https://www.youtube.com/watch?v=QtmzVYNe0Fo>

## Moyens

- Utilisation de l'Atelier B, outils de développement avec la méthode formelle B (<https://www.clearsy.com/outils/atelier-b/>)
- Utilisation la Clearsy Safety Platform comportant des cartes électronique et un logiciel de développement (<https://www.clearsy.com/outils/clearsy-safety-platform/>).

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Acquis d'apprentissage visés dans le cours :

- Modéliser un système critique en utilisant la méthode formelle B.
- Modélisation des propriétés critiques d'un système dans le cadre ferroviaire.
- Vérification des propriétés de sûreté en utilisant la preuve.
- Générer un programme informatique embarqué dans une carte électronique à partir d'un modèle formel prouvé.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C1 - Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques.
- C2 - Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers
- C4 - Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients
- C6 - Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique
- C7 - Savoir convaincre

# 2SC5893 – Système intelligent pour le contrôle automatisé du trafic aérien

Responsables : **Lina Ye**

Département de rattachement : **DOMINANTE - INFORMATIQUE ET NUMÉRIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Les systèmes d'informations critiques dans le domaine avionique sont soumis à des contraintes de temps et de fiabilité très importantes. Leur développement nécessite donc des techniques d'ingénierie prenant en compte ces caractéristiques dès les phases amont de leur cycle de vie. Cet EI s'intéresse donc à la conception des modèles des systèmes intelligents pour contrôler trafic aérien et à la vérification des certaines propriétés de sûretés. Ces systèmes mettent en œuvre de nombreux composants interagissant fortement, qui sont parallèles et synchrones. Tous ces sous-systèmes sont soumis à la vérification pour garantir leur propre fonctionnalité. Par exemple, il est primordial de démontrer l'absence de blocage et la possibilité pour chaque composant d'assurer un fonctionnement correct dans des délais compatibles avec leurs propres contraintes temporelles.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

ST5 - Systèmes complexes industriels et critiques à logiciels prépondérants

## Plan détaillé du cours (contenu)

En basant sur la description informelle du système critique, les étudiants sont invités à utiliser une approche de modélisation semi-formelle pour capturer et structurer les exigences de sûreté, puis à les transformer en un modèle formel (par exemple des automates temporisés) avant d'appliquer des techniques de model-checking pour la vérification formelle. Une partie facultative est dédiée à développer un outil pour détecter un type de scénarios non réalistes dans les modèles, qui peuvent très souvent perturber les résultats de model checker comme UPPAAL.

## Déroulement, organisation du cours

Projet d'une semaine en intégrant les contenus de cours de ST5, par les méthodes démonstratives, actives et de découverte.

## Organisation de l'évaluation

Rapport et soutenance

## Support de cours, bibliographie

1. Alur, R., Dill, D.L. A theory of timed automata. *Journal of Theoretical Computer Science* 126(2), page: 183–235, 1994
2. Christel Baier and Joost-Pieter Katoen, *Principles of Model Checking (Representation and Mind Series)*. The MIT Press, 2008.
3. Gerd Behrmann, Alexandre David, Kim Guldstrand Larsen. A Tutorial on Uppaal. *Formal Methods for the Design of Real-Time Systems, International School on Formal Methods for the Design of Computer, Communication and Software Systems, SFM-RT*, page:200-236, 2004.
4. Patricia Bouyer, Uli Fahrenberg, Kim Guldstrand Larsen, Nicolas Markey, Joël Ouaknine, James Worrell, *Model Checking Real-Time Systems. Handbook of Model Checking*, page:1001-1046, 2018.
5. Patricia Bouyer, François Laroussinie, Nicolas Markey, Joël Ouaknine, James Worrell, *Timed Temporal Logics. Models, Algorithms, Logics and Tools*, page: 211-230, 2017.
6. Nicolas Navet and Stephan Merz, *Modeling and Verification of Real-Time Systems (1st ed.)*. Wiley-IEEE Press, 2008.

## Moyens

WIFI,  
PROJECTEUR,  
PRISES ELECTRIQUES

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Les étudiants doivent savoir et comprendre comment concevoir un système de sûreté avec les approches informelles et formelles en garantissant les exigences de sûreté.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Les étudiants doivent être capable d'exploiter ses ressources (par exemple leurs propres connaissances nécessaires), de bien maîtriser l'environnement de travail, de faire aboutir les objectifs en produisant des résultats et également de bien développer l'entraide et le partage avec les autres dans le groupe.

# 2SC5894 – Automatisation de la conception de la signalisation : de la spécification au code embarqué

Responsables : **Idir Ait Sadoune**

Département de rattachement : **DOMINANTE - INFORMATIQUE ET NUMÉRIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

L'objectif principal de cette étude est le développement de système ferroviaire utilisant une approche en deux phases : Développement d'une application générique, et Instanciation de cette application générique pour produire une ou plusieurs applications spécifiques.

L'approche développée sera mise en œuvre pour le développement des systèmes d'enclenchements d'une ligne ferroviaire complète en suivant les étapes suivantes :

- Une ligne est découpée en plusieurs postes d'enclenchement (interlockings), en général un par station.
- Les mêmes principes de signalisation sont utilisés tout le long de la ligne.
- Chaque poste d'enclenchement est une instanciation de ces principes génériques.

L'étude sera finalisée par une simulation de la ligne entière en liant les différents postes d'enclenchement développés.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Les élèves doivent avoir pris part au cours "Systèmes critiques" de la ST5

## Plan détaillé du cours (contenu)

- - Modélisation d'un système ferroviaire.
- - Vérification des propriétés de sûreté d'un système ferroviaire.

## Déroulement, organisation du cours

Projet sur une semaine (9 demi-journées)

## Organisation de l'évaluation

Les étudiants seront évalués à la suite d'une présentation de 15 à 20 minutes des résultats obtenus.

## Moyens

Une salle de TD/TP pour ~25 élèves avec connexion WiFi

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Modéliser un système critique.
- Modélisation des propriétés critiques d'un système dans le cadre ferroviaire.
- Vérification des propriétés de sûreté.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C1 - Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques.
- C2 - Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers
- C4 - Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients
- C6 - Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique
- C7 - Savoir convaincre



# ST5 - 59 - ASSISTANCE ET AUTONOMIE DE LA PERSONNE

**Dominante :** VSE (Vivant-Santé-Environnement) et ENE (Energie)

**Langue d'enseignement :** Français

**Campus où le cours est proposé :** Metz

---

## Problématique d'ingénieur

Cette séquence thématique aborde la conception des systèmes motorisés d'assistance aux personnes à mobilité réduite, quelle qu'en soit leur nature, dans ses aspects techniques, économiques, ergonomiques. Cette problématique à fort impact sociétal est doublement au cœur des préoccupations. Tout d'abord, le vieillissement de la population accroît le besoin de ce type de systèmes. Par ailleurs, du fait de l'évolution des systèmes informatiques embarqués à bas coût, il devient maintenant possible de proposer des fonctionnalités de plus en plus complexes, permettant d'élargir le spectre des services fournis qui peuvent aller de l'asservissement des moteurs à un contrôle plus évolué (calcul de trajectoires, évitement d'obstacles) ou encore des systèmes connectés et communicants.

Ainsi, par exemple, un dispositif très répandu de nos jours est le fauteuil roulant pour l'aide aux personnes à mobilité réduite (paralysie des jambes). Ces fauteuils peuvent être simplement mécaniques ou assistés électriquement. Remboursés par la sécurité sociale, ce sont des dispositifs médicaux soumis à homologation.

Au-delà des problèmes techniques, il faut également s'interroger sur le coût (en France le prix est fixé par la sécurité sociale) et sur l'ergonomie. Des expérimentations ont lieu sur des systèmes qui pourraient être différents comme par exemple des exosquelettes.

## Prérequis conseillés

Aucun

## Modules contexte et enjeux :

Cette partie se structure en conférences et table ronde permettant d'appréhender la problématique, les technologies et les enjeux des dispositifs liés à la personne :

- Environnement, type de pathologie, les fauteuils manuels et électriques. Homologation
- Comment améliorer le vécu des personnes
- Démonstration de fauteuils, verrous technologiques, innovation

## Cours spécifique (60 HEE) : Commande d'une chaîne de motorisation

### Brève description :

Ce cours aborde les notions nécessaires à la commande d'une chaîne de motorisation dans ses aspects électroniques (convertisseurs, puissance, alimentation), asservissement (modélisation, observateurs, régulateurs) et numérique (conversion analogique-numérique, programmation, temps réel). Les aspects pratiques seront testés sur cartes à microcontrôleurs afin d'implémenter concrètement un système de régulation de vitesse d'un moteur à courant continu.

## Enseignement d'intégration :

Conception d'un fauteuil roulant motorisé pour personne à mobilité réduite

**Partenaire associé :** Société Logosilver, CERAH (Centre d'Etudes et de Recherche sur l'Appareillage des Handicapés)

**Lieu :** Campus de Metz

**Breve description :**

Un fauteuil roulant pour personne à mobilité réduite doit assurer un niveau de sécurité minimal fixé par des normes. La conception mécanique et le pilotage des moteurs s'associent pour obtenir ensemble cette sécurité. La confrontation des étudiants aux aspects normatifs et sécuritaires en même temps qu'aux aspects techniques mécaniques et électroniques/informatiques les ouvrent à la dimension multidisciplinaire. La spécificité de cet enseignement d'intégration est la prise en compte de la sécurité dans les conceptions techniques. En outre, les tendances actuelles étant que tous les objets soient de plus en plus « connectés », des fonctions de ce type seront envisagées (pilotage du fauteuil depuis un smartphone, pilotage de la maison depuis le fauteuil...).

Cet enseignement d'intégration est conçu sur mesure pour amener à la réalisation concrète d'un fauteuil roulant. L'ensemble est un mini-projet séquencé en séances individuelles thématiques (mécanique, électronique, informatique, automatique...). Les thématiques peuvent être variables en fonction des groupes d'étudiants (tous les groupes ne font pas toutes les thématiques) et suivront un planning permettant d'arriver au final à un fauteuil opérationnel.

# 2SC5910 – Commande d'une chaîne de motorisation

Responsables : **Jean-Louis Gutzwiller**

Département de rattachement : **CAMPUS DE METZ**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Cours ST**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours aborde les notions nécessaires à la commande d'une chaîne de motorisation dans ses aspects électroniques (convertisseurs, puissance, alimentation), asservissement (modélisation, observateurs, régulateurs) et numérique (conversion analogique-numérique, programmation, temps réel). Les aspects pratiques seront testés sur cartes à microcontrôleurs afin d'implémenter concrètement un système de régulation de vitesse d'un moteur à courant continu.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

- Moteur à courant continu
- Convertisseurs continu-continu
- Modélisation mécanique
- Synthèse des lois de commande (régulation analogique et régulation numérique)
- Régulation non linéaire
- Programmation sur microcontrôleur

## Déroulement, organisation du cours

12h de CM, 6h de TD, 15h de TP et 1h30 d'examen.

24 élèves pour les groupes de TD/TP

## Organisation de l'évaluation

Un rapport écrit sur les travaux pratiques, à rendre à la date indiquée par le professeur, sera demandé et un examen écrit individuel d'une heure et demi aura lieu à la fin du cours. La note de l'examen individuel comptera pour 60% et la note du rapport de travaux pratiques comptera pour 40% de la note finale. En cas d'absence, la pénalité standard selon le règlement sera appliquée.

En cas d'échec à l'examen, un examen de rattrapage aura lieu sous la forme d'un examen écrit individuel d'une heure et demi.

## Support de cours, bibliographie

« Commande des entraînements à vitesse variable », polycopié de cours.

## Moyens

Des cours magistraux pour présenter les principes généraux.

Des applications seront testées sur des cartes électroniques pendant des séances de cours dirigés.

Taille des groupes de TD : 24 élèves

Taille des groupes de TP : 24 élèves

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Comprendre le fonctionnement des moteurs
- Choisir les caractéristiques et les performances adaptées au problème
- Mettre au point les lois de commandes
- Maîtriser les systèmes d'asservissement

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques
- C2 : Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers

# 2SC5990 – Conception d'un fauteuil roulant motorisé pour personne à mobilité réduite

Responsables : **Jean-Louis Gutzwiller**

Département de rattachement : **DOMINANTE - VIVANT, SANTÉ, ENVIRONNEMENT, DOMINANTE - ENERGIE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Cet enseignement d'intégration, qui fait partie de la séquence thématique "Assistance et autonomie de la personne", aborde les concepts permettant de faire fonctionner un fauteuil électrique pour personne paralysée. Un tel fauteuil dispose d'un joystick permettant de commander des moteurs qui actionnent les roues. Le fonctionnement du fauteuil doit être le plus précis et le plus rapide possible par rapport aux commandes fournies par la personne. La mécanique, l'électronique et les algorithmes utilisés pour l'asservissement participent de concert à obtenir les performances souhaitées.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Commande d'une chaîne de motorisation

## Plan détaillé du cours (contenu)

Différents sujets seront proposés comme :

- l'étude et la conception d'une carte électronique de commande pour les moteurs,
- l'étude et la conception du programme informatique à mettre dans le microprocesseur,
- l'étude et la conception de la connectivité avec d'autres objets (smartphone, internet),
- la simulation du comportement mécanique du système afin d'optimiser la commande...

## Déroulement, organisation du cours

Les étudiants choisiront, par groupes de 3 à 5, un des sujets proposés. Ces sujets devront être traités durant le temps du projet (du lundi au jeudi) et une évaluation sera effectuée le dernier jour (vendredi).

## Organisation de l'évaluation

Les étudiants devront fournir un compte-rendu écrit par groupe et devront soutenir leur travail par une présentation orale. La note du compte-rendu interviendra pour 50% dans la note finale pour l'ensemble des membres du groupe et la note individuelle obtenue à la présentation orale interviendra également pour 50% sur la note finale.

## Moyens

L'enseignement se fera sous forme d'un projet durant lequel les étudiants auront accès au matériel informatique, électronique et mécanique (selon le sujet du projet).

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de cet enseignement, les étudiants seront capables de :

- concevoir une partie d'une chaîne de commande de moteur (selon le sujet choisi),
- piloter la réalisation du dispositif (donner au fabricant les instructions claires pour la réalisation du dispositif),
- écrire et tester les programmes informatiques nécessaires au fonctionnement du dispositif.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C4 : Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients

C6 : Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

C7 : Savoir convaincre

# ST5 - 60 - NAVIGATION SEMI-AUTONOME DE DRONES

**Dominante :** MDS (Mathématiques et Data Sciences)

**Langue d'enseignement :** Anglais

**Campus où le cours est proposé :** Metz

---

## Problématique d'ingénieur

La collecte de données par un humain est parfois extrêmement difficile, par exemple pour l'exploration/la surveillance de mines abandonnées ou de bâtiments désaffectés, la surveillance de cultures, la surveillance de l'environnement. Ce qui rend difficile l'exploration de ces zones par un humain peut dépendre de l'encombrement de ces zones (p.e. enrochements dans les mines), de l'accessibilité de ces zones (p.e. surveillance de l'état de digues, des bords de rivière ...), de l'étendue du territoire à couvrir (p.e. surveillance de cultures agricoles, de rivières). A ce titre, le développement récent des drones offre beaucoup d'opportunités mais soulève également plusieurs problèmes. A ce jour, le pilotage d'un drone requiert en effet encore un certain niveau d'expertise puisque son contrôle est assez bas niveau. On peut alors envisager une assistance au pilotage où certains aspects du contrôle du drone sont gérés automatiquement, du fait d'un traitement des flux d'information des capteurs par des techniques d'apprentissage automatique. Ce contrôle semi-autonome nécessite dans ce cas de construire à partir des informations des capteurs des représentations plus intégrées à partir desquelles l'humain, comme le contrôleur automatique qui l'assiste, peuvent assurer de concert une navigation robuste du drone.

## Prérequis conseillés

Le cours spécifique et l'enseignement d'intégration nécessite une maîtrise de plusieurs outils (ROS, Linux,...) auxquels les étudiants seront formés pendant la séquence. Cependant, cette formation à ces nouveaux outils demande une réelle motivation et implication des étudiants. Il est également nécessaire de disposer de compétences en programmation Python.

## Modules contexte et enjeux :

Cette partie se structure en conférences et table ronde permettant d'appréhender la problématique, les technologies et les enjeux liés à l'utilisation des drones dans plusieurs domaines cibles de la séquence (interventions de Alérion, Parrot, Safran, STEF)

## Cours spécifique (60 HEE) : Python pour la robotique

### Brève description :

Ce cours présente une approche en python de la programmation robotique. On abordera dans une première partie des fondements en python couvrant les thématiques de la programmation orientée objet, de la programmation système/parallèle. On étudiera ensuite plus en détail les aspects robotiques sur la base de l'écosystème ROS2. On implémentera une bibliothèque de traitement visuel pour la navigation qu'on déploiera sur une plateforme robotique réelle Turtlebot. L'ensemble des réalisations se feront sous Linux avec des outils libres et une partie des TPs permettra aux étudiants de se familiariser avec cet environnement.

## **Enseignement d'intégration : Inspection de bâtiment par un drone (quadricoptère) semi-autonome**

**Partenaire associé :** Parrot

**Lieu :** Campus de Metz

### **Brève description :**

Les étudiants travailleront sur les problématiques liées à l'inspection technique par drones (diagnostic visuel et thermique) des zones difficilement accessibles de sites industriels, sur des cas d'étude fournis par les partenaires industriels pressentis. Ils apporteront ainsi des réponses à leurs besoins en termes d'amélioration de performances énergétiques et de détection d'éventuelles dégradations, permettant en particulier des économies non négligeables au niveau des sites considérés.

Les étudiants auront mis en œuvre des techniques d'asservissement avec la particularité d'inclure un opérateur humain dans la boucle de contrôle. Ils auront également intégré des techniques d'apprentissage automatique (quantification vectorielle, apprentissage supervisé) sur un cas industriel, pour l'interprétation des flux d'information issus des capteurs (vidéo principalement). Il s'agit d'un premier contact, par le versant applicatif et expérimental, avec le domaine de l'apprentissage automatique. Ils auront acquis, au travers de cette expérience, une compétence plus générale sur la conception de systèmes robotiques avec ROS.



# 2SC6010 – Python pour la robotique

Responsables : **Jeremy Fix, Joël Legrand, Herve Frezza-Buet**

Département de rattachement : **CAMPUS DE METZ**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Cours ST**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours présente une approche en python de la programmation robotique. On abordera dans une première partie des fondements en python couvrant les thématiques de la programmation orientée objet, de la programmation système/parallèle. On étudiera ensuite plus en détail les aspects robotiques sur la base de l'écosystème ROS2. On implémentera une bibliothèque de traitement visuel pour la navigation qu'on déploiera sur une plateforme robotique réelle Turtlebot. L'ensemble des réalisations se feront sous Linux avec des outils libres et une partie des TPs permettra aux étudiants de se familiariser avec cet environnement.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

1C1000 : Systèmes d'information et programmation

1C4000 : Traitement du signal

Des connaissances en programmation python sont absolument nécessaires.

## Plan détaillé du cours (contenu)

- TP (2 x 1h30) d'introduction à Linux et à GIT
- CM (2 x 1h30) : Cours programmation objet python
- TP (2 x 1h30) : Programmation orientée objet en python
- TP (2 x 1h30) : Calcul numérique vectorisé efficace avec numpy
- TP (2 x 1h30) : Python multithreadé, multiprocessing
- CM (1h30) : Introduction à ROS2
- TP (2 x 1h30) : Tutoriels d'introduction à ROS2
- TP (4 x 1h30) : Détection de lignes et de points de fuite pour l'asservissement visuel d'un Turtlebot
- TP (2 x 1h30) : Navigation semi-autonome et cartographie visuo-guidée

Volume horaire en HPE:

CM : 4.5 HPE

TP : 24 HPE

## Déroulement, organisation du cours

Le cours est organisé autour de quelques enseignement magistraux accompagnés d'une part importante de mise en pratique. Les TPs, avec des plateformes robotiques réelles ou simulées, seront en particulier l'occasion d'implémenter et expérimenter les différents concepts vus en cours. Cette mise en œuvre reposera fortement sur ROS2. La programmation se fera en Python et l'ensemble des expérimentations se dérouleront sous Linux.

## Organisation de l'évaluation

L'évaluation sera réalisée sur la base de comptes rendus de TPs.

## Moyens

Équipe enseignante : Joel Legrand, Hervé Frezza-Buet, Jeremy Fix  
Outils logiciels : Uniquement des logiciels libres (Linux, Python, ROS, Gazebo)  
Matériel : Turtlebot équipés de LIDAR et caméra 3D  
Salles de TP : Salle de TP avec les logiciels pré-installés

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Structurer un développement informatique par une approche objet en python
- Écrire un code parallèle
- Prendre en main une plateforme robotique
- Code et déployer un ensemble de noeuds ROS2 pour un système robotique

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

**C1** : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques  
**C2** : Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers  
**C6**: Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

# 2SC6090 – Inspection de bâtiment par un drone (quadricoptère) semi-autonome

Responsables : **Jeremy Fix, Joël Legrand, Herve Frezza-Buet**

Département de rattachement : **DOMINANTE - MATHÉMATIQUES, DATA SCIENCES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Les étudiants travailleront sur les problématiques liées à l'inspection technique par drones (diagnostic visuel et thermique) d'environnements intérieurs. Ils apporteront ainsi des réponses à des besoins en termes d'amélioration de performances énergétiques et de détection d'éventuelles dégradations, permettant en particulier des économies non négligeables au niveau des sites considérés.

Dans le cadre de l'enseignement d'intégration, on s'intéresse à aider un opérateur humain en automatisant autant que possible le contrôle du drone et en offrant à l'opérateur un contrôle logique de haut niveau. Les étudiants auront ainsi mis en œuvre des techniques d'asservissement avec la particularité d'inclure un opérateur humain dans la boucle de contrôle. Ils auront également intégré des techniques d'apprentissage automatique et de reconnaissance de forme pour l'interprétation des flux d'information issus des capteurs embarqués (vidéo principalement). Il s'agit d'un premier contact, par le versant applicatif et expérimental, avec le domaine de l'apprentissage automatique.

Ils auront acquis, au travers de cette expérience, une compétence plus générale sur la conception de systèmes robotiques avec ROS.

Attention: Un des points forts de la séquence est la validation expérimentale sur de vrais quadricoptères dans les bâtiments de l'école. Cela suppose d'acquérir la maîtrise de plusieurs outils (ROS, Linux, ...) ainsi que de compétences en programmation python. Un travail conséquent et une réelle motivation sont demandés aux étudiants ; le volume de la ST5 et la disponibilité de l'équipe pédagogique sont renforcés pour vous y accompagner.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Les étudiants devront être à l'aise sous Linux/Ubuntu, avec ROS et OpenCV. Ces pré-requis seront enseignés durant la séquence thématique à laquelle l'EI est associé.

## Plan détaillé du cours (contenu)

L'enseignement d'intégration est divisé en trois grands modules.

Le premier module traite

1) de la boucle d'asservissement de bas niveau régulant les angles de roll/pitch et les vitesses ascensionnelles et de rotation et

2) de quelques asservissements de plus haut niveau (demi-tour, translation le long d'un axe).

Le deuxième module porte sur la gestion dans le temps de comportements directs (vitesses linéaires/angulaires) et de comportements logiques (prendre la porte à gauche, avancer dans le couloir).

Le troisième module comprend toutes les fonctionnalités de traitement d'image (détection des lignes de fuite, calcul du flux optique, ..).

Ces trois modules sont découpés avec une granularité plus fine pour que les étudiants puissent paralléliser le travail.

## Déroulement, organisation du cours

- Présentation des cas d'étude par les partenaires industriels
- Conception de solutions aux problèmes proposés
- Développement des solutions proposées dans un environnement réel
- Mise en œuvre sur de vrais drones et ajustement éventuel des solutions
- Présentation/Démonstration des solutions aux partenaires industriels

## Organisation de l'évaluation

Le travail individuel et en groupe sera évalué pendant la période de l'EI, au fil de l'eau, pour la compétence C6. La présentation orale de chaque groupe, en fin d'EI, sur le problème introduit par un industriel, évaluera les compétences C4 et C7.

## Moyens

Equipe enseignante : Hervé Frezza-Buet, Jérémie Fix

Taille des groupes : environ 5 élèves

Outils logiciels : Uniquement des logiciels libres (Linux, Python, ROS, Gazebo-Sphinx)

Matériel : Chaque groupe disposera d'un bebop2 (prêtés par Parrot), d'un joystick et d'un PC portable

Salles de TP : Salle de TP avec les logiciels pré-installés

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Être capable de réaliser un projet ambitieux de bout en bout
- Travailler en équipe
- Diviser et se répartir le travail d'un projet en sous tâches
- Expérimenter avec une plateforme robotique réelle
- Réaliser un projet logiciel mêlant robotique, traitement du signal et informatique

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C4. Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients
- C6. Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique
- C7. Savoir convaincre

# ST5 - 61 - SMART PHOTONICS SYSTEMS FOR CONTROL AND MEASURE

**Dominante** : PNT (Physique et NanoTechnologie), SCOC (Systèmes Communicants et Objets Connectés)

**Langue d'enseignement** : Anglais

**Campus où le cours est proposé** : Metz

---

## Problématique d'ingénieur

Les systèmes utilisant la photonique – sciences et technologies exploitant la lumière – permettent de mesurer, de réguler et de commander des grandeurs physiques. Ces propriétés des systèmes photoniques sont utilisées largement dans la régulation d'un laser pour les systèmes de production, dans le contrôle de la déviation d'un faisceau pour visualiser un objet ou observer la dynamique de cellules biologiques, ou encore dans la stabilisation d'impulsions ultra-courtes en télécommunications. Par ailleurs, les systèmes photoniques sont des systèmes intelligents dont les mesures servent à faciliter la régulation, par exemple avec le développement de la télémétrie et vélocimétrie laser – techniques utilisées largement en production industrielle et dans nos véhicules, et essentielles pour l'industrie du futur et le véhicule autonome.

Très récemment les systèmes photoniques ont amorcé une révolution dans leur principe et leur usage avec le développement de systèmes qui exploitent la lumière à l'échelle du nanomètre et de l'attoseconde. Ces systèmes innovants par leur physique nouvelle posent des défis importants pour à la fois la mesure de leurs propriétés physiques – compte tenu des échelles spatiales et temporelles très courtes – et l'exploitation de cette mesure pour le développement de capteurs et de systèmes innovants de régulation, compte tenu des limitations de nos systèmes de traitement du signal. En étudiant des systèmes photoniques, cette séquence thématique sera également l'occasion d'apprendre et de maîtriser les notions générales d'analyse, d'identification et de commande de systèmes physiques non-linéaires.

## Prérequis conseillés

Connaissances de base en électromagnétisme, matériaux, électricité générale et électronique

## Modules contexte et enjeux :

Cette partie se structure en conférences, table ronde et visite du site GDI SIMULATION – Elancourt, notamment autour du thème de « la télédétection laser ».

## Cours spécifique (60 HEE) : Photonique pour le contrôle des systèmes physiques

### Brève description :

Ce cours enseignera les notions essentielles de la mesure et de l'exploitation des grandeurs physiques des ondes électromagnétiques optiques, dans le contexte de l'exploitation de la photonique pour l'observation et le contrôle de systèmes physiques. Ainsi ce cours assemblera des connaissances de :

- Mesure et instrumentation optique : généralités en métrologie et analyse d'erreur, photométrie, et détecteurs optiques, métrologie holographique, vélocimétrie, interférométrie.
- Technologies des sources lasers : compléments de physique du solide, matériaux et semi-conducteurs.
- Modélisation et contrôle de sources : analyse et dynamique non-linéaire des sources lasers.
- Génération de signaux optiques : techniques de modulation spatiale et temporelle de signaux optiques; ingénierie et design de faisceaux optiques.

Les notions traitées dans le cours sont :

- Métrologie optique
- Technologies photoniques incluant les matériaux semi-conducteurs et les fibres optiques, la modulation de phase et d'intensité
- Analyse des signaux exploitant notamment la dynamique non-linéaire d'un système physique
- Propriétés et régulation des systèmes non-linéaires

## **Enseignement d'intégration : Télédétection laser (LIDAR) pour la surveillance optronique et la détection de cibles**

**Partenaire associé :** GDI SIMULATION - Elancourt

**Lieu :** Campus de Metz

**Brève description :**

Cet EI est fondé sur l'utilisation des lasers en tant qu'outils pour contrôler l'infiniment petit et l'ultra rapide pour, notamment, des applications dans le domaine de la surveillance optronique et la détection de cibles. Il est proposé de développer un système photonique dont l'application visée est la télémétrie laser (LIDAR). Ces lidars ont un potentiel énorme pour la défense, l'environnement, la sécurité : identification de mobiles, détection de gaz, imagerie active ... La détection et l'identification de danger ou de cibles est un élément clé des dispositifs de défense et sécurité, et sont des éléments clés par exemple des dispositifs développés par GDI SIMULATION pour l'aviation civile ou la simulation de tir laser pour l'entraînement des forces armées. Les étudiants effectueront la réalisation expérimentale du LIDAR à l'aide de plateformes ARDUINO. Ils devront : i/ comprendre les grandeurs physiques essentielles liées à une onde électromagnétique optique ii/ concevoir et réaliser un système photonique asservi iii/ concevoir et contrôler des faisceaux optiques innovants en exploitant des techniques de modulation spatiale et temporelle du signal v/ faire un choix de composants pour répondre à un problème économique de dimensionnement et de consommation d'énergie.

Les avancées récentes dans la réalisation de faisceaux optiques innovants permettront d'explorer de nouvelles topologies de faisceaux (ex faisceaux d'Airy : non-diffractants, de trajectoire curviligne, auto-régénérant en cas d'obstacles) qui ouvrent la voie à une amélioration des performances (résolution spatiale, rapidité, etc.).

# 2SC6110 – Photonique pour le contrôle des systèmes physiques

Responsables : **Nicolas Marsal**

Département de rattachement : **CAMPUS DE METZ**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Cours ST**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours enseignera les notions essentielles de la mesure et de l'exploitation des grandeurs physiques des ondes électromagnétiques optiques, dans le contexte de l'exploitation de la photonique pour l'observation et le contrôle de systèmes physiques.

Notions traitées dans le cours :

- Métrologie optique
- Technologies photoniques incluant les matériaux semi-conducteurs et les fibres optiques, la modulation de phase et d'intensité
- Analyse des signaux exploitant notamment la dynamique non-linéaire d'un système physique
- Propriétés et régulation des systèmes non-linéaires

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Connaissances de base en électromagnétisme, matériaux, électricité générale et électronique.

## Plan détaillé du cours (contenu)

- Mesure et instrumentation optique : généralités en métrologie et analyse d'erreur, photométrie, et détecteurs optiques, métrologie holographique, vélocimétrie, interférométrie.
- Technologies des sources lasers : compléments de physique du solide, matériaux et semi-conducteurs.
- Modélisation et contrôle de sources : analyse et dynamique non-linéaire des sources lasers.
- Génération de signaux optiques : techniques de modulation spatiale et temporelle de signaux optiques; ingénierie et design de faisceaux optiques.

## Déroulement, organisation du cours

30h00 CM et 3h00 TD-TP

## Organisation de l'évaluation

Examen Oral par groupe de 3-4 étudiants. 15 minutes de présentation sur un sujet photonique imposé.

## Moyens

Intervenants de cours : Nicolas Marsal, Delphine Wolfersberger, Marc Sciamanna

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Grâce à ce cours, les étudiants apprendront les grandeurs et les outils physiques qui permettent de caractériser spatialement des faisceaux optiques, d'analyser leurs fréquences, de moduler leurs intensités, leurs phases de les guider dans différents systèmes physiques (fibre, guide d'onde...)

Ils verront les dynamiques linéaires et non linéaires associées à ces faisceaux lorsqu'ils se propagent dans différents matériaux et/ou systèmes physiques.

Grâce à ce cours et en complément de l'E1, l'étudiant sera capable de concevoir physiquement un LIDAR, d'en tester ses performances, de le comparer à d'autres équipements utilisés en métrologie optique.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

C2 Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers



# 2SC6190 – Télédétection laser (LIDAR) pour la surveillance optronique et la détection de cibles

Responsables : **Delphine Wolfersberger**

Département de rattachement : **DOMINANTE - PHYSIQUE ET NANOTECHNOLOGIES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Cet EI est basé sur l'utilisation des lasers en tant qu'outils pour contrôler l'infiniment petit et l'ultra rapide pour, notamment, des applications dans le domaine de la surveillance optronique et la détection de cibles. Il est proposé de développer une solution innovante de contrôle-commande pour la génération d'impulsions lasers ultra-courtes et la mise en œuvre d'un système photonique dont l'application visée est la télémétrie laser (LIDAR : radar laser). Ces lidars ont un potentiel énorme pour la défense, l'environnement, la sécurité : identification de mobiles, détection de gaz, imagerie active,... La détection et l'identification de danger ou de cibles est un élément clé des dispositifs de défense et sécurité, et sont des éléments clés par exemple des dispositifs développés par GDI Simulation pour l'aviation civile ou la simulation de tir laser pour l'entraînement des forces armées.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

Les élèves seront répartis en différents groupes réalisant chacun 4 travaux pratiques de durée 1/2 journée.

Proposition de Travaux pratiques :

1/ une séance sur le laser émetteur : réalisation et caractérisation d'un émetteur laser régulé en température de manière à maintenir sa puissance constante

2/ une séance sur la génération d'une impulsion laser : étude de la génération d'une impulsion laser via l'utilisation d'une boucle de rétroaction optique

3/ une séance sur la mise en forme du faisceau laser : mise en forme du faisceau laser via l'optique adaptée et/ou via l'utilisation d'un modulateur spatial de lumière (SLM) permettant à terme l'utilisation de faisceaux non conventionnels (ex faisceaux d'Airy)

4/ une séance sur le récepteur : mise au point du dispositif de réception et d'analyse du signal optique

Ces 4 séances seront suivies par une séance sur la synthèse des différentes expériences pour la réalisation d'un dispositif de télémétrie et éventuellement la mise au point du système d'asservissement nécessaire pour que le signal laser touche la cible.

## Déroulement, organisation du cours

Réalisation expérimentale et numérique en équipe sous la forme d'un challenge

## Organisation de l'évaluation

Présentation orale devant les professeurs de CS et le partenaire industriel GDI simulation

## Moyens

Dispositifs expérimentaux optiques  
Equipe pédagogique : Delphine Wolfersberger - Nicolas Marsal

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Les étudiants effectueront la réalisation expérimentale du LIDAR à l'aide de plateformes ARDUINO. Ils devront :

- i/ comprendre les grandeurs physiques essentielles liées à une onde électromagnétique optique
- ii/ concevoir et réaliser un système photonique asservi
- iii/ concevoir et contrôler des faisceaux optiques innovants en exploitant des techniques de modulation spatiale et temporelle du signal
- iv/ faire un choix de composants pour répondre à un problème économique de dimensionnement et de consommation d'énergie.

Les avancées récentes dans la réalisation de faisceaux optiques innovants permettront d'explorer de nouvelles topologies de faisceaux (ex faisceaux d'Airy : non-diffractants, de trajectoire curviligne, auto-régénérant en cas d'obstacles) qui ouvrent la voie à une amélioration des performances (résolution spatiale, rapidité, etc.).

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C4 Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients  
C6 Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique  
C7 Savoir Convaincre

# ST5 - 62 - INTELLIGENCE ENERGETIQUE ET SMART BUILDING

**Dominante** : GSI (Grands Systèmes en Interaction) et SCOC (Systèmes Communicants et Objets Connectés)

**Langue d'enseignement** : Français avec modalités spécifiques pour permettre l'adaptation des étudiants à faible niveau en français : tous les supports sont en anglais, les travaux dirigés, les travaux pratiques ainsi que l'enseignement d'intégration **sont assurés en anglais**. Des séances de soutien en anglais sont également programmées.

**Campus où le cours est proposé** : Rennes

---

## Problématique d'ingénieur

Le bâtiment ne doit plus être considéré comme un simple consommateur mais comme un véritable acteur énergétique parfaitement intégré dans son écosystème et doit s'inscrire pleinement dans une vision de société renouvelée, où confort et santé sont en harmonie avec la gestion de l'énergie. Il faut donc pour ce faire repenser les systèmes qui le composent, par de nouvelles fonctions de pilotage et par des interactions plus fortes avec les occupants. L'écosystème « bâtiment » est complexe, car il est constitué d'un ensemble hétérogène de systèmes : production locale, stockage, approvisionnement, vente, et les différents équipements, qui doivent être coordonnés pour une gestion optimisée.

Les défis de l'ingénieur qui se posent alors sont d'abord l'analyse des besoins et la spécification des systèmes intelligents de contrôle. Cette conception repose sur l'intégration d'algorithmes de contrôle déployés sur des systèmes communicants pour atteindre un compromis optimal entre technologie – coût – efficacité, comme par exemple la performance en boucle fermée, fréquence et protocole de communication, autonomie des capteurs et durée de vie des actionneurs.

## Prérequis conseillés

Aucun

## Modules contexte et enjeux :

Cette partie s'organise autour de plusieurs conférences qui doivent donner aux élèves les clés pour comprendre les grands enjeux associés à ce sujet de séquence thématique. A commencer par les enjeux industriels : quels sont les besoins d'aujourd'hui et à venir, en termes de services et de technologies : challenges et verrous scientifiques. Puis présentation des difficultés rencontrées pour la captation de données hétérogènes à partir desquelles on peut réaliser des analyses et exploiter ces données.

Des apports de connaissances seront donnés pour comprendre les besoins et l'hétérogénéité à prendre en compte pour la gestion des confort (qualité de l'air, confort thermique, ...). Enfin, une dernière intervention présentera le point de vue « Recherche » autour des bâtiments intelligents.

## Cours spécifique (60 HEE) :

Les étudiants devront choisir entre l'un des deux cours spécifiques suivants :

- **Option 1 : Communications à haute performance énergétique**

### Brève description :

Avec une consommation électrique mondiale de 6 à 10% correspondant à 4% des émissions de gaz à effet de serre, les STIC (Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication) doivent repenser leur façon de transmettre, traiter et stocker les données. L'arrivée de la 5G (5<sup>ème</sup> Génération de mobiles) et l'explosion des objets connectés (Internet of Things) laissent en particulier présager une croissance du secteur encore très forte pour les années à venir, justifiant d'autant plus l'urgence pour proposer des communications plus respectueuses de

l'environnement. Les besoins en efficacité spectrale (transmettre un débit dans une bande passante donnée) doivent alors se conjuguer avec une forte contrainte d'efficacité énergétique (transmettre tout en consommant le moins possible). Ce cours forme aux concepts et outils de communication numérique pour lesquels l'efficacité énergétique est explicitement prise en compte.

## • **Option 2 : Architecture système et modélisation**

### **Brève description :**

Les systèmes actuels sont de plus en plus complexes. Cette complexité provient de la complexité de leur structure et des interactions entre les différents éléments constitutifs, de l'augmentation et de la complexité des données échangées, de l'hétérogénéité des concepts, des substances, des métiers, des standards, mais aussi de la complexité humaine (organisation, ergonomie, psychologie, sociologie...). Afin de mieux maîtriser cette complexité, il est souvent nécessaire de s'appuyer sur une modélisation des différents artefacts du système. Cette modélisation permet à différentes phases de la vie du système de mieux comprendre les besoins auxquels il doit répondre, de structurer son architecture, de faire des analyses afin de prédire son comportement et ainsi de faire un choix justifié entre plusieurs solutions. Les différents modèles constituent un référentiel commun pour les différentes parties prenantes de la conception du système. L'objectif de ce cours est de former les élèves à la modélisation et la structuration d'une architecture système. Les systèmes technologiques seront privilégiés avec des domaines tels que l'avionique, le ferroviaire, l'industrie, la santé, l'énergie etc. L'accent sera aussi mis sur la capacité à identifier les attributs caractéristiques de la performance essentiels dans la conception, l'implémentation, l'exploitation et le management des systèmes complexes.

## **Enseignement d'intégration 1 : Pilotage hiérarchisé du confort thermique**

**Partenaire associé :** Delta Dore (à confirmer)

**Lieu :** Campus de Rennes

### **Brève description :**

L'objectif est de définir un système modulaire, permettant d'implémenter des stratégies de commande hiérarchisées entre une régulation locale du confort par zone et un superviseur gérant l'intermittence de l'occupation, la limitation de puissance disponible afin de minimiser la consommation liée au confort thermique. Les challenges induits par ce projet sont la prise en compte des enjeux sociétaux (humain, confort et efficacité énergétique), des contraintes techniques (limitation de puissance, facilité de mise en œuvre et robustesse de la solution) et les technologies permettant la mise en œuvre. Les différents groupes devront collaborer pour aborder les différents aspects du projet et aboutir à la réalisation d'une preuve de concept.

## **Enseignement d'intégration 2 : Pilotage à distance du confort thermique**

**Partenaire associé :** Delta Dore (à confirmer)

**Lieu :** Campus de Rennes

### **Brève description :**

Dans le cadre de la rénovation thermique, des solutions de pilotage à distance sont souvent bien plus simples à déployer que des solutions qui nécessitent de faire passer de nouveaux câbles à travers les murs. L'objectif de cet enseignement d'intégration est de réaliser l'ensemble du système de régulation à distance du chauffage de plusieurs pièces. Cette réalisation requiert en particulier l'implémentation réelle du système de communication entre le contrôleur et les dispositifs de chauffage. Des groupes seront ainsi mis en concurrence pour trouver la solution technologique la plus pertinente tout en intégrant des dimensions économiques et écologiques.

# 2SC6210 – Communications à haute performance énergétique

Responsables : **Yves Louet**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Cours ST**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Avec une consommation électrique mondiale de 6 à 10% correspondant à 4% des émissions de gaz à effet de serre, les STIC (Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication) doivent repenser leur façon de transmettre, traiter et stocker les données. L'arrivée de la 5G (5ième Génération de mobiles) et l'explosion des objets connectés (Internet of Things) laissent en particulier présager une croissance du secteur encore très forte pour les années à venir, justifiant d'autant plus l'urgence pour proposer des communications plus respectueuses de l'environnement. Les besoins en efficacité spectrales (transmettre un débit dans une bande passante donnée) doivent alors se conjuguer avec une forte contrainte d'efficacité énergétique (transmettre tout en consommant le moins possible).

Les objectifs du cours sont alors

- de faire prendre conscience de l'empreinte carbone du domaine des STIC
- de dresser un état des lieux des communications actuelles et des raisons qui expliquent la consommation des équipements
- de présenter les éléments clés d'une chaîne de communications et les éléments dimensionnant (débit, bande passante, bilan de liaison, qualité de service, efficacité spectrale, efficacité énergétique, ...).
- de comprendre les différences entre signaux à enveloppe constante/enveloppe non constantes
- de présenter les formats de transmission à enveloppe constante (CPM, MSK, GMSK, FSK, OQPSK, ....) et les récepteurs associés
- de présenter les standards dans lesquels ces standards sont utilisés (téléphonie mobile, IoT, Bluetooth, ....)
- de comparer les schémas de transmission entre eux (modulations linéaires et non linéaires)

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Une partie des prérequis de ce cours coïncident avec les notions abordées dans le cours de 1A "Traitement du signal" (1CC4000). On retiendra en particulier :

- modélisation déterministe des signaux
- notions de puissance, énergie, corrélation
- caractérisation spectrale des signaux et transformation de Fourier
- analyse spectrale
- opération de filtrage et convolution linéaire
- échantillonnage des signaux et repliement spectral
- Transformation de Fourier discrète

## Plan détaillé du cours (contenu)

### 1. Introduction : l'empreinte carbone des STIC

- a. Les réseaux
- b. Les équipements

### 2. Les modulations linéaires

- a. Codage binaire à symboles
- b. Codage symbole à signal ; filtrage de mise en forme ; interférence entre symboles
- c. Densité spectrale de puissance
- d. Exemple de standards

### 3. Les modulations non linéaires

- a. CPM (FSK, MSK, GMSK, ...)
- b. Architectures des récepteurs
- c. Exemples de standards

### 4. Comparaisons modulations linéaires / non linéaires

- a. Efficacité spectrale
- b. Efficacité énergétique
- c. Taux d'erreur binaire sur canal gaussien

## Déroulement, organisation du cours

Cet enseignement sera décomposé entre trois parties pour les heures de présentiel élève (HPE) :

- 16,5 heures de cours magistraux
- 4,5 heures de travaux dirigés
- 12 heures d'études de laboratoires

Par ailleurs, 25,5 heures de travail personnel sont programmées. Enfin cet enseignement sera évalué par un examen de 1,5 heure et par les compte-rendus d'études de laboratoires.

Les enseignants intervenants sont Yves Louët (responsable du cours) et Haïfa Fares.

La langue d'enseignement des cours magistraux sera le français avec modalités spécifiques pour permettre l'adaptation des étudiants à faible niveau en français : tous les supports sont en anglais, les travaux dirigés, les travaux pratiques ainsi que l'enseignement d'intégration pourront être assurés en anglais. Des séances de soutien en anglais sont également programmées.

## Organisation de l'évaluation

Cet enseignement sera évalué par : une note de compte-rendus de travaux de laboratoires (coefficient 0,2) et une note d'un examen écrit d'une durée de 1h30 (coefficient 0,8)

Les compétences 1 et 2 seront évaluées à travers l'introduction (enjeux et contexte) et le cours spécifique. Les compétences 4, 6 et 7 seront évaluées lors de la soutenance finale de l'enseignement d'intégration

## Support de cours, bibliographie

- [1] J. B. Anderson, T. Aulin, and C.-E. Sundberg, Digital Phase Modulation. New York: Plenum Press, 1986.
- [2] L. H. J. Lampe, R. Tzschoppe, J. B. Huber, and R. Schober, "Noncoherent Continuous- Phase Modulation for DS-CDMA," in Communications, 2003. ICC '03. IEEE International Conference on, vol. 5, pp. 3282–3286 vol.5, May 2003.
- [3] M. Mouly and M.-B. Pautet, The GSM System for Mobile Comm.. Telecom Publishing, 1992.
- [4] M. K. Simon, Bandwidth-Efficient Digital Modulation with Application to Deep-Space Communications. John Wiley & Sons, 2005.
- [5] Reducing the Energy Consumption of Photonics Hardware in Data Center Networks Authors: Richard Penty, Jonathan Ingham, Adrian Wonfor, Kai Wang, Ian White Richard Penty, Core Switching and Routing Working Group Adrian Wonfor, Green Touch, 2012

## Moyens

Cet enseignement sera décomposé en trois parties pour les heures de présentiel élève (HPE) :

- 16,5 heures de cours magistraux
- 4,5 heures de travaux dirigés
- 12 heures d'études de laboratoires

Par ailleurs, 25,5 heures de travail personnel sont programmées. Enfin cet enseignement sera évalué par un examen de 1,5 heures et par les compte-rendus d'études de laboratoires.

Les enseignants intervenants sont Yves Louët (responsable du cours) et Haïfa Fares.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera en mesure de :

- évaluer l'impact environnemental du domaine des STIC (Sciences et Technologies de l'Information et des Communications)
- identifier les traitements & éléments les plus consommateurs en énergie pour transmettre une information
- argumenter sur le choix des paramètres d'une transmission en fonction des besoins
- simuler une transmission radio à haute efficacité énergétique et d'en établir les performances
- connaître les traitements numériques nécessaires pour transmettre une information
- expliquer le compromis entre efficacité spectrale (recherche du débit) et efficacité énergétique (économie d'énergie) pour une transmission
- justifier l'emploi de formes d'onde à haute efficacité énergétique dans des contextes bien particuliers (Internet des Objets, transmissions à bas débit, besoin d'autonomie, ...).

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

C2 : Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers

C4 : Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients

C6 : Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

C7 : Savoir convaincre

# 2SC6291 – Pilotage hiérarchisé du confort thermique

Responsables : **Herve Gueguen, Romain Bourdais**

Département de rattachement : **DOMINANTE - SYSTÈMES COMMUNICANTS ET OBJETS CONNECTÉS, DOMINANTE - GRANDS SYSTÈMES EN INTERACTION**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **Rennes**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Le bâtiment ne doit plus être considéré comme un simple consommateur mais comme un véritable acteur énergétique parfaitement intégré dans son écosystème et doit s'inscrire pleinement dans une vision de société renouvelée, où confort et santé sont en harmonie avec la gestion de l'énergie. Il faut donc pour ce faire, repenser les systèmes qui le composent, par de nouvelles fonctions de pilotage et par des interactions plus fortes avec les occupants. L'écosystème «bâtiment» est complexe, car il est constitué d'un ensemble hétérogène des systèmes : production locale, stockage, approvisionnement, vente, et les différents équipements, qui doivent être coordonnés pour une gestion optimisée.

Les défis de l'ingénieur qui se posent alors sont d'abord l'analyse des besoins et la spécification des systèmes intelligents de contrôle. Cette conception repose l'intégration d'algorithmes de contrôle déployés sur des systèmes communicants pour atteindre un compromis optimal entre technologie – coût – efficacité, comme par exemple la performance en boucle fermée, fréquence et protocole de communication, autonomie des capteurs et durée de vie des actionneurs.

L'objectif est de définir un système modulaire, permettant d'implémenter des stratégies de commande hiérarchisée entre une régulation locale du confort par zone et un superviseur gérant l'intermittence de l'occupation, la limitation de puissance disponible afin de minimiser la consommation liée au confort thermique. Les challenges induits par ce projet sont la prise en compte des enjeux sociétaux (humain, confort et efficacité énergétique), des contraintes techniques (limitation de puissance, facilité de mise en œuvre et robustesse de la solution) et les technologies permettant la mise en œuvre. Les différents groupes devront collaborer pour aborder les différents aspects du projet et aboutir à la réalisation d'une preuve de concept.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Commande des systèmes dynamiques (cours commun 2A)

Le cours spécifique Architecture Système et Modélisation

## Plan détaillé du cours (contenu)

Cet enseignement d'intégration est construit à partir d'un simulateur/émulateur du comportement thermique d'un bâtiment, dont les données météorologiques et conditions d'utilisation sont issues des données de la ville de Rennes.

Le gestionnaire d'énergie que les élèves devront construire devra être implémenté et validé dans le simulateur.



## Déroulement, organisation du cours

L'activité pédagogique alterner travail en commun et travail en mini-groupe pour arriver à une proposition collective en fin de semaine.

Les cours sont en français avec modalités spécifiques pour permettre l'adaptation des étudiants à faible niveau en français : tous les supports sont en anglais, les travaux dirigés, les travaux pratiques ainsi que l'enseignement d'intégration sont assurés en anglais. Des séances de soutien en anglais sont également programmées.

## Organisation de l'évaluation

L'activité sera évaluée lors des différents points quotidiens et lors de la présentation finale.

## Moyens

Un simulateur de la thermique du bâtiment est mis à la disposition des élèves . Ils pourront alors travailler par groupe sur le projet, en profitant de l'encadrement de 2 enseignants chercheurs de l'école aux compétences complémentaires (Modélisation système et automatique)

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, les élèves seront capables :

- de mettre en oeuvre une stratégie de commande collaborative
- de simuler le comportement du bâtiment et d'évaluer la pertinence de la solution proposée
- de présenter une solution technologique et de la valoriser d'un point de vue technico-économique

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C4.1 : Identifier et (re)formuler le besoin de création de valeur du client ainsi que les enjeux et contraintes associés. Identifier et intégrer les autres parties prenantes, internes et externes ainsi que les autres dimensions non évoquées initialement (techniques, économiques, humaines, etc.)

C6.2 : Concevoir un logiciel

C7.1 : Sur le fond : Structurer ses idées et son argumentation, être synthétique (hypothèses, objectifs, résultats attendus, démarche et valeur créée)

# 2SC6292 – Pilotage à distance du confort thermique

Responsables : **Haïfa Jridi**

Département de rattachement : **DOMINANTE - GRANDS SYSTÈMES EN INTERACTION, DOMINANTE - SYSTÈMES COMMUNICANTS ET OBJETS CONNECTÉS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Cet enseignement vise à mettre en œuvre les acquis des cours de la ST "Intelligence énergétique et bâtiments intelligents" pour concevoir un système de contrôle automatique du confort thermique dans un espace multi-zone donc avec des considérations et des ressources différentes.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

- Communications à haute efficacité énergétique
- Intelligence économique et smart building

## Déroulement, organisation du cours

- Travail en équipe (brainstorming)
- Harmonisation des tâches et des outils utilisés :
  - \* Simulink pour les simulations
  - \* GNU-Radio pour l'émulation d'une transmission réelle
- Définition des besoins et des indicateurs de performance
- préparation des livrables

## Organisation de l'évaluation

La note finale comporte une évaluation de l'apport individuel (travail en sous-groupes et implication) et une évaluation collective (livrables, validations techniques intermédiaires, présentation finale). Une pénalité de - 2 pts est appliquée par demi-journée d'absence injustifiée

## Moyens

- Equipe enseignante pour l'encadrement : Romain Bourdais et Haïfa Farès.
- Outils logiciels : MatLab et GNU-Radio pour les simulations
- Outils matériels : des modules USRP pour transmissions réelles à paramétrer grâce à GNU-Radio.
- Salles de TP

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- - Conception d'un système de régulation à distance pour un espace multi-zone
- Introduction à la radio logicielle
- Conception d'une chaîne de communication point-à-point entre le bâtiment et le contrôleur
  - - Prise en compte des compromis entre les paramètres de la communication sans fil et la qualité de service du contrôle

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Compétences développées : C1.4, C4.2, C6.1 et C7.1.

# ST5 - 63 - SYSTEMES INTELLIGENTS ET EMBARQUES POUR LA SANTE

**Dominante** : GSI (Grands Systèmes en Interaction), VSE (Vivant-Santé-Environnement) et SCOC (Systèmes Communicants et Objets Connectés)

**Langue d'enseignement** : Français avec modalités spécifiques pour permettre l'adaptation des étudiants à faible niveau en français : la plupart des supports de cours sont en anglais et l'enseignement d'intégration est assuré à la fois en français et en anglais.

**Campus où le cours est proposé** : Rennes

---

## Problématique d'ingénieur

Les avancées technologiques en termes de miniaturisation des éléments de mesure et de pilotage de grandeurs physiologiques permettent d'entrevoir de nouvelles solutions pour le soin des patients : substitution pour le contrôle d'organes défectueux, délivrance continue, automatisée et adaptée au patient, de traitements thérapeutiques. D'autre part l'intégration des capacités de communication numérique entre ces éléments de contrôle et les objets connectés du quotidien (smartphone, tablettes, ...) ouvrent de nouvelles opportunités pour une meilleure implication du patient dans son protocole, ou pour le suivi par son médecin.

Les enjeux sociétaux sont évidents, qu'il s'agisse de gain en santé et en confort de vie quotidienne pour le patient tout autant que de diminution de risques de pathologies graves à plus long terme.

Pour l'ingénieur, le défi est de proposer une solution intégrée fiable, simple d'utilisation et de réglage, peu énergivore, et facilement adaptable à une grande diversité de patients.

## Prérequis conseillés

Aucun

## Modules contexte et enjeux :

Cette partie s'organise autour de plusieurs conférences qui doivent donner aux élèves les clés pour comprendre les grands enjeux associés à ce sujet de séquence thématique. Ainsi, seront abordés les aspects médicaux avec le cas du traitement du diabète, la problématique de l'embarqué pour la santé, les aspects éthiques, sociaux et humains au travers de l'influence des objets connectés, la sécurité des données personnelles, l'incidence des antennes.

## Cours spécifique :

Les étudiants devront choisir entre l'un des deux cours spécifiques suivants.

- **Option 1 (60 HEE, FR) : Communications à haute performance énergétique**

**Brève description** : Avec une consommation électrique mondiale de 6 à 10% correspondant à 4% des émissions de gaz à effet de serre, les STIC (Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication) doivent repenser leur façon de transmettre, traiter et stocker les données. L'arrivée de la 5G (5<sup>ème</sup> Génération de mobiles) et l'explosion des objets connectés (Internet of Things) laissent en particulier présager une croissance du secteur encore très forte pour les années à venir, justifiant d'autant plus l'urgence pour proposer des communications plus respectueuses de l'environnement. Les besoins en efficacité spectrales (transmettre un débit dans une bande passante donnée) doivent alors se conjuguer avec une forte contrainte d'efficacité énergétique (transmettre tout en consommant le moins possible). Ce cours forme aux concepts et outils de communication numérique pour lesquels l'efficacité énergétique est explicitement prise en compte.

## • **Option 2 (60 HEE, AN) : Architecture Système et Modélisation**

**Brève description :** Les systèmes actuels sont de plus en plus complexes. Cette complexité provient de la complexité de leur structure et des interactions entre les différents éléments constitutifs, de l'augmentation et de la complexité des données échangées, de l'hétérogénéité des concepts, des substances, des métiers, des standards, mais aussi de la complexité humaine (organisation, ergonomie, psychologie, sociologie...). Afin de mieux maîtriser cette complexité il est souvent nécessaire de s'appuyer sur une modélisation des différents artefacts du système. Cette modélisation permet à différentes phases de la vie du système de mieux comprendre les besoins auxquels il doit répondre, de structurer son architecture, de faire des analyses afin de prédire son comportement et ainsi de faire un choix justifié entre plusieurs solutions. Les différents modèles constituent un référentiel commun pour les différentes parties prenantes de la conception du système. L'objectif de ce cours est de former les élèves à la modélisation et la structuration d'une architecture système. Les systèmes technologiques seront privilégiés avec des domaines tels que l'avionique, le ferroviaire, l'industrie, la santé, l'énergie etc. L'accent sera aussi mis sur la capacité à identifier les attributs caractéristiques de la performance essentiels dans la conception, l'implémentation, l'exploitation et le management des systèmes complexes.

**Enseignement d'intégration :** Système intelligent pour la régulation personnalisée de glycémie

**Partenaire associé :** CHU Rennes – Service Diabétologie

**Lieu :** Campus de Rennes

**Brève description :**

L'objectif est de proposer un système d'aide à la régulation de glycémie pour des patients diabétiques. Ce système doit répondre à des problématiques diverses : sûreté de fonctionnement et confort d'utilisation pour le patient, intégration numérique des algorithmes de pilotage, capacité d'interaction avec des éléments de contrôle (capteur sous-cutané de glycémie, micro pompe de délivrance d'insuline ...) via des protocoles de communications divers et de faible coût énergétique. Il doit permettre une interaction en local avec le patient et à distance avec un médecin pour le suivi des données biomédicales.

# 2SC6310 – Architecture Système et Modélisation

Responsables : **Herve Gueguen, Nabil Sadou**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Les systèmes actuels sont de plus en plus complexes. Cette complexité provient de la complexité de leur structure et des interactions entre les différents éléments constitutifs, de l'augmentation et de la complexité des données échangées, de l'hétérogénéité des concepts, des substances, des métiers, des standards, mais aussi de la complexité humaine (organisation, ergonomie, psychologie, sociologie...).

Afin de mieux maîtriser cette complexité il est souvent nécessaire de s'appuyer sur une modélisation des différents artefacts du système. Cette modélisation permet à différentes phases de la vie du système de mieux comprendre les besoins auxquels il doit répondre, de structurer son architecture, de faire des analyses afin de prédire son comportement et ainsi de faire un choix justifié entre plusieurs solutions. Les différents modèles constituent un référentiel commun pour les différentes parties prenantes de la conception du système.

L'objectif de ce cours est de former les élèves à la modélisation et la structuration d'une architecture système. Les systèmes technologiques seront privilégiés avec des domaines tels que l'avionique, le ferroviaire, l'industrie, la santé, l'énergie etc. L'accent sera aussi mis sur la capacité à identifier les attributs caractéristiques de la performance essentiels dans la conception, l'implémentation, l'exploitation et le management des systèmes complexes.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

1. Introduction à la modélisation système
2. Modélisation des besoins des parties prenantes et des exigences
3. Modélisation et structuration de l'architecture système
4. Modélisation discrète et continue/ composition
5. Choix d'une structuration organique
6. Modélisation des différentes solutions techniques et analyse des compromis

## Déroulement, organisation du cours

Les cours sont en français **avec modalités spécifiques pour permettre l'adaptation des étudiants à faible niveau en français** : tous les supports sont en anglais, les travaux dirigés, les projets sont assurés en anglais. Des séances spécifiques en anglais sont programmées.

## Organisation de l'évaluation

Examen écrit (1h) (30%) et contrôle continu (70%)

## Moyens

Cours TD, BE.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de ce cours, les élèves seront capables de :

- Concevoir et déployer la modélisation d'un système (Observer, Définir le système, Proposer un modèle formel, Analyser et Exploiter les résultats)
- Comprendre les concepts de la modélisation système (notion de composants, différentes hiérarchies utilisées dans la modélisation, principes de décomposition) avec un accent particulier sur les interactions entre les composants d'un système (causale ou noncausale, synchrone ou Asynchrone, interfaces d'échange d'information ou d'énergie, etc.)
- Comprendre et analyser les interactions afin de bien structurer l'architecture d'un système pour favoriser sa modularité et ses futures évolutions.
- Maîtriser et déployer les différentes techniques de modélisation comportementale d'un système afin de prédire son comportement

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Description des compétences acquises à l'issue du cours :

- C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économique
  - C1.1 Étudier un problème dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un problème dans ses dimensions scientifiques, économiques et humaine
  - C1.2 Utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes pour traiter le problème
- C8 Mener un projet, une équipe
  - a. C8.1 Travailler en équipe/en collaboration.

# 2SC6390 – Système intelligent pour la régulation personnalisée de glycémie

Responsables : **Marie-Anne Lefebvre**

Département de rattachement : **DOMINANTE - VIVANT, SANTÉ, ENVIRONNEMENT, DOMINANTE - SYSTÈMES COMMUNICANTS ET OBJETS CONNECTÉS, DOMINANTE - GRANDS SYSTÈMES EN INTERACTION**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

L'objectif est de proposer un système d'aide à la régulation de glycémie pour des patients diabétiques;

Ce système doit répondre à des problématiques diverses : sûreté de fonctionnement et confort d'utilisation pour le patient, intégration numérique des algorithmes de pilotage, capacité d'interaction avec des éléments de contrôle (capteur sous-cutané de glycémie, micro pompe de délivrance d'insuline,..) via des protocoles de communications divers et de faible coût énergétique;

Il doit permettre une interaction en local avec le patient et à distance avec un médecin pour le suivi des données biomédicales.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

Modélisation

Systèmes d'information et programmation

## Plan détaillé du cours (contenu)

Compréhension de la problématique

Définition des exigences(sûreté, confort,..)

Définition des architectures fonctionnelles et physiques du système de régulation

Modélisation et étude d'un correcteur

Etude de l'intégration embarquée du correcteur

Etude des aspects interface patient et communications avec le contrôleur embarqué

Intégration et Validation

Synthèse

## Déroulement, organisation du cours

Travail en groupes de 5-6 étudiants



## Organisation de l'évaluation

Notes de synthèse, Soutenance finale et démonstration

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Les élèves seront capables :

- d'appliquer les principes d'une méthodologie système
- d'analyser et réaliser l'intégration d'une régulation temps réel
- avoir des bases de programmation pour les composants logiciels dédiés à l'embarqué et leur intercommunication

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques  
C2 Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers  
C4 Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients  
C6 Etre opérationnel, responsable et innovant dans un monde numérique  
C7 Savoir convaincre

# ST5 - 64 - MODELISATION ET DEVELOPPEMENT DE LOGICIELS DE SUPERVISION

**Dominante :** Info&Num (Informatique et Numérique) et SCOC (Systèmes Communicants et Objets Connectés)

**Langue d'enseignement :** Français

**Campus où le cours est proposé :** Rennes

---

## Problématique d'ingénieur

Aujourd'hui, l'informatique est omniprésente, et permet en particulier de réaliser la supervision de capteurs et objets connectés, ainsi que le traitement et l'analyse des données provenant de ceux-ci. Par exemple, dans le cadre médical, des pompes à insulines ou pacemakers connectés peuvent remonter les informations collectées afin de réaliser des historiques, statistiques sur des ensembles d'individus, etc. Dans le cadre "smart building", les systèmes d'information déportent par exemple le pilotage ou la facturation.

L'objectif d'un tel système de supervision est d'une part de fournir des informations agrégées aux utilisateurs et superviseurs, mais également de permettre une régulation du système via l'envoi de commandes de pilotage aux capteurs et aux objets connectés. Ainsi, l'implémentation logicielle d'un tel système repose sur plusieurs services, avec de multiples utilisateurs manipulant des données spécifiques à leur rôle. La difficulté d'une telle implémentation réside dans la modélisation et le volume des données traitées en temps réel, mais aussi dans le choix et la définition de l'architecture logicielle qui permettra d'obtenir un système efficace tout en assurant une maintenabilité aisée.

Dans cette ST, nous proposons d'étudier la conception d'un tel système. Pour ce faire, nous étudierons d'une part la modélisation et la gestion des données, et d'autre part, les schémas de conception qui vont permettre d'accélérer le développement tout en facilitant la maintenabilité du système. Par ailleurs, l'enseignement d'intégration sera l'occasion d'illustrer les bénéfices d'une organisation AGILE en permettant de concevoir un système fonctionnel au plus tôt et de le faire évoluer en fonction du besoin client.

## Prérequis conseillés

Aucun

## Modules contexte et enjeux :

Les modules contexte et enjeux de ce sujet de séquence thématique s'appuient sur ceux des deux autres sujets de séquence thématique proposés sur le campus de Rennes, « Santé » et « Smart Building ». Les 2 premiers ateliers sont donc « partagés » avec ces autres séquences thématiques. Ensuite, des ateliers spécifiques au développement logiciel sont présentés. Les sujets abordés sont, en fonction de la disponibilité des industriels, le développement embarqué, les réseaux Lora, la modélisation en UML. Des ateliers pratiques de remise à niveau sur les outils de base du développement logiciel (git, ligne de commande, etc) complètent les conférences données.

## Cours spécifique (60 HEE) : Modèles de données et schémas de conception

### Brève description :

Ce cours permet de découvrir les notions nécessaires à la conception de logiciels manipulant de grandes quantités de données. Il aborde la programmation orientée objet, au travers de deux langages, Java et Kotlin. Il aborde ensuite les méthodologies de génie logiciel en lien étroit avec le cours de modélisation système dans lequel sont vus les différents diagrammes (classes, séquence, etc.). Le cours permet à l'étudiant de se questionner sur la pertinence de la structuration d'un code logiciel au regard des patrons de conception existants. A cet effet, les

travaux dirigés qui s'appuient sur le cours de modélisation système qui se déroule en parallèle seront réalisés en pédagogie inversée.

Dans une seconde partie le cours s'intéresse au stockage à la manipulation des données proprement dites. Il s'agira de découvrir les fondements des logiciels de base de donnée et les problématiques théoriques que cela pose (mise en forme, requêtes). Enfin, cette partie se conclut par l'introduction des logiciels de mapping objet-relation qui permettent de lier les données avec le code métier de l'application et pour lesquels une compétence de modélisation particulière doit être acquise.

## **Enseignement d'intégration : Développement d'un système de supervision de capteurs**

### **Partenaire associé :**

Aucun directement mais certains en partenariat avec la ST5 Systèmes intelligents et embarqués pour la santé et les équipements déployés dans la salle Smart and Secure Room.

**Lieu :** Campus de Rennes

### **Brève description :**

En collaboration avec les étudiants de la séquence thématique du campus de Rennes « Systèmes intelligents et embarqués pour la santé » ou bien de la salle Smart and Secure Room, l'objectif est de développer le système d'information qui permettra de collecter et de traiter les données en provenance de capteurs, et de fournir des services pour la régulation de ceux-ci. L'objectif pédagogique est de découvrir les spécificités du développement dans le Cloud et de percevoir l'intérêt des choix de conception pour faciliter l'évolution logicielle ainsi que les bénéfices d'une organisation AGILE.

# 2SC6410 – Modèles de données et schémas de conception

Responsables : **Jean-Francois Lalande**  
Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**  
Langues d'enseignement : **FRANCAIS**  
Type de cours : **Cours ST**  
Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**  
Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**  
Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,00**  
Catégorie d'électif :  
Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours permet de découvrir les notions nécessaires à la conception de logiciels manipulant de grandes quantités de données. Il aborde la programmation orientée objet, au travers de deux langages, Java et Kotlin. Il aborde ensuite les méthodologies de génie logiciel en lien étroit avec le cours de modélisation système dans lequel sont vus les différents diagrammes (activités, séquence, blocs, etc.). Le cours permet à l'étudiant de se questionner sur la pertinence de la structuration d'un code logiciel au regard des patrons de conception existant. A cet effet, les travaux dirigés qui s'appuient sur le cours de modélisation système qui se déroule en parallèle seront réalisés en pédagogie inversée.

Dans une seconde partie le cours s'intéresse au stockage à la manipulation des données proprement dites. Il s'agira de découvrir les fondements des logiciels de base de donnée et les problématiques théoriques que cela pose (mise en forme, requêtes). Enfin, cette partie se conclut par l'introduction des logiciels de mapping objet-relation qui permettent de lier les données avec le code métier de l'application et pour lesquels une compétence de modélisation particulière doit être acquise.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

- Système d'information et programmation
- Algorithmique et complexité

## Plan détaillé du cours (contenu)

### Programmation orientée objet (Java/Kotlin)

- Héritage, encapsulation, polymorphisme, dispatch dynamique
- Généricité, covariance, contravariance, invariance
- Fonctions et classes anonymes
- Typage et inférence de type

TL : prise en main des langages en illustrant les notions vues en cours.

Travail personnel : Approfondir : Réflexivité, sérialisation, Java NIO, JNI, Garbage collector

### Génie logiciel

- Méthodes historiques : cycle en V, cycle en spirale, tests
- Diagramme UML : utilisation des diagrammes vus dans « Modélisation système » (use case, séquences, classes, état transition)
- Test et intégration continue

## Bases de données relationnelles

- Algèbre relationnelle,
- Conception de bases de données, normalisation
- Langage SQL, requêtage, indexation
- Optimisation de requêtes

Introduction au patrons de conception

Travail personnel : Finir le TL de développement + génie logiciel + base de données

## Déroulement, organisation du cours

33.5 HPE: 12h de cours, 3h de TD, 18h de TP, 1,5 Examen

## Organisation de l'évaluation

Examen final : 1h30 : 50 % Contrôle continu: TL génie logiciel, par binome: 15 min de présentation + 10 min de questions : 50 % En cas d'absence justifiée à l'un des contrôles intermédiaires, la note de ce dernier est remplacée par celle du contrôle final.

## Support de cours, bibliographie

- Java et Eclipse Développez une application avec Java et Eclipse (2e édition), Editions ENI
- JPA et Java Hibernate, Editions ENI
- SQL, Les fondamentaux du langage, Eyrolles
- Neo4j : données-graphes - Volume 2
- Design Patterns en Java, Eyrolles

## Moyens

TP sur machine:

- Eclipse, IntelliJ
- Logiciel de base de données

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Effectuer de la programmation orientée objet
- Choisir correctement les patrons de conception
- Savoir manipuler des données dans une base de données
- Modéliser avec un mapping objet-relation

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.2 Modéliser : utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes

Évalué par un examen écrit.

C2.2 Importer des connaissances d'autres domaines ou disciplines

Acquise par la validation de l'introduction de la ST5 (Quizz).

C6.2 Concevoir un logiciel

Évalué par le TP de conception de bibliothèque.

# 2SC6490 – Développement d'un système de supervision de capteurs

Responsables : **Jean-Francois Lalande**

Département de rattachement : **DOMINANTE - SYSTÈMES COMMUNICANTS ET OBJETS CONNECTÉS, DOMINANTE - INFORMATIQUE ET NUMÉRIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

En collaboration avec les étudiants de la séquence thématique du campus de Rennes « Systèmes intelligents et embarqués pour la santé » ou bien de la salle Smart and Secure Room, l'objectif est de développer le système d'information qui permettra de collecter et de traiter les données en provenance de capteurs, et de fournir des services pour la régulation de ceux-ci. L'objectif pédagogique est de découvrir les spécificités du développement dans le Cloud et de percevoir l'intérêt des choix de conception pour faciliter l'évolution logicielle ainsi que les bénéfices d'une organisation AGILE.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

## Prérequis

- Système d'information et programmation
- Algorithmique et complexité

## Plan détaillé du cours (contenu)

D'un point de vue technique, on visera à développer par une équipe une infrastructure complète pour collecter, traiter et visualiser des données issues de capteurs. Les données issues des autres groupes projets des autres ST remonteront des données qui seront hébergées sur un serveur local mais qui seront ensuite poussées sur une infrastructure de type cloud. Un court-circuit de la partie Cloud peut être prévu, si le temps de développement est trop long ou suivant les échecs des différentes équipes. A ce stade, aucun traitement n'est réalisé. Les données sont ensuite ré-extraites et peuvent subir un traitement afin d'être projetées dans un modèle de donnée final propice à la manipulation pour présentation. Ces données seront stockées dans une base de données à mettre en œuvre par l'équipe de développement. Ces données sont alors présentées via une API REST à la partie de l'équipe développant le frontend applicatif.

## Déroulement, organisation du cours

Les étudiants seront répartis en équipe projet s'organisant autour d'un chef projet (qui pourra changer chaque jour). En début de journée, chaque équipe projet se verra attribuer des fonctionnalités devant être fournies en fin de journée. Par ailleurs, chaque jour, des améliorations mineures devront être apportées afin de répondre au plus vite aux besoins exprimés par les étudiants des autres ST à l'occasion de réunion regroupant l'ensemble des étudiants des ST concernées.

Pour supporter l'EI, il est à prévoir :

- une salle informatique permettant d'accueillir maximum 25 personnes
- un accès à une infrastructure de type Cloud Computing
- d'éventuels VPN pour connecter les différents composants logiciels

## Organisation de l'évaluation

Présentations orales

## Moyens

- ordinateur
- capteurs de test et des autres STs

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Interpréter et modéliser le besoin client
- Implémenter en équipe une solution répondant au besoin client

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C4.1 Identifier et intégrer les autres parties prenantes, internes et externes ainsi que les autres dimensions non évoquées initialement  
Évalué par une présentation technique du produit réalisé intégrant de bout en bout les développements des ST partenaires.
- C7.1: Sur le fond : Structurer ses idées et son argumentation, être synthétique (hypothèses, objectifs, résultats attendus, démarche et valeur créée)  
Évaluée par une présentation non technique de la solution globale en coordination avec les autres ST.

# COURS SEQUENCE THEMATIQUE 7



# ST7 - 71 - FINANCE STOCHASTIQUE ET MODÉLISATION DU RISQUE

Dominante : **MDS (Mathématiques, Data Sciences)**

Langues d'enseignement : **Anglais**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

## Problématique d'ingénieur

La financiarisation de l'économie est un phénomène remarquable de ces trente dernières années, qui place les marchés financiers au cœur de l'économie mondialisée. En conséquence, la gestion des risques par les institutions financières est cruciale pour l'économie dans son ensemble.

Cette matière vise à présenter aux étudiants les concepts fondamentaux de la gestion des risques financiers, et en particulier les aspects mathématiques correspondants. Ce module permettra aux étudiants de se familiariser avec les modèles stochastiques d'évaluation des actifs en temps discret, de découvrir les produits dérivés courants et d'aborder des questions réelles de gestion des risques. Pour les ingénieurs travaillant dans l'industrie financière, la compréhension et la maîtrise de ces modèles sont essentielles.

## Prérequis conseillés

Les étudiants doivent avoir suivi les cours CIP, PDE et Algorithmes et complexité. La connaissance de la théorie de la mesure (trouvée dans le CIP) est essentielle, par exemple l'algèbre sigma, l'espace mesurable, la mesure/probabilité, l'espérance conditionnelle, etc.

Néanmoins, le ST4 Données et statistiques en finance n'est PAS nécessaire

## Modules contexte et enjeux

Une série de conférences présentera différents domaines des méthodes de gestion des risques financiers et leurs applications. Les thèmes et les intervenants peuvent changer chaque année. Les conférences peuvent traiter de :

- les produits dérivés ;
- la gestion d'actifs : allocation de portefeuille et gestion des risques ;
- l'actuariat et la gestion des risques d'assurance
- les marchés des matières premières et de l'énergie ;
- etc.

## Cours spécifique (60 HEE) : Modélisation des risques financiers

- **Contenu :**

Modèles de marché en temps discret. Arbitrage. Produits dérivés européens. Marché complet/non-complet. Évaluation. Couverture. Mesure du risque et optimisation du portefeuille. Produits dérivés américains.

**Classe tutorée (TD) :** Diverses questions/problèmes se posant en finance sont formulées en langage mathématique. Les théorèmes/outils/techniques présentés pendant le cours sont nécessaires pour les résoudre.

**Devoirs à domicile (TP) :** Les devoirs se présentent en général sous la forme d'un projet. Ils permettent aux étudiants de mieux comprendre l'objectif de ce cours et les obligent à appliquer les résultats obtenus pour résoudre des problèmes pratiques.

## Projet : Gestion des risques financier

**Partenaire associé :** Les partenaires industriels peuvent changer chaque année. Parmi les partenaires récents figurent BNP Paribas, Generali, Volga Technologies, ODDO BHF, etc.

**Lieu :** Campus Paris-Saclay

**Brève description :** Les étudiants inscrits à ce cours sont invités à étudier une méthode quantitative dans un contexte de gestion des risques financiers. Les sujets sont proposés par un partenaire industriel ou académique

**Objectifs :** être capable de modéliser des problèmes de gestion des risques financiers, être capable d'implémenter des solutions numériques.

Chaque projet porte sur une méthode quantitative de gestion des risques, par exemple le pricing ou la couverture d'un produit financier, ou l'allocation d'actifs, la gestion de portefeuille, l'analyse de portefeuille client, etc. Les données financières ou clients réelles sont fournies par le partenaire du projet. Chaque projet nécessite le codage de la méthode étudiée.

Les étudiants travailleront en groupes (les règles de constitution des groupes seront précisées au début de l'ET).

**Evaluation :** Les étudiants seront notés respectivement pour le cours et le projet.

- Cours : La note est donnée comme  $\max(0.5*x+0.5*y, y)$ , où  $x$  représente la note des devoirs (TP) et  $y$  la note de l'examen final. Plus de détails peuvent être trouvés pendant le premier cours ou dans Edunao.

- Projet : La note finale est décidée après une présentation orale, par un jury comprenant le superviseur industriel.

# 2SC7110 – Modélisation des risques financiers

Responsables : **Gaoyue Guo**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MATHÉMATIQUES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Cours ST**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours est une introduction aux mathématiques financières en temps discret. Y sont en particulier abordés la valorisation et la couverture des produits dérivés ainsi que la gestion des risques dans un cadre stochastique à temps discret.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

## Prérequis

Cours communs 1A de mathématiques et informatique (CIP, EDP, Algo et complexité, Statistiques)

## Plan détaillé du cours (contenu)

Calcul stochastique en temps discret. Introduction aux produits dérivés financiers. Modèles de marchés financiers en temps discret. Passage au temps continu, vers le modèle de Black & Scholes. Mesures de risques. Allocation optimale de portefeuilles.

## Déroulement, organisation du cours

CM/TD/TP

18h de CM, 9h de TD, 6h de TP

## Organisation de l'évaluation

TP (50%) et examen final (50%) d'une durée de 1H30.

## Support de cours, bibliographie

Transparent du cours CIP;

Föllmer, H., & Schied, A. (2011). *Stochastic finance: an introduction in discrete time*. Walter de Gruyter.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

L'objectif de ce sujet est d'initier les étudiants aux concepts fondamentaux de la gestion des risques financiers, en particulier à ses aspects mathématiques. Cette séquence permettra aux étudiants de se familiariser avec les modèles stochastiques d'évaluation d'actifs, de découvrir les principaux produits dérivés et d'aborder des problématiques réelles de gestion des risques.

# 2SC7190 – Gestion des risques financiers

Responsables : **Gaoyue Guo**

Département de rattachement : **DOMINANTE - MATHÉMATIQUES, DATA SCIENCES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Cet enseignement se déroule sous la forme d'un projet, au cours duquel les étudiants sont invités à étudier une méthode quantitative de gestion du risque financier. Les projets sont proposés par un partenaire industriel ou académique.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

## Prérequis

Stochastic Finance and Risk Modelling (ST7 MDS)

## Plan détaillé du cours (contenu)

Chaque projet s'appuie sur l'étude d'une méthode quantitative en gestion du risque financier. Cela peut concerner des problèmes d'évaluation ou de couverture d'un produit financier, de construction de portefeuilles optimaux, de gestion d'un portefeuille d'investissement, d'analyse et d'optimisation d'un portefeuille de clients, etc. Un jeu de données réelles est fourni par le partenaire du projet. Chaque projet nécessite une implémentation informatique de la méthode étudiée.

Liste des sujets 2021 (peut différer en 2022):

- Optimal portfolio allocation (en partenariat avec BNP Paribas)
- Optimization for insurance products (en partenariat avec Generali)
- Hybrid portfolio optimization (en partenariat avec Volga Technologies)
- Heuristic portfolio construction (en partenariat avec ODDO BHF)

## Déroulement, organisation du cours

Projet avec suivi régulier. Mini-cours selon les besoins du projet.

## Organisation de l'évaluation

Code, rapport technique et soutenance orale

# ST7 - 72 - OPTIMISATION DE L'INFRASTRUCTURE DES RESEAUX POUR LES VILLES INTELLIGENTES

Dominante : **SCOC (Systèmes Communicants et Objets Connectés)**

Langues d'enseignement : **Anglais**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

---

## Problématique d'ingénieur

L'avènement de l'internet des objets ainsi que la multiplication des applications basées sur les réseaux de capteurs peu coûteux ouvre aujourd'hui la voie vers le développement des villes intelligentes, connectées et durables. De nombreuses villes en Europe (Antony, Dijon, Malaga, Santander, Barcelone etc.) sont en train de créer des environnements intelligents avec des expérimentations déployées pour une meilleure gestion adaptative des trafics et des transports, pour une meilleure gestion de la consommation d'énergie, de l'eau, une réduction du niveau CO<sub>2</sub>, du niveau de pollution, de la qualité de vie etc. La création et la gestion de villes intelligentes nécessitent des infrastructures transversales de communications à haut débit et des réseaux d'extrémité pour la collecte, l'acheminement et le traitement d'une grande quantité d'informations (capteurs de trafic, caméras, véhicules géo-localisables, profils et déplacements des usagers/personnes, etc.), ce qui surchargera les réseaux de *télécommunications* actuels et/ou nécessitera le développement de nouveaux systèmes de communications. Il est estimé que la densité des objets connectés dans les villes intelligentes atteindra un million d'objets par Km<sup>2</sup> en 2020. Bien évidemment, l'optimisation des réseaux de communications est essentielle. Dans ce contexte, un des objectifs principaux de la cinquième génération des systèmes de communications est de pouvoir répondre aux besoins des villes intelligentes, en permettant notamment la communication d'un grand nombre de machines, la virtualisation des fonctions, et le traitement intelligent des données. Cette séquence thématique présentera les défis et problèmes actuels des villes intelligentes, par des interventions des acteurs principaux dans le domaine. Les principes fondamentaux de la théorie des jeux (rationalité, équilibres, etc.) seront ensuite expliqués en détail et plusieurs exemples pratiques de l'utilisation de cette théorie pour résoudre les problèmes de villes intelligentes seront aussi présentés et analysés.

## Prérequis conseillés

Avoir des notions fondamentales en Modélisation et Traitement du signal.

## Modules contexte et enjeux

Ces modules comprennent une conférence portant sur les smart cities (enjeux, défis, et expérimentations), une table ronde dédiée aux marchés et aux modèles économiques confrontant les visions des acteurs principaux dans ce domaine, ainsi que des interventions des partenaires de la séquence portant sur les verrous technologiques et scientifiques.

## Cours spécifique (60 HEE) : Théorie des jeux pour les villes intelligentes

**Brève description** : Ce cours explique les principes fondamentaux de la théorie des jeux (rationalité, équilibre de Nash, équilibres corrélés, etc) et présente la solution de plusieurs types de jeux (jeux finis et stratégies mixtes, jeux révolutionnaires, jeux répétés, etc.). Plusieurs exemples pratiques de l'utilisation de la théorie des jeux dans les villes intelligentes sont présentés et analysés. En particulier, l'optimisation distribuée des infrastructures de réseaux de télécommunications, le routage des données dans les réseaux et le problème de recharge intelligente de véhicules seront étudiés.

## Projet : Smart cities : les cités connectées

**Partenaire associé :** Orange, Nokia, Thales

**Lieu :** Campus Paris-Saclay

**Brève description :** Les projets sont centrés autour d'applications pratiques de l'optimisation (combinatoire, convexe) et de la théorie des jeux aux problématiques actuelles des villes intelligentes. Les projets seront pluridisciplinaires et serviront à mettre en perspective les cours de la séquence et à initier les élèves aux problèmes d'ingénierie et/ou à la recherche scientifique dans le domaine.

Exemples de projets : collecte et routage de données dans les villes intelligentes, optimisation d'itinéraire pour le déplacement à vélo, stratégies d'optimisation de la recharge des vélos électriques en station, prévision de la consommation d'énergie électrique, etc.

Le contexte pratique du projet est lié à un service précis dans les villes intelligentes (collecte d'information des capteurs, régulation de température, vidéo surveillance, consommation d'énergie électrique, optimisation d'itinéraire pour le déplacement à vélo, etc.) et il sera donné comme complément des cours. Les élèves devront proposer et implémenter des algorithmes d'optimisation convexe ou de théorie des jeux vus en cours. Les élèves testeront leurs approches sur des données, si possible, réelles.

# 2SC7210 – Théorie des jeux pour les villes intelligentes

Responsables : **Mohamad Assaad**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SIGNAL, INFORMATION, COMMUNICATION**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Cours ST**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours explique les principes fondamentaux de la théorie des jeux (rationalité, équilibre de Nash, équilibres corrélés, etc) et présente la solution de plusieurs types de jeux (jeux finis et stratégies mixtes, jeux révolutionnaires, jeux répétés, etc.). Plusieurs exemples pratiques de l'utilisation de la théorie des jeux dans les villes intelligentes sont présentés et analysés. En particulier, l'optimisation distribuée des infrastructures de réseaux de télécommunications, le routage des données dans les réseaux et le problème de recharge intelligente de véhicules seront étudiés.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

## Prérequis

Réseaux de télécommunications (notions de bases), optimisation

## Plan détaillé du cours (contenu)

- Introduction générale
  - Grands enjeux de la ville du futur (énergie, transport, télécommunications, etc.)
  - Ville intelligente et Théorie des jeux
  - Théorie des jeux: Forme normale et extensive
  - Décision et concepts de solution (rationalité, équilibre de Nash, etc)
  - Equilibres corrélés
- Différent types de jeux et application aux problématiques des villes intelligentes
  - i. Jeux à somme nulle et à somme non nulle
  - ii. Jeux finis et stratégies mixtes
  - iii. Jeux de routage
  - iv. Jeux révolutionnaires
  - v. Jeux répétés
  - vi. Matching stables: problèmes de mariages stables
- Etude de cas: Application aux problèmes de recharge intelligente, application à l'allocation des fréquences dans les réseaux sans fil

## Déroulement, organisation du cours

Déroulement, organisation du cours (séquençage CM, TD, EL/TP...):

- Introduction générale: 6h CM+ 1.5h TD
- Différent types de jeux (jeux à somme nulle, routage, etc.): 9h CM + 7.5h TD
- Etude de cas: 3h CM

## Organisation de l'évaluation

Examen final - 1.5h

## Support de cours, bibliographie

- Rida Laraki, Jérôme Renault, Sylvain Sorin, Bases Mathématiques de la Théorie des Jeux, Ecole Polytechnique, 2013.
- E. Altman, Advances in Dynamic Games and Applications, 2013
- D.Bertsekas and J. Tsitsiklis, Parallel and Distributed : Numerical Methods, athena scientific, 2015.
- D. Bertsekas and R. Gallager, Data Networks, Prentice Hall.
- Chen, C., Zhu, S., Guan, X., Shen, X.S, Wireless Sensor Networks : Distributed Consensus Estimation, Springer, 2014.
- G. Ferrari, Sensor Networks : Where Theory Meets Practice, Springer-Verlag, 2009.
- Recent papers on IoT, smart cities and wireless networks.

## Moyens

- Equipe enseignante: Mohamad Assaad (CS), Mikael Touati (Orange Labs)
- Taille des TD (par défaut 35 élèves) :25
- Outils logiciels et nombre de licence nécessaire : Matlab

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de :

- 1- connaître plusieurs problèmes émergents dans les villes intelligentes (réseaux de télécommunications, recharge intelligente, etc. )
- 2- modéliser un réseau dans le contexte des villes intelligentes avec ses fonctions principales.
- 3- formuler les problèmes émergents dans les villes intelligentes sous la forme de problèmes d'optimisation distribuée
- 4- connaître les outils de la théorie des jeux et leur utilisation dans le contexte des villes intelligentes
- 5- implémenter des algorithmes de la théorie des jeux sous Matlab

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Les acquis d'apprentissage 1, 2 et 3 permettent d'atteindre le jalon 1 de la compétence C1.1, c'est-à-dire « Savoir faire la liste des paramètres influents sur le système étudié, la liste des éléments avec lesquels il est en relation » et « Savoir identifier les paramètres importants vis-à-vis du problème posé ». Les acquis d'apprentissage 2 et 3 permettent d'atteindre le jalon 1 de la compétence C1.2, c'est-à-dire « Savoir utiliser un modèle présenté en cours de manière pertinente. Faire le choix d'hypothèses simplificatrices adaptées au problème étudié ». Les acquis d'apprentissage 3,4, et 5 permettent d'atteindre les jalons 1B et 3B de la compétence C1.3, c'est-à-dire "Résoudre un problème avec une pratique de l'approximation" et "Faire un choix de simulation pertinent pour un problème donné". L'acquis d'apprentissage 5 permet aussi d'atteindre le jalon 2B de la compétence C1.3, c'est-à-dire «Connaitre les limitations des simulations numériques et ce qu'on peut en attendre, savoir critiquer des résultats de simulations numériques ».



# 2SC7290 – Smart cities : les cités connectées

Responsables : **Mohamad Assaad**

Département de rattachement : **DOMINANTE - SYSTÈMES COMMUNICANTS ET OBJETS CONNECTÉS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Les projets sont centrés autour d'applications pratiques de l'optimisation (combinatoire, convexe) et de la théorie des jeux aux problématiques actuelles des villes intelligentes. Les projets seront pluridisciplinaires et serviront à mettre en perspective les cours de la séquence et à initier les élèves aux problèmes d'ingénierie et/ou à la recherche scientifique dans le domaine. Exemples de projets: collecte et routage de données dans les villes intelligentes, optimisation d'itinéraire pour le déplacement à vélo, stratégies d'optimisation de la recharge des vélos électriques en station, prévision de la consommation d'énergie électrique, etc.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

## Prérequis

Réseaux de télécommunications (notions de base), optimisation, Matlab

## Plan détaillé du cours (contenu)

Exemples de projets : collecte et routage de données dans les villes intelligentes, optimisation d'itinéraire pour le déplacement à vélo, stratégies d'optimisation de la recharge des vélos électriques en station, prévision de la consommation d'énergie électrique, etc.

Le contexte pratique du projet est lié à un service précis dans les villes intelligentes (collecte d'information de capteurs, régulation de température, vidéo surveillance, consommation d'énergie électrique, optimisation d'itinéraire pour le déplacement à vélo, etc.) et il sera donné comme complément des cours. Les élèves devront proposer et implémenter des algorithmes d'optimisation convexe ou de théorie des jeux vus en cours. Les élèves testeront leurs approches sur des données, si possible, réelles.

## Déroulement, organisation du cours

Chaque projet est associé en moyenne à 5 élèves et encadré principalement par un enseignant de CentraleSupélec. Certains projets sont proposés conjointement avec des partenaires industriels et co-encadrés par des ingénieurs de ces entreprises. Une salle informatique sera mise à disposition des élèves. Les encadrants assureront un suivi régulier (une réunion/groupe/semaine au début et une réunion quotidienne par groupe durant la semaine finale). La collaboration inter groupes sera encouragée (si c'est possible), et les élèves seront évalués sur leur capacité de travail en équipe (leadership, partage des tâches, communication).

## Organisation de l'évaluation

Rapport à rédiger + soutenance (par groupe)

## Moyens

Outil logiciel : Matlab

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin du projet, l'élève sera capable de :

- 1- connaître des problèmes émergents dans les villes intelligentes (réseaux de télécommunications, routage de données, recharge électrique, etc.)
- 2- modéliser un réseau dans le contexte des villes intelligentes avec ses fonctions principales.
- 3- formuler des problèmes émergents dans les villes intelligentes sous la forme de problèmes d'optimisation
- 4- implémenter des méthodes d'optimisation convexe et de théorie des jeux sous Matlab

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

C1.1 : Étudier un problème dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un problème dans ses dimensions scientifiques, économiques et humaines

C1.2 : Utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes pour traiter le problème

C1.3 : Résoudre le problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation

C1.4 : Spécifier, concevoir, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe

C1.5 : Mobiliser un large socle scientifique et technique dans le cadre d'une approche transdisciplinaire.

C2 : Développer une compétence approfondie dans un domaine scientifique ou sectoriel et une famille de métiers

C2.1 : Avoir approfondi un domaine ou une discipline relative aux sciences fondamentales ou aux sciences de l'ingénieur.

C2.3 : Identifier et acquérir rapidement des nouvelles connaissances et compétences nécessaires dans les domaines pertinents, qu'ils soient techniques, économiques ou autres

C3 : Agir, Entreprendre, innover en environnement scientifique et technologique

C3.1 : Être proactif, prendre des initiatives, s'impliquer

C3.2 : Remettre en cause ses hypothèses de départ, ses certitudes. Surmonter ses échecs. Prendre des décisions

C6 : Être à l'aise et innovant dans le monde numérique

C6.1 : Identifier et utiliser au quotidien les logiciels nécessaires pour son travail (y compris les outils de travail collaboratif). Adapter son "comportement numérique" au contexte.

C8 : Mener un projet, une équipe

C8.1 : Travailler en équipe/en collaboration.

C8.2 : Mobiliser et entraîner un collectif (faire preuve de leadership)

C8.4 : Travailler en mode projet en mettant en oeuvre les méthodes de gestion de projet adaptées à la situation

C9 : Agir en professionnel responsable. Penser, agir de façon éthique

C9.2, : Percevoir le champ de responsabilité des structures auxquelles on contribue, en intégrant les dimensions environnementales, sociales et éthiques

C9.4 : Faire preuve de rigueur et d'esprit critique dans l'approche des problèmes sous tous les angles, scientifiques, humains et économiques

# ST7 - 73 - ECONOMIE CIRCULAIRE ET SYSTEMES INDUSTRIELS

**Dominante** : GSI (Grands Systèmes en Interaction), VSE (Vivant-Santé, Environnement), CVT (Construction, Ville et Transports)

**Langues d'enseignement** : Français

**Campus où le cours est proposé** : CAMPUS DE PARIS - SACLAY

---

## Problématique d'ingénieur

Les entreprises sont en train de devenir des acteurs de la transition vers une économie plus respectueuse de l'environnement. Plusieurs d'entre elles ont par exemple demandé un accord fort lors de la COP21 et elles sont depuis de plus en plus nombreuses à décider d'agir et de transformer leurs pratiques vers des modèles plus « circulaires ». Cette nouvelle conduite des affaires traduit dans les actes plusieurs facteurs qui se renforcent mutuellement : la sensibilisation croissante aux enjeux de la transition écologique et énergétique, la multiplication des initiatives à l'échelle territoriale, le renforcement de lois et de normes vers une économie plus durable, et des équilibres de marché qui changent et rendent plus rentables les pratiques durables.

L'économie circulaire vise à sortir d'une culture de l'extraction et du déchet et à optimiser l'usage des ressources afin de minimiser l'impact des activités humaines sur l'environnement. L'écologie industrielle est une approche scientifique de métabolisme intégré permettant de mettre en œuvre cette économie circulaire, via – entre autres – les synergies industrielles (mutualisations de flux de matières, d'eau ou d'énergie entre entreprises), l'écoconception des produits et services, ou encore l'économie de la fonctionnalité.

C'est un formidable champ d'innovation, de différenciation commerciale et un relais de croissance durable et profitable qui est en train d'éclorre. Il faut à cette économie circulaire des chefs d'orchestres capables d'en comprendre les enjeux, formés pour initier et piloter des projets ambitieux à l'échelle des entreprises et des territoires.

Cette séquence thématique aborde en détail l'Economie Circulaire par les stratégies, méthodes et outils d'ingénierie qui permettent de la mettre en œuvre (ce n'est donc pas un enseignement en économie). Elle alterne théorie (cours), mise en pratique (TD, projet académique, projet industriel), et interventions d'industriels et d'institutionnels du secteur (conférences, ateliers, projet industriel).

## Prérequis conseillés

Aucun

## Modules contexte et enjeux

L'introduction de la séquence s'organise autour de trois demi-journées visant à présenter la séquence, les projets et à introduire les enjeux de l'économie circulaire, avec les activités suivantes :

- Conférences introductives et table ronde : introduction à l'Economie Circulaire par les acteurs de terrain (Institut National de l'Economie Circulaire, Cabinet d'avocat spécialisé en Economie Circulaire)
- Ateliers de découverte : atelier « Impacts du Smartphone » (exemple du Fairphone), atelier « Business models circulaires » (exemple de l'entreprise SEB), atelier d'introduction à l'Analyse de Cycle de Vie (Waro, start-up créée par des anciens de l'école)
- Conférences industrielles (différentes chaque année)

## Cours spécifique (60 HEE) : Économie Circulaire et méthodes de l'écologie industrielle

**Brève description :** Le cours vise à parcourir les différentes dimensions de l'Économie Circulaire pour donner aux étudiants une vision d'ensemble du domaine. Puis le focus sera fait sur les outils opérationnels de l'Écologie Industrielle que les étudiants apprendront à manipuler (outils de Material Flow Analysis, Analyse de Cycle de Vie et indicateurs de circularité) pour mener à bien un projet « académique » en modélisant des flux de matières, d'énergie, et en mesurant des impacts environnementaux. Ces outils pourront être mobilisés dans le projet industriel de la séquence thématique.

### Projets :

La séquence est construite autour d'un projet industriel ; 4 sujets en lien avec des partenaires industriels seront proposés aux étudiants, dont au moins un projet porté par la dominante VSE et un par la dominante CVT. Les sujets décrits ci-dessous sont ceux des années passées et sont fournis à titre purement indicatif. Ceux de 2024 seront sur des thématiques similaires ou proches.

### Projet 1 : (exemple 2020 à 2023) Bioraffinerie : optimisation des flux et/ou des procédés associés

**Partenaire associé :** Chaire de Biotechnologie, ARD

**Lieu :** Campus Paris-Saclay

**Brève description :** La bioraffinerie peut se définir comme un écosystème industriel permettant de valoriser la biomasse (ressources végétales, animales déchets) sous forme de divers produits, alimentaire ou non (énergies, intermédiaires chimiques, matériaux, cosmétiques, santé, etc.). La France est, à l'échelle mondiale très en pointe dans ce domaine, notamment grâce à la bioraffinerie de Pomacle Bazancourt qui traite plus de 4 Mt de biomasse par an. La bioraffinerie est donc d'un des outils industriels crédible pour accompagner la transition écologique, à la fois pour répondre aux enjeux climatiques et humanitaires mais aussi pour relocaliser l'industrie, notamment au sein des bassins de production agricoles ou forestiers. Elle répond ainsi au triple objectif du développement durable (environnemental, social et économique). L'objectif de ce projet est, à l'échelle du site industriel, de comprendre l'organisation des procédés et des flux pour ensuite dégager les opportunités d'optimisation. Par une approche pluridisciplinaire (data sciences, modélisation-simulation-optimisation, génie des procédés, etc.), les élèves devront travailler en groupe pour identifier, développer et présenter une solution opérationnelle contribuant à la réduction de l'impact environnemental de la bioraffinerie.

### Projet 2 : (exemple 2021) ESA\_Lab@CentraleSupélec

- **Partenaire associé :** European Space Agency (ESA)

- **Lieu :** Campus Paris-Saclay

- **Brève description :** Le projet MELiSSA (Micro-Ecological Life Support Alternative) de l'ESA a pour objectif de développer un système de support de vie régénératif permettant de reproduire les fonctions principales de l'écosystème terrestre (production en eau, oxygène), dans une masse et un volume réduits et avec une sécurité extrême. MELiSSA est un des exemples les plus aboutis au monde d'économie circulaire, au sens du bouclage extrême des flux de matière et d'énergie. L'ESA\_Lab@CentraleSupélec, créé en 2020, est un cadre de collaboration privilégié entre l'ESA et CentraleSupélec. Il a pour objectif de développer l'intérêt et la connaissance des activités d'exploration pacifique de l'espace et les applications transverses qui en découlent, telles que la surveillance du climat, l'observation de la Terre, la navigation, la (cyber)sécurité, l'intelligence artificielle, la durabilité, l'économie spatiale, etc., au bénéfice mutuel des deux organisations et de la société. Le but de ce projet de ST7 est de spécifier et proposer des premiers scénarios de conception préliminaire d'un futur « laboratoire démonstrateur », qui serait un lieu d'expérimentation et de projets scientifiques autour du concept d'Économie Circulaire, et donc en lien étroit avec le projet MELiSSA. Le projet est structurée en deux grande phases : (1) Spécification du laboratoire démonstrateur : recueil des besoins et des premières idées par un état de l'art, et des entretiens auprès des différents acteurs de CentraleSupélec et d'experts de l'ESA ; (2) Conception préliminaire du laboratoire démonstrateur.

### Projet 3 : (exemple 2022 et 2023) Reconditionnement d'ordinateurs portables

**Partenaire associé :** Emmaüs Connect

**Lieu :** Campus Paris-Saclay

**Brève description :** Membre du Mouvement Emmaüs, Emmaüs Connect est une association loi 1901 créée en 2013 pour lutter contre la fracture numérique et l'illectronisme. Emmaüs Connect a lancé en novembre 2020 LaCollecte.tech, une plateforme qui permet aux organisations de donner facilement une deuxième vie à leur matériel informatique inutilisé au profit des publics en situation de précarité sociale et numérique. Le projet vise à promouvoir le reconditionnement d'ordinateurs portables issus de la collecte et à destination des 8 millions de Français qui sont encore privés d'accès à internet et donc de services de première nécessité faute de moyens pour s'équiper (alors que dans le même temps, 33% des entreprises ont du matériel dormant qu'elles ne savent pas revaloriser). Quatre axes de travail ont été étudiés (chaque groupe d'étudiants en a traité deux) : (1) imaginer une coque "universelle" qui permettrait de recréer un ordinateur portable de seconde main avec n'importe quels composants issus de la récupération ; (2) concevoir un outil permettant d'évaluer la compatibilité de composants de marques différentes, issus d'ordinateurs différents, et en fonction des stocks disponibles ; (3) étudier la faisabilité d'un ordinateur portable dont la carte mère serait un Raspberry Pi (car la carte mère d'un ordinateur portable est souvent très compliquée à réutiliser car les composants sont soudés) ; (4) proposer des mesures de plaidoyer à destination des fabricants d'ordinateurs portables pour faire évoluer leurs pratiques vers plus de circularité et soutenabilité.

### Projet 4 : (exemple 2022) Trophée étudiant Circolab

**Partenaire associé :** association professionnelle Circolab

**Lieu :** Campus Paris-Saclay

**Brève description :** Circolab est une association d'entreprises du secteur de l'immobilier et de la construction qui souhaitent promouvoir l'économie circulaire dans leurs activités. Circolab a lancé en 2022 la première édition du Trophée Economie Circulaire à destination d'étudiants d'écoles d'ingénieur et d'architecture, dont CentraleSupélec. Plusieurs cas d'étude étaient proposés avec un objectif commun : proposer des initiatives d'économie circulaire réalistes et quantifiées à l'échelle d'un bâtiment ou d'un quartier. Les étudiants de la ST7 ont travaillé sur deux cas d'études au niveau du futur village des athlètes pour les Jeux Olympiques de Paris en 2024 : (1) un cas proposé par la SOLIDEO (organisme en charge de la construction des ouvrages olympiques) à l'échelle d'un îlot de quartier pour proposer des solutions de circularisation des flux d'eau ; (2) un cas proposé par Vinci à l'échelle d'un second îlot de quartier pour proposer des solutions de revalorisation maximisée d'équipements (cloisons, mobilier, sanitaires) entre la "Phase Jeux" (= pendant les jeux) et la "Phase héritage" (= après les Jeux, lorsque le village deviendra un quartier d'habitation, de bureaux et de commerces).

# 2SC7310 – Economie circulaire et méthodes de l'écologie industrielle

Responsables : **Yann LEROY, François CLUZEL**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT GÉNIE INDUSTRIEL ET OPÉRATIONS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Cours ST**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

L'économie circulaire vise selon l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) à changer de paradigme par rapport à l'économie dite linéaire, en limitant le gaspillage des ressources et l'impact environnemental, et en augmentant l'efficacité à tous les stades de l'économie des produits ; elle est composée de 7 piliers : approvisionnement durable, éco-conception, écologie industrielle et territoriale, économie de la fonctionnalité, consommation responsable, allongement de la durée d'usage et recyclage.

L'écologie industrielle est une approche qui vise à limiter les impacts de l'industrie sur l'environnement. Elle cherche à considérer un système industriel dans sa globalité pour identifier, modéliser et optimiser les flux matières et énergie, ainsi que les impacts environnementaux associés. Elle vise à reproduire, dans les activités humaines, un système naturel où tous les flux de matière et d'énergie sont réutilisés, ou la notion de déchet n'existe plus. Tous les secteurs économiques sont concernés.

Le cours vise à parcourir les différentes dimensions de l'économie circulaire pour donner aux étudiants une vision d'ensemble du domaine. Puis le focus sera fait sur les outils opérationnels d'ingénierie de l'écologie industrielle que les étudiants apprendront à manipuler (Material Flow Analysis (MFA, outil de cartographie des flux de matière et d'énergie), Analyse de Cycle de vie (ACV, outil de calcul des impacts environnementaux) et indicateurs de circularité) pour mener à bien un projet d'écologie industrielle. Tout à ou partie de ces outils seront directement mobilisés dans le projet industriel de la séquence thématique.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

Le cours est structuré en une séance de 1h30 et 9 séances de 3h.

1. Introduction à l'Économie Circulaire et aux impacts environnementaux (Yann Leroy et/ou François Cluzel)

### A. Les piliers de l'Économie Circulaire

Les séances 2 à 6 sont construites sur un format cours/TD d'application sur un cas industriel. Elles permettent de parcourir les 7 piliers de l'Économie Circulaire selon la définition de l'ADEME.

2. Fin de vie des produits (Yann Leroy et/ou François Cluzel)

3. Éco-conception, allongement de la durée d'usage et consommation responsable (Yann Leroy et/ou François Cluzel)

4. Approvisionnement durable (Yann Leroy et/ou François Cluzel)
5. Économie de la fonctionnalité et consommation responsable (ATEMIS)
6. Écologie Industrielle et Territoriale (Yann Leroy et/ou François Cluzel et/ou Andreas Hein)

### **B. Méthodes et outils de l'Écologie Industrielle**

Les séances 7 à 10 (Yann Leroy et/ou François Cluzel) sont consacrées à l'enseignement (cours et TP sur ordinateur) du Material Flow Analysis (MFA), de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) et des indicateurs de Circularité et Soutenabilité. Les trois approches seront appliquées sur un cas d'étude en groupe.

12. Examen final d'une durée de 1h30

## **Déroulement, organisation du cours**

Selon les séances, les modules alterneront entre cours magistraux, TD sur des cas industriels (sous forme de cas d'étude ou de serious game), TP sur des outils logiciels mobilisables pour le projet de la ST. Certaines séances pourront être organisées en mode classe inversée.

## **Organisation de l'évaluation**

Contrôle final écrit (1h30, sur Evalmee: quiz + essai, 50% de la note) + évaluation en groupe des TDs 7 à 10 (50 % de la note)

## **Support de cours, bibliographie**

- Adoue, C., 2007. Mettre en œuvre l'écologie industrielle. PPUR, Lausanne.
- Buclet, N., Barles, S., 2011. Écologie industrielle et territoriale : Stratégies locales pour un développement durable. Presses Universitaires du Septentrion, Villeneuve d'Ascq, France.
- Erkman, S., 2004. Vers une écologie industrielle, 2e éd. ed. Charles Léopold Mayer, Paris.
- Hawken, P., Lovins, A., Lovins, L.H., 1998. Natural Capitalism: Creating the Next Industrial Revolution, 1st edition. ed. US Green Building Council, Boston.

## **Moyens**

Équipe enseignante : François Cluzel, Yann Leroy (enseignants-chercheurs au Laboratoire Génie Industriel) + autres chercheurs, doctorants ou intervenants extérieurs

Outils logiciels : logiciel d'Analyse de Cycle de Vie (OpenLCA ou Waro) et logiciel de Material Flow Analysis (Stan)

## **Acquis d'apprentissage visés dans le cours**

- Être sensibilisé aux grands enjeux environnementaux
- Connaître les 7 piliers de l'économie circulaire
- Maîtriser les principaux outils d'ingénierie de l'écologie industrielle : Material Flow Analysis, Analyse de Cycle de Vie, indicateurs de circularité et soutenabilité
- Savoir modéliser et simuler un système industriel dans une perspective d'économie circulaire
- Savoir optimiser un système industriel dans une perspective d'économie circulaire

## **Description des compétences acquises à l'issue du cours**

- C2 Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers
- C2.1 Approfondir un domaine des sciences de l'ingénieur ou une discipline scientifique à Jalon 2 : Approfondir l'ensemble de ses connaissances sur un domaine choisi, via les enseignements de 2A
  - C2.3 Identifier et acquérir de façon autonome les nouvelles connaissances et compétences nécessaires à Jalon 2 : Assimiler les nouvelles connaissances au sein d'outils ou méthodes opérationnels et efficaces pour le problème donné

C9 Penser et agir en ingénieur éthique, responsable et intègre en prenant en compte les dimensions environnementales, sociales et sociétales

- C9.1 Analyser et anticiper les conséquences possibles de ses choix et de ses actes dans le respect de soi-même, d'autrui et de l'environnement à Jalon 2 : Identifier la responsabilité en termes individuels, la sienne et celle des autres, et en termes collectifs à court et à long termes. Situer son action et ses conséquences potentielles



# 2SC7390 – Projet industriel d'économie circulaire

Responsables : **François CLUZEL**

Département de rattachement : **DOMINANTE - CONSTRUCTION VILLE TRANSPORTS, DOMINANTE - GRANDS SYSTÈMES EN INTERACTION, DOMINANTE - VIVANT, SANTÉ, ENVIRONNEMENT**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Le projet industriel d'Economie Circulaire est un élément central de la ST7 Economie Circulaire & Systèmes Industriels. Chaque année, 4 sujets en lien étroit avec des partenaires industriels sont proposés aux étudiants, dont au moins un projet porté par la dominante VSE (Vivant, Santé, Environnement) et un par la dominante CVT (Construction, Ville, Transports). Lors de la première séance de projet, en début de ST7, les sujets sont présentés aux étudiants qui émettent ensuite leurs préférences (campagne MyWay). Les étudiants sont affectés à un projet en maximisant leur satisfaction et en respectant les quotas (tous les sujets doivent être pourvus). Chaque projet est encadré par un ou deux enseignants, et par un ou plusieurs partenaires industriels. Le projet de ST7 n'est pas un projet scolaire ; les étudiants se voient confier une mission répondant à des problématiques réelles, et travaillent sur la base de données réelles fournis par les partenaires (et le plus souvent sous accord de confidentialité). Leur première mission est de comprendre et reformuler le problème posé. Ainsi, les sujets et partenaires proposés évoluent tous les ans pour correspondre aux "besoins du moment", même si une certaine continuité existe avec certains partenaires/sujets (par exemple le sujet Bioraffinerie, ou un sujet en lien avec l'Aménagement et la Construction Durable). Les sujets proposés sont tous en lien avec l'Economie Circulaire, mais avec des points de vue et objectifs assez différents (optimisation de flux ou de procédés, démarche territoriale nécessitant une consultation fine des parties prenantes, étude technico-économique, étude prospective, définition de modèles d'affaires, etc.) qui permettent à chaque étudiant de creuser une dimension de l'Economie Circulaire en accord avec ses préférences.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

## Prérequis

Aucune

## Plan détaillé du cours (contenu)

Le projet sera étalé sur 6 à 8 semaines. Les élèves devront se répartir les tâches et les rôles au sein de leur groupe, et seront invités à s'organiser autour d'une démarche de management agile de projet. A peu près au milieu du projet, une séance sera consacrée à une présentation intermédiaire de chaque groupe. Enfin, la soutenance finale sera organisée lors de la dernière séance projet. Les étudiants rendront à l'issue de cette soutenance une version finalisée de leur rapport. Les sujets décrits ci-dessous sont ceux des années passées et sont fournis à titre purement indicatif. Ceux de 2024 seront sur des thématiques similaires ou proches.

**Projet n°1 (exemple 2020 à 2023) : Bioraffinerie : optimisation des flux et/ou des procédés associés**

- Partenaire associé : Chaire de Biotechnologie, ARD

- Lieu : Paris-Saclay avec visite de la Bioraffinerie de Pomacle (CEBB et site industriel partenaire)

- Brève description : La bioraffinerie peut se définir comme un écosystème industriel permettant de valoriser la biomasse (ressources végétales, animales déchets) sous forme de divers produits, alimentaire ou non (énergies, intermédiaires chimiques, matériaux, cosmétiques, santé, etc.). La France est, à l'échelle mondiale très en pointe dans ce domaine, notamment grâce à la bioraffinerie de Pomacle Bazancourt qui traite plus de 4 Mt de biomasse par an. La bioraffinerie est donc d'un des outils industriels crédible pour accompagner la transition écologique, à la fois pour répondre aux enjeux climatiques et humanitaires mais aussi pour relocaliser l'industrie, notamment au sein des bassins de production agricoles ou forestiers. Elle répond ainsi au triple objectif du développement durable (environnemental, social et économique). L'objectif de ce projet est, à l'échelle du site industriel, de comprendre l'organisation des procédés et des flux pour ensuite dégager les opportunités d'optimisation. Par une approche pluridisciplinaire (data sciences, modélisation-simulation-optimisation, génie des procédés, etc.), les élèves devront travailler en groupe pour identifier, développer et présenter une solution opérationnelle contribuant à la réduction de l'impact environnemental de la bioraffinerie.

#### **Projet n°2 (exemple 2021) : ESA\_Lab@CentraleSupélec**

- Partenaire associé : European Space Agency (ESA)

- Lieu : Campus Paris-Saclay

- Brève description : Le projet MELiSSA (Micro-Ecological Life Support Alternative) de l'ESA a pour objectif de développer un système de support de vie régénératif permettant de reproduire les fonctions principales de l'écosystème terrestre (production en eau, oxygène), dans une masse et un volume réduits et avec une sécurité extrême. MELiSSA est un des exemples les plus aboutis au monde d'économie circulaire, au sens du bouclage extrême des flux de matière et d'énergie. L'ESA\_Lab@CentraleSupélec, créé en 2020, est un cadre de collaboration privilégié entre l'ESA et CentraleSupélec. Il a pour objectif de développer l'intérêt et la connaissance des activités d'exploration pacifique de l'espace et les applications transverses qui en découlent, telles que la surveillance du climat, l'observation de la Terre, la navigation, la (cyber)sécurité, l'intelligence artificielle, la durabilité, l'économie spatiale, etc., au bénéfice mutuel des deux organisations et de la société. Le but de ce projet de ST7 est de spécifier et proposer des premiers scénarios de conception préliminaire d'un futur « laboratoire démonstrateur », qui serait un lieu d'expérimentation et de projets scientifiques autour du concept d'Economie Circulaire, et donc en lien étroit avec le projet MELiSSA. Le projet est structurée en deux grande phases : (1) Spécification du laboratoire démonstrateur : recueil des besoins et des premières idées par un état de l'art, et des entretiens auprès des différents acteurs de CentraleSupélec et d'experts de l'ESA ; (2) Conception préliminaire du laboratoire démonstrateur.

#### **Projet n°3 (exemple 2022 et 2023) : Reconditionnement d'ordinateurs portables**

- Partenaire associé : Emmaüs Connect

- Lieu : Campus Paris-Saclay + visite d'un centre de reconditionnement d'ordinateurs portables

- Brève description : Membre du Mouvement Emmaüs, Emmaüs Connect est une association loi 1901 créée en 2013 pour lutter contre la fracture numérique et l'illectronisme. Emmaüs Connect a lancé en novembre 2020 LaCollecte.tech, une plateforme qui permet aux organisations de donner facilement une deuxième vie à leur matériel informatique inutilisé au profit des publics en situation de précarité sociale et numérique. Le projet vise à promouvoir le reconditionnement d'ordinateurs portables issus de la collecte et à destination des 8 millions de Français qui sont encore privés d'accès à internet et donc de services de première nécessité faute de moyens pour s'équiper (alors que dans le même temps, 33% des entreprises ont du matériel dormant qu'elles ne savent pas revaloriser). Quatre axes de travail ont été étudiés (chaque groupe d'étudiants en a traité deux) : (1) imaginer une coque "universelle" qui permettrait de recréer un ordinateur portable de seconde main avec n'importe quels composants issus de la récupération ; (2) concevoir un outil permettant d'évaluer la compatibilité de composants de marques différentes, issus d'ordinateurs différents, et en fonction des stocks disponibles ; (3) étudier la faisabilité d'un ordinateur portable dont la carte mère serait un Raspberry Pi (car la carte mère d'un ordinateur portable est souvent très compliquée à réutiliser car les composants sont soudés) ; (4) proposer des mesures de plaidoyer à destination des fabricants d'ordinateurs portables pour faire évoluer leurs pratiques vers plus de circularité et soutenabilité.

#### **Projet n°4 (exemple 2022) : Trophée étudiant Circolab**

- Partenaire associé : association professionnelle Circolab

- Lieu : Campus Paris-Saclay + visite du chantier du village olympique (Saint-Denis)

- Brève description : Circolab est une association d'entreprises du secteur de l'immobilier et de la construction qui souhaite promouvoir l'économie circulaire dans leurs activités. Circolab a lancé en 2022 la première édition du Trophée Economie Circulaire à destination d'étudiants d'écoles d'ingénieur et d'architecture, dont CentraleSupélec. Plusieurs cas d'étude étaient proposés avec un objectif commun : proposer des initiatives d'économie circulaire réalistes et quantifiées à l'échelle d'un bâtiment ou d'un quartier. Les étudiants de la ST7 ont travaillé sur deux cas d'études au niveau du futur village des athlètes pour les Jeux Olympiques de Paris en 2024 : (1) un cas proposé par la SOLIDEO (organisme en charge de la construction des ouvrages olympiques) à l'échelle d'un îlot de quartier pour proposer des solutions de circularisation des flux d'eau ; (2) un cas proposé par Vinci à l'échelle d'un second îlot de quartier pour proposer des solutions de revalorisation maximisée d'équipements (cloisons, mobilier, sanitaires) entre la "Phase Jeux" (= pendant les jeux) et la "Phase héritage" (= après les Jeux, lorsque le village deviendra un quartier d'habitation, de bureaux et de commerces).

## Déroulement, organisation du cours

Apprentissage par projet  
Management de projet agile  
Travail en groupe avec appui des encadrants  
Plusieurs échanges programmés avec les partenaires industriels  
Utilisation de Teams pour faciliter les échanges et le travail de groupe

## Organisation de l'évaluation

Les élèves sont évalués en fonction de la qualité de leur présentation orale et de leurs livrables, incluant un compte-rendu (note individuelle et collective).  
Leur note sera basée en particulier sur un document à rendre précisant les tâches et rôles spécifiques de chaque élève dans chaque groupe.  
Présentation orale : 35%  
Compte-rendu et livrables : 65%

## Support de cours, bibliographie

Diaporamas et supports du cours de la ST7  
Diapositives des différentes présentations  
Rapports et livrables des années précédentes  
Documents et données fournis par les partenaires industriels.

## Moyens

Équipe enseignante : François CLUZEL (LGI), Yann LEROY (LGI), Franck MARLE (LGI), Julien LEMAIRE (LGPM – Chaire de biotechnologie), un encadrant de la dominante CVT  
Outils logiciels : à définir selon les projets (par exemples logiciels ACV (OpenLCA ou Waro) et MFA (Stan))  
Selon les projets, des déplacements (visite de site, consultation de parties prenantes, etc.) seront organisés.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- 1) Être sensibilisé aux grands enjeux environnementaux
- 2) Maîtriser les principaux outils de l'écologie industrielle : MFA et ACV
- 3) Savoir modéliser et simuler un système industriel dans une perspective d'économie circulaire
- 4) Savoir optimiser un système industriel dans une perspective d'économie circulaire
- 5) Savoir s'organiser en équipes interdépendantes et gérer un projet
- 6) Savoir définir un périmètre d'étude et des objectifs précis pour répondre aux besoins industriels
- 7) Savoir réduire de façon pertinente la complexité d'un problème
- 8) Savoir faire face à l'incertitude ou au manque de données
- 9) Avoir un regard critique sur les données et les modèles

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C2 Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers
- C2.4 Produire des données et développer de la connaissance selon une démarche scientifique à Jalon 2 : Exploiter un ensemble cohérent de données et réaliser un état de l'art exhaustif avec un esprit critique
  - *Pour certains* : C2.5 Développer les savoir-faire et savoir-être d'un des métiers de l'ingénieur à Jalon 2 : Interagir avec une posture appropriée au contact d'un milieu professionnel (entreprise, laboratoire ou autre organisation)
- C4 Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients
- C4.1 Identifier et (re)formuler le besoin de création de valeur du client ainsi que les enjeux et contraintes associés. Identifier et intégrer les autres parties prenantes, internes et externes ainsi que les autres dimensions non évoquées initialement (techniques, économiques, humaines, etc.) à Jalon 2 : Identifier avec le client les autres parties prenantes (internes et externes) et leurs liens ainsi que, si possible, les autres dimensions ne figurant pas dans la formulation initiale : techniques, économiques, humaines, etc. Ceci afin d'avoir une formulation plus complète et plus riche de la question posée.

- C4.2 Proposer une ou des solutions répondant à la question reformulée en termes de création de valeur et compléter par l'impact sur les autres parties prenantes et par la prise en compte des autres dimensions. Quantifier la valeur créée par ces solutions. Arbitrer entre des solutions possibles à Jalon 2 : Elargir à l'impact sur les autres parties prenantes et dans le périmètre fixé dans le jalon 2 de C4.1
- C6 Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique
- C7 Savoir convaincre
- C7.1 Sur le fond : Structurer ses idées et son argumentation, être synthétique (hypothèses, objectifs, résultats attendus, démarche et valeur créée) à Jalon 2 : Adapter le fond et son argumentation en fonction d'interlocuteurs ou de contextes élargis, « avoir du répondant » pour défendre sa solution (maîtrise du sujet des interlocuteurs, valeurs, engagements, disponibilité, attention, etc.).
  - C7.4 Sur les techniques de communication : Maitriser le langage parlé, écrit et corporel, et maitriser les techniques de base de communication à Jalon 2 : Déployer avec succès des techniques de communication adaptées à la situation spécifique, parmi lesquelles : rhétorique, storytelling, langage corporel, occupation d'espace, respiration, mémoire, supports visuels, outils vidéos, distanciel, etc.
- C8 Mener un projet, une équipe
- *Pour certains* : C8.2 Mobiliser et entraîner un collectif en faisant preuve de leadership à Jalon 2 : Mobiliser l'équipe jusqu'au résultat final dans un projet « par temps calme autant qu'en tempête » (projet subissant des contraintes exogènes, gestion des aléas, des parties prenantes, etc.)
  - *Pour certains* : C8.4 Travailler en mode projet en mettant en œuvre les méthodes de gestion de projet adaptées à la situation à Jalon 2 : Maitriser et utiliser pertinemment une méthode avancée de développement projet (Management agile de projet complexe, chaîne critique, holocratie, ...) et les outils associés et les mettre en œuvre tout au long d'un projet simple en faisant les ajustements nécessaires.

# ST7 - 74 - OPTIMISATION DE SYSTEMES DE TRANSPORT PASSAGERS

**Dominante :** Info&Num (Informatique & Numérique), GSI (Grands Systèmes en Interaction)

**Langues d'enseignement :** Français

**Campus où le cours est proposé :** CAMPUS DE PARIS - SACLAY

---

## Problématique d'ingénieur

Les systèmes de transport sont aujourd'hui essentiels à l'activité de la société car ils fournissent des services de mobilité cruciaux tant du point de vue des déplacements personnels que professionnels. La massification des déplacements et la diversité des services de mobilité, les nouveaux véhicules autonomes, rendent ses systèmes complexes à dimensionner, concevoir et opérer.

L'optimisation de tels systèmes est donc tout à fait essentielle. Pour une compagnie aérienne, il s'agit, en particulier, d'être capable :

- de tirer parti des informations disponibles pour prévoir la demande sur des « origines destinations » et définir les planning de vols qui couvrent au mieux la demande,
- de tarifier au mieux les vols pour assurer un taux de remplissage des avions et assurer un revenu à la compagnie (revenue management),
- de dimensionner les services (enregistrement, bagages, ...) aux hubs permettant d'opérer les plans de vols,
- de prévoir les plannings des personnels navigants respectant la législation et les préférences des équipages,
- d'affecter les avions aux vols afin de minimiser les couts, d'être robuste à des retards éventuels.

Au-delà de la capacité à opérer efficacement les opérations, l'ingénieur a aussi pour rôle d'éclairer des décisions stratégiques par des modèles quantitatifs évaluant différents scénarios dans lesquels une compagnie pourrait choisir de s'engager.

## Prérequis conseillés

Cours de SIP et Algorithmique et Complexité

## Modules contexte et enjeux

Ces modules comprennent une conférence introductive de la thématique, des interventions portant sur les verrous technologiques et scientifiques de l'optimisation des transports passagers, ainsi qu'une présentation des projets associés..

## Cours spécifique (60 HEE) : Aide à la décision / Recherche opérationnelle (AD/RO)

**Brève description :** L'optimisation et la prise de décision est une activité intrinsèque au métier d'ingénieur/manager. Pour appréhender les problèmes de décision complexes auxquels ils seront confrontés, les ingénieurs et managers de demain doivent disposer des concepts et méthodes d'optimisation permettant de formaliser un problème de décision. Le cours vise à introduire un certain nombre de modèles classiques permettant de représenter et résoudre des problèmes de décision dans différents contextes. Il s'agit de présenter des modélisations de différents problèmes concrets de décision.

## Projets :

---

Le projet vise à mettre les étudiants en situation réelle de résolution d'un problème de décision impliquant la formulation d'un modèle, le choix d'une/de méthode(s) de résolution, l'implémentation d'une solution permettant une résolution sur des jeux de données réelles, la validation de la solution par des tests numériques. L'objectif du projet à travers cette activité est de faire progresser les étudiants dans la compréhension des enjeux scientifiques, techniques, mais aussi humains et économiques qui sous-tendent la mise en place d'un projet de recherche opérationnelle et d'aide à la décision dans une organisation.

## Projet 1 : Optimisation des opérations de transport ferroviaire

**Partenaire associé :** SNCF

**Lieu :** Campus Paris-Saclay

**Brève description :** Dans le transport ferroviaire la mise en place du service aux passagers implique de traiter différents problèmes de gestion des opérations : la prévision de la demande passagers, la conception de grilles horaires, la tarification des places, l'affectation des trains aux quais dans une gare... Ces exemples impliquent d'optimiser le fonctionnement du système de transport. Le projet consistera à traiter un de ces problèmes de gestion des opérations ferroviaires.

## Projet 2 : Optimisation des opérations d'une compagnie aérienne

- **Partenaire associé :** Air France - Groupe Recherche Opérationnelle / Intelligence Artificielle

- **Lieu :** Campus Paris-Saclay

- **Brève description :** Il s'agit de traiter un des multiples problèmes de gestions des opérations d'une compagnie aérienne : par exemple affectation des vols à des portes d'embarquement, placement des passagers dans un avion, affectation des vols prévu à une flotte d'avions, ...

## Projet 3 : Planification d'une équipe mobile

**Partenaire associé :** Decision Brain

**Lieu :** Campus Paris-Saclay

**Brève description :** Il s'agit de concevoir et implémenter un outil de planification d'une équipe de techniciens mobiles, initialement prévue pour créer les routes quotidiennes de 500 techniciens devant réaliser quelques 10000 tâches.

# 2SC7410 – Aide à la Décision : Modèles, algorithmes et implémentation

Responsables : **Vincent Mousseau**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT GÉNIE INDUSTRIEL ET OPÉRATIONS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Cours ST**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

La prise de décision est une activité intrinsèque au métier d'ingénieur et conduit très souvent optimiser un/plusieurs aspects d'un système. Mais ces décisions s'appuient aussi sur des jugements/préférences d'un décideur/utilisateur. Les préférences jouent donc un rôle clé dans de nombreuses applications de l'informatique et des technologies de l'information modernes. C'est le cas du marketing computationnel, des systèmes de recommandations, des interfaces utilisateurs adaptatives, ... Les décisions concernées peuvent être de nature stratégiques, tactiques ou opérationnelles, dans des contextes complexes, concurrentiels, incertains, faire intervenir un seul critère à optimiser, ou trouver un compromis entre des critères conflictuels... Pour appréhender les problèmes de décision complexes auxquels ils seront confrontés, les ingénieurs doivent disposer des concepts et méthodes et algorithmes permettant de formaliser un problème de décision.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

- Introduction à l'aide à la décision, concepts de base,
- Modélisations de problèmes de décision utilisant la programmation mathématique. Présentation d'outils de modélisation et de résolution (modeleurs et solveurs),
- Implémentation TP Python + GUROBI,
- Décision en présence de risque, décision dans l'incertain, théorie de l'utilité, arbres de décision,
  
- Décision multicritère et modélisation des préférences, introduction à quelques modèles d'agrégation simples,
- Analyse expérimentale du comportement décisionnel,
- Apprentissage de modèle de préférences à partir de données, apprentissage incrémental,
- Métaheuristiques pour les problèmes combinatoires,
- Optimisation multiobjectif,

## Déroulement, organisation du cours

Cours : 13,5h

TD : 10,5h

TP : 9h

Cette distribution C/TD/TP peut évoluer à la marge



## Organisation de l'évaluation

Examen (1h30) : 70% TP : 30%

## Support de cours, bibliographie

Les slides de cours et feuilles de TDs seront fournis  
Les TP seront effectués sur un notebook Jupyter

bibliographie :

D. Bouyssou, T. Marchant, M. Pirlot, P. Perny, A. Tsoukiàs, P. Vincke "Evaluation and Decision models: A critical perspective", Kluwer, 2000.

W. Cooper, L. Seiford, and K. Tone, "Introduction to Data Envelopment Analysis and its use", Springer, 2006.

C. Guéret, C. Prins, M. Sevaux. "Programmation linéaire, 65 problèmes d'optimisation modélisés et résolus avec Visual Xpress", Eyrolles, 2003

C. Kwon, "Julia programming for operations research", 2019, second edition, <http://www.chkwon.net/julia>

P. Vallin, D. Vanderpooten, "Aide à la décision, une approche par les cas", 2e édition, Ellipses. 2002.

H.P. Williams. "Model building in mathematical programming". J. Wiley, New York, 2013. 5ème édition,

## Moyens

Equipe enseignante (V. Mousseau + chargés de TD/TP à valider)

Logiciels : Python + Solveurs d'optimisation + bibliothèques de métaheuristiques

TD à ~30 étudiants

TP à ~20 étudiants

Wifi ABSOLUMENT INDISPENSABLE en salle de TP et TD

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Ce cours vise à développer les aptitudes des étudiants à élaborer et mettre en oeuvre des modèles et algorithmes pertinents face à une situation de décision.

À l'issue du cours, les étudiants maîtriseront quelques méthodes/modélisation d'aide à la décision. Ils sauront manipuler les modèles, les utiliser de façon opérationnelle et les implémenter efficacement. Ils auront aussi les éléments nécessaires pour prendre du recul et avoir un sens critique par rapport à ces méthodes, et ainsi en distinguer leurs performances et leurs limites d'application.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 (toutes les sous compétences) : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

C2.1 : Avoir approfondi un domaine ou une discipline relative aux sciences fondamentales ou aux sciences de l'ingénieur.

C2.3 : Identifier et acquérir rapidement des nouvelles connaissances et compétences nécessaires dans les domaines pertinents, qu'ils soient techniques, économiques ou autres

C6.3 : Spécifier, concevoir, réaliser et valider un logiciel

C6.4 : Résoudre des problèmes dans une démarche de pensée computationnelle Nouvelle compétence

C6.5 : Exploiter tout type de données, structurées ou pas, y compris massives.



# 2SC7490 – Optimisation des systèmes de transport de passagers

Responsables : **Vincent Mousseau**

Département de rattachement : **DOMINANTE - GRANDS SYSTÈMES EN INTERACTION, DOMINANTE - INFORMATIQUE ET NUMÉRIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentes d'enseignement (HPE) : **40,50**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST 7

# ST7 - 75 - SIMULATION DE FLUX INDUSTRIELS

**Dominante** : GSI (Grands Systèmes en Interaction) et VSE (Vivant-Santé, Environnement)

**Langues d'enseignement** : Français

**Campus où le cours est proposé** : CAMPUS DE PARIS - SACLAY

---

## Problématique d'ingénieur

La complexité croissante des produits et services, la mondialisation des opérations et les exigences de plus en plus grandes des clients placent la problématique de pilotage des flux au cœur des préoccupations des entreprises industrielles et de services.

La compétitivité de ces entreprises est fortement liée à leur capacité à s'organiser pour produire et distribuer des produits et des services répondant aux attentes du client tout en assurant la pérennité de l'entreprise dans ses dimensions économiques, sociales et environnementales.

L'un des enjeux majeurs pour répondre à ces objectifs porte sur l'optimisation du pilotage des flux, allant des fournisseurs aux clients finaux.

Ce sujet aborde ces thèmes en présentant particulièrement une méthode de simulation permettant de s'attaquer aux problèmes de gestion de flux : la simulation à événements discrets.

## Prérequis conseillés

Aucun

## Modules contexte et enjeux

Ces modules comprendront des interventions de partenaires industriels pour illustrer les problématiques de gestion des flux dans différents secteurs.

## Cours spécifique (60 HEE) : Optimisation et gestion de flux

**Brève description** : Flux de produits dans une usine, flux de colis dans un centre postal, flux de patients dans un hôpital, flux de clients dans un supermarché : les problématiques liées à la compréhension et à la gestion des flux sont présentes dans tous les secteurs d'activité. Plus qu'une problématique spécifique, la gestion des flux est une approche des problèmes industriels adaptable dans de nombreux secteurs. Savoir comprendre et maîtriser les flux est un enjeu majeur de performance industrielle. Ce cours introduit les problématiques liées à la gestion de flux industriels et présente un outil pour s'attaquer à ces problèmes, la simulation à événements discrets.

## Projet : Gestion des flux dans la livraison de gaz industriels

**Partenaire associé** : Air Liquide

**Lieu** : Campus Paris-Saclay

**Brève description** : Ce projet permettra, sur un cas industriel proposé par un partenaire, la mise en application des outils vus dans le cours spécifique, et en particulier de la simulation à événements discrets des systèmes de flux industriels. Il s'agira, à partir d'une problématique de livraison de gaz industriels, de définir un modèle conceptuel, le transposer en modèle informatique, valider ce modèle, expérimenter avec, et construire une recommandation à destination des managers à partir des résultats de simulation.

# 2SC7510 – Optimisation et gestion de flux

Responsables : **Guillaume LAMÉ, Adam ABDIN**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT GÉNIE INDUSTRIEL ET OPÉRATIONS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Cours ST**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Flux de produits dans une usine, flux de colis dans un centre postal, flux de patients dans un hôpital, flux de clients dans un supermarché : les problématiques liées à la compréhension et à la gestion des flux sont présentes dans tous les secteurs d'activité. Plus qu'une problématique spécifique, la gestion des flux est une approche des problèmes industriels adaptable dans de nombreux secteurs.

Savoir comprendre et maîtriser les flux est un enjeu majeur de performance industrielle. Ce cours introduit les problématiques liées à la gestion de flux industriels et présente un outil pour s'attaquer à ces problèmes, la simulation à événements discrets.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

Principes de la simulation à événements discrets de systèmes de flux.

Utilisation du logiciel Simul8.

Optimisation de systèmes de flux.

Utilisation du logiciel OptQuest couplé à Simul8 pour la simulation-optimisation.

Perspectives sur l'implémentation de ces techniques en industrie.

Cas d'études en secteur manufacturier et de services.

## Déroulement, organisation du cours

Le module alternera séances de cours, en présentiel ou sous forme de vidéos et lectures à préparer individuellement, et cas d'applications et exercices.

## Organisation de l'évaluation

- Contrôle écrit de 90 minutes (40%) et travail intermédiaire à rendre (60%).
- Le travail intermédiaire à rendre est une évaluation obligatoire

## Support de cours, bibliographie

Sujets de TDs distribués en cours, notes de cours, vidéos.

Ouvrage de référence pour ce cours : Robinson S. Simulation the practice of model development and use. 2nd ed. London: Palgrave Macmillan 2014.

## Moyens

Logiciel de simulation à événements discrets Simul8, et son extension OptQuest pour la simulation-optimisation.

***Le logiciel Simul8 n'existe qu'en version Windows. Les étudiants munis de portables Mac OS devront installer une machine virtuelle, ce qui peut ralentir la vitesse d'exécution du logiciel et compromettre son ergonomie générale.***

Cours, vidéos, exercices et cas d'application industriels.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'étudiant sera capable de mobiliser des techniques de simulation et d'optimisation pour comprendre et améliorer la performance d'un système de flux.

Ce cours permettra de travailler les compétences suivantes :

- C1 Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques
  - C1.2 Utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes pour traiter le problème.
  - C1.3 Résoudre le problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation.
- C2 Développer une compétence approfondie dans un domaine scientifique ou sectoriel et une famille de métiers
  - C2.1 Avoir approfondi un domaine ou une discipline relatif aux sciences fondamentales ou aux sciences de l'ingénieur.
- C3 Agir, entreprendre, innover en environnement scientifique et technologique
  - C3.6 Evaluer l'efficacité, la faisabilité et la robustesse des solutions proposées

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Maîtrise d'un formalisme de modélisation de systèmes industriels, la simulation à événements discrets, et d'un logiciel l'implémentant, Simul8.

# 2SC7591 – Gestion des flux dans la livraison de gaz industriels

Responsables : **Guillaume LAMÉ, Loïc Pineau**

Département de rattachement : **DOMINANTE - VIVANT, SANTÉ, ENVIRONNEMENT, DOMINANTE - GRANDS SYSTÈMES EN INTERACTION**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce projet permettra, sur un cas industriel proposé par un partenaire, la mise en application des outils vus dans le cours spécifique, et en particulier de la simulation à événements discrets des systèmes de flux industriels.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

T7

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

En parallèle du cours spécifique de ST7, les étudiants appliqueront progressivement les notions abordées en cours sur un problème réel qu'ils aborderont dans toute sa complexité. Des rappels de cours seront fournis si nécessaire.

## Déroulement, organisation du cours

Cas d'étude industriel.

## Organisation de l'évaluation

Projet en groupe avec rapport et soutenance finale.

## Support de cours, bibliographie

Supports du cours spécifique de ST7.

Données du cas d'étude industriel.

## Moyens

Cas d'étude industriel, avec données et présentation du contexte et de la problématique, supervisé par un tuteur.

Logiciel de simulation à événements discrets Simul8, et son extension OptQuest pour la simulation-optimisation.

***Le logiciel Simul8 n'existe qu'en version Windows. Les étudiants munis de portables Mac OS devront installer une machine virtuelle, ce qui peut ralentir la vitesse d'exécution du logiciel et compromettre son ergonomie générale.***

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Implémentation de la simulation à événements discrets. Modélisation conceptuelle d'un problème, transposition en modèle informatique, validation du modèle, expérimentation.

Ce cours permettra de travailler les compétences suivantes :

- C1 Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques
  - C1.2 Utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes pour traiter le problème.
  - C1.3 Résoudre le problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation.
- C2 Développer une compétence approfondie dans un domaine scientifique ou sectoriel et une famille de métiers
  - C2.1 Avoir approfondi un domaine ou une discipline relatif aux sciences fondamentales ou aux sciences de l'ingénieur.
- C3 Agir, entreprendre, innover en environnement scientifique et technologique
  - C3.6 Evaluer l'efficacité, la faisabilité et la robustesse des solutions proposées
- C7 Savoir convaincre
  - C7.1 Convaincre sur le fond. Être clair sur les objectifs et les résultats attendus. Être rigoureux sur les hypothèses et la démarche. Structurer ses idées et son argumentation. Mettre en évidence la valeur créée.
- C8 Mener un projet, une équipe
  - a. C8.1 Travailler en équipe/en collaboration.
  - b. C8.4 Travailler en mode projet en mettant en œuvre les méthodes de gestion de projet adaptées à la situation

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Implémentation de la simulation à événements discrets sur un cas réel.

# ST7 - 76 - SIMULATION A HAUTE PERFORMANCE POUR LA REDUCTION D'EMPREINTES

Dominante :

Langues d'enseignement :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

---

## Problématique d'ingénieur

La simulation est aujourd'hui au cœur de nombreuses démarches de conception et d'optimisation pour diminuer l'empreinte ou l'impact des produits créés : réduction du risque de destruction en cas de catastrophe naturelle, réduction d'une traînée d'avion pour minimiser le carburant consommé et le CO<sub>2</sub> émis, réduction du temps d'un calcul à large échelle et des ressources exploitées (les simulations elles-mêmes finissent par consommer beaucoup d'énergie sur beaucoup de processeurs), ...

Mais il s'agit souvent de simulations de *systèmes complexes*, qui demandent à la fois des compétences en *simulations à haute performance* et à *large échelle*, et en *méthodes d'optimisation* pour limiter le champ des investigations et les heures de calculs nécessaires. De plus, chaque étude doit encore se faire en recherchant un compromis entre la qualité de la solution trouvée et le nombre d'heures de calcul utilisées, car les heures de calculs coûtent cher (notamment sur des clusters de calculs performants ou à grande échelle dans des *clouds*). Il est donc indispensable d'apprendre à *gérer un quota d'heures de calcul*.

Cette ST comprend ainsi des mathématiques numériques, de l'informatique parallèle, des méthodes d'optimisation, et des développements et expérimentations sur des clusters de PC ou dans des *clouds*. Les étudiants apprendront :

- à développer des modélisations et simulations parallèles afin de réduire la durée de la phase la plus coûteuse de la boucle d'optimisation,
- à associer ces simulations à des méthodes et algorithmes d'optimisation adaptés, qui minimiseront le nombre de configurations à simuler et évaluer (on évitera les approches *brut force*),
- à expérimenter la programmation de plates-formes de calculs à haute performance (clusters de PC ou *clouds*),
- à exploiter ces plates-formes sous la contrainte d'un quota d'heures de calculs à ne pas dépasser.

## Modules contexte et enjeux

Les modules de présentation du contexte et des enjeux commenceront par une présentation des objectifs et de l'organisation de la ST. Puis, une succession d'exposés des partenaires industriels illustrera différents cas d'utilisation de la simulation à haute performance pour la réduction d'empreinte (réduction de consommation énergétique, réduction du coût financier, réduction des temps de simulation, réduction des volumes des données...). A cette occasion, les verrous scientifiques et techniques associés seront identifiés, ainsi que les besoins induits en optimisation.

Les sujets des projets de la ST seront également présentés durant les modules *contexte et enjeux* : en aéronautique, en exploration sismique, en détection d'onde infrasonores, en calcul de risques sur le *cloud*, et en optimisation temporelle et énergétique de calculs parallèles. Ces exposés présenteront également les problématiques économiques et sociétales dues aux investissements associés pour réaliser des simulations à haute performance, et à l'impact de la simulation sur l'évolution des technologies qui nous entourent.

Une visite du *Très Grand Centre de Calcul* (TGCC) à Bruyères-le-Châtel, sous la conduite du CEA, permettra de voir des infrastructures modernes de calcul à haute performance, et leurs infrastructures support (alimentation électrique, refroidissement, protections). Enfin, une table ronde avec tous les partenaires industriels permettra de débattre des tendances pour l'avenir.

## Cours spécifique (60 HEE) : Calcul parallèle et optimisation

**Breve description :** Ce cours inclut à la fois des aspects mathématiques, numériques, algorithmiques et de programmation performante sur machines parallèles et distribuées, associés à des problématiques d'optimisation. Parmi les notions abordées, ce cours décrit, dans une première partie, les bases de l'informatique parallèle et distribué, en détaillant notamment les architectures informatiques et modèles de programmation parallèles ainsi que des algorithmes parallèles et distribué utilisées sur ces architectures. Dans une deuxième partie, ce cours présente des méthodes et algorithmes d'optimisation parallèles, communément utilisées dans des codes de calculs parallèles. Deux classes de méthodes utilisées pour des problèmes d'optimisations sont successivement abordées, à savoir les méthodes de partitionnement et de décomposition de domaine parallèles, puis les algorithmes génétiques et les méta-heuristiques parallèles. Ce sont d'ailleurs ces méthodes et algorithmes que l'on retrouvera dans les différents enseignements d'intégrations de cette ST, dans le but de traiter des problèmes issus des sciences de l'ingénieur. Dans une troisième partie, ce cours s'intéresse à l'analyse des performances des solutions développées. Les notions de métriques de performance et de passage à l'échelle, ainsi que l'analyse des performances expérimentales sont également étudiées.

## Projets : Partenaires industriels et sujets de projets proposés

Lieu : Campus Paris-Saclay

1. **Le CEA DAM (Direction des Applications Militaires)** propose une étude « **d'Optimisation d'une campagne d'exploration sismique pour la protection des ouvrages** »

*(Optimisation d'une exploration sismique)*

Le CEA-DAM est le centre d'alerte français pour les tsunamis et les forts séismes, et utilise ses ressources de calculs à haute performance pour différentes missions.

Après l'accident de Fukushima (Japon), l'exploitation des moyens de calcul à haute performance est devenue de plus en plus courante pour l'estimation du risque sismique associé aux centrales nucléaires : dans le cadre de la conception des nouvelles usines, mais aussi afin d'étudier les performances des centrales existantes face à des événements extrêmes, non prévus lors de leur conception.

Cette étude concerne l'optimisation d'une campagne d'exploration géophysique sur un site expérimental, à l'aide de son *jumeau numérique*. Le projet consiste à optimiser (minimiser) le nombre de capteurs nécessaires pour découvrir la configuration géologique du site d'intérêt. De nombreuses simulations réalistes à l'aide du code SEM3D (méthode de *Reverse Time Migration*) devront être appelées dans une boucle d'optimisation. On cherchera donc une méthode d'optimisation permettant d'atteindre une bonne qualité d'optimisation tout en respectant le quota d'heures.

Les calculs se feront sur des machines du mesocentre Moulon, sous contrainte d'un quota d'heures de calculs.

2. **L'ONERA (Office National d'Etudes et Recherche Aéronautique)** propose une étude « **d'Optimisation de formes et réduction de la traînée en aéronautique** »

*(Réduction de traînée en aéronautique)*

Des études récentes montrent que le trafic aérien est en constante augmentation. Sans améliorations des performances des avions en termes de consommation d'énergie, la part du transport aérien dans les émissions de gaz à effet de serre risque de devenir insupportable dans le futur. La baisse de la consommation des avions passe d'une part par l'augmentation des rendements des moteurs et d'autre part par l'amélioration des qualités aérodynamiques des aéronefs et de la diminution de leur poids.

Les outils numériques sont largement utilisés depuis longtemps dans le domaine aéronautique pour aider à la conception et à l'optimisation des systèmes. Par exemple la forme d'une aile peut être améliorée de façon à diminuer sa traînée, à portance constante, ou sa structure intérieure peut être allégée. Les méthodes d'optimisation nécessitent des calculs successifs pour différentes géométries d'ailes. Les coûts de calcul pour chaque étape sont d'autant plus élevés que les modèles numériques sont précis. La seule façon de réduire les temps de calcul pour pouvoir intégrer les méthodes d'optimisation dans le cycle de conception industriel consiste à utiliser des calculateurs parallèles. L'objectif de ce projet consiste à réaliser la parallélisation de la partie la plus coûteuse de la phase d'optimisation, à savoir la résolution des grands systèmes linéaires issus de modèles éléments finis sur des maillages de grande taille, et d'expérimenter différents jeux de paramètres d'optimisation. Les essais se feront sur les machines parallèles du Data Center d'Enseignement de CentraleSupélec, sous contrainte d'un quota d'heures de calculs.

3. **Le CEA DAM (Direction des Applications Militaires)** propose une étude « **d'Optimisation de détection d'ondes infrasonores pour la vérification du traité d'interdiction complète d'essais nucléaires** »

*(Détection d'ondes infrasonores)*



Le CEA-DAM est le centre d'alerte français pour les tsunamis et les forts séismes, et participe aussi à la mise en œuvre des moyens de vérification du Traité d'Interdiction Complète des Essais nucléaires (TICE) en utilisant ses ressources de calculs à haute performance.

Un code d'hydrodynamique compressible parallèle a ainsi été développé au CEA DAM, qui permet de simuler la propagation d'ondes de souffle et d'ondes acoustiques en présence de relief et de bâtiments, avec ou sans vent. D'autre part, on considère que des capteurs judicieusement placés permettent d'enregistrer les signaux de surpression en cas d'explosion. Deux types de problèmes peuvent alors être étudiés : (1) retrouver le lieu d'une explosion et déterminer sa puissance à partir des enregistrements de capteurs situés sur le terrain, (2) définir où positionner judicieusement des capteurs pour maximiser les chances de détection d'une explosion au sein d'une zone déterminée.

Une investigation « brut force » simulant toutes les configurations possibles des paramètres consommerait beaucoup trop d'heures de calculs. On mettra donc au point une boucle d'optimisation explorant avec parcimonie l'espace des configurations possibles et faisant appel efficacement au code d'hydrodynamique.

Les calculs se feront sur des clusters du CEA sous contraintes d'un quota d'heures de calculs, et trois des derniers jours de l'étude se dérouleront sur le site de Bruyères-le-Châtel. Cette étude est réservée aux étudiants de l'Union Européenne.

#### **4. ANEO est une société d'informatique experte en calcul à haute performance et en exploitation de clouds, qui propose une étude de « Optimisation énergétique et accélération d'un graphe de calculs financiers sur cloud »**

##### **(Graphe de calculs financiers)**

Une des difficultés dans l'appréciation des comptes d'une assurance (ou d'une banque) réside dans la valorisation des actifs financiers (actions, contrats d'assurance vie ou voiture, etc.) et des risques sous-jacents. En fonction de la valorisation des risques pris, les réglementations résultant des diverses crises économiques obligent l'assurance ou la banque à immobiliser une certaine quantité de fonds propres.

Les étapes d'un tel calcul, que gère ANEO, forment un graphe tâches avec de nombreuses dépendances, et la somme des temps d'exécution correspond à l'équivalent de 413177 heures de calcul. Sur une infrastructure de 1700 cœurs la durée du calcul serait d'un peu plus de 10 jours pleins si tous les cœurs pouvaient travailler à tout moment. Mais à cause des dépendances entre les tâches de calcul, il arrive qu'il n'y ait pas assez de tâches pour occuper toutes les ressources allouées, et le processus dure finalement plus de 10 jours.

Afin d'optimiser les coûts de ce calcul, nous souhaitons : (1) utiliser des ressources à la demande disponibles dans le cloud, et (2) optimiser l'exécution du graphe de tâches en recherchant la meilleure stratégie d'allumage/extinction des nœuds de calcul, et le meilleur ordonnancement des tâches sur les nœuds disponibles. Pour cela on développera une fonction de coût calculant le temps d'exécution du graphe de tâches en fonction d'une stratégie de gestion des nœuds et d'ordonnement des tâches, et on implantera un algorithme d'optimisation recherchant le meilleur paramétrage de cette stratégie.

#### **5. INTEL propose une étude « d'Optimisation à faible coût des performances d'un code de propagation d'ondes acoustiques »**

##### **(Réduction de l'empreinte d'un code)**

Toute application à haute performance s'exécutant sur une machine parallèle possède de nombreux paramètres de configuration de son code source et de sa compilation, qui ont un impact non négligeable sur ses performances et son empreinte énergétique. Mais le comportement de l'application dépend de l'architecture des processeurs utilisés, des données du cas test et de la configuration logicielle de la machine. Au final, ce comportement est extrêmement difficile à modéliser, et l'espace des paramètres de configuration peut être de dimension importante. L'utilisation d'algorithmes d'optimisation apparaît donc fondamentale pour converger vers une configuration de l'application minimisant son temps d'exécution et son empreinte énergétique sur la machine utilisée.

Cependant, chaque exécution d'un cas test d'une application de calcul intensif peut être longue, même sur une machine parallèle. On va donc cibler des méthodes d'optimisation pas trop gourmandes en nombre d'expérimentations, pour que la pré-étape d'optimisation du code HPC ne consomme elle-même pas trop de ressources de calculs ! Ce qui revient à *rechercher un compromis entre l'énergie dépensée à optimiser un code HPC, et l'énergie économisée par cette application une fois optimisée.*

Les essais se feront sur les machines parallèles du Data Center d'Enseignement de CentraleSupélec, sous contrainte d'un quota d'heures de calculs.

# 2SC7610 – Méthodes et algorithmes de calcul parallèle, et méthodes d'optimisation

Responsables : **Frédéric Magoules**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT INFORMATIQUE**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Cours ST**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

La *simulation* est aujourd'hui au cœur de nombreuses démarches de conception et d'optimisation, pour diminuer l'impact des produits créés : *réduction de l'empreinte carbone, de l'empreinte sonore...* Mais il s'agit souvent de systèmes complexes, dont la simulation nécessite des compétences spécifiques en simulations à *haute performance* et à *large échelle*.

Dans ce cours les étudiants apprendront à développer des modélisations et simulations sans limite de taille de problème, sans sacrifier la précision des calculs. Pour cela :

- Ils concevront des modélisations décomposables en blocs d'opérations et réalisables en parallèle sur des blocs de données les plus indépendants possibles.
- Ils concevront des algorithmes distribués déployables sur un nombre croissant de processeurs quand la taille du problème augmente, sans sacrifier à la précision des résultats.
- Ils identifieront les méthodes mathématiques d'optimisation adaptées au problème traité.
- Ils expérimenteront la programmation parallèle pour l'optimisation.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

## Prérequis

- Cours commun « Systèmes d'Information et Programmation » de SG1 (1CC1000)
- Cours commun « Algorithmique et complexité » de ST2 (1CC2000)
- Connaissances de bases en algèbre linéaire

## Plan détaillé du cours (contenu)

### Plan détaillé du cours spécifique

#### Architectures et modèles de programmation bas niveau

- Introduction aux architectures des machines parallèles
- Programmation séquentielle et parallèle, auto-vectorisation
- Autonomie: Exemples de code vectorisés (avec office hours)

#### Programmation parallèle et distribuée

- Multithreading sur Multicores
- Passage de messages : communications point-à-point, communications collectives, déploiement sur clusters
- Ordonnancement de Jobs et de tâches
- Autonomie: Exemples d'algorithmes 1D et 2D, modélisation de performances (avec office hours)

### Algorithmes parallèles et distribués

- Introduction aux algorithmes de gradient
- Méthodologie de parallélisation de l'algorithme du gradient
- Homeworks: analyse de la modification d'un algorithme (avec office hours)

### Méthodes de partitionnement et de décomposition de domaine pour l'optimisation

- Introduction aux algorithmes de minimisation dans le cadre de l'optimisation
- Méthodes de décomposition de domaines parallèles
- Techniques de partitionnement de graphes
- Méthodologie de parallélisation
- Minimisation des communications

### Algorithmes d'optimisation combinatoire

- Optimisation combinatoire à base de recherche locale
- Optimisation combinatoire à base de population de solutions

### Métriques et analyse de performances

- Accélération, efficacité, loi d'Amdhal, loi de Gustafson, passage à l'échelle, extensibilité
- Exemple d'identification de sources de pertes de performance, et d'optimisation de code

### Application à la mécanique

- Analyse d'un barrage
- Autonomie: implementation et analyse d'un problème de mécanique (avec office hours)

## Déroulement, organisation du cours

1. Cours (21,0 heures) et TD (4.5 heures) et office hours (4,5 heures) avec examen final écrit (1,5 heures) et contrôle continu.

## Organisation de l'évaluation

Evaluation des Acquis d'apprentissage du cours spécifique Evaluation 85% par l'examen écrit final individuel répartis pour moitié entre : AA.1 et AA.3 évalués par la première partie de l'examen, et AA.2 et AA.3 évalués par la deuxième partie de l'examen et 15% des homeworks.

## Support de cours, bibliographie

- Frédéric Magoulès, François-Xavier Roux. Calcul Scientifique Parallèle. Dunod, Sciences Sup., 2017. 248 pages (en Français).
- Frédéric Magoulès, Stéphane Vialle. Calcul parallèle et distribué, Méthodes numériques: Transparents des supports de cours

## Moyens

- Equipe pédagogique : Filippo GATTI et Frédéric MAGOULES et Stéphane VIALLE
- Cours et TD, avec des groupes de TD de 25 étudiants travaillant sur machines.
- Accès à différents serveurs et clusters de calculs (Data Center d'Enseignement de CentraleSupélec, et/ou mésocentre CentraleSupélec-ENS Paris Saclay).
- Expérimentation avec des langages standards: C/C++/Python, bibliothèque d'envois de messages pour clusters de calculs (MPI).

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

### Acquis d'apprentissage du cours spécifique

**AA.1** A l'issue de ce cours les élèves seront capables de paralléliser les noyaux de calcul par méthodes de décomposition de domaines, intervenant dans les techniques d'optimisations (contribue aux compétences C2.1 et C3.6).

**AA.2** A l'issue de ce cours les élèves seront capables de paralléliser les méthodes d'optimisation basé sur des algorithmes génétiques, du recuit simulé, et des méta-heuristiques (contribue aux compétences C1.3 et C3.6).

**AA.3** A l'issue de ce cours les élèves seront capables de mettre en oeuvre des techniques de parallélisation permettant de résoudre en temps limité un problème dont la résolution séquentielle est impossible en un temps raisonnable (contribue à la compétence C3.6).

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

### Compétences du cours spécifique (détail)

A l'issue de ce cours les élèves sauront :

**C1.3** Résoudre le problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation

**C2.1** Avoir approfondi un domaine ou une discipline relative aux sciences fondamentales ou aux sciences de l'ingénieur.

**C3.6** Evaluer l'efficacité, la faisabilité et la robustesse des solutions proposées

# 2SC7691 – Optimisation d'une campagne d'exploration sismique pour la protection des ouvrages

Responsables : **Stephane Vialle, Filippo GATTI**

Département de rattachement : **DOMINANTE - MATHÉMATIQUES, DATA SCIENCES, DOMINANTE - INFORMATIQUE ET NUMÉRIQUE**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

**Projet de la ST7 "Simulation à Haute Performance pour la réduction d'empreintes"**

**Sujet en partenariat avec CEA-DAM**

**Dominantes : Informatique (INFONUM) & Math, Data Sciences (MDS)**

Après l'accident de Fukushima (Japon), l'exploitation des moyens de calcul à haute performance est devenue de plus en plus courante pour l'estimation du risque sismique associé aux centrales nucléaires. Ces outils ont une importance stratégique non seulement dans le cadre de la conception des nouvelles installations, mais aussi afin d'étudier les performances des centrales existantes face à des événements extrêmes, non prévus lors de leur conception. Dans ce contexte, l'Institut SEISM (dont CentraleSupélec et le CEA sont fondateurs) a été fondé en 2012. Il s'agit d'un regroupement scientifique français, comprenant des partenaires académiques et industriels (dont le CEA et EDF), avec l'objectif de réunir les différents savoir-faire en sismologie et génie parasismique pour améliorer la prédiction de la réponse sismique des sites et structures critiques en France, ainsi que l'évaluation du risque associé.

Dans ce cadre, ce projet concerne l'optimisation d'une campagne d'exploration géophysique sur un site expérimental, à l'aide de son jumeau numérique, construit en utilisant un code de propagation d'onde (SEM3D) en développement entre CentraleSupélec, le CEA et l'Institut de Physique du Globe. SEM3D permet de simuler la propagation d'ondes sismiques sur des larges domaines 3D, avec décomposition de domaine sur maillage cartésien (ou sphérique). Il intègre également la topographie du site et les structures géologiques complexes. Le projet consiste donc à résoudre un problème inverse afin d'optimiser - à l'aide de SEM3D - la configuration géologique du site d'intérêt. Cette optimisation se base sur la méthode de *Reverse Time Migration* (i.e. résolution par problème adjoint). La stratégie d'optimisation prévoit des nombreuses simulations réalistes, de la source aux capteurs (*forward*) et de rétro-propagation du misfit (*backward*) pour pouvoir mettre à jour itérativement les propriétés mécaniques du sous-sol. En effet, vu la taille du site d'intérêt (~10 km de large) et la résolution spatiale cherchée (~100m), bien que SEM3D soit parallélisé et distribué sur des supercalculateurs, chaque simulation de propagation d'onde peut durer plusieurs heures sur de nombreux cœurs de calcul partagés. Pour cela, à chaque itération, les étapes *Forward* et *Backward* doivent être correctement enchaînées avec une stratégie de job scheduling approprié (lancement des calculs en batch). Enfin, le nombre de capteurs pour les enregistrements in situ doit être réduit, vu les coûts associés, en termes de capteurs, de campagnes d'acquisition et le stockage des données obtenues.

**L'objectif de cette étude est donc triple:**

- proposer un modèle de géologie minimisant l'écart entre simulation et enregistrements,
- minimiser le nombre de capteurs nécessaires pour aboutir à un modèle à coût financier raisonnable (en considérant leur disposition spatiale),
- arriver à concevoir cette solution dans la durée du projet avec des calculateurs à haute performance et avec un quota d'heures de calculs limité.

Pour cela, on mettra au point une boucle d'optimisation faisant appel le plus efficacement possible au code de simulation de propagation d'onde : en explorant avec parcimonie l'espace des configurations possibles, pour trouver économiquement une bonne solution.

### Détails techniques du système :

Le système étudié consiste en un bassin sédimentaire entouré par du rocher affleurant, lieu candidat à la construction d'une centrale nucléaire. Afin d'évaluer la réponse sismique du site et de proposer des scénarios de séismes incident, on a besoin de connaître :

- la géométrie 3D des couches géologique,
- les propriétés mécaniques de ces couches.

Ces informations sont fondamentales pour la définition des effets de site sur l'énergie sismique radiée par une faille active.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

### Prérequis

Cours de 1A :

- Cours commun "Systèmes d'Information et Programmation" de SG1 (1CC1000)
- Cours commun "Algorithmique et complexité" de ST2 (1CC2000)

Cours de la ST :

- Cours commun "Optimisation" de la ST7 (2CC3000)
- Cours spécifique "Méthodes et algorithmes parallèles pour l'optimisation" de la ST7 (2SC7610)

Autres prérequis :

- Eléments du cours commun "CIP - Convergence, Intégration et Probabilités" (1SL1000)
- Eléments du cours commun "EDP - Equations aux dérivées partielles" (1SL1500)
- Des connaissances d'algèbre linéaire seront également nécessaires

## Plan détaillé du cours (contenu)

### Principales étapes de l'étude :

- Complément d'information sur le sujet au début de la première partie du projet (intervention du CEA-DAM) :
  - présentation des outils théoriques fondamentaux en propagation d'onde dans des milieux complexes,
  - présentation des enjeux scientifiques liés à la conception parasismique des centrales nucléaires, à l'évaluation de la réponse sismique du site et à l'estimation du risque associé.
- Formalisation du problème et de la grandeur représentant la prospection géophysique afin de caractériser la réponse sismique d'un site nucléaire. Choix d'une méthode d'optimisation adaptée au problème. Mise au point de l'algorithme sur un cas de vérification, supporté par la solution analytique.
- Identification des paramètres du code SEM3D et de leurs impacts respectifs sur sa durée d'exécution parallèle, prise en main de ressources de calcul du Mésocentre Moulon .
- Conception et implantation en Python d'un code d'optimisation appelant SEM3D. Le code d'optimisation sera lui-même parallélisé si son algorithme le permet (on aurait alors un code maître parallèle appelant à la demande un code fils parallèle).
- Test et mise au point du code complet d'optimisation sur machine parallèle du Mésocentre Moulon, sur des petits et moyens problèmes (basse fréquence et/ou petite taille du domaine).
- Application à un cas réel (en termes de taille de la zone étudiée, et de fréquence maximale) :
  - expérimentation de plus gros problèmes sur un plus grand nombre de nœuds et de cœurs de calcul (démarche de passage à l'échelle),
  - analyse de la qualité de la solution trouvée et de la performance des calculs,
  - optimisation du code pour améliorer la solution trouvée ET, si besoin, la performance des calculs,
- Estimation du nombre minimal de capteurs nécessaires pour trouver une solution traitable en fonction des ressources disponibles et de la durée maximale de l'étude.
- L'étude se terminera par la remise d'un rapport et une présentation orale visant à évaluer : la qualité de la solution trouvée, l'efficacité et l'extensibilité du code de recherche d'une solution optimale, et la gestion du quota de ressources de calcul durant le projet.

**Rmq :** Les différents groupes d'étudiants mettront en œuvre des méthodes d'optimisation différentes, mais testeront tous plusieurs exemples de *Reverse Time Migration* (prospection géophysique terrestre et marine).

## Déroulement, organisation du cours

### Partie 1 (40HEE) :

- Etapes 1 et 2 : compléments de cours, prise en main de ressources de calculs, formalisation du problème, choix d'un algorithme d'optimisation.
- Etapes 3 et 4 : implémentation numérique (Python) de l'algorithme d'optimisation pour la méthode de *Reverse Time Migration*. Interprétation des résultats de campagnes de prospection géophysique pour le choix des paramètres à optimiser, la compréhension des sources d'incertitude et de bruit expérimental.
- Etape 5 : première implantation sur machine parallèle de l'algorithme d'optimisation, évaluation de la qualité des résultats et des performances des calculs sur des problèmes de petites et moyennes tailles et vérification sur solution analytique de référence.
- Rapport intermédiaire (slides et résumé d'avancement) et présentation d'avancement et du travail prévu en 2ème partie.

### Partie 2 – *sprint final* (40HEE) :

- Etape 6 : expérimentation sur des problèmes réels dans des configurations différentes, identification des sources de blocages ou de pertes de performances, et (si besoin) amélioration du code pour repousser les limites de taille de problème traitable.
  - Etape 7 : estimation du nombre de capteurs/enregistrements nécessaires à une optimisation stable, en fonction des ressources de calculs disponibles et des contraintes de durée maximale de l'étude.
1. Rapport final (slides et résumé étendu) et présentation orale complète de l'étude.

## Organisation de l'évaluation

Le projet sera évalué par une soutenance intermédiaire en fin de partie 1 (40HEE), et une soutenance finale en fin de partie 2 (*sprint final* de 40HEE). Les soutenances se feront en groupe, mais pourront mener à des notes individualisées en cas d'hétérogénéité forte au sein du groupe. A chaque soutenance on évaluera la qualité globale de la présentation orale, des slides et du résumé d'activité. Chaque soutenance comptera pour 50% de la note finale.

## Moyens

### Equipe enseignante :

- **F. Gatti** (CentraleSupélec & MSSMat)
- **M. Bertin** (CEA-DAM)

### Lieu de travail et moyens de calculs :

- Les étudiants travailleront à CentraleSupélec, dans une salle équipée de prises électriques et d'un accès internet wifi (hors cas de confinement)
- Les étudiants utiliseront leurs PC portables pour accéder à des **clusters de PC** distants au **Mésocentre Moulon**.
- La soutenance finale se fera le dernier après-midi à CentraleSupélec.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce projet les étudiants seront en mesure :

- **AA1** : d'identifier et de paramétrer une méthode d'optimisation adaptée au cas où chaque évaluation/itération demande beaucoup de ressources informatiques et de temps de calcul,
- **AA2** : d'implanter et de mettre au point un code Python séquentiel ou parallèle sur supercalculateur (par développement explicite et/ou par assemblage de bibliothèques), appelant des noyaux de calculs C eux-mêmes distribués,
- **AA3** : de déployer des applications de calcul intensif sur des ressources distantes,
- **AA4** : d'identifier les limites de l'étude en fonction des ressources de calculs disponibles,
- **AA5** : de gérer un quota de ressources de calculs lors d'une campagne de calculs intensifs.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C4 : Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients
- C7 : Savoir convaincre
- C8 : Mener un projet, une équipe



# 2SC7692 – Optimisation de formes et réduction de la traînée en aéronautique

Responsables : **Stephane Vialle**

Département de rattachement : **DOMINANTE - MATHÉMATIQUES, DATA SCIENCES, DOMINANTE - INFORMATIQUE ET NUMÉRIQUE**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

**Projet de la ST7 "Simulation à Haute Performance pour la réduction d'empreintes"**

**Sujet en partenariat avec l'ONERA**

**Dominantes : Informatique (IN) & Math, Data Sciences (MDS)**

Le trafic aérien est en constante augmentation chaque année au point que, sans améliorations des performances des avions en termes de consommation d'énergie, la part du transport aérien dans les émissions de gaz à effet de serre risque de devenir insupportable dans le futur.

La baisse de la consommation des avions passe d'une part par l'augmentation des rendements des moteurs et d'autre part par l'amélioration des qualités aérodynamiques des aéronefs et de la diminution de leur poids. Les outils numériques sont largement utilisés depuis longtemps dans le domaine aéronautique pour aider à la conception et à l'optimisation des systèmes. Par exemple la forme d'une aile peut être améliorée de façon à diminuer sa traînée, à portance constante, ou sa structure intérieure peut être allégée.

**Détails techniques du système et méthodologie :**

Les méthodes d'optimisation nécessitent des calculs successifs pour différentes géométries d'ailes, ainsi que sur des *modèles adjoints*. Les coûts de calcul pour chaque étape sont d'autant plus élevés que les modèles numériques sont précis.

La seule façon de réduire les temps de calcul de façon à obtenir des temps de réponse suffisamment courts pour pouvoir intégrer les méthodes d'optimisation dans le cycle de conception industriel consiste à utiliser des calculateurs parallèles. Dans le cas de méthodes d'optimisation de type méthodes de descente efficaces (comme par exemple la méthode du gradient ou la méthode de Newton), les différentes configurations ne sont pas connues a priori mais déterminées successivement par l'algorithme. Il faut donc paralléliser chaque calcul du *problème primal* puis du *problème adjoint*.

L'objectif de ce projet est de réaliser la parallélisation de la phase la plus coûteuse de la boucle d'optimisation, à savoir la résolution des grands systèmes linéaires issus de modèles de discrétisation de type éléments finis sur des maillages de grande taille, et d'expérimenter différents jeux de paramètres d'optimisation.

Pour cela, la parallélisation sera réalisée, dans un environnement de programmation par échanges de messages adaptées à l'utilisation de très grands calculateurs avec des nœuds de calcul en réseau, par une approche par décomposition de domaine. La méthode de résolution itérative globale sera accélérée par la résolution des équations locales dans chaque sous-domaine. Le code parallèle développé sera exécuté et évalué sur des machines parallèles de CentraleSupélec.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7



## Prérequis

Cours de 1A :

- Cours commun "Systèmes d'Information et Programmation" de SG1 (1CC1000)
- Cours commun "Algorithmique et complexité" de ST2 (1CC2000)

Cours de la ST :

- Cours commun "Optimisation" de la ST7 (2CC3000)
- Cours spécifique "Méthodes et algorithmes parallèles pour l'optimisation" de la ST7 (2SC7610)

Autres prérequis :

- Eléments du cours commun "CIP - Convergence, Intégration et Probabilités" (1SL1000)
- Eléments du cours commun "EDP - Equations aux dérivées partielles" (1SL1500)
- Des connaissances d'algèbre linéaire seront également nécessaires

## Plan détaillé du cours (contenu)

**Principales étapes de l'étude :**

- Complément d'information sur le sujet au début de la première partie du projet (intervention de l'ONERA)
  - présentation des outils théoriques fondamentaux en optimisation utilisés en aéronautique
  - présentation des enjeux scientifiques liés à la conception des ailes d'avions, à l'évaluation de la traînée et à l'estimation du risque associé lors de la réduction du poids des matériaux utilisés.
- Formalisation du problème et de la grandeur représentant la géométrie et la structure afin de caractériser la traînée d'une aile d'avion. Utilisation d'une méthode d'optimisation fixe adaptée au problème (méthode d'optimisation de la géométrie utilisant la forme d'Hadamard de dérivée de la géométrie). Mise au point de l'algorithme sur un cas de vérification supporté par la solution analytique.
- Identification des paramètres du code FENICS (OpenSource) de résolution des équations aux dérivées partielles, et de leurs impacts sur la qualité de la solution du calcul des écoulements et sur la durée d'exécution.
- Conception et implantation en Python d'un code d'optimisation appelant FENICS ; code d'optimisation qui sera ensuite parallélisé par échanges de messages basés sur une approche par décomposition de domaines.
- Test et mise au point du code complet d'optimisation sur machine parallèle du Data Center d'Enseignement de CentraleSupélec, sur des petits et moyens problèmes (courte durée de simulation physique, petite taille du domaine).
- Application à un cas réel (en termes de taille de la zone étudiée, et de géométrie) :
  - expérimentations de plus gros problèmes sur un plus grand nombre de nœuds et de cœurs de calcul (démarche de passage à l'échelle),
  - analyse de la qualité de la solution trouvée et de la performance des calculs,
  - optimisation du code pour améliorer la solution trouvée ET, si besoin, la performance des calculs,
- Estimation de la forme optimale de l'aile ou des volets afin de réduire la traînée de l'écoulement.
- L'étude se terminera par la remise d'un rapport et une présentation orale visant à évaluer : la qualité de la solution trouvée, l'efficacité et l'extensibilité du code de recherche d'une solution optimale, et la gestion du quota de ressources de calculs qui aura eu lieu durant le projet.

**Rmq :** Les différents groupes d'étudiants mettront en œuvre des méthodes d'optimisation différentes, chacune testée sur un exemple différent.

## Déroulement, organisation du cours

**Partie 1 (40HEE) :**

- Etapes 1 et 2 : compléments de cours, prise en main de ressources de calculs, formalisation du problème, présentation de la méthode d'optimisation.
- Etapes 3 et 4 : implémentation numérique (Python) de l'algorithme. Interprétation des résultats pour le choix des paramètres à optimiser et la compréhension de la qualité de la solution.
- Etape 5 : première implantation sur machine parallèle de l'algorithme d'optimisation, évaluation de la qualité des résultats et des performances des calculs sur des problèmes de petites et moyennes tailles et vérification sur solution analytique de référence.
- Rapport intermédiaire (slides et résumé d'avancement), et présentation de l'avancement et du travail prévu en 2ème partie.

**Partie 2 – *sprint final* (40HEE) :**

- Etape 6 : expérimentation sur des problèmes réels dans des configurations différentes, identification des sources de blocages ou de pertes de performances, et si besoin amélioration du code pour repousser les limites de taille de problème traitable.
- Etape 7 : estimation de la forme optimale de l'aile ou des volets afin de réduire la traînée, en fonction des ressources de calculs disponibles et des contraintes de durée maximale de l'étude.
- Rapport final (slides et résumé étendu) et présentation orale complète de l'étude.

## Organisation de l'évaluation

Le projet sera évalué par une soutenance intermédiaire en fin de partie 1 (40HEE), et une soutenance finale en fin de partie 2 (*sprint final* de 40HEE). Les soutenances se feront en groupe, mais pourront mener à des notes individualisées en cas d'hétérogénéité forte au sein du groupe. A chaque soutenance on évaluera la qualité globale de la présentation orale, des slides et du résumé d'activité. Chaque soutenance comptera pour 50% de la note finale.

## Moyens

### Equipe enseignante :

- **F. Magoules** (CentraleSupélec & MICS), et **S. Vialle** (CentraleSupélec & LISN)
- **S. Claus** et **F.-X. Roux** (ONERA)

### Lieu de travail et moyens de calculs :

1. Les étudiants travailleront à CentraleSupélec, dans une salle équipée de prises électriques et d'un accès internet wifi
2. Les étudiants utiliseront leurs PC portables pour accéder à des clusters de PC distants au Data Center d'Enseignement de CentraleSupélec.
3. La soutenance finale se fera le dernier après-midi à CentraleSupélec.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce projet les étudiants seront en mesure :

- **AA1** : d'identifier et de paramétrer une méthode d'optimisation adaptée au cas où chaque évaluation/itération demande beaucoup de ressources informatiques et de temps de calcul,
- **AA2** : d'implanter et de mettre au point un code Python séquentiel ou parallèle sur supercalculateur (par développement explicite et/ou par assemblage de bibliothèques), appelant des noyaux de calculs C eux-mêmes distribués,
- **AA3** : de déployer des applications de calcul intensif sur des ressources distantes,
- **AA4** : d'identifier les limites de l'étude en fonction des ressources de calculs disponibles,
- **AA5** : de gérer un quota de ressources de calculs lors d'une campagne de calculs intensifs.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C4 : Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients
- C7 : Savoir convaincre
- C8 : Mener un projet, une équipe

# 2SC7693 – Optimisation de détection d'ondes infrasonores pour la vérification du traité d'interdiction complète d'essais nucléaires

Responsables : **Stephane Vialle**

Département de rattachement : **DOMINANTE - MATHÉMATIQUES, DATA SCIENCES, DOMINANTE - INFORMATIQUE ET NUMÉRIQUE**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

**Projet de la ST7 "Simulation à Haute Performance pour la réduction d'empreintes"**

**Sujet en partenariat avec le CEA DAM**

**Dominantes : Informatique (INFONUM) & Math, Data Sciences (MDS)**

Rmq : Sujet proposé aux étudiants de l'**Union Européenne**

Le CEA-DAM utilise des moyens de calcul à haute performance pour ses diverses missions, notamment dans le domaine de la surveillance de l'environnement (ex : phénomènes de propagation d'ondes sismiques, acoustiques, ...). Le centre d'Ile de France situé à Bruyères-le-Châtel est ainsi le centre d'alerte français pour les tsunamis et les forts séismes. Dans le cadre de ses missions, le CEA-DAM apporte également son expertise, fondée sur sa connaissance du nucléaire et son savoir-faire dans les domaines des technologies de détection et d'identification dans la lutte contre la prolifération nucléaire et le terrorisme. Afin d'informer les autorités nationales en cas d'essai nucléaire, le CEA participe ainsi à la mise en œuvre des moyens de vérification du Traité d'Interdiction Complète des Essais nucléaires (TICE).

L'étude proposée ici concerne la caractérisation et la détection à grandes distances d'ondes infrasonores, avec prise en compte de la topographie (relief et/ou bâti) et des conditions atmosphériques (vent). Un code d'hydrodynamique compressible 2D axisymétrique / 3D avec parallélisme hybride (décomposition de domaines MPI / multithreading OpenMP) sur maillage cartésien avec raffinement adaptatif (AMR) a été développé dans notre laboratoire. Il permet de simuler la propagation d'ondes de souffle et d'ondes acoustiques en présence de relief et de bâtiments, avec ou sans vent. Des capteurs judicieusement placés permettent d'enregistrer les signaux de surpression.

Deux types de problèmes peuvent alors être abordés et résolus avec ce logiciel d'hydrodynamique AMR. Le premier consiste à retrouver le lieu d'une explosion et à déterminer sa puissance à partir des enregistrements d'une sonde située sur le terrain. Le second vise à définir où positionner judicieusement des capteurs pour maximiser les chances de détection d'une explosion au sein d'une zone déterminée. Dans un cas comme dans l'autre, une investigation « brut force » consistant à simuler toutes les configurations possibles des paramètres pour ne retenir que la meilleure solution est inenvisageable. Elle consommerait une quantité d'heures de calculs gigantesque, ce qui rendrait la conception de la solution très longue et hors de prix.

Pour ces deux types de problèmes, l'objectif de cette étude est donc double :

- proposer une solution permettant de caractériser la source des ondes acoustiques,
- arriver à concevoir cette solution en temps raisonnable avec des calculateurs à haute performance ET avec un quota d'heures de calcul limité.

Pour cela, on mettra au point une boucle d'optimisation faisant appel le plus efficacement possible au code d'hydrodynamique : en explorant avec parcimonie l'espace des configurations possibles, pour trouver économiquement une bonne solution.

## Détails techniques des systèmes étudiés

- **1er sujet : Caractérisation d'une source à l'échelle urbaine avec prise en compte du bâti**  
Il s'agit de localiser et de déterminer la puissance d'une explosion, à la suite d'un accident ou d'un acte malveillant, sur la base de relevés enregistrés par des stations de mesure (dont l'emplacement est bien sûr connu), en prenant en compte le bâti. Pour le besoin de l'exercice, les relevés seront issus en pratique d'une simulation dont la condition initiale fictive (localisation et puissance de la source) ne sera pas connue des étudiants.
- **2ème sujet : Mise en place d'un réseau de surveillance**  
Il s'agit de définir un réseau de stations permettant la détection d'hypothétiques expérimentations explosives au sein d'une zone à surveiller. Ces stations – en nombre limité – devront être judicieusement positionnées pour maximiser les chances de détection quelle que soit la météo (on ne tiendra compte que du vent ici). Le relief sera pris en compte, et les stations ne pourront être positionnées que dans des zones dites « accessibles » pour des raisons de maintenance.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

## Prérequis

Cours de 1A :

- Cours commun "Systèmes d'Information et Programmation" de SG1 (1CC1000)
- Cours commun "Algorithmique et complexité" de ST2 (1CC2000)

Cours de la ST :

- Cours commun "Optimisation" de la ST7 (2CC3000)
- Cours spécifique "Méthodes et algorithmes parallèles pour l'optimisation" de la ST7 (2SC7610)

Autres prérequis :

- Eléments du cours commun "CIP - Convergence, Intégration et Probabilités" (1SL1000)
- Eléments du cours commun "EDP - Equations aux dérivées partielles" (1SL1500)
- Des connaissances d'algèbre linéaire seront également nécessaires

## Plan détaillé du cours (contenu)

**Principales étapes de l'étude :**

- Complément d'information sur le sujet au début de la première partie du projet (intervention du CEA-DAM) :
  - présentation des principes physiques et des mathématiques numériques utilisées dans le code d'hydrodynamique compressible fourni pour simuler la propagation d'ondes acoustiques,
  - identification des paramètres du code d'hydrodynamique compressible et de leurs impacts sur sa durée d'exécution parallèle,
  - prise en main de ressources dans un centre de calcul distant (au CEA).
- Formalisation du problème et des grandeurs à optimiser. Choix d'une méthode d'optimisation adaptée au problème.
- Conception et implantation en Python d'un code d'optimisation appelant le code de simulation intensive et parallèle. Le code d'optimisation sera lui-même parallélisé si son algorithme le permet (on aurait alors un code maître parallèle appelant à la demande un code fils parallèle).
- Test et mise au point du code complet d'optimisation sur machine parallèle du CEA, sur des petits et moyens problèmes : reliefs ou bâtis simplifiés sur des cartes réduites, sans météo et en 2D axisymétrique (beaucoup plus rapide).
- Passage à l'échelle en termes de taille de terrain couvert, ajout du relief et/ou du bâti et de cartes de vent :
  - expérimentations sur de plus gros problèmes sur un plus grand nombre de nœuds et de cœurs de calcul,
  - analyse de la qualité de la solution trouvée et de la performance des calculs,
  - optimisation du code pour améliorer la solution trouvée ET la performance des calculs.
- Estimation de la taille maximale de problème traitable en fonction des ressources disponibles et de la durée maximale de l'étude. Analyse de la faisabilité de l'extension au cas 3D dans le temps imparti pour le projet.

- L'étude se terminera par la remise d'un rapport et une présentation orale visant à évaluer : la qualité de la solution trouvée, l'efficacité et l'extensibilité du code de recherche d'une solution optimale, et la gestion du quota de ressources de calculs qui aura eu lieu durant le projet.

**Rmq** : Les différents groupes d'étudiants travailleront sur des sujets différents (sujets 1 et 2) et mettront en œuvre des méthodes d'optimisation différentes.

## Déroulement, organisation du cours

### Partie 1 (40HEE) :

- Etapes 1 et 2 : compléments de cours, prise en main de ressources de calculs, formalisation du problème, choix d'un algorithme d'optimisation.
- Etape 3 : implémentation numérique (Python) de l'algorithme d'optimisation appelant le code parallèle d'hydrodynamique compressible fourni par le CEA DAM.
- Etape 4 : premières exécutions sur des simulations en 2D avec configuration simple, mise au point sur machine parallèle de l'algorithme et du code d'optimisation, évaluation de la qualité des résultats et des performances des calculs sur des problèmes de petites et moyennes tailles et vérification par comparaison à une solution de référence.
- Rapport intermédiaire (slides et résumé d'avancement) et présentation d'avancement et du travail prévu en 2ème partie.

### Partie 2 – *sprint final* (40HEE) :

1. Etape 5 : expérimentation sur des problèmes plus complexes et/ou plus grands proches de problèmes réels, analyse de la qualité de la solution trouvée, identification des sources de blocages ou de pertes de performances, et (si besoin) amélioration du code pour repousser les limites de taille de problème traitable.
  2. Etape 6 : estimation de la taille de problème traitable en fonction des ressources de calculs disponibles et des contraintes de durée maximale de l'étude, analyse de la faisabilité d'une simulation en 3D.
- Rapport final (slides et résumé étendu) et présentation orale complète de l'étude.

## Organisation de l'évaluation

Le projet sera évalué par une soutenance intermédiaire en fin de partie 1 (40HEE), et une soutenance finale en fin de partie 2 (*sprint final* de 40HEE). Les soutenances se feront en groupe, mais pourront mener à des notes individualisées en cas d'hétérogénéité forte au sein du groupe. A chaque soutenance on évaluera la qualité globale de la présentation orale, des slides et du résumé d'activité. Chaque soutenance comptera pour 50% de la note finale.

## Moyens

### Equipe enseignante :

- **J. Cagnol** (CentraleSupélec & MICS) et **S. Vialle** (CentraleSupélec & LISN)
- **T. Chantrait** (CEA DAM)

### Lieu de travail et moyens de calculs :

- Lors de la première partie du projet :
  - Les étudiants travailleront à CentraleSupélec, dans une salle équipée de prises électriques et d'un accès internet wifi.
  - Les étudiants utiliseront leurs PC portables pour accéder à des **ressources de calculs importantes opérées par le CEA DAM**.
- Lors de la 2nd partie du projet (*sprint final*) :
  - Les étudiants travailleront **3 jours sur le site du TGCC/TERATEC à Bruyères-le-Châtel**, le CEA DAM assurera le déplacement quotidien des étudiants.
  - La soutenance finale se fera le dernier après-midi à CentraleSupélec.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce projet les étudiants seront en mesure :

- **AA1** : d'identifier et de paramétrer une méthode d'optimisation adaptée au cas où chaque évaluation/itération demande beaucoup de ressources informatiques et de temps de calcul,

- **AA2** : d'implanter et de mettre au point un code Python séquentiel ou parallèle sur supercalculateur (par développement explicite et/ou par assemblage de bibliothèques), appelant des noyaux de calculs C eux-mêmes distribués,
- **AA3** : de déployer des applications de calcul intensif sur des ressources distantes,
- **AA4** : d'identifier les limites de l'étude en fonction des ressources de calculs disponibles,
- **AA5** : de gérer un quota de ressources de calculs lors d'une campagne de calculs intensifs.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C4 : Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients
- C7 : Savoir convaincre
- C8 : Mener un projet, une équipe

# 2SC7694 – Optimisation énergétique et accélération d'un graphe de calculs financiers sur cloud

Responsables : **Stephane Vialle**

Département de rattachement : **DOMINANTE - MATHÉMATIQUES, DATA SCIENCES, DOMINANTE - INFORMATIQUE ET NUMÉRIQUE**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,60**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

**Projet de la ST7 "Simulation à Haute Performance pour la réduction d'empreintes"**

**Sujet en partenariat avec ANEO**

**Dominantes : Informatique (INFONUM) & Math, Data Sciences (MDS)**

### Contexte applicatif

Les **assureurs** modernes ont un champ d'activité très réglementé mais relativement large en même temps : différents types d'assurance, services bancaires, etc. Une des difficultés dans l'appréciation des comptes d'une assurance (ou d'une banque) réside dans la valorisation des actifs financiers (ex : action EDF, contrat d'assurance vie ou voiture, etc.) et des risques sous-jacents. L'approche généralement utilisée consiste à évaluer pour chaque actif le coût d'une dévaluation ainsi que le risque associé. Pour les actifs simples comme les actions, le calcul est simple. Pour les actifs plus complexes (produits d'assurance ou produits dérivés), ce calcul est plus complexe puisqu'il repose en général sur la prise en compte de nombreux facteurs. En fonction de la valorisation des risques pris, les réglementations résultant des diverses crises économiques, comme Solvency II ou IFRS17, obligent l'assurance ou la banque à immobiliser une certaine quantité de fonds propres. Certains risques peuvent s'annuler entre différents actifs (ex : le risque d'un actif d'assurance vie basé sur le taux euro/dollars peut être couvert par d'autres actifs basés sur les taux euro/yen et yen/dollars). Afin de maximiser ce potentiel de compensation à travers les actifs possédés, ces organismes vont consolider les comptes à l'échelle la plus large possible, le groupe en général. C'est à dire qu'ils vont effectuer les analyses de risque comme si l'ensemble des actifs appartenait à une seule entité. Une des difficultés de l'exercice consistant alors à répartir le besoin de fonds propres entre les différentes entités juridiques dont les comptes ont été consolidés, ce process est donc en réalité plus complexe qu'une simple union des actifs suivis d'une analyse de risque globale.

Le **processus de construction des comptes consolidés pour une assurance engendre donc de nombreux calculs**. Ces calculs concernent donc d'un côté la modélisation du coût de remboursement des contrats en fonction de différents facteurs et d'un autre côté la modélisation des placements effectués avec l'argent disponible. A titre d'exemple pour un contrat d'assurance vie, la modélisation du risque s'appuie sur les tables de mortalités fournies par l'INSEE et prenant en compte différents facteurs comme la géographie, la catégorie socio-professionnelle, la situation familiale, etc. Pour ce faire, la vie du contrat est simulée année après année afin de prendre en compte l'évolution de ces facteurs. Différents scénarios d'évolution sont joués afin de refléter l'ensemble des évolutions de situations possibles (déménagements, évolution de la situation familiale, etc.). Ces scénarios sont ensuite agrégés. Ce processus est bien sûr une vue simplifiée et ne prend pas en compte différents éléments comme l'agrégation des contrats afin de réduire la volumétrie de calcul, laquelle agrégation fait l'objet en soi de différents travaux d'optimisation. Parmi les autres éléments du processus, citons la consolidation des risques actif/passifs par typologie de contrat, la consolidation par entité légale et prenant en compte les spécificités réglementaires de chaque pays ou encore l'exploitation de ces simulations pour optimiser le risque des contrats proposés ainsi que leur prix.

### Problème traité dans ce projet



Le processus de construction des comptes consolidés se déroule sur plusieurs semaines et comprend des étapes de calcul ainsi que des étapes manuelles ; nous considérerons ici ces dernières comme instantanée. Les étapes de calcul correspondent à l'équivalent de 413177 heures de calcul, soit un peu plus de 10 jours pleins sur une infrastructure de 1700 cœurs. Cependant, en réalité, le processus ne peut se dérouler en 10 jours sur une telle infrastructure à cause des dépendances entre les tâches de calcul : il arrive qu'à certains moments, il n'y ait pas assez de tâches pour occuper la grille. Une analyse fine des dépendances montre que la durée du chemin critique est de 11h30. Cette durée serait celle de l'ensemble du calcul si une infrastructure de taille infinie était disponible.

**Sujet du projet :** Afin d'optimiser les coûts sans pour autant investir dans une grille de calcul de très grande dimension qui ne serait finalement que très peu utilisée, nous souhaitons utiliser des ressources à la demande disponibles dans le cloud. Pour en tirer le meilleur parti, nous souhaitons **optimiser l'exécution du graphe de tâches** en recherchant :

- La meilleure stratégie d'allumage/extinction des nœuds de calcul.
- Le meilleur ordonnancement des tâches sur les nœuds disponibles.

L'étude devra prendre en compte les éléments suivants :

- Les dépendances entre les tâches
- La durée des tâches, connue à l'avance
- La durée du transfert des résultats entre les tâches (seuls les fichiers significatifs seront listés)
- La capacité du cœur de réseau que l'on supposera proportionnelle au nombre de nœuds.

Il convient de noter ici que le coût mentionné peut aussi bien être énergétique que financier et que les deux sont très liés : à l'usage, plus de la moitié du coût de possession d'une infrastructure de calcul correspond au coût de l'électricité, même en France avec l'énergie nucléaire. Nous ferons l'hypothèse (très simplificatrice) que le réseau n'a pas de coût.

**Objectif du projet :** fournir une application d'optimisation travaillant sur deux fichiers décrivant d'une part le graphe de tâches (durées et dépendances) et d'autre part les caractéristiques de l'infrastructure de calcul, et qui fournira en sortie un fichier décrivant l'ordonnancement de l'infrastructure (allumage et extinction des nœuds) ainsi que l'ordonnancement des tâches (placement d'une tâche sur un nœud à un moment donné).

Seront fournis aux étudiants :

- Une documentation décrivant les formats d'entrée, de sortie et les critères d'évaluation de la performance
- Des exemples de graphes et d'infrastructures
- Une API REST (fonction de calcul callable directement depuis Internet) permettant d'évaluer la qualité de la solution proposée
- Un accès à des ressources de calcul distribuées

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

## Prérequis

Cours de 1A :

- Cours commun "Systèmes d'Information et Programmation" de SG1 (1CC1000)
- Cours commun "Algorithmique et complexité" de ST2 (1CC2000)

Cours de la ST :

- Cours commun "Optimisation" de la ST7 (2CC3000)
- Cours spécifique "Méthodes et algorithmes parallèles pour l'optimisation" de la ST7 (2SC7610)

Autres prérequis :

- Eléments du cours commun "CIP - Convergence, Intégration et Probabilités" (1SL1000)
- Eléments du cours commun "EDP - Equations aux dérivées partielles" (1SL1500)
- Des connaissances d'algèbre linéaire seront également nécessaires

## Plan détaillé du cours (contenu)

**Principales étapes de l'étude :**

- Complément de cours en architecture matérielle des systèmes informatiques, y compris les aspects énergétiques.
- Formalisation du problème et de la fonction de coût à optimiser.



- Choix d'une méthode d'optimisation par méta-heuristique adaptée au problème, exemples : algorithmes génétiques, colonies de fourmis, méthode à voisinages variables...
- Prise en main de ressources de calculs distantes (dans cloud ou supercalculateur sur lesquels ANEO possède des accès).
- Conception d'un algorithme parallèle de la méthode d'optimisation choisie, apte à passer à l'échelle en termes de taille ou de complexité du graphe de tâches traité.
- Implantation d'un code Python parallèle supportant le passage à l'échelle prévu.
- Exécution du code de résolution parallèle sur des jeux de données réels fournis par ANEO, et dans la limite des ressources de calculs allouées à l'étude.
- Analyse de la qualité des résultats du code de résolution, des performances des calculs de résolution effectués (vitesse de calcul, capacité d'extensibilité), et du coût associé dans une perspective d'exploitation industrielle.
- L'étude se terminera par la remise d'un rapport et une présentation orale visant à évaluer la pertinence globale de la solution trouvée et expérimentée, et la gestion du quota de ressources de calculs qui aura eu lieu durant le projet.

**Rmq :** Les différents groupes d'étudiants seront confrontés à des hypothèses différentes sur les plates-formes de calcul visées, menant à des choix et des mises en œuvre de méthodes d'optimisation également différentes.

## Déroulement, organisation du cours

### Partie 1 (40HEE) :

- Etapes 1 à 4 : compléments de cours, formalisation du problème, choix d'une méthode d'optimisation, et prise en main de ressources de calculs.
- Etapes 5 et 6 : première implantation parallèle fonctionnelle de l'algorithme de résolution, tests à petite échelle.
- Rapport intermédiaire et présentation d'avancement et du travail prévu en 2ème partie

### Part 2 - *sprint final* (40HEE):

- Etapes 7 et 8 : exécution de l'algorithme de résolution sur des ressources de calcul intensif, et évaluation des résultats obtenus et des performances mesurées.
- Rebouclage au point 5 pour l'amélioration de l'algorithme de résolution et de son implantation parallèle.
- 1. Rapport final et présentation orale complète

## Organisation de l'évaluation

Le projet sera évalué par une soutenance intermédiaire en fin de partie 1 (40HEE), et une soutenance finale en fin de partie 2 (*sprint final* de 40HEE). Les soutenances se feront en groupe, mais pourront mener à des notes individualisées en cas d'hétérogénéité forte au sein du groupe. A chaque soutenance on évaluera la qualité globale de la présentation orale, des slides et du résumé d'activité. Chaque soutenance comptera pour 50% de la note finale.

## Moyens

### Equipe enseignante :

- **A. Rimmel** (CentraleSupélec & LISN)
- **W. Kirschenmann** (ANEO)

### Lieu de travail et moyens de calculs :

- Les étudiants travailleront à CentraleSupélec, dans une salle équipée de prises électriques et d'un accès internet wifi
- Les étudiants utiliseront leurs PC portables pour accéder à des ressources de calculs distantes (cloud ou supercalculateur sur lesquels ANEO possède des accès).
- La soutenance finale se fera le dernier après-midi à CentraleSupélec.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce projet les étudiants seront en mesure de :

- **AA0** : d'identifier les parties consommatrices de CPU dans une chaîne d'optimisation, et de modéliser le coût énergétique d'un calcul distribué,
- **AA1** : d'identifier des méthodes d'optimisation adaptées à la minimisation du temps d'exécution d'un graphe de tâches, et adaptées à une parallélisation large échelle,

- **AA2** : de concevoir un algorithme parallèle supportant le passage à l'échelle, de l'implanter et de mettre au point son code sur une architecture distribuée,
- **AA3** : de déployer des simulations intensives sur des ressources de calculs distantes
- **AA4** : d'identifier les limites de l'étude en fonction des ressources de calculs disponibles
- **AA5** : de gérer un quota de ressources de calculs lors d'une campagne de calculs intensifs

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- **C4** : Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients
- **C7** : Savoir convaincre
- **C8** : Mener un projet, une équipe

# 2SC7695 – Optimisation à faible coût des performances d'un code de propagation d'ondes acoustiques

Responsables : **Stephane Vialle**

Département de rattachement : **DOMINANTE - MATHÉMATIQUES, DATA SCIENCES, DOMINANTE - INFORMATIQUE ET NUMÉRIQUE**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

**Projet de la ST7 "Simulation à Haute Performance pour la réduction d'empreintes"**

**Sujet en partenariat avec INTEL**

**Dominantes : Informatique (INFONUM) & Math, Data Sciences (MDS)**

Quel que soit le type d'application s'exécutant sur des machines parallèles dans un cadre « HPC » (*high performance computing*) et quel que soit leur niveau d'efficacité (en termes de performances ou d'empreinte énergétique), nous nous apercevons très facilement que l'impact des paramètres d'entrées est en général non négligeable. On peut notamment agir sur :

- les paramètres de l'algorithme parallèle utilisé, comme la taille et la forme des domaines réalisant un découpage en sous-problèmes,
- les paramètres de l'implantation HPC contrôlant par exemple le blocage des données en mémoire cache (*cache blocking*) pour diminuer les temps d'accès aux données,
- les paramètres de déploiement de l'application parallèle, contrôlant la répartition processus-MPI vs threads-OpenMP et le placement de ces tâches de calculs pour occuper efficacement les cœurs CPU,
- les paramètres contrôlant la politique de *scheduling* des threads (habituellement contrôlée par l'intermédiaire de variables d'environnements).

Ces différents paramètres d'entrée permettent d'améliorer l'exécution d'un code HPC sur une plate-forme de calcul. Mais il reste extrêmement difficile de comprendre exactement le comportement de l'application dans l'architecture des processeurs et quand bien même nous pourrions rendre l'application plus efficace par modification du code source, la dépendance aux cas tests et à l'environnement d'exécution resterait prépondérante.

Dans ce contexte où l'espace des paramètres peut être de dimension importante, l'utilisation d'algorithmes d'optimisation apparaît fondamentale pour converger vers un minimum global (ou au moins local) d'une fonction de coût exprimant le temps d'exécution et l'empreinte énergétique. On va donc utiliser des méthodes et algorithmes d'optimisation pour optimiser le fonctionnement d'un code de calcul HPC.

Cependant, chaque exécution d'un cas test d'une application de calcul intensif peut être longue, même sur une machine parallèle. Or l'espace des paramètres est grand et un algorithme d'optimisation peut requérir des dizaines de milliers d'exécutions de l'application (voire plus). Ce qui est réalisable à l'échelle d'un noyau de calcul reste insupportable à l'échelle d'une application complète.

**Il devient donc nécessaire de choisir des méthodes d'optimisation pas trop gourmandes en nombre d'expérimentations**, puis d'optimiser leur usage pour arriver à réduire l'empreinte du code HPC ciblé, sans que cette pré-étude ne consomme elle-même trop de ressources de calculs ! Ce qui revient à « **rechercher la méthode d'optimisation la moins coûteuse** » pour trouver un optimum entre vitesse de convergence (de l'algorithme d'optimisation) et qualité de la minimisation du temps d'exécution et de l'empreinte énergétique (de l'application HPC ciblée).

## Détails techniques du système :

Nous démarrerons ce projet à partir :

- d'un code de calcul à haute performance (code HPC) qui simule l'équation des ondes 3D acoustiques en milieu homogène isotropique par différences finies, et qui s'exécute sur des clusters de PC multicoeurs (en MPI + OpenMP),
- d'un algorithme génétique capable d'itérer sur de nombreux paramètres du code HPC tels que : taille et formes des domaines et du *cache blocking*, flags de compilation, variables d'environnement, nombre et placement des threads..., mais qui reste séquentiel et limité à une seule machine.

L'algorithme génétique appelle donc successivement le code de simulation d'ondes acoustiques dans différentes configurations, et ne peut l'appeler qu'en version multithreadée sur une machine (pas en version distribuée sur cluster). Cela permet néanmoins de rechercher la configuration optimale sur chaque PC, et de l'appliquer ensuite sur chaque PC lors d'une exécution sur un cluster de PC.

Les *différences finies* étant tout à fait explicites en terme de nombre d'opérations flottantes, nous pouvons facilement compter le nombre de points traités ou le nombre d'opérations flottantes réalisées lors d'une exécution, et en déduire une vitesse de traitement en Giga points/s ou GFlops/s. Nous pouvons alors chercher à minimiser le temps de la simulation (ou à maximiser la vitesse de traitement). Nous pouvons également consacrer et collecter quelques compteurs hardware pour obtenir la consommation énergétique exacte du processeur et de la mémoire, pour étudier finement l'impact énergétique de nos optimisations.

Mais un algorithme génétique est une méthode d'optimisation par population qui est gourmande en ressources de calculs, et l'implantation fournie n'exploite qu'un seul PC. La recherche d'une configuration optimale du code peut donc être très longue et rébarbative. Pour dépasser cette limitation nous adopterons deux approches :

- Tout d'abord identifier des méthodes d'optimisation ayant a priori des chances de converger en relativement peu d'essais vers un paramétrage efficace du code HPC (c-a-d menant à des exécutions rapides et peu gourmandes en énergie). On pourra étudier des méthodes d'optimisation à trajectoires (Hill Climbing, Simulated Annealing, Tabu search..., avec ou sans comportement glouton), ou d'autres méthodes à population moins gourmandes que les algorithmes génétiques (colonies de fourmis...). On recherchera ainsi une très bonne solution en un temps assez long, qui permettrait ensuite d'exécuter de nombreuses simulations de propagations d'ondes acoustiques très optimisées.
- On cherchera ensuite à expérimenter une méthode d'optimisation, ou une variante de celle expérimentée précédemment, qui convergerait « très rapidement » vers une solution de qualité seulement « assez bonne ». Une telle optimisation (très rapide) pourrait alors être intégrée à l'application sous la forme d'un pre-processing dynamique, en début ou en cours d'exécution sur machines parallèles, et constituer un mécanisme d'auto-optimisation de l'application.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

### Prérequis

Cours de 1A :

- Cours commun "Systèmes d'Information et Programmation" de SG1 (1CC1000)
- Cours commun "Algorithmique et complexité" de ST2 (1CC2000)

Cours de la ST :

- Cours commun "Optimisation" de la ST7 (2CC3000)
- Cours spécifique "Méthodes et algorithmes parallèles pour l'optimisation" de la ST7 (2SC7610)

Autres prérequis :

- Eléments du cours commun "CIP - Convergence, Intégration et Probabilités" (1SL1000)
- Eléments du cours commun "EDP - Equations aux dérivées partielles" (1SL1500)
- Des connaissances d'algèbre linéaire seront également nécessaires

## Plan détaillé du cours (contenu)

Principales étapes de l'étude :

- Présentation du noyau de calcul fourni, complément de cours sur les méthodologies de caractérisation et d'accélération de code HPC (*compteurs hardware, modèle roofline, placement NUMA, vectorisation...*), prise en main des ressources de calculs distantes du Data Center d'Enseignement de CentraleSupélec avec expérimentation des codes fournis par INTEL.

- Identification de méthodes d'optimisation prometteuses pour le problème, et ne lançant pas trop de simulations HPC d'ondes acoustiques. Le développement de méthodes hybrides pourra être envisagé.
- Développement d'une 1ère solution en Python séquentiel avec appel du code C de simulation fourni pour l'étude.
- Déroulement d'une première campagne d'optimisation-simulation sur machines multi-cœurs, avec une gestion d'un quota hebdomadaire d'heures de calculs. Identification d'une solution réduisant au mieux l'empreinte du code HPC de simulation d'ondes acoustiques
- Développements et expérimentations d'une 2nd solution, permettant de rechercher « très rapidement » une configuration « d'assez bonne » qualité, afin d'intégrer cette recherche à l'application de simulation en étape de pre-processing.
- Déroulement d'une seconde campagne d'optimisation-simulation sur machines multi-cœurs, avec une gestion d'un quota hebdomadaire d'heures de calculs.
- L'étude se terminera par la remise d'un rapport et une présentation orale visant à évaluer :
  - la démarche d'investigation adoptée,
  - la qualité de la solution trouvée : en termes de vitesse de convergence de chaque algorithme d'optimisation testé, et de temps de calcul et de consommation énergétique de la simulation parallèle optimisée,
  - la gestion du quota de ressources de calculs qui aura eu lieu durant le projet.

**Rmq : Les différents groupes d'étudiants mettrons en œuvre des méthodes d'optimisation différentes.**

## Déroulement, organisation du cours

### Partie 1 (40HEE) :

- Etapes 1 et 2 : complément de cours sur les optimisations de code HPC et sur les paramètres de configuration du code de simulation fourni, prise en main des ressources de calcul distantes du Data Center d'Enseignement avec expérimentation de la solution initiale, et identification de deux méthodes d'optimisation prometteuses.
  - Etape 3 : implantation séquentielle en Python d'une première méthode d'optimisation appelant le code de simulation parallèle et HPC, première campagne d'optimisation-simulation sur un serveur de calcul multi-cœurs.
  - Etape 4 : déroulement d'une campagne d'optimisation-simulation sur machines parallèles, avec la gestion d'un quota d'heures. Analyse des performances obtenues.
1. Rapport intermédiaire, et présentation de l'avancement et du travail prévu en 2ème partie.

### Part 2 - *sprint final* (40HEE):

- Etape 5 : identification d'une méthode permettant de rechercher « très rapidement » une configuration « assez bonne ». Nouvelle implantation en Python.
  - Etape 6 : nouvelle campagne d'optimisation-simulation sur machines parallèles, avec la gestion d'un quota d'heures. Analyse des performances obtenues.
- Rapport final et présentation orale complète.

## Organisation de l'évaluation

Le projet sera évalué par une soutenance intermédiaire en fin de partie 1 (40HEE), et une soutenance finale en fin de partie 2 (*sprint final* de 40HEE). Les soutenances se feront en groupe, mais pourront mener à des notes individualisées en cas d'hétérogénéité forte au sein du groupe. A chaque soutenance on évaluera la qualité globale de la présentation orale, des slides et du résumé d'activité. Chaque soutenance comptera pour 50% de la note finale.

## Moyens

### Equipe enseignante :

- **S. Vialle** (CentraleSupélec & LISN), **G. Quercini** (CentraleSupélec & LISN), **H. Talbot** (CentraleSupélec & CVN)
- **Ph. Thierry** (INTEL)

### Lieu de travail et moyens de calculs :

- Les étudiants travailleront à CentraleSupélec, dans une salle équipée de prises électriques et d'un accès internet wifi
- Les étudiants utiliseront leurs PC portables pour accéder à des clusters de PC distants au Data Center d'Enseignement de CentraleSupélec.
- La soutenance finale se fera le dernier après-midi à CentraleSupélec.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce projet les étudiants seront en mesure :

- **AA0** : d'identifier les paramètres impactant l'exécution d'un code parallèle, et de configurer son exécution,
- **AA1** : de choisir et de paramétrer des méthodes d'optimisation convergeant avec un nombre limité d'expérimentations,
- **AA2** : de mettre au point un code Python séquentiels, appelant des codes parallèles sur des architectures parallèles,
- **AA3** : de déployer des simulations intensives sur des ressources de calculs distantes,
- **AA4** : d'identifier les limites de l'étude en fonction des ressources de calculs disponibles
- **AA5** : de gérer un quota de ressources de calculs lors d'une campagne de calculs intensifs.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C4 : Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients
- C7 : Savoir convaincre
- C8 : Mener un projet, une équipe

# ST7 - 77 - EFFICACITE DES SYSTEMES D'ENERGIE EMBARQUES

Dominante : ENE (Energie)

Langues d'enseignement : Français

Campus où le cours est proposé : CAMPUS DE PARIS - SACLAY

---

## Problématique d'ingénieur

L'optimisation des systèmes d'énergie embarqués est une problématique rencontrée quotidiennement dans le monde industriel.

Que ce soit dans un objectif de réduire les coûts de production ou d'utilisation, pour participer à la transition énergétique en minimisant l'empreinte carbone, l'optimisation est incontournable dans le monde de l'énergie.

Gain de volume, de coût (conception optimale ou coût d'opération), de performances ou d'efficacité sont des objectifs que l'on retrouvera aussi bien dans les systèmes aéronautiques, spatiaux ou automobiles. L'aspect système et multiphysique de la conception est désormais pris en compte afin de satisfaire au mieux à un cahier des charges de plus en plus exigeant.

Lors de cette séquence des exemples industriels seront abordés : optimisation du rendement et du coût d'une chaîne de traction électrique sur quelques points de fonctionnement où sur des cycles routier, gestion optimale des sources d'énergie d'un système hybride.

## Prérequis conseillés

Il est conseillé d'avoir suivi le cours « Energie électrique ».

## Modules contexte et enjeux

Ces modules comprennent une conférence introductive de la thématique, une table ronde impliquant les partenaires de la séquence, des interventions portant sur les verrous technologiques et scientifiques, ainsi qu'un atelier d'innovation.

## Cours spécifique (60 HEE) : Optimisation des systèmes d'énergie embarqués

**Brève description** : Après une description et formulation du problème ainsi qu'une présentation des modèles relatifs à l'optimisation, seront examinées les techniques d'optimisation de systèmes d'énergie, optimisation stochastique, estimation de paramètres, optimisation multi-source et optimisation multicritères.

### Projet 1 : Efficacité énergétique de machines électriques

**Partenaire associé** : Leroy-Sommer

**Lieu** : Campus Paris-Saclay

**Brève description** : La problématique de l'optimisation énergétique des machines électriques est posée d'une part par une recherche de la baisse des coûts d'utilisation mais aussi par la réglementation qui impose des rendements de plus en plus élevés afin de maîtriser la demande électrique.

Il est donc nécessaire d'optimiser le rendement des machines électriques. Bien entendu cette maximisation du rendement va à l'encontre d'une autre optimisation : celle du coût de fabrication. Une optimisation multicritère entre l'efficacité et le coût sera donc mise en place.

### Projet 2 : Optimisation de chaîne de traction sur cycle routier

---

**Partenaire associé :**

**Lieu :** Campus Paris-Saclay

**Brève description :** La hausse du prix des énergies fossiles ainsi que les contraintes environnementales poussent le secteur automobile et de la mobilité à se tourner de plus en plus vers la traction électrique en remplacement ou complément du moteur thermique.

Le moteur électrique dans le véhicule n'est pas utilisé sur un unique point de fonctionnement comme c'est le cas pour une application statique mais doit répondre aux sollicitations de la conduite. Pour modéliser ces comportements, de nombreux cycles tests routiers sont utilisés. L'optimisation de la chaîne de traction en tant que système est rendu donc compliquée et coûteuse par le grand nombre de points de fonctionnement engendré par ces cycles. Des techniques de réduction seront donc utilisés pour optimiser les rendements ou les masses des systèmes.

### Projet 3 : Gestion optimale d'un générateur hybride

**Partenaire associé :**

**Lieu :** Campus Paris-Saclay

**Brève description :** Un générateur de production énergétique convertit une source en énergie. Un générateur est dit hybride lorsqu'il y a plusieurs sources à disposition (dans le cas électrique, il peut s'agir d'une batterie et d'un couple moteur thermique et alternateur). Le choix de la source d'énergie primaire est donc posé lors de l'utilisation. Sur un cycle de fonctionnement (courbe de puissance demandée par exemple), il est nécessaire de trouver la consigne optimale conduisant à la meilleure gestion du générateur hybride : savoir si l'électricité est produite à partir de la batterie ou au contraire du générateur thermique.

Une optimisation est donc nécessaire pour réduire les coûts de fonctionnement ou augmenter les rendements. Par la suite une optimisation du système en fonction de cette gestion optimale est envisageable.

### Projet 4 : Optimisation d'une chaîne de propulsion navale sur cycle

**Partenaire associé :** DCNS

**Lieu :** Campus Paris-Saclay

**Brève description :** 90% du commerce mondial se fait par voie maritime. En conséquence, le transport maritime est l'un des principaux contributeurs à la pollution atmosphérique : 3 % des émissions totales de gaz à effet de serre dans le monde. La propulsion navale électrique est l'un des candidats pour remplacer les systèmes de propulsion thermique conventionnels.

Dans un navire électrique, des turbines à gaz ou des générateurs diesel produisent de l'électricité qui est ensuite utilisée pour alimenter à la fois les moteurs de propulsion électriques et les charges auxiliaires. Le réseau électrique à bord peut être AC ou DC. Un tel système doit être optimisé afin de minimiser son coût et d'optimiser son efficacité. En particulier, si le navire suit un itinéraire fixe (comme un ferry), l'optimisation peut prendre en compte le cycle d'exploitation.



# 2SC7710 – Méthodes numériques et résolution des problèmes d'optimisation des systèmes d'énergies embarqués

Responsables : **Maya Hage Hassan, Philippe Dessante**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SYSTÈMES D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Cours ST**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

## Présentation, objectifs généraux du cours

L'optimisation des systèmes d'énergie embarqués est une problématique rencontrée quotidiennement dans le monde industriel. Que ce soit dans un objectif de réduire les coûts de production ou d'utilisation, pour participer à la transition énergétique en minimisant l'empreinte carbone, l'optimisation est incontournable dans le monde de l'énergie.

Gain de volume, de coût (conception optimale ou coût d'opération), de performances ou d'efficacité sont des objectifs que l'on retrouvera aussi bien dans les systèmes aéronautiques, spatiaux ou automobiles. L'aspect système et multiphysique de la conception est désormais pris en compte afin de satisfaire au mieux à un cahier des charges de plus en plus exigeant.

Lors de cette séquence des exemple industriels seront abordés via les projets : optimisation du rendement et du coût d'une chaîne de traction électrique sur quelques points de fonctionnement où sur des cycles routiers, conception optimale des actionneurs électriques, dimensionnement des convertisseurs pour des systèmes embarqués, conception de chaîne de traction navale et aéronautique, le dimensionnement d'un vélo électrique.

### Plan global du cours (contenu)

- 1) Définition de l'activité de conception
- 2) Formulation du problème
- 3) Résolution : méthode déterministe, stochastique
- 4) Reformulation : Multi en mono objectif, et avec /sans contraintes
- 5) TP : modélisation multiphysique d'un transfo, optimisation (reformulation avec SQP) et NSGA-II
- 6) Évaluation des compétences (C6,C2) : 3h travail en autonomie salle imposée, CR à rendre à la fin de la séance**
- 7) Eco-Conception

Dans le cadre de cette séquence thématique, on vous propose des projets sous trois thèmes :

- **Efficacité énergétique // Partenaires WattandWell, SafranTech, GeePs**
- **Gestion optimale du réseau // Partenaire SRD energies, GeePs**
- **Optimisation d'une chaîne de propulsion // GeePs**

Vous êtes invité à choisir le projet qui vous intéresse le plus sous chaque thème. A la fin on vous attribuera un seul projet.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

## Prérequis

Énergie Électrique conseillé

Science des transferts conseillé

## Plan détaillé du cours (contenu)

Formulation du problème  
Modèles relatifs à l'optimisation  
Optimisation de systèmes d'énergie  
Optimisation stochastique (recruit simulé, algorithmes génétiques, evolution différentielle)  
Estimation de paramètres  
Programation dynamique  
Optimisation multisource  
Optimisation multicritère

## Déroulement, organisation du cours

Cours  
TD/TP : 9h  
Evaluations des compétences : 3h

## Organisation de l'évaluation

Examen écrit de 1H30  
Note de TP  
Evaluations des compétences

## Support de cours, bibliographie

Les présentations de cours  
Les fichiers Matlab

## Moyens

Cours, TD, TP, Evaluation des compétences, Projet de la ST

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Optimisation  
Aspect Système  
Optimisation des systèmes embarqués  
Optimisation stochastique

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

L'étudiant sera capable de mettre en oeuvre une optimisation d'un système embarqué.  
- formalisation du problème  
- optimisation mathématique  
- analyse des résultats  
- multi objectifs

# 2SC7790 – Efficacité des systèmes d'énergie embarqués

Responsables : **Philippe Dessante, Maya Hage Hassan**

Département de rattachement : **DOMINANTE - ENERGIE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

# ST7 - 78 - TRANSITION ENERGETIQUE EN SITE ISOLE

**Dominante :** GSI (Grands Systèmes en Interaction), ENE (Energie)

**Langues d'enseignement :** Anglais

**Campus où le cours est proposé :** CAMPUS DE PARIS - SACLAY

---

## Problématique d'ingénieur

Ce sujet s'intéresse aux problématiques associées à une transition vers un monde plus juste et durable en termes d'accès à l'énergie. En effet, certains sites, habitations ou autres, ne sont pas et ne peuvent pas être reliés au réseau de distribution à cause de la complexité technique de raccordement et d'extension du réseau ou parce que le coût d'une telle opération n'est, soit pas justifié ou n'est pas envisageable pour des zones situées dans des régions pauvres du monde. Il est alors nécessaire de proposer des solutions basées sur le développement de microgrids. Ces derniers permettent de déployer localement des installations collectives de taille réduite grâce à des systèmes hybrides avec une production et un stockage décentralisés ainsi qu'une gestion intelligente de la production, du stockage et de la demande de chaque utilisateur.

Le déploiement de microgrids nécessite une approche système où les questions suivantes se posent :

- comment gérer un système multi composants soumis à différentes contraintes,
- comment gérer et prendre en compte la multiplicité des parties prenantes : usagers, collectivité, financeurs, normes, ...
- comment gérer le compromis entre le coût économique, l'impact environnemental sur cycle de vie, ainsi que la qualité de service.

Tout au long de la séquence thématique (modules contexte et enjeux, cours spécifique, projet) les étudiants aborderont ces questions. Ils s'intéresseront à la définition du besoin pour une situation donnée, à la modélisation et à la formalisation du problème d'optimisation. Ils seront amenés à proposer des solutions techniquement et économiquement fiables dans un environnement incertain.

## Prérequis conseillés

Cours de Modélisation, Probabilités/Statistiques

## Modules contexte et enjeux

Ces modules comprennent une conférence introductive de la thématique, des interventions portant sur les verrous technologiques et scientifiques, ainsi qu'une présentation des projets associés.

## Cours spécifique (60 HEE) : Energies renouvelables et microgrids

**Brève description :** Face aux impacts environnementaux négatifs de toute production d'énergie et à l'épuisement des ressources fossiles, la transition vers des sources renouvelables est une tendance de fond. Si les énergies renouvelables n'ont fourni que 25 % de la production mondiale d'électricité en 2018, cette part est en forte croissance, avec un triplement sur 10 ans de l'éolien et du solaire.

Ces nouvelles énergies posent des questions spécifiques que ce cours propose d'aborder :

- quels sont les gisements éoliens et solaires et les grands principes de leur conversion en électricité ?
- quelles sont les technologies de stockage, en particulier les batteries, aptes à traiter la variabilité de ces sources ?
- quels sont les enjeux techniques, environnementaux et économiques de ces technologies ?

Par ailleurs, l'éolien et le solaire sont des sources nettement plus décentralisées que les centrales thermiques classiques. Ainsi, la production d'électricité se rapproche des lieux de consommation, ce qui fait émerger la notion de « microgrid », analogue des circuits courts en agriculture.

---

Un microgrid est un petit système électrique qui intègre des productions et des consommations dans un périmètre délimité (bâtiment, quartier, île...) et qui est équipé d'une gestion locale des flux d'énergie. Un microgrid peut être autonome ou connecté à un grand réseau. S'il est connecté, il se comporte comme un acteur unique et intelligent, capable par exemple d'acheter de l'électricité au marché de gros aux meilleurs moments ou de fournir des services réseau. L'intégration de tous ces composants et de ces fonctions pose des questions d'optimisation système abordées dans ce cours.

De par leur petite taille, la question de la fiabilité est une question importante pour les microgrids. Ce cours propose d'étudier les méthodes de la sûreté de fonctionnement pour analyser les risques de défaillance, planifier la maintenance et réagir aux pannes...

## Projet : Microgrid insulaire décarbonné

**Partenaire associé :**

**Lieu :** Campus de Rennes

**Brève description :** Près d'un milliard de personnes n'ont pas encore accès à l'électricité (IEA 2018). Ces populations se trouvent souvent en zone isolée dans des régions rurales ou insulaires. Ainsi, pour 3/4 d'entre elles, il n'est pas économiquement efficace de leur apporter l'électricité en agrandissant les grands réseaux électriques existants. L'électrification doit donc se faire à l'échelle locale, par ce qui constitue des micro-réseaux ou microgrids. La génération d'électricité dans un microgrid peut se faire par des moyens fossiles (groupes Diesel) ou par des énergies renouvelables (panneaux solaires...). Grâce aux progrès technologiques, ces dernières sont généralement moins chères. Cependant, leur intermittence pousse à les compléter par des moyens plus onéreux mais pilotables (Diesel, stockage par batterie, hydrogène...). La taille de chacun des composants d'un microgrid (appelé son « dimensionnement ») est donc à optimiser selon différents critères : le coût économique bien sûr, mais aussi la qualité de service, l'indépendance énergétique ou les émissions de gaz à effet de serre. La gestion des flux d'énergie (ex. : arbitrage entre Diesel et batterie/hydrogène) est également à optimiser. Ce projet propose d'aborder ces différentes problématiques d'optimisation sur le cas concret de sites isolés.

# 2SC7810 – Energies renouvelables et micro grids

Responsables : **Pierre Haessig, Nabil Sadou**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Cours ST**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Face aux impacts environnementaux négatifs de toute production d'énergie et à l'épuisement des ressources fossiles, la transition vers des sources renouvelables est une tendance de fond. Si les énergies renouvelables n'ont fourni que 25 % de la production mondiale d'électricité en 2018, cette part est en forte croissance, avec un triplement sur 10 ans de l'éolien et du solaire.

Ces nouvelles énergies posent des questions spécifiques que ce cours propose d'aborder :

- quels sont les gisements éolien et solaire et les grands principes de leur conversion en électricité ?
- quelles sont les technologies de stockage, en particulier les batteries, aptes à traiter la variabilité de ces sources ?
- quels sont les enjeux techniques, environnementaux et économiques de ces technologies ?

Par ailleurs, l'éolien et le solaire sont des sources nettement plus *décentralisées* que les centrales thermiques classiques. Ainsi, la production d'électricité se rapproche des lieux de consommation, ce qui fait émerger la notion de « microréseau », analogue des circuits courts en agriculture.

Un microréseau est un petit système électrique qui intègre des productions et des consommations dans un périmètre délimité (bâtiment, quartier, île...) et qui est équipé d'une gestion locale des flux d'énergie. Un microréseau peut être autonome ou connecté à un grand réseau. S'il est connecté, il se comporte comme un acteur unique et intelligent, capable par exemple d'acheter de l'électricité au marché de gros aux meilleurs moments ou de fournir des services réseau. L'intégration de tous ces composants et de ces fonctions pose des questions d'optimisation système abordées dans ce cours.

De par leur petite taille, la question de la fiabilité est une question importante pour les microréseaux. Ce cours propose d'étudier les méthodes de la *sûreté de fonctionnement* pour analyser les risques de défaillance, planifier la maintenance et réagir aux pannes...

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

**Energies renouvelables (EnR) et stockage :**

- Solaire, éolien, hydrolien, bio-masse, ...
- Modélisation et prédictibilité de la production
- Besoin de flexibilité, technologies de stockage

**Micro grids :**

- Architecture des réseaux électriques et modélisation

- Dimensionnement et gestion opérationnelle : prise en compte des impacts des EnR de sur le réseau, Qualité de Service (tension, fréquence...)

#### **Fiabilité du réseau :**

- Indicateurs de fiabilité
- Organes de sécurité
- Reconfigurabilité
- Défaillance et fiabilité des composants

#### **Modèles économiques des micro grids :**

- Plan d'investissement, rentabilité
- Étude des incertitudes et management des risques
- Marchés de l'énergie, signal-prix, trading

## **Déroulement, organisation du cours**

Cours (~50%): TD/TP (~50%)

## **Organisation de l'évaluation**

Examen écrit - 1h30 (70%), contrôle continu (30%)

## **Moyens**

Cours. TP.

Ce cours contient des cours magistraux ainsi qu'une grande part de travaux pratiques portant sur les différents sujets traités en cours.

## **Acquis d'apprentissage visés dans le cours**

A l'issue de ce module, les élèves seront capables de :

- Comprendre le contexte et les enjeux économiques, écologiques et sociétaux des microgrids.
- Identifier et décrire les différentes sources de production et de stockage d'énergie.
- Dimensionner un microgrid intégrant différents sources de production et de stockage d'énergie en prenant en compte les contraintes techniques /non techniques ainsi que les incertitudes
- Mener des analyses de performances et de sûreté de fonctionnement

## **Description des compétences acquises à l'issue du cours**

- Comprendre le contexte et les enjeux économiques, écologiques et sociétaux des microgrids. C1.1
- Approfondir les connaissances des sources de production et de stockage d'énergie. C2.1
- Dimensionner un microgrid intégrant différents sources de production et de stockage d'énergie en prenant en compte les contraintes techniques /non techniques ainsi que les incertitudes. C2.1

# 2SC7890 – Micro grid insulaire décarbonné

Responsables : **Pierre Haessig, Nabil Sadou**

Département de rattachement : **DOMINANTE - ENERGIE, DOMINANTE - GRANDS SYSTÈMES EN INTERACTION**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Près de 800 millions de personnes n'ont pas encore accès à l'électricité (IEA 2021). Ces populations se trouvent souvent en zone isolée dans des régions rurales ou insulaires. Ainsi, pour 3/4 d'entre elles, il n'est pas économiquement efficace de leur apporter l'électricité en agrandissant les grands réseaux électriques existants. L'électrification doit donc se faire à l'échelle locale, par ce qui constitue des micro-réseaux ou microgrids.

La génération d'électricité dans un micro-réseau peut se faire par des moyens fossiles (groupes Diesel) ou des énergies renouvelables (panneaux solaires...). Grâce aux progrès technologiques, ces dernières sont généralement moins chères. Cependant, leur intermittence pousse à les compléter par des moyens plus onéreux mais pilotables (Diesel, stockage par batterie...). La taille de chacun des composants d'un micro-réseau (appelé son « dimensionnement ») est donc à optimiser selon différents critères : le coût économique bien sûr, mais aussi la qualité de service, l'indépendance énergétique ou les émissions de gaz à effet de serre. La gestion des flux d'énergie (ex. : arbitrage entre Diesel et batterie) est également à optimiser. Ce projet propose d'aborder ces différentes problématiques d'optimisation sur le cas concret d'un site isolé insulaire.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

## Prérequis

Cours d'optimisation

## Plan détaillé du cours (contenu)

**Définition du problème :**

**Données :**

- recueil de donnée de production et de consommation
- analyse et mise en forme des données

**Modélisation et formalisation :**

- définition des critères d'optimisation
- formalisation du problème d'optimisation

**Résolution :**

- choix de la méthode de résolution
- analyse de sensibilité

## Déroulement, organisation du cours

Projet 80HEE



## Organisation de l'évaluation

Rapports de projet et présentations orales (intermédiaire et finale)

## Moyens

Projet en groupe

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce module, les élèves seront capables de :

- Comprendre le contexte et les enjeux économiques, écologiques et sociétaux des microgrids.
- Formaliser un problème d'optimisation
- Choisir la méthode de résolution adaptée.
- Mise en oeuvre d'une démarche d'analyse de compromis
- Travailler en groupe et présenter les résultats

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- Comprendre le contexte et les enjeux économiques, écologiques et sociétaux des microgrids. C1.1, C.4.2
- Modélisation technique et économique d'un microgrid C2.1, C6.2
- Formaliser un problème d'optimisation C1.2, C1.3, C2.1
- Choisir la méthode de résolution adaptée C2.1, C2.3, C6.1, C6.2
- Présenter les résultats C7.1
- Travail en groupe C8.1, C8.4

# ST7 - 79 - LE NUMERIQUE AU SERVICE DU FACTEUR HUMAIN

**Dominante** : Info&Num (Informatique & Numérique), MDS (Mathématiques, Data Sciences), VSE (Vivant-Santé, Environnement)

**Langues d'enseignement** : Anglais

**Campus où le cours est proposé** : CAMPUS DE RENNES

---

## Problématique d'ingénieur

Le recours massif à l'automatisation informatique de nombreux procédés, aux agents de prise de décision de type IA, et à l'analyse de jeux de données toujours plus grands, questionnent le rapport de l'humain face aux technologies de l'information.

En réalité, la vitesse actuelle du développement de ces mêmes technologies, et la richesse des outils qui voient le jour, nous permettent d'aller au plus proche encore de l'humain. Analyse des expressions et émotions par extraction de données multi-capteurs (webcam, kinect, micro, EEG, sudation), modélisation du comportement humain dans des contextes critiques (crise, problèmes de santé, dépression) et analyse poussée des interactions entre différents agents, sont autant de possibilités offertes par les outils du numérique.

Pour la recherche en sciences humaines ou la médecine, ces nouvelles méthodes représentent l'opportunité d'affiner notre compréhension des sujets, des patients et de leur rapport au monde ou aux autres (comportement autistiques, contextes de collaboration).

L'ingénieur CentraleSupélec sera capable de comprendre comment mettre le numérique au service du facteur humain, quelles en sont les possibilités et les limites, et quelles technologies sont appropriées pour construire l'informatique de demain.

## Prérequis conseillés

Cours de d'Algorithmique et Complexité, Statistiques et Apprentissage, Traitement du signal

## Modules contexte et enjeux

Ces modules comprennent une conférence introductive de la thématique, des interventions portant sur les verrous technologiques et scientifiques, ainsi qu'une présentation des projets associés. L'ensemble permettra de mettre en évidence une problématique commune (l'analyse du comportement non verbal) avec des domaines d'application très variés, et donnera une introduction à la psychologie sociale, sur les aspects langage verbal et non verbal.

## Cours spécifique (60 HEE) : Analyse d'image et son 2D-3D

**Brève description** : le cours abordera trois parties importantes nécessaires pour la réalisation des projets :

Analyse d'image : filtrage, segmentation, extraction de caractéristiques

Analyse de son : représentation temps-fréquence, modélisation de la parole, audio spatial

**Projet** : Ce que vous dites sans le vouloir : décryptage et analyse automatique des comportements non verbaux

**Partenaire associé :**

**Lieu :** Campus de Rennes

**Brève description :** Tous les ans, les communautés audio, vidéo, machine learning se regroupent autour de challenges internationaux de recherche sur l'analyse automatique des comportements humains : émotions, dépression, humeur, détection de mouvements, ... (ex: <http://sspnet.eu/avec2017/>). Le projet consiste en la participation à l'un de ces challenges. Il s'agit, à partir d'un large corpus de données représentant des sujets en action, de déterminer automatiquement des informations sur leur comportement et leurs émotions.

Chaque équipe projet se focalise sur une étude particulière (ex : la voix, le visage ...), et toutes les équipes réuniront leur travaux pour comparer leurs résultats à ceux des compétiteurs du challenge international.

Il s'agira donc de choisir et mettre en application certaines méthodes vues en cours d'analyse d'image et son 3D. Les outils de classification et de régression donneront lieu à la mise en œuvre d'algorithmes d'optimisation (régression par réseau de neurone, logique floue, SVM,...).

# 2SC7910 – Analyse d'image et son 2D-3D

Responsables : **Gwendal Fouché**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Cours ST**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

La vue, l'ouïe, le toucher, l'odorat et le goût. C'est au travers de nos 5 sens que nous appréhendons notre environnement et que nous interagissons avec lui. Depuis quelques années, les êtres vivants ne sont plus les seuls à interagir et à comprendre le monde qui les entoure. Des outils automatiques d'analyse d'image et de son, de plus en plus performants, sont créés chaque jour. Que ce soit pour de la conduite autonome, le spatial, le médical, les champs d'applications sont multiples. Et plus récemment, ces techniques ont pris un nouvel élan avec le Deep Learning et les modèles génératifs. Il est désormais difficile de reconnaître une vraie image d'une fausse image ! Et il devient facile de faire dire, artificiellement mais efficacement, ce que l'on veut à qui l'on veut... Dans ce module, vous découvrirez un overview des techniques d'analyse et de synthèse d'image et de son 2D et 3D, au travers de cas concrets d'application. Vous serez les acteurs de la compréhension et de la modification artificielle de votre environnement !

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

## Prérequis

Informatique :

- Algorithmes
- Langage de programmation (bases)

Traitement de signal

Statistiques et apprentissage

## Plan détaillé du cours (contenu)

**Contexte (5%)**

- Introduction à la matière
- Mise en contexte historique.
- Lien avec les matières du programme.

**Analyse d'image (35%)**

- Filtrage : passe haut, passe bas, filtre de Canny
- Segmentation : waterShed, Split&merge, region growing
- Extraction de caractéristiques : LBP, SIFT, HOG

**Analyse du son (35%)**

- Signaux audio et représentation temps-fréquence
- Production et modélisation de la parole
- Audio spatial

**Synthèse d'image et de son (10%)**

- Synthèse d'image 3D: des fondamentaux à l'animation
- Stéréoscopie

### Etude personnelle (15%)

- Choix d'un sujet
- Exploration et présentation

## Déroulement, organisation du cours

- Cours appliqué : alternance d'éclairage théorique et de pratique en présentiel : 50% (30 HEE)
- Evaluation présentiel : 10% (6 HEE)
- Rapport des cours appliqués, révision et préparation thème en non présentiel : 40% (24 HEE)

## Organisation de l'évaluation

QCM de connaissances théoriques : 1/3 de la note

Soutenance du projet de réalisation d'un cours appliqué : 1/3 de la note

Contenu et justification du cours appliqué : 1/3 de la note

## Support de cours, bibliographie

For audio, videos available online: <https://www.animations.physics.unsw.edu.au/waves-sound/oscillations/index.html>

For image synthesis: OpenGL Programming Guide

## Moyens

Equipe enseignante :

- Catherine SOLADIE
- Renaud SEGUIER
- Simon LEGLAIVE
- Gwendal Fouché
- Doctorants de l'équipe de recherche AIMAC
- Intervenants Extérieurs

Outils logiciels et nombre de licences nécessaires :

- Librairies python
- Anaconda et Jupyter Notebooks
- OpenGL

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, vous serez capable de :

- Citer de nombreuses techniques d'extractions de caractéristiques audio et vidéo (C2.1)
- Choisir le traitement pertinent pour l'analyse, la compréhension et la synthèse de données audio et vidéos (C6.1)
- Concevoir, réaliser et valider un système complet de traitement audio et/ou vidéo (C2.1 et C6.1)
- Comprendre et expliquer de nouveaux algorithmes en traitement de l'image et du son (C7.4)

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

1. C2 Jalon 2
  - a. C2.1 **Approfondissement** : Approfondir l'ensemble de ses connaissances sur un domaine choisi, via les enseignements de 2A
2. C6 Jalon 2
  - o C6.1 **Numérique** : Résoudre numériquement un problème
3. C7 Jalon 2
  - o C7.4 **Convaincre sur les techniques de communications** : Déployer avec succès des techniques de communication adaptées à la situation spécifique, parmi lesquelles : rhétorique, storytelling, langage corporel, occupation d'espace, respiration, mémoire, supports visuels, outils vidéos, distanciel, etc...

# 2SC7990 – Ce que vous dites sans le vouloir : décryptage et analyse automatique des comportements non verbaux

Responsables : **Gwendal Fouché**

Département de rattachement : **DOMINANTE - MATHÉMATIQUES, DATA SCIENCES, DOMINANTE - INFORMATIQUE ET NUMÉRIQUE, DOMINANTE - VIVANT, SANTÉ, ENVIRONNEMENT**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

**Ce que vous dites sans le vouloir : décryptage et analyse automatique des comportements non verbaux.**

Lettres, mots, phrases : les algorithmes dont nous disposons aujourd'hui sont de plus en plus efficaces pour décrypter notre grammaire, et comprendre ce que nous pouvons dire. Et pourtant cela ne couvre qu'une partie infime de notre communication.

Joie, résignation, ironie : seuls notre corps et le ton de notre voix dévoilent nos intentions profondes, notre message réel, et la compréhension automatisée des comportements et émotions humaines est un défi de taille.

Pour le relever, tous les ans, les communautés audio, vidéo, machine learning se regroupent autour de challenges internationaux de recherche sur l'analyse automatique des comportements humains : émotions, dépression, humeur, détection de mouvements, ... (ex: <http://sspnet.eu/avec2017/>).

À travers ce projet, vous pourrez vous confronter à l'un de ces challenges. Vous disposerez d'un large corpus de données représentant des personnes en action et devrez déterminer automatiquement leur comportement, leurs émotions.

Chaque équipe projet se focalise sur une étude particulière (ex : la voix, le visage, ...), et toutes les équipes réuniront leur travaux pour comparer leurs résultats à ceux des compétiteurs du challenge international.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

## Prérequis

Statistiques et apprentissage.

Traitement de signal

Informatique :

- Algorithmes
- Langage de programmation (bases)

## Plan détaillé du cours (contenu)

**Contexte** (5%)

- Introduction par l'équipe de recherche.
- Organisation en groupe.
- Mise à disposition des données du challenge.

### Etat de l'art (20%)

- Rechercher et comprendre les papiers de recherches sur le sujet.
- Reproduire un sous ensemble choisi de méthodes de l'état de l'art (elles serviront de base pour vos travaux).

### Pré-traitement, compréhension et visualisation des données (40%)

- En fonction du thème choisi (voix, visage, ...), extraire les caractéristiques intéressantes pour votre analyse
- Explorer les modes de représentation visuelle pertinents
- Utiliser ces représentations pour guider votre stratégie d'analyse

### Analyse statistiques et apprentissage (20%)

- Choisir et construire vos modèles d'analyse et d'apprentissage
- Quantifier vos résultats et comparer les à l'état de l'art

### Points de visibilité et présentation finale (15%)

- 3 points de visibilité seront à mener pour présenter votre avancement au fur et à mesure du projet (roulement des membres de l'équipe).
- Structurer vos présentations avec les objectifs, l'état de l'art, les schéma d'architecture, les tableaux de résultats.
- En fin de projet, présenter en équipe vos résultats à nos partenaires industriels et académiques.
- Fournir un rapport scientifique

## Déroulement, organisation du cours

- Immersion dans l'équipe de recherche AIMAC : encadrement par les chercheurs, doctorants et post-doctorants.
- Plusieurs équipes de 2 à 5 étudiants. Coordination des différentes équipes pour la production d'un résultat final global unique.
- Présentation des résultats à nos partenaires.

## Organisation de l'évaluation

Points de visibilité individuels : 1/4 de la note

Soutenance devant les partenaires : 1/4 de la note

Résultats scientifiques (performances du système) : 1/4 de la note

Rapport scientifique : 1/4 de la note

## Moyens

Equipe enseignante :

- Catherine SOLADIE
- Renaud SEGUIER
- Simon LEGLAIVE
- Gwendal Fouché
- Doctorants de l'équipe de recherche AIMAC

Outils logiciels et nombre de licences nécessaires :

- TensorFlow ou équivalent (gratuit)

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, vous serez capable de :

- Préciser ou redéfinir le besoin (C4.1)
- Naviguer parmi les papiers de recherche d'un sujet, les lire et les comprendre (C2.4)
- Reproduire un sous-ensemble choisi de méthodes de l'état de l'art en traitement de signal et/ou machine learning (C3.2)
- Mixer des compétences issues du traitement de signal, de l'analyse statistique et de l'apprentissage afin d'analyser les données (C2.2)
- Explorer des modes de représentation visuelle pertinents pour vos données (C6.3)
- Utiliser ces représentations pour guider votre stratégie d'analyse (C3.3)
- Choisir et construire vos modèles d'analyse et d'apprentissage (C1.2, C6.1)

- Quantifier vos résultats et les comparer à l'état de l'art (C2.4, C3.3)
- Réaliser un projet scientifique d'envergure en groupe (C8.1)
- Décrypter un certain nombre de messages non-verbaux lors d'interactions humaines (C7.4)
- Argumenter votre démarche scientifique (C7.1)

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

1. C2 Jalon 2
  - a. C2.4 **Données** : Exploiter un ensemble cohérent de données et réaliser un état de l'art exhaustif avec un esprit critique
2. C6 Jalon 2
  - C6.3 **Traiter des données** : Mettre en œuvre des algorithmes traitant ou utilisant des données massives (intelligence artificielle, clustering)
3. C4 Jalon 2
  - C4.1 **Besoin client** : Identifier avec le client les autres dimensions ne figurant pas dans la formulation initiale : techniques, économiques, humaines, etc.
4. C7 Jalon 2
  - C7.1 **Convaincre sur le fond** : Adapter le fond et son argumentation en fonction d'interlocuteurs ou de contextes élargis, « avoir du répondant » pour défendre sa solution (maîtrise du sujet des interlocuteurs, valeurs, engagements, disponibilité, attention, etc.).
5. C8 Jalon 2
  - C8.1 **Travailler en équipe** : Associer chaque membre de l'équipe en fonction de ses forces



# ST7 - 80 - SEPARATION DE SOURCES POUR UNE EXPLOITATION OPTIMALE DE SIGNAUX

Dominante : **MDS (Mathématiques, Data Science)**

Langues d'enseignement : **Français**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ**

---

## Problématique d'ingénieur

Pour augmenter la productivité, réduire l'impact écologique ou améliorer la qualité de services, les industriels et les centres de recherche doivent répondre aux problématiques d'analyse de données constituées de superpositions de signaux. En effet, dans de nombreuses applications, les signaux de capteurs sont des mélanges issus de plusieurs sources qui émettent en même temps, et l'information portée par ces signaux n'est exploitable que si l'on arrive à séparer ce qui provient de chacune des sources. Par exemple, en exploration pétrolière les industriels réalisent aujourd'hui des campagnes d'acquisition en mode sources simultanées (plusieurs sources émettent en même temps). Il faut alors distinguer dans les signaux des géophones les échos dus aux différentes sources pour obtenir une image du sous-sol. Ou dans un magasin « hi-tech », un robot qui a commencé une conversation avec un interlocuteur peut être perturbé par d'autres clients ou par un bruit ambiant, alors qu'il doit poursuivre sa conversation avec le même interlocuteur. Ou dans des électrocardiogrammes, séparer le signal du cœur du fœtus de celui de sa mère. Ou encore pour la prise de son dans une conférence ou une table ronde avec plusieurs locuteurs, plutôt que de donner un microphone à chaque conférencier, il serait pratique de séparer ce que dit chaque locuteur à partir d'enregistrements de micros placés en des positions fixes. Les solutions à ces problématiques reposent sur les mêmes concepts mathématiques :

- la connaissance d'un espace de représentation des données adapté au problème traité, où en général ces dernières sont « parcimonieuses » (autrement dit les données peuvent être représentées par un vecteur dont la matrice des coordonnées est creuse, dans un espace de grande dimension) ;
- la minimisation d'un critère qui dépend des données ; et
- une phase d'apprentissage et de tests pour vérifier que la solution obtenue se généralise et éviter ainsi le sur-apprentissage.

## Prérequis nécessaires

Cours de probabilité, de statistiques, de traitement du signal et d'algorithmique de première année ; bonne maîtrise d'un environnement de programmation (Matlab, Python, ...).

## Modules contexte et enjeux

Ces modules comprennent une conférence introductive de la thématique, des interventions portant sur les enjeux environnementaux et sociétaux et sur les verrous technologiques et scientifiques, ainsi qu'une présentation des projets associés.

## Cours spécifique (60 HEE) : Représentation parcimonieuse des signaux

**Brève description** : Ce cours présente les outils mathématiques d'analyse de signaux et leurs propriétés (compléments sur la transformée de Fourier, sous/sur-échantillonnage, signal harmonique, STFT, analyse multi-résolution, décompositions en ondelettes de Paley-Littlewood et bi-orthogonale, bancs de filtres à reconstruction parfaite) ainsi que des méthodes de décomposition de signaux (Matching Pursuit, Basis Pursuit, Analyse en composantes indépendantes).

## Projets :

### Projet 1 : Suivi d'un locuteur par un robot

**Partenaire associé :** Orange

**Lieu :** Campus Metz

**Brève description :** Les robots sont de plus en plus présents dans notre environnement. Quand un robot a commencé une conversation avec un locuteur, le problème est de conserver le focus sur l'interlocuteur alors que plusieurs personnes discutent autour du robot, ou qu'un autre interlocuteur s'adresse à lui. La société ORANGE souhaite résoudre ce problème à partir d'un signal audio monophonique enregistré par le robot uniquement, sans ajouter d'autres modalités.

La problématique consiste donc à trouver un ou plusieurs espaces de représentation des données bien adapté(s) au problème du suivi d'un locuteur; apprendre à partir d'un faible nombre d'échantillons (c'est-à-dire sur une petite durée d'enregistrement) les caractéristiques du locuteur qu'il faut suivre; éviter le sur-apprentissage qui peut survenir si les caractéristiques apprises dépendent des mots dits par le locuteur.

### Projet 2 : Séparation de sources sonores à partir d'enregistrements de plusieurs microphones

**Partenaire associé :** CentraleSupélec, plateforme audio de la « smartroom » à Metz

**Lieu :** Campus de Metz

**Brève description :** Il existe beaucoup de situations concrètes dans lesquelles on souhaite capter un son (par exemple lors d'un reportage, lors d'une conférence, lors d'un spectacle) afin de permettre soit de l'enregistrer à des fins de rediffusion, soit de l'amplifier en direct pour que tous les participants aient une bonne perception. Dans certaines de ces situations, plusieurs sources peuvent intervenir (par exemple, une conférence ou table ronde dans laquelle plusieurs locuteurs sont présents).

Afin de permettre une bonne intelligibilité, on place en général un microphone devant chaque conférencier, ou, au théâtre, on place un microphone émetteur radio directement sur les acteurs.

Une amélioration notable du service rendu pourrait être d'utiliser un réseau de microphones fixe (par exemple au plafond) et d'avoir un algorithme de traitement permettant de séparer les sources, donnant ainsi l'illusion d'avoir un microphone individuel par conférencier ou par acteur. Cela éviterait les problèmes de préparation, les oublis d'allumer le microphone quand on souhaite parler, ... En outre, si le système est capable de fournir la position de chacune des sources, il sera également possible de reproduire cette position au moyen d'un système holophonique.

La problématique consiste donc, à partir d'un réseau de microphones fixe et en supposant qu'il y ait un nombre fini de sources (par exemple de locuteurs), à assurer la séparation des sources et fournir en sortie un canal par source (locuteur), lequel canal contiendrait également l'information de la position de cette source. Pour simplifier, on commencera par supposer que les locuteurs se trouvent à des positions fixées et connues à l'avance. C'est le cas, par exemple, des conférenciers d'une table ronde. Dans ce cas, le système pourrait être étalonné au préalable en utilisant des générateurs de bruit blanc, puis pourrait fonctionner en utilisant les paramètres fixes déterminés ainsi.

### Projet 3 : Extraction non-invasive de l'électrocardiogramme du fœtus

**Partenaire associé :** INSERM

**Lieu :** Campus de Metz

**Brève description :** L'électrocardiographie fœtale non invasive (NI-FECG) représente une technique de surveillance fœtale alternative à l'échographie Doppler traditionnelle, qui est non invasive. Cependant, malgré les progrès significatifs réalisés dans le domaine du traitement des signaux ECG adultes au cours des dernières décennies, l'analyse du NI-FECG reste difficile et largement inexplorée. Cela est principalement dû au rapport

signal/bruit relativement faible du FECG par rapport à l'ECG maternel, qui se chevauche à la fois en temps et en fréquence.

La problématique consiste donc à trouver un ou plusieurs espaces de représentation des données bien adapté(s) au problème de l'extraction de l'ECG fœtal. Il s'agira d'appliquer et de tester une ou plusieurs méthodes en partant d'un article qui passe en revue les avancées récentes de la recherche sur le NI-FECG, notamment : les bases de données accessibles au public, les techniques d'extraction du NI-FECG pour l'évaluation du rythme cardiaque fœtal et l'analyse morphologique, les simulateurs du NI-FECG et la méthodologie et les statistiques permettant d'évaluer les performances des algorithmes d'extraction.

# 2SC8010 – Représentations parcimonieuses des signaux

Responsables : **Stephane Rossignol**

Département de rattachement : **CAMPUS DE METZ**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Cours ST**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

La représentation parcimonieuse des signaux est un des concepts fondamentaux en science des données. Les représentations parcimonieuses permettent de représenter des signaux complexes (comme des sons) par un petit nombre de coefficients non nuls, ceci dans des espaces de très grandes dimensions. Elles permettent ainsi de trouver des structures ou des régularités dans des espaces de très grandes dimensions. Ces représentations sont au cœur de la compréhension mathématique de l'efficacité des algorithmes et techniques récentes d'apprentissage supervisé ou non supervisé et des transformations de scattering.

Le cours présente les outils mathématiques d'analyse de signaux et leurs propriétés (compléments sur la transformée de Fourier, sous-échantillonnage, sur-échantillonnage, signal harmonique, STFT, analyse multi-résolution, décompositions en ondelettes de Paley-Littlewood et bi-orthogonale, bancs de filtres à reconstruction parfaite) ainsi que des méthodes de décomposition de signaux (Matching Pursuit, Basis Pursuit, Analyse en composantes indépendantes).

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

## Prérequis

Les cours de probabilité, de statistiques, de traitement du signal (1CC4000 et 1CC5000) et d'algorithmique de première année (1CC1000) ; une bonne maîtrise d'un environnement de programmation (Matlab/Octave, Python).

## Plan détaillé du cours (contenu)

**Analyse harmonique:** rappels et compléments sur la transformée de Fourier (sous/sur-échantillonnage, TFD, bancs de filtres, signal harmonique, transformée de Hilbert, transformée de Fourier à court terme).

**Analyse multi-résolution:** décomposition en ondelettes de Paley-Littlewood, bi-orthogonales, bancs de filtres à reconstruction parfaite.

**Décomposition d'un signal:** dictionnaire, représentation parcimonieuse, *matching pursuit*, *matching pursuit* orthogonal, *basis pursuit*.

**Analyse en composantes indépendantes:** notions d'entropie, de débit d'entropie d'un signal aléatoire, information mutuelle, analyse en composantes indépendantes (ACI), ACI dans une base orthonormée, déconvolution aveugle.

**Notions d'apprentissage supervisé:** introduction aux notions de base d'apprentissage, base de tests, sur-apprentissage, risque empirique, risque réel (ou de généralisation).

## Déroulement, organisation du cours

17,5h Cours magistral

9h Travaux dirigés

8h Travaux pratiques (sur machines). Un sujet courant sur la séquence.

## Organisation de l'évaluation

Contrôle continu (50% de la note, sous forme de 2/3 QCM en début de TD ; note individuelle) et exposé oral à la toute fin du long TP (50% de la note). TP : note par binôme ; différenciée en cas d'anomalie dans un binôme.

## Support de cours, bibliographie

A wavelet tour of signal processign, Stéphane Mallat

<https://www.di.ens.fr/~mallat/papiers/WaveletTourChap1-2-3.pdf>

## Moyens

Equipe enseignante : Stéphane Rossignol

Taille des TD : 34

Taille max des TP : 34

Outils logiciels et nombre de licence nécessaire : Matlab (34 licences)/Octave (Python)

Salles de TP (département et capacité d'accueil) : salles sur le campus de Metz

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Savoir concevoir une chaîne de traitement du signal complète.
- Savoir comparer les performances des divers outils à notre disposition pour l'analyse des séries temporelles compliquées, afin de choisir celui qui conviendra le mieux pour tel ou tel signal à analyser.
- Savoir utiliser à bon escient les principes de base et approfondis du traitement des signaux numériques et analogiques.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C2. Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers.

C6. Etre opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique.

# 2SC8092 – Suivi d'un locuteur par un robot

Responsables : **Michel Barret**

Département de rattachement : **DOMINANTE - MATHÉMATIQUES, DATA SCIENCES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Le projet, qui fait partie de la ST7-Optimisation "Séparation de sources pour une exploitation optimale des signaux", portera sur une problématique de séparation de sources posée par un partenaire client: ORANGE, Informatique Cognitive à Arcueil.

Les robots sont de plus en plus présents dans notre environnement. Quand un robot a commencé une conversation avec un locuteur, le problème est de conserver le focus sur l'interlocuteur alors que plusieurs personnes discutent autour du robot, ou qu'un autre interlocuteur s'adresse à lui. La société ORANGE souhaite résoudre ce problème à partir d'un signal audio monophonique enregistré par le robot, sans ajouter d'autres modalités.

La problématique consiste donc à trouver un ou plusieurs espaces de représentation des données bien adaptés au problème du suivi d'un locuteur; apprendre à partir d'un faible nombre d'échantillons (c'est-à-dire sur une petite durée d'enregistrement) les caractéristiques du locuteur qu'il faut suivre; éviter le sur-apprentissage qui peut survenir si les caractéristiques apprises dépendent des mots dits par le locuteur.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

## Prérequis

- Cours de *Probabilités* de 1A (CIP-EDP, 1SL1000)
- Cours de *Traitement du Signal* de 1A (1CC4000)
- Cours de *Statistique et apprentissage* de 1A (1CC5000)
- Cours *Système d'information et Programmation* de 1A (1CC1000).

## Plan détaillé du cours (contenu)

**Solution proposée** : l'espace des coefficients des transformations de *scattering* semble bien adapté au problème du suivi d'un interlocuteur inconnu à partir d'un enregistrement de courte durée du locuteur. Les transformations de *scattering*, basées sur les décompositions en ondelettes, dépendent de méta-paramètres qu'il faut ajuster. Une heuristique recommande de les ajuster pour avoir une représentation la plus « parcimonieuse » des coefficients transformés. Différents classificateurs (linéaires, SVM, autre ?) devront être testés en apprentissage supervisé pour séparer au mieux des locuteurs dans l'espace des coefficients de *scattering*.

D'autres approches sont possibles (réseaux de neurones convolutifs sur les données brutes ou séparation dans l'espace des MFCC --- Mel-Frequency Cepstral Coefficients).

Il s'agira de découper le problème en sous-systèmes et d'essayer de bien traiter une partie et/ou d'évaluer des algorithmes de séparation de locuteurs dont des implantations sont disponibles sur le net.

## Déroulement, organisation du cours

Cet enseignement se fait sous forme de projet.

Pendant toute la durée du projet il sera demandé aux élèves de tenir à jour un « cahier de laboratoire » précisant en quelques lignes pour chaque expérience ou test réalisé, ses motivations, les résultats obtenus, les codes sources et les données utilisés. Durant la dernière semaine dédiée au projet, il sera demandé aux élèves :

- de fournir un rapport de projet ; et
- de réaliser une soutenance en présence du partenaire.

Un point d'avancement du projet avec lecture du « cahier de laboratoire » et de la version provisoire du rapport aura lieu régulièrement .

## Organisation de l'évaluation

Le projet sera évalué dans deux mises en situation:

- en contrôle continu à l'occasion de points d'avancement et de la lecture du « cahier de laboratoire » et de la version provisoire du rapport (note individuelle CC);
- à l'occasion de la soutenance finale (note individuelle S).

De plus, la qualité des livrables: rapport final, cahier de laboratoire et codes source commentés sera évaluée (note QL).

Note finale =  $CC/3 + S/2 + QL/6$ .

En cas d'absence justifiée à l'un des contrôles intermédiaires, la note de ce dernier est remplacée par celle de la soutenance finale.

L'évaluation des compétences est précisée au paragraphe "description des compétences acquises".

## Support de cours, bibliographie

Y. Luo & N. Mesgarani, "Conv-TasNet: Surpassing Ideal Time-Frequency Magnitude Masking for Speech Separation", *IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, vol. 27, no. 8, pp. 1256 - 1266, August 2019.

C. Subakan, M. Ravanelli, S. Cornell, M. Bronzi, J. Zhong, "Attention is all you need in speech separation", *Proceeding of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 21-25, June 2021.

## Moyens

80 HEE de projet réalisé en groupe d'élèves

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de cet enseignement, les étudiants seront capables de :

- représenter et décomposer de façon "optimale" des signaux audio;
- ajuster un modèle à des données;
- utiliser un langage de programmation pour implanter de façon efficace un algorithme de traitement de données.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C4: Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients (évaluée durant le suivi du projet)

C6: Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique (évaluée tout au long du projet)

C7: Savoir convaincre (évaluée pendant le suivi, à la soutenance et dans les livrables)

C8: Mener un projet, une équipe (évaluée par les cahiers de laboratoire )

# 2SC8093 – Séparation de sources sonores à partir d'enregistrements de plusieurs microphones

Responsables : **Jean-Louis Gutzwiller**

Département de rattachement : **DOMINANTE - MATHÉMATIQUES, DATA SCIENCES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce projet, qui fait partie de la séquence thématique 7 "Séparation de sources pour une exploitation optimale de signaux», s'intéresse à la séparation de sources multiples dans des signaux audio.

Il existe beaucoup de situations concrètes dans lesquelles on souhaite capter un son afin de permettre soit de l'enregistrer à des fins de rediffusion, soit de l'amplifier en direct pour que tous les participants aient une bonne perception.

Afin de permettre une bonne intelligibilité dans le cas de plusieurs intervenants, on place en général un microphone devant chaque conférencier, ou, au théâtre, on place un microphone émetteur radio directement sur les acteurs.

Une amélioration notable du service rendu pourrait être d'utiliser un réseau de microphones fixe et d'avoir un algorithme de traitement permettant de séparer les sources, donnant ainsi l'illusion d'avoir un microphone individuel par conférencier ou par acteur.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

## Prérequis

Cours de Probabilités de 1A (CIP-EDP, 1SL1000)

Cours de Traitement du Signal de 1A (1CC4000)

Cours de Statistique et apprentissage de 1A (1CC5000)

Cours Système d'information et Programmation de 1A (1CC1000).

## Plan détaillé du cours (contenu)

Évaluation des algorithmes de traitement du son au moyen de langage de programmation matriciels.  
Développement informatique en langage C/C++ des algorithmes retenus.

## Déroulement, organisation du cours

Cet enseignement se fait sous forme de projet.

Pendant toute la durée du projet il sera demandé aux élèves de tenir à jour un « cahier de laboratoire » précisant en quelques lignes pour chaque expérience ou test réalisé, ses motivations, les résultats obtenus, les codes sources et les données utilisés. Durant la dernière semaine dédiée au projet, il sera demandé aux élèves :

- de fournir un rapport de projet ; et
- de réaliser une soutenance en présence du partenaire.



Un point d'avancement du projet avec lecture du « cahier de laboratoire » et de la version provisoire du rapport aura lieu régulièrement.

## Organisation de l'évaluation

Le projet sera évalué dans deux mises en situation :

- en contrôle continu à l'occasion de points d'avancement et de la lecture du "cahier de laboratoire" et rapport provisoire, avec évaluation individuelle des contributions de chaque membre (note CC)
- à l'occasion de la soutenance finale (note S correspondant à la présentation individuelle de chaque participant)

et par la qualité des livrables (rapport final, codes sources commentés, cahiers de laboratoire : note QL).

La note finale =  $CC / 3 + S / 2 + QL / 6$ .

L'évaluation des compétences est précisée au paragraphe "description des compétences acquises".

## Moyens

Un réseau de microphones disponible dans la smartroom du campus de Metz permet de faire des acquisitions sonores. Les étudiants travailleront sur des ordinateurs en vue de développer l'algorithme informatique permettant de réaliser la fonction souhaitée.

80 HEE (48 HPE) de projet réalisé en groupe d'élèves.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de cet enseignement, les étudiants seront capables de :

- Représenter et décomposer d'une façon "optimale" des signaux audio
- Ajuster un modèle à des données
- Utiliser un langage de programmation pour écrire de manière efficace un algorithme de traitement du signal

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C4 : Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients (évaluée durant le suivi de projet)

C6 : Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique (évaluée tout au long du projet)

C7 : Savoir convaincre (évaluée pendant le suivi, à la soutenance et dans les livrables)

C8 : Mener un projet, une équipe (évaluée par les cahiers de laboratoire)

# 2SC8094 – Extraction non-invasive de l'électrocardiogramme du fœtus

Responsables : **Jean-Luc Collette**

Département de rattachement : **DOMINANTE - MATHÉMATIQUES, DATA SCIENCES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Le projet, qui fait partie de la ST7-Optimisation "Séparation de sources pour une exploitation optimale des signaux", portera sur une problématique de séparation de sources posée par un partenaire client : INSERM à Nancy.

L'électrocardiographie fœtale non invasive (NI-FECG) représente une technique de surveillance fœtale alternative à l'échographie Doppler traditionnelle, qui est non invasive. Cependant, malgré les progrès significatifs réalisés dans le domaine du traitement des signaux ECG adultes au cours des dernières décennies, l'analyse du NI-FECG reste difficile et largement inexplorée. Cela est principalement dû au rapport signal/bruit relativement faible du FECG par rapport à l'ECG maternel, qui se chevauche à la fois en temps et en fréquence.

La problématique consiste donc à trouver un ou plusieurs espaces de représentation des données bien adaptés au problème de l'extraction de l'ECG fœtal. Il s'agira d'appliquer et de tester une ou plusieurs méthodes en partant d'un article qui passe en revue les avancées récentes de la recherche sur le NI-FECG, notamment : les bases de données accessibles au public, les techniques d'extraction du NI-FECG pour l'évaluation du rythme cardiaque fœtal et l'analyse morphologique, les simulateurs du NI-FECG et la méthodologie et les statistiques permettant d'évaluer les performances des algorithmes d'extraction.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

## Prérequis

Cours de Probabilités de 1A (CIP-EDP, 1SL1000)

Cours de Traitement du Signal de 1A (1CC4000)

Cours de Statistique et apprentissage de 1A (1CC5000)

Cours Système d'information et Programmation de 1A (1CC1000).

## Plan détaillé du cours (contenu)

Évaluation et implantation d'algorithmes d'extraction non invasive d'ECG fœtal, à partir de la lecture de l'article de Joachim Behar et al. "A practical guide to non-invasive fœtal electrocardiogram extraction and analysis", *Physiol. Meas.* 37, 2016.

## Déroulement, organisation du cours

Cet enseignement se fait sous forme de projet.

Pendant toute la durée du projet il sera demandé aux élèves de tenir à jour un « cahier de laboratoire » précisant en quelques lignes pour chaque expérience ou test réalisé, ses motivations, les résultats obtenus, les codes sources et les données utilisés. Durant la dernière semaine dédiée au projet, il sera demandé aux élèves :

- de fournir un rapport de projet ; et
- de réaliser une soutenance en présence du partenaire.

Un point d'avancement du projet avec lecture du « cahier de laboratoire » et de la version provisoire du rapport aura lieu régulièrement.

## Organisation de l'évaluation

Le projet sera évalué dans deux mises en situation :

- en contrôle continu à l'occasion de points d'avancement et de la lecture du « cahier de laboratoire » et de la version provisoire du rapport (note individuelle CC) ;
- à l'occasion de la soutenance finale (note individuelle S).

De plus, la qualité des livrables : rapport final, cahier de laboratoire et codes source commentés sera évaluée (note QL).

Note finale =  $CC/3 + S/2 + QL/6$ .

En cas d'absence justifiée à l'un des contrôles intermédiaires, la note de ce dernier est remplacée par celle de la soutenance finale.

L'évaluation des compétences est précisée au paragraphe "Description des compétences acquises"

## Support de cours, bibliographie

Joachim Behar, Fernando Andreotti, Sebastian Zaunseder, Julien Oster and Gari D Clifford, "A practical guide to non-invasive foetal electrocardiogram extraction and analysis", Physiological Measurement, 37, R1 – R35, 2016.

## Moyens

80 HEE (48 HPE) de projet réalisé en groupe d'élèves.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À l'issue de cet enseignement, les étudiants seront capables de :

- représenter et décomposer de façon "optimale" des électrocardiogrammes ;
- ajuster un modèle à des données ;
- utiliser un langage de programmation pour implanter de façon efficace un algorithme de traitement de données.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C4 : Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients (évaluée durant le suivi du projet)

C6 : Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique (évaluée tout au long du projet)

C7 : Savoir convaincre (évaluée pendant le suivi, à la soutenance et dans les livrables)

C8 : Mener un projet, une équipe (évalué par les cahiers de laboratoire)

# ST7 - 81 - CONCEPTION EN FABRICATION ADDITIVE

**Dominante** : CVT (Construction, Ville et Transports)

**Langues d'enseignement** : Anglais

**Campus où le cours est proposé** : CAMPUS DE PARIS-SACLAY

## Problématique d'ingénieur

Depuis ses débuts, la fabrication additive s'est avérée être un changement fondamental parmi les procédés de fabrication, permettant une personnalisation totale et une qualité artisanale au prix et avec la précision d'un procédé industrialisé moderne. C'est toutefois un procédé jeune, et par conséquent, pas encore totalement maîtrisé. Les propriétés mécaniques des pièces produites sont souvent imprévisibles, contraignant sévèrement leur utilisation dans des applications haut de gamme. C'est pourquoi le développement de méthodes (analytiques et numériques) capables de prévoir les caractéristiques finales de la pièce en optimisant le processus de conception semble une nécessité.

La séquence se concentre sur l'optimisation de la conception par fabrication additive :

- Choix optimal de matériau et de microstructure ;
- Optimisation de la géométrie par rapport aux contraintes multiphysiques ;
- Optimisation des paramètres du procédé (trajet d'impression, puissance du laser, caractéristiques des poudres...)
- Evaluation des enjeux économiques et sociaux de la FA par rapport aux procédés standards (Temps de fabrication, cout des matériaux, mains-d'œuvre employées, compatibilité environnementale...)

Cette conception présente un défi majeur de par la nature multiphysique du procédé de fabrication additive (thermique, mécanique, électromagnétique, métallurgique, changement de phase) et pose un problème multi-échelle tant dans l'espace que dans le temps (caractère évolutif du procédé).

## Prérequis nécessaires

Il est conseillé d'avoir suivi le cours SPI « Mécanique des milieux continus » et au moins un cours parmi les cours suivants : Matériaux, Science des transferts, Thermodynamique.

## Modules contexte et enjeux

Ces modules comprennent des conférences, étude de cas et mini projet, visant à présenter la problématique, les enjeux sociaux-économiques et à réaliser un objet simple par impression 3D.

## Cours spécifique (60 HEE) : Couplages multiphysiques

**Brève description** : Ce cours abordera au sens large les concepts et les enjeux du couplage multiphysique. Les sujets suivants seront, entre autres, abordés pendant le cours :

- Couplage fort – faible
- Couplage de formulations différentes
- Couplage d'échelles différentes

Puis nous nous intéresserons à des couplages particuliers, d'intérêt pour la fabrication additive :

- Laser sur poudre : couplage électro-thermique
- Fusion du lit de poudre : couplages discret-continu, solide-fluide et thermo-mécanique
- Phase de refroidissement : couplage aéro-thermique-mécanique

Le cours se finira par une réflexion sur la mécanique de la pièce finale (contrainte résiduelles, porosités, microstructure...)

Un fort accent est mis sur la pratique grâce à des TDs et une étude de cas sur le logiciel de simulation multiphysiques COMSOL. Les compétences acquises sont évaluées par l'étude de cas.

## **Projet** : Optimisation de structure en fabrication additive

**Partenaire associé :**

**Lieu :** Campus de Paris-Saclay

**Brève description :** La séquence est construite autour de divers projets portés par la dominante CVT. Les élèves, par groupe de 6 maximum, devront répondre à une problématique proposée par leur partenaire industriel autour de la conception d'une pièce en fabrication additive. Il pourra s'agir d'optimiser sa géométrie, de réfléchir à sa conception, de concevoir un système pour une utilisation donnée, d'analyser la performance de la pièce conçue par fabrication additive ... La plupart des sujets impliquent de la simulation éléments finis sur COMSOL ou sur le logiciel de choix des élèves. Certains sujets peuvent proposer de l'expérimental.

Tous les projets devront suivre les étapes suivantes :

- Etape 1 : prise en main du sujet
- Etape 2 : Représentation simplifiée du problème pour arriver à une première solution
- Etape 3 : Optimisation du système dans un espace de paramètres donné
- Etape 4 : Analyse des coûts bénéfiques de la solution proposé par rapport à une solution initiale ou classique.

Exemple de partenaires et thématiques associées : Safran pour des pièces aéronautiques en fabrication additive métallique, ESA pour la conception de structures pour applications spatiales, XtreeE pour l'optimisation de structures génie civil en fabrication additive plâtre ou béton, Michelin pour la réalisation de bandes de roulement optimisées en fabrication additive polymère mais aussi des sujets de recherche avec les laboratoires LMPS et LURPA.

# 2SC8110 – Couplages multiphysiques pour la fabrication additive

Responsables : **Camille Gandiolle, Andrea Barbarulo**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ENERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Cours ST**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours abordera au sens large les concepts et les enjeux du couplage multiphysique.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

## Prérequis

Avoir suivi le cours SPI "Mécanique des milieux continus" et au moins un cours parmi les suivants : Matériaux, Science des transferts, Thermodynamique.

## Plan détaillé du cours (contenu)

Ce cours abordera au sens large les concepts et les enjeux du couplage multiphysique.

Les sujets suivants seront, entre autres, abordés pendant le cours :

- Couplage fort – faible ;
- Couplage de formulations différentes ;
- Couplage d'échelles différentes.

Puis des couplages particuliers, d'intérêt pour la fabrication additive, seront étudiés plus en détail :

- Laser sur poudre : couplage électro-thermique
- Fusion du lit de poudre : couplages discret-continu, solide-fluide et thermo-mécanique
- Phase de refroidissement : couplage aéro-thermique-mécanique

Le cours se finira par une réflexion sur la mécanique de la pièce finale (contrainte résiduelles, porosités, microstructure...)

## Déroulement, organisation du cours

- 1 remise à niveau en MMC et un tutoriel COMSOL à réaliser en autonomie. QCM d'autoévaluation disponible

- 6 séances de cours d'1h30 et 7 séances de TD d'1H30

- 2x3h d'étude de cas supervisées.

## Organisation de l'évaluation

Les connaissances seront testées par un QCM (N1) et les compétences acquises par une étude de cas en groupe de 3 consistant à mettre en œuvre un système couplé par simulation éléments finis sur comsol (N2=80%note de groupe + 20%note individuelle).

Le QCM (N1) compte pour 80% de la note finale; La note N2 compte pour 70% de la note finale

## Support de cours, bibliographie

- Zhang, Qun, and Song Cen, eds. "Multiphysics Modeling: Numerical Methods and Engineering Applications". Tsinghua University Press Computational Mechanics Series. Elsevier, 2015. <https://univ-scholarvox-com.ezproxy.universite-paris-saclay.fr/catalog/book/docid/88831751?searchterm=multiphysics>
- Peksen, Murat. "Multiphysics Modeling: Materials, Components, and Systems". Academic Press, 2018

## Moyens

Les outils numériques suivant seront utilisés en support du cours : COMSOL

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Maîtriser les différents types de couplage ;
- Savoir justifier un choix de modélisation dans un système multiphysique ;
- Savoir formuler un modèle intégrant un couplage ;
- Savoir simuler ce couplage sous COMSOL et utiliser le logiciel de manière pertinente pour en tirer des conclusions sur comment optimiser le système

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C2 Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers
- C6 Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

# 2SC8190 – Optimisation de structure en fabrication additive

Responsables : **Camille Gandiolle**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ENERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Optimisation des propriétés physiques (mécaniques, acoustiques, thermiques...) d'une pièce proposé par un partenaire industriel ou académique. La conception optimisée devra intégrer les contraintes liés au procédé de fabrication additive.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

## Prérequis

Avoir suivi le cours SPI « Mécanique des milieux continus » et au moins un cours parmi les cours suivants : Matériaux, Science des transferts, Thermodynamique.

## Plan détaillé du cours (contenu)

La séquence est construite autour de divers projets portés par la dominante CVT. Les élèves, par groupe de 6 maximum, devront répondre à une problématique proposée par leur partenaire industriel autour de la conception d'une pièce en fabrication additive. Il pourra s'agir d'optimiser sa géométrie, de réfléchir à sa conception, de concevoir un système pour une utilisation donnée, d'analyser la performance la pièce conçue par fabrication additive. Les domaines d'applications possibles sont l'aéronautique, le biomédical, le génie civil, le spatial... La plupart des sujets impliquent de la simulation éléments finis sur COMSOL ou sur le logiciel de choix des élèves. Certains sujets peuvent proposer de l'expérimental.

Tous les projets devront suivre les étapes suivantes :

- Etape 1 : prise en main du sujet
- Etape 2 : Représentation simplifiée de la pièce étudiée pour arriver à une première solution
- Etape 3 : Optimisation du système dans un espace de paramètres donné
- Etape 4 : Analyse des coûts bénéfiques de la solution proposé par rapport à une solution initiale ou classique.

## Déroulement, organisation du cours

Les étudiants auront l'opportunité de pratiquer une première optimisation mécanique simple et de découvrir la mise en donnée pour la fabrication additive grâce à une activité en collaboration avec la fabrique. La pièce sera ensuite imprimée et testée. Valider cette activité permet de valider la compétence C6.

## Organisation de l'évaluation

Les compétences C2 et C8 seront évalués tout au long du projet qui se finira par une soutenance en présence du partenaire industriel. Les compétences C2 et C7 seront évaluées lors de la soutenance. Le partenaire évaluera la compétence C4.



Contrôle continu pendant le projet (C2, C8) : N1  
Note des enseignants pour la soutenance orale (C2, C7) : N2

Note des partenaires industriels (C2, C4, C7) : N3  
C6 : validation par PASS or FAIL avec l'activité à la fabrique

$NF = 30\%N1 + 30\%N2 + 40\%N3$

## Moyens

Logiciels de l'école, notamment COMSOL  
Moyens expérimentaux du LMPS

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C2 Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers
- C4 Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients
- C6.2 Pratiquer la conception collaborative au travers d'outils de conception et de prototypage de produits (CAO, imprimante 3D) ;
- C7 Savoir convaincre ;
- C8 Mener un projet, une équipe

# ST7 - 82 - SYSTEMES PHYSIQUES NEURO-INSPIRES POUR LE TRAITEMENT D'INFORMATION

Dominante : PNT (Physique et NanoTechnologie)

Langues d'enseignement : Anglais

Campus où le cours est proposé : CAMPUS DE METZ

## Problématique d'ingénieur

Dans un contexte de l'accroissement constant du volume de l'information à traiter, il est nécessaire de définir de nouvelles stratégies d'analyse. Les méthodes de classification automatique issues de l'apprentissage machine sont prometteuses mais leurs implémentations numériques restent lentes et très énergivores. Une solution alternative consiste à concevoir des architectures matérielles (« hardware ») dites neuro-inspirées permettant de lever une grande partie de ces verrous. Cette thématique suscite un intérêt grandissant à la fois dans la recherche fondamentale mais aussi chez des start-ups et grands groupes de hautes technologies tels qu'IBM ou encore Google.

Dans ce contexte, et au travers d'une architecture spécifique connue sous le nom de calculateur réservoir (un réseau de neurones artificiels pour lequel seule une couche de lecture finale est entraînée), nous proposons aux étudiants de découvrir les principes de design et de conception des réseaux de neurones physiques. Pour cela, les étudiants feront appel à de nombreuses techniques d'optimisation telles que la régression *ridge* et la descente de gradient, ainsi que leurs versions accélérées, ou encore d'heuristiques stochastiques (ex. recuit simulé, algorithmes génétiques).

L'objectif sera de simuler puis de tester un prototype d'architecture physique de traitement neuro-inspirée comprenant plusieurs dizaines, voir centaines de milliers de neurones et de démontrer sa faible consommation énergétique, de déterminer l'équivalent du nombre d'opérations flottantes par seconde réalisables en comparaison de celle d'un ordinateur sur des tâches de classification.

## Prérequis nécessaires

Notions sur les équations et systèmes dynamiques. Cours de statistiques, de traitement du signal et d'automatique, bonne maîtrise d'un langage de programmation (ex. Matlab, Python, ou C/C++).

## Modules contexte et enjeux

Ces modules comprennent une conférence introductive de la thématique par des personnalités du monde académique et des industriels, des interventions portant sur les verrous technologiques et scientifiques, ainsi qu'une présentation des projets associés.

## Cours spécifique (60 HEE) : Optimisation pour l'apprentissage des systèmes physiques

**Brève description** : Ce cours présente les outils physiques et mathématiques pour la réalisation et l'entraînement de réseaux de neurones artificiels : *echo-state network* (ESN), implémentations électroniques et photoniques, capacité mémoire et de calcul des architectures physiques, apprentissage supervisé et non-supervisé, régression *ridge* et régularisation, techniques de descente de gradient accélérées, méthodes heuristiques, approche matérielles pour des *deep networks*, technologies émergentes (ex. photonique intégrée, nano-photonique et spintronique)

## Projet : Classification de signaux vidéos et d'images à haute performance et faible coût énergétique par des systèmes photoniques

**Partenaire associé :** Start-up Light On, CentraleSupélec / Chaire Photonique et Institut FEMTO-ST

**Lieu :** Campus de Metz

**Brève description :** Le projet portera sur l'apprentissage / optimisation d'une architecture photonique expérimentale de calculateur analogique neuro-inspiré (développé dans les laboratoires de CentraleSupélec en collaboration avec l'institut FEMTO-ST). Les élèves devront choisir des stratégies d'apprentissage / optimisation issues du cours et les mettre en œuvre pour que l'architecture photonique puisse effectuer une classification de signaux images / vidéos ou alors de résolution de problèmes à orientation industrielle proposés par notre partenaire industriel Light-On.

L'organisation du projet est la suivante :

- 1) Etude bibliographique rapide sur la tâche de classification de signaux images ou vidéos (ou tâche proposée par le partenaire Light-On)
- 2) Simulation numérique sur un modèle réaliste de l'architecture (fourni) sous Matlab. Mise en œuvre des méthodes d'apprentissage basées sur de la régression linéaire / ridge, de la régression multi-logistique, ou des encore d'heuristique stochastique (modèle de la fonction de coût inconnue).
- 3) Identification des hyper-paramètres physiques d'importance (ajustables expérimentalement) pour l'architecture photonique
- 4) Tests expérimentaux, analyse de performance, évaluation de la capacité de calcul (flops) et étude comparative de la performance énergétique (coût énergétique par image / séquence vidéo traitée) par rapport aux méthodes logicielles.

# 2SC8210 – Optimisation pour l'apprentissage des systèmes physiques

Responsables : **Damien Rontani**

Département de rattachement : **CAMPUS DE METZ**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,00**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Dans un contexte de l'accroissement constant du volume de l'information à traiter, il est nécessaire de définir de nouvelles stratégies d'analyse. Les méthodes de classification automatique issues de l'apprentissage machine sont prometteuses mais leurs implémentations numériques restent lentes et très énergivores. Une solution alternative consiste à concevoir des architectures matérielles (« hardware ») dites neuro-inspirées permettant de lever une grande partie de ces verrous. Cette thématique suscite un intérêt grandissant à la fois dans la recherche fondamentale mais est aussi chez des start-ups et grands groupes de hautes technologies tels qu'IBM ou encore Google.

Dans ce contexte, et au travers d'une architecture spécifique connue sous le nom de calculateur réservoir (un réseau de neurones artificiels pour lequel seule une couche de lecture finale est entraînée), Ce module propose aux étudiants de découvrir les principes de design et de conception des réseaux de neurones physiques. Pour cela, les étudiants feront appel à de nombreuses techniques d'optimisation telles que la régression *ridge* et la descente de gradient, ainsi que leurs versions accélérées, ou encore d'heuristiques stochastiques (ex. recuit simulé, algorithmes génétiques).

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

## Prérequis

Notions de Physique Generale (Equations différentielles et aux dérivées partielles) (Niveau L2)

Modélisation (1CC3000)

Statistique et Apprentissage (1CC5000)

Traitement du signal (1CC4000)

Expérience d'un langage ou environnement de programmation (ex. : Matlab, Python, ou C/C++).

## Plan détaillé du cours (contenu)

### Architectures physiques neuro-inspirées (6h CM + 6h TD)

- Notions de réseaux de neurones artificiels (perceptron, réseaux feed-forward et récurrents)
- Implémentations physiques en électronique, photonique
- Rappels de dynamiques des systèmes. Notions de systèmes non-linéaires.
- Notions sur les echo-state networks (ESN) et liquid state machines (LSM) – Calculateurs Réservoirs - Conditions pour le traitement de l'information
- Capacité de calcul et Capacité mémoire
- Systèmes physiques intégrés et nanoscopiques pour le machine learning
- Ouverture vers les architectures physiques profondes (deep neural networks)

TD/TP 1: Simulation d'un ESN pour la résolution d'un problème de régression sur un problème de régression (3h)

TD/TP 2: Simulation d'une architecture photonique de calculateur réservoir sur un problème de classification (3h)

### Apprentissage et optimisation pour les architectures physiques neuro-inspirées (15h CM + 1.5h TD)

- Notions d'apprentissage machine, lien avec l'optimisation

- Supervision et non-supervision, fonction de coût, courbe d'apprentissage, validation croisée
- Apprentissage supervisé hors ligne (batch): régression linéaire (Moore-Penrose) et régression ridge - Apprentissage supervisé en ligne : descentes de gradients (stochastique, mini-batch, moyenné) et moindres-carrés récursifs.
- Accélération des méthodes du premier ordre.
- Traitement des tâches de classification (winner-takes-all, régression multi-logistique)
- Apprentissage et optimisation paramétrique des architectures de type calculateur réservoir.

TD 3: Mise en oeuvre de technique d'optimisation en ligne (1.5h)

## Déroulement, organisation du cours

Cours magistraux et interactifs avec démonstrations numériques / expérimentales en laboratoire. Présentations des outils mathématiques simplifiés et nécessaires à la compréhension du cours.

3 TDs seront organisés pour l'assimilation de notions clés

Volume horaire:

Cours magistraux + démonstrations interactives : 21 h

TD : 7.5h

Examen final : 1.5h

## Organisation de l'évaluation

Examen final : Durée : 1.5h comptant pour 50% de la note finale

- En cas d'absence non justifiée : la note de zéro est attribuée à cette partie de la note.
- Devoir Maison prenant la forme d'un mini-projet avec problème de simulation à résoudre ou de l'analyse d'un article scientifique avec remise d'un rapport de synthèse (5 pages max) comptant pour 50% de la note finale.
  - En cas de non remise du rapport avant la date limite précisée en début du cours, la note de zéro est attribuée à cette partie de la note .
- Examen de rattrapage : En cas d'échec à l'examen final, un examen oral de 20 min sera organisé.

## Support de cours, bibliographie

D. Brunner, M. C. Soriano and G. Van der Sande, "Photonic Reservoir Computing: Optical Recurrent Neural Networks" Ed. De Gruyter (2019)

## Moyens

Equipe enseignante : Damien Rontani & Piotr Antonik

Moyens informatiques pour la simulation numérique / accès distanciel à un setup expérimental dans les laboratoires de CentraleSupélec

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Ce cours spécifique sera divisé en 3 parties dont les objectifs d'apprentissage sont les suivants :

- Simuler et expérimenter sur des implémentations physiques de réseaux de neurones artificiels
- Appliquer des techniques d'optimisation pour l'apprentissage machine et pouvoir les mettre en oeuvre dans le cadre spécifique des systèmes physiques
- Synthétiser les dernières avancées issues de la recherche sur l'implémentation de systèmes neuro-inspirés sur puce électroniques et photonique pour des applications en traitement d'information à haut-débit.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C2 Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénierie et dans une famille de métiers

C6 Etre opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

# 2SC8290 – Classification de signaux vidéos et d'images à haute performance et faible coût énergétique par des systèmes photoniques

Responsables : **Damien Rontani**

Département de rattachement : **DOMINANTE - PHYSIQUE ET NANOTECHNOLOGIES**

Langues d'enseignement :

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce projet fait partie de la séquence thématique ST7 "Systèmes Physiques Neuro-inspirés" et a pour objet la classification automatique de signaux vidéos à partir d'architectures photoniques développées au sein des laboratoires de Recherche de CentraleSupélec. Il y a de nombreuses applications à la classification de données images ou vidéos, telles que l'aide à la décision dans le bio-médical, la robotique autonome ou encore l'analyse de scènes pour des applications en défense.

De multiples techniques logicielles tournant sur des architectures à base de processeurs traditionnels (CPU) ou processeurs graphiques (GPU) existent pour traiter les tâches de classification, mais celles-ci s'accompagnent souvent de faibles vitesses de traitement et d'une consommation énergétique importante dans les phases d'apprentissage et d'exécution effective des tâches après entraînement. Ceci motive le développement d'architectures physiques (ou hardware) basées sur l'électronique ou la photonique afin de réaliser ces mêmes tâches de classification.

L'objectif de ce projet sera : (i) d'étudier les capacités de classification de séquences vidéo (ou d'images) d'une base de donnée publique par un système photonique, (ii) d'optimiser ses performances afin qu'il soit compétitif avec les meilleures approches logicielles et (iii) d'estimer la performance énergétique du système.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

## Prérequis

Cours de Modélisation de 1A (1CC3000)

Cours de Traitement du Signal de 1A (1CC4000)

Cours de Statistique et apprentissage de 1A (1CC5000)

## Plan détaillé du cours (contenu)

### 1. Simulation numérique d'une architecture photonique neuro-inspirée de grande dimension (>10,000 systèmes dynamiques interconnectés)

- Choix d'une implémentation Matlab / Python ou C/C++
- Utilisation de différentes stratégies d'apprentissage hors-ligne (régression linéaire et ridge, heuristique stochastiques) ou en ligne (descente de gradient et leurs versions accélérées).
- Recherche de points de fonctionnement optimaux par exploration paramétrique.

### 2. Prise en main d'une base de données publique de signaux vidéo ou d'images

- a. Choix et analyse des algorithmes de pré-traitement pour extraction de "features" adaptés aux tâches de classification.
- b. Réduction du nombre de "features"

### 3. Expérience sur Prototype

- Implémentation de la stratégie d'apprentissage retenue. (réglages effectués par les encadrants)
- Campagne expérimentale

### 4. Analyse de performance

- Performance (taux d'erreur / succès en classification) et mise en contexte avec l'état de l'art (étude bibliographique)
- Estimation de la consommation énergétique pour la résolution d'une tâche (entraînement + énergie consommée par signal classé)

## Déroulement, organisation du cours

Cet enseignement se fait sous forme de projet au cours duquel il sera demandé aux élèves :

- de travailler en groupe (3 à 4 étudiants) pendant 80 HEE (*i.e.* 41.5 HPE).
- d'organiser des points d'avancement réguliers avec les encadrants du cours afin de consigner les progrès réalisés, la mise à jours des codes de simulation, et les résultats numériques et expérimentaux obtenus.
- de fournir un rapport de mi-parcours (environ 5 pages) sur les avancées dans le projet et un rapport final (10 à 15 pages) lors de dernière la semaine
- de réaliser une première soutenance à mi-parcours (S1) en présence des responsables du cours et une deuxième soutenance (S2) qui sera la soutenance finale du projet en présence des partenaires industriels et académiques.

## Organisation de l'évaluation

Les compétences seront évaluées sur la base :

- d'un contrôle continu (CC) sur la gestion du projet (organisation des réunions d'avancements, progrès réalisés, maîtrise technique du sujet). Evaluation de la performance du groupe et de la performance individuelle à pondération identique.
- des deux soutenances (S1 et S2) Evaluation de la performance du groupe et de la performance individuelle à pondération identique.
- des livrables de groupe (L) (rapports, archives bibliographiques, codes sources commentés).

La note finale =  $CC / 3 + (S1+S2)/6 + L/3$

## Moyens

- Equipe pédagogique : Damien Rontani, Piotr Antonik
- Ordinateurs au sein du laboratoire LMOPS du Campus de Metz et Cluster FUSION (Paris-Saclay) disponibles pour la simulation numérique et l'analyse paramétrique en performance.
- Ordinateur personnel des étudiants
- Dispositif expérimental en accès distant pour effectuer des tests sur prototype dans le laboratoire LMOPS du Campus de Metz.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de cet enseignement, les étudiants seront capables de :

- Simuler numériquement un système dynamique de grande dimension sous Matlab / Python ou C/C++ et d'appliquer des techniques d'optimisation hors ligne et en ligne pour effectuer une opération d'apprentissage
- Analyser des points de fonctionnement et effectuer des cartographies paramétriques
- Utiliser des bases de données publiques de signaux images / vidéos et appliquer un prétraitement.
- Effectuer des expériences sur un prototype d'architecture photonique neuro-inspirée.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C4 Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients

C7 Savoir Convaincre

C8 Mener un projet une équipe





# PARCOURS COMPILATION / INFOSEC

## 2SC3000 – Compilation - Infosec

Responsables : **Pierre Wilke**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

### Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours vise à donner aux étudiants une meilleure compréhension des mécanismes mis en œuvre dans les compilateurs.

Il s'agit d'un sujet fondamental car les compilateurs sont omniprésents dans le monde numérique. Ils servent évidemment à produire tous les programmes exécutables, que ce soit sur un PC, un téléphone portable, ou même un calculateur embarqué. Même la conception des processeurs est issue d'un compilateur qui traduit une description "haut-niveau" du matériel en un circuit logique qui implémente le processeur. Plus généralement, tout processus de transformation partant d'un artefact décrit dans un langage donné, et devant produire un autre artefact dans un autre langage, souvent de plus bas-niveau, peut bénéficier des résultats obtenus depuis plus de 50 ans dans le domaine des compilateurs.

Nous étudierons les différentes phases d'un compilateur : les analyses lexicales, syntaxiques et sémantiques, la génération de code, les optimisations et les analyses de programme associées, ainsi que les formats d'exécutables courants.

Ces connaissances seront mises en pratique en TP, où les étudiants construiront un compilateur pour un petit sous-ensemble du langage C, vers l'assembleur RISC-V. Le compilateur sera écrit dans le langage fonctionnel OCaml.

Les premiers cours de ce module seront dédiés à l'apprentissage du langage C (le langage que l'on veut compiler) et du langage OCaml (le langage dans lequel on écrira le compilateur).

### Prérequis

- Architecture des ordinateurs (2A, SG6)
- Algorithmique et complexité (1A)

### Plan détaillé du cours (contenu)

1. Le langage C
2. Le langage OCaml
3. Analyse lexicale
4. Analyse syntaxique
5. Génération de code et optimisations de programme
6. Allocation de registres
7. Édition de liens et assemblage, formats de fichiers exécutables

## Déroulement, organisation du cours

8 CM de 3h  
9 TP de 3h  
1 TD de 3h

## Organisation de l'évaluation

Examen écrit 1h30.

Chaque sous-compétence (Cij) ci-dessus sera évaluée par une partie de l'examen écrit.

## Support de cours, bibliographie

- Modern Compiler Implementation in Java. Andrew W. Appel, Cambridge University Press, 2nd Edition.
- Compilers: Principles, Techniques, and Tools 2nd Edition. Alfred V. Aho, Monica S. Lam, Ravi Sethi, Jeffrey D. Ullman
- Crafting Interpreters, Bob Nystrom
- Engineering a compiler, K. Cooper and L. Torczon

## Moyens

- Enseignants : Frédéric Tronel et Pierre Wilke
- Matériel nécessaire : un ordinateur équipé d'un système d'exploitation Linux
- Logiciels nécessaires : opam, chaîne de cross-compilation gcc pour RISC-V, qemu-riscv64, docker  
(Un guide d'installation de ces différents outils sera fourni en introduction du cours)

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À l'issue de ce cours, l'étudiant devra :

- Savoir mettre en œuvre un analyseur lexical
- Mettre en œuvre un analyseur syntaxique pour une grammaire LL(1) donnée
- Concevoir et implémenter, par calcul de point-fixe, des analyses de programmes pour l'optimisation
- Mettre en œuvre un algorithme d'allocation de registres
- Comprendre l'organisation de la pile lors de l'exécution d'un programme

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- **C1.3 Résoudre** : résoudre un problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation
- C2.1 Approfondir un domaine spécifique

# 2SC3090 – Projet Compilation - Infosc

Responsables : **Pierre Wilke**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **0**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce projet a pour objectif d'améliorer le compilateur obtenu en fin de TP dans le cours de Compilation (2PC3000). Le langage source du compilateur s'étoffera pour atteindre un langage très proche du langage C. Le compilateur ainsi obtenu pourra produire un exécutable pour un petit jeu en mode graphique (Space Invaders).

## Prérequis

Compilation

## Plan détaillé du cours (contenu)

Les étudiants amélioreront leur compilateur selon les axes suivants :

- Appels de fonction
- Typage
- Pointeurs
- Tableaux
- Structures

## Déroulement, organisation du cours

12 TP de 3h

## Organisation de l'évaluation

Soutenance orale de projet

Code du projet

## Moyens

- Enseignants : Frédéric Tronel et Pierre Wilke
- Matériel nécessaire : un ordinateur équipé d'un système d'exploitation Linux
- Logiciels nécessaires : opam, chaîne de cross-compilation gcc pour RISC-V, qemu-riscv64, docker (Un guide d'installation de ces différents outils sera fourni en introduction du cours)

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Savoir compiler les constructions évoluées du langage C (appels de fonction, pointeurs, tableaux, structures)

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C6.2 : Concevoir un logiciel
- C7.1 : Savoir convaincre Sur le fond : Structurer ses idées et son argumentation, être synthétique (hypothèses, objectifs, résultats attendus, démarche et valeur créée)

## **COURS en SEMAINE INTERCALAIRE 2A**

# 2IN1510 – Comprendre la blockchain

Responsables : **Marc-Antoine Weisser**

Département de rattachement : **INFORMATIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **45**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

L'objectif de ce cours est de s'approprier la technologie blockchain, de la comprendre, d'être capable de l'expliquer, de savoir dans quel contexte l'utiliser et pourquoi elle n'est pas adaptée dans tous les contextes.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée en SG6

## Prérequis

Bonne connaissance des bases de Python 3.

## Plan détaillé du cours (contenu)

Le cours se divise en 5 grandes parties.

I. Introduction sur la blockchain et éléments de cryptographie

- Le registre partagé
- Chainage de blocks
- Fonction à sens unique

II. Mise en oeuvre de la blockchain

- Preuve de travail
- Noeuds et mineurs
- Composition d'une transaction
- Initialisation d'une chaîne
- Composition d'un block
- Processus de validation

III. Concepts avancés

- Minage
- Risque crypto
- Autres preuves
- Smart Contract
- Consensus
- Fork de la chaîne et résolution

IV. Enjeux

- Pool et gouvernance
- Vulnérabilités
- Éthiques et juridiques

V. TP

- Implémentation d'une blockchain simple en Python
- Proposition d'une application l'intégrant

## Déroulement, organisation du cours

- Cours magistraux : 6x3h
- TP : 3x3h

## Organisation de l'évaluation

La validation sur la base du TP et d'un rapport.

## Moyens

- Cours magistraux
- TP
  
- Lecture de support et synthèse

Les cours et l'encadrement des TP sont assurés par Marc-Antoine Weisser.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de comprendre le fonctionnement d'un registre partagé utilisant la technologie "blockchain", de connaître ses possibilités, ses enjeux et ses limitations.

L'élève aura acquis :

- quelques notions de cryptographie asymétrique (fonction à sens unique, hachage, clef publique et clef privée, ...)
- ;
- les éléments fondamentaux de la technologie "blockchain" (chainage de blocs, preuve de travail, les noeuds, le minage, la composition d'un bloc, ...)
- quelques extensions et alternatives (preuve d'enjeu, smart contract, consensus, ...)
- les enjeux (sécurité, gouvernance, vulnérabilité, ...).

Acquis d'apprentissage :

- Connaître les principes de la cryptographie asymétrique
- Comprendre le fonctionnement des blockchains
- Implémenter une blockchain
- Distinguer les cas pertinents d'utilisation d'une blockchain
- Concevoir une application mettant en oeuvre une blockchain

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.1 : Étudier un problème dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un problème dans ses dimensions scientifiques, économiques et humaines,

C1.4 : Spécifier, concevoir, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe

# 2IN1520 – Analyse de risques - INFOSEC

Responsables : **Valerie Viet Triem Tong**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Non**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Cette semaine de cours alterne cours et études de cas pratiques pour présenter l'analyse des risques cyber.

L'analyse des risques en matière de cybersécurité consiste à comprendre, gérer, contrôler et atténuer les risques informatiques au sein d'une organisation numérique. L'analyse des risques est un élément crucial des efforts de protection des données.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée en fin de SG8

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

### Analyse de la menace

qui sont les attaquants, quelles sont leur motivation et leur organisation, leur caractéristiques

Cyber Threat Intelligence

Etude de quelques APT

### Analyse de risques

- but de l'analyse de risque
- présentation des différentes approches
- focus sur Ebios-RM

### Sécurité technique

### Cadre légal

### Sécurité physique

Etude du mode opératoire des attaques exploitant des vulnérabilités dans la mise en oeuvre de la sécurité physique

### Sécurité du monde industriel

### Gestion de crise

Etude pratique de trois cas de cyberattaques et de la coordination de la réponse des acteurs internes et externes dan la gestion de crise associée

- Processus de gestion de crise (Attaque contre TV5 Monde)
- Communication de crise (Attaque contre Norsk Hydro)
- Remédiation (Attaque NotPetya contre Maersk)

## **Social Engineering**

Analyse des moyens de pression reposant sur des techniques de social-engineering

## **Déroulement, organisation du cours**

Semaine ponctuée de quelques cours classiques et de beaucoup d'interactions avec les intervenants à l'aide de

- Mise en situation concrète sur de nombreux petits exemples
- Etude de cas pratiques en petits groupes et restitution au groupe entier
- Discussion avec Philippe Thomazo, CEO du groupe ECOCERT qui viendra témoigner sur son expérience des risques cyber.

## **Organisation de l'évaluation**

Evaluation des connaissances à l'écrit à l'aide d'un quizz et à travers les restitutions orales des études de cas faites dans la semaine.

## **Moyens**

Support de cours, vidéos, témoignages, cas pratiques

## **Acquis d'apprentissage visés dans le cours**

Prendre en compte le risque Cyber

Apprécier l'impact réel d'une cyber-attaque sur le métier de l'entreprise

Comprendre l'organisation de la menace

Envisager les différents aspects de la gestion d'une crise cyber

## **Description des compétences acquises à l'issue du cours**

C1 Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques



# 2IN1570 – Développement d'applications web et mobile

Responsables : **Benoit VALIRON**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT INFORMATIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Les technologies actuelles du web vont au-delà de la simple création de sites : leurs capacités d'interaction sont telles qu'elles permettent de réaliser toutes sortes d'applications pour toutes sortes de supports, comme des téléphones mobiles par exemple. Connectées au web, ces applications échangent des données en s'appuyant sur un ensemble de formats de structuration et de manipulation de données, notamment la famille XML.

L'objectif de ce cours est de découvrir les technologies sur lesquelles s'appuient les applications web et mobiles, en s'appuyant sur la mise en application des concepts et la réalisation d'une petite application web complète.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée en fin de SG8

## Prérequis

Le cours "Systèmes d'Information et Programmation" (SIP)

## Plan détaillé du cours (contenu)

Il faut noter que les technologies web évoluent très vite. Les exemples précis que nous donnons seront appelés à être modifiés au fur et à mesure des changements. On peut néanmoins poser que le schéma de cours suivant, basé sur les concepts sous-jacents, restera inchangé.

- Module 1 : Concepts et technologies de base du web
  - Architecture et protocoles du web : Client / serveur, couche HTTP
  - Pages web : structure et contenu (HTML), mise en forme (CSS)
  - Accessibilité : Clients non-conventionnels, gestion des tailles d'écran
- Module 2 : Interaction dynamique avec l'utilisateur dans le navigateur
  - a. Le langage du web : javascript
  - b. Le modèle du web : programmation événementiel
  - c. Spécificité des écrans mobiles et tactiles
- Module 3 : Échange de données structurées:
  - Format JSON : structure, manipulation
  - Format XML : structure et manipulation (DOM)
- Module 4 : Architecture d'une application web
  - Interaction asynchrone entre navigateur et serveur : AJAX
  - Interaction avec le serveur (par exemple Nodejs)
  - Réactivité des applications ; problèmes de connectivité

Nous attirons l'attention sur le fait que ce cours s'appuie sur de la **programmation en javascript**. Si il n'est pas nécessaire d'être un expert en programmation, il est préférable d'avoir une certaine appétence pour ce type de chose.

## Déroulement, organisation du cours

L'accent est mis sur la pratique : chaque notion présentée est suivie d'une mise en application directe dans une série de tutoriels permettant de construire une application complète au fur et à mesure.

## Organisation de l'évaluation

Une partie de l'évaluation consiste en du contrôle continu, chaque TP étant remis pour évaluation. D'autre part, on demandera un projet aux élèves mettant en oeuvre les concepts présentés en cours.

## Support de cours, bibliographie

Le cours consiste en une série de tutoriels qui seront disponible en ligne au fur et à mesure.

On peut néanmoins citer la bibliographie suivante:

- W. S. Means, E. Rusty Harold, XML in a Nutshell: A Desktop Quick Reference. O'Reilly, 2001.
- A. T. Holdener III, Ajax: The Definitive Guide. O'Reilly, 2008.
- B. Bibeault, Y. Katz, jQuery in Action. Manning, 2008.
- D. Flanagan, JavaScript: The Definitive Guide. O'Reilly, 2011.

## Moyens

Le cours se compose de 5 modules qui présentent de façon incrémentale les notions nécessaires. Chaque module comporte une partie théorique (CM) et une partie pratique de travail personnel et de mise en application de ces concepts (TPs sur machine).

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À la fin de cet apprentissage, les élèves seront capables de :

- Connaître et utiliser les techniques standards de développement web
  - Décrire les différentes parties composant une application web
  - Appliquer chaque techniques du web présentée en cours à un cas simple
- Concevoir et développer une application web simple, avec serveur et client
  - Proposer l'orchestration des différentes composantes pour construire un tout cohérent
  - Gérer les différents modes d'accès au service en fonction du type de client
  - Évaluer et choisir les technologies pertinentes pour un projet donné

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

*Compétence C6.4 - Spécifier, concevoir, réaliser et valider un logiciel complexe*

# 2IN1580 – Intelligence artificielle et santé mondiale

Responsables : **Bich-Lien Doan, Marie-Anne Lefebvre**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT INFORMATIQUE**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE METZ, CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Non**

## Présentation, objectifs généraux du cours

L'ALLIANCE UNIVERSITAIRE EUROPÉENNE POUR LA SANTÉ GLOBALE (Eugloh ) est composée de neuf universités (Saclay, Porto, Lund, Munich, Szeged, Hambourg, Novi Sad, Tromse, Alcalá). Elles partagent l'ambition de mutualiser leur expertise et leurs ressources en matière de santé mondiale afin d'offrir le meilleur enseignement à leurs étudiants. Une université pilote, non seulement innovante, mais aussi pleinement consciente de ses responsabilités et prête à relever les défis sociétaux, en particulier ceux liés à la santé mondiale. Former des étudiants en tant que futurs leaders, à la fois experts dans leur domaine et citoyens responsables : curieux, créatifs et capables de s'adapter à divers écosystèmes et environnements culturels. Un cadre de collaboration ouvert aux contributions de tous les acteurs et de tous les domaines concernés par la santé mondiale.....

(voir la présentation [https://www.eugloh.eu/about/vision-and-objectives/plaquette-EUGLOH-EN-page-par-page%20\(1\)%20\(1\).pdf](https://www.eugloh.eu/about/vision-and-objectives/plaquette-EUGLOH-EN-page-par-page%20(1)%20(1).pdf))

Ce cours se situe dans le cadre de cette alliance et propose aux étudiants des cinq universités européennes une initiation aux problématiques de l'IA appliquées à la santé et au bien-être.

Au cours de la semaine bloquée, les élèves recevront un cours sur l'intelligence artificielle afin d'appréhender les interventions plus spécialisées dans l'utilisation des modèles d'IA dans des applications à la santé et au bien-être.

Les cours suivants seront donnés sous la forme de conférences ou d'ateliers interactifs en présentiel et distanciel, mixant des étudiants des 5 universités européennes.

Ce cours permettra donc à la fois d'acquérir des compétences et des connaissances en IA et santé, mais aussi une ouverture interculturelle et internationale grâce aux échanges entre les enseignants chercheurs et les étudiants de l'alliance Eugloh.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée en début de SG6

## Prérequis

Pas de prérequis excepté le niveau d'anglais pour suivre les conférences en anglais.

## Plan détaillé du cours (contenu)

o Introduction : L'intelligence artificielle (IA) est la technologie la plus puissante à laquelle l'homme ait jamais eu accès. L'IA va révolutionner tous les aspects de notre vie, dont les soins de santé ne sont pas les moindres. Mais qu'est-ce que l'IA exactement ? Nous allons voir que cette question est plus complexe qu'on ne pourrait le penser à première vue. De la classification d'images au traitement des connaissances en passant par la robotique médicale, nous verrons sur des exemples choisis que l'IA est diverse et ne peut pas (encore) être réduite à une technologie unique. Nous passerons en revue les principales techniques d'IA, ce sur quoi elles reposent et leur champ d'application. Le domaine étant en constante évolution, de nombreuses questions restent ouvertes.

o Atelier bien-être chez soi : Fini le salon Télé-Canapé où l'on reçoit des informations formatées. Remplacez-le par une zone d'action et d'interactions, pour prendre soin de soi, de son corps et de son esprit, chez soi ! Après avoir découvert quelques exemples concerts industriels ou de recherche, nous vous inviterons à imaginer, en groupe, des solutions de demain permettant de prendre soin de sa santé physique et psychique de chez soi. Quels outils sont nécessaires ? Quel rôle peut jouer l'IA ? Comment restituer les informations prises chez soi aux services spécialisés (coach sportif, médecin, ...) ? A quel point ces solutions peuvent être acceptables pour leurs utilisateurs ? Parce que le bien-être n'est pas réservé aux salles de sport ou de yoga et que la santé n'est pas chez les kinésithérapeutes ou dans les hôpitaux, nous vous proposerons d'imaginer comment cela peut s'inscrire dans vos maisons, dans une démarche scientifique éthique et responsable.

o Cours sur les décompositions parcimonieuses à l'aide au diagnostic. Les maladies chroniques du foie sont un problème de santé majeur dans nos sociétés modernes. Or, de nos jours la procédure de référence pour le diagnostic repose sur la biopsie, une méthode potentiellement dangereuse ne pouvant être répétée régulièrement. Dans ce cours, nous verrons comment les méthodes de "décomposition parcimonieuse" permettent d'exploiter des données de type « spectroscopie vibratoire » dans l'optique de développer des nouvelles méthodes de diagnostic automatiques non invasives et peu coûteuses.

o Conférences données par des experts du domaine de l'IA et santé globale. (Conférenciers Eugloh)

o Conférence sur les questions éthiques. La pandémie de coronavirus a bouleversé nos vies, nous rappelant la fragilité de l'existence, et faisant remonter à la surface des questions éthiques pressantes aux niveaux individuel, collectif et international. Parmi ces questions, citons les décisions d'éthique clinique concernant l'allocation de ressources limitées en matière de soins de santé, le dilemme entre la protection de la santé publique et la suspension des droits individuels, ainsi que la question de l'éthique de la recherche concernant l'essai de vaccins sans les précautions habituelles.

## Déroulement, organisation du cours

Atelier interactifs, cours et conférences

## Organisation de l'évaluation

Evaluation par un contrôle final sous la forme de Quizz associé aux différentes interventions

## Moyens

En présentiel/distanciel sur les campus de Gif, Rennes ou Metz, en distanciel pour les professeurs des autres universités d'Eugloh

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C1.1 Étudier un problème dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un problème dans ses dimensions scientifiques, économiques et humaines
- C6.7 Exploiter les connexions possibles entre objets et personnes
- C9.1 Analyser et anticiper les conséquences possibles de ses choix et de ses actes dans le respect de soi-même, d'autrui et de l'environnement
- C9.4 Faire preuve de rigueur et d'esprit critique dans l'approche des problèmes sous tous les angles, scientifiques, humains et économiques

# 2IN1590 – Biomécanique et matériaux du vivant

Responsables : **Elsa Vennat**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ÉNERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

## Présentation, objectifs généraux du cours

Le lien entre la mécanique et le vivant est bien plus fort qu'on ne le pense au premier abord. Savez-vous que notre tissu osseux évolue et s'adapte en fonction du chargement mécanique qu'il subit ? Cela est important dans notre vie quotidienne (une activité physique modérée régulière induit une meilleure qualité osseuse) mais aussi dans les soins médicaux (comment remplacer ou régénérer du tissu osseux après un accident ?).

Dans cet électif expérimental, nous allons aborder les liens entre mécanique et vivant en observant et caractérisant les tissus osseux. Les matériaux du vivant sont par nature multi-échelle. Une démarche complète sera menée pour caractériser et modéliser en trois étapes le matériau du vivant choisi :

Recherche bibliographique (présentation des outils puis recherche par groupe)

Observations aux différentes échelles pertinentes : observation d'échantillons au microscope, visualisation tridimensionnelle de la microstructure, traitement et analyse d'images.

Étude expérimentale du comportement des tissus sous chargement, modélisation éléments finis et analyse critique

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée en fin de SG8

## Prérequis

1EL5000 - Mécanique des milieux continus

## Plan détaillé du cours (contenu)

*Lundi, toute la journée*

Choix du matériau à étudier

Présentation des outils de recherche bibliographique et recherche bibliographique

Une fiche de synthèse sera à rendre en fin de séance.

*Mardi, toute la journée (en parallèle) :*

Observation des microstructures du matériaux étudié (acquisition tomographie rayons X, microscopie optique) + quantification (logiciel ImageJ)

Préparation des éprouvettes pour les essais mécaniques

Préparation d'échantillons pour la microscopie électronique à balayage

*Mercredi, toute la journée (en parallèle) :*

Essais mécaniques et analyse des résultats (essais globaux et locaux, compression et nano-indentation)

Observations MEB (soit sur échantillons polis soit sur échantillons fracturés)

Finalisation de l'analyse des images acquises

Ou

Modélisation éléments finis sous COMSOL

Création d'une géométrie modèle sur la base des observations et des quantification mécaniques locales

Analyse du comportement mécanique : comparaison / analyse critiques des résultats numériques et expérimentaux

Fin d'après-midi : Travail sur le point d'avancement qui aura lieu le jeudi matin

*Jeudi*

Matin : point d'avancement : 5' de présentation par groupe

Reste de la journée :

Essais mécaniques et analyse des résultats (essais globaux et locaux, compression et nano-indentation)

Finalisation de l'analyse des images acquises

Ou

Modélisation éléments finis sous COMSOL

Création d'une géométrie modèle sur la base des observations et des quantification mécaniques locales

Analyse du comportement mécanique : comparaison / analyse critiques des résultats numériques et expérimentaux

*Vendredi :*

Matin : préparation de la présentation finale

Après-midi : soutenance finale

## Déroulement, organisation du cours

Travaux pratiques et travaux dirigés

## Organisation de l'évaluation

Travail / implication au sein du groupe de projet (15%) + fiche biblio (15%) + point d'avancement (10%)+ soutenance finale (60%)

## Support de cours, bibliographie

- S.C. Cowin. Bone Mechanics Handbook. CRC Press, Boca Raton, 2001.
- G. Puel. Polycopié de Mécanique des milieux continus 1ère année CentraleSupélec.

## Moyens

Enseignants : Elsa VENNAT, Shangaya TOURAIVANE, Margot LECLERCQ

Outils logiciels : Comsol Multiphysics, ImageJ (ou FIJI)

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, les élèves seront capables de :

- De savoir chercher des données fiables dans la bibliographie,
- Connaître les outils de microscopie adaptés à l'observation d'un tissu biologique dur
- De caractériser un tissu biologique poreux par analyse d'images sur ImageJ
- De décrire le comportement de tissus biologiques à partir de courbes expérimentales (traction/compression),
- De proposer un protocole expérimental pour caractériser mécaniquement un tissu biologique dur sous sollicitations simples
- De proposer un modèle géométrique simple et de mener une étude numérique par la méthode des éléments finis (logiciel COMSOL) de ce tissu pour évaluer son module d'Young global
- De faire le lien entre microstructure et propriétés mécaniques pour un tissu biologique dur

# 2IN1600 – Design your way

Responsables : **Fabienne Berge**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT DÉVELOPPEMENT PROFESSIONNEL ET MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Non**

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours aborde les fondamentaux de connaissance de soi (fonctionnement intellectuel et relationnel) et intègre les principes du Design Thinking au service de la construction de ses choix et de son parcours, en s'appuyant notamment sur les travaux du Life Design Lab de Stanford, bien apprécié des étudiants. Il permet de faire un travail sur l'estime de soi, et la préparation des choix importants à venir. Il offre également un cadre d'intégration de différents apprentissages réalisés à l'école (en cours, ateliers API et APP, associations, temps forts sportifs...).

Ce cours aborde la question de la liberté et responsabilité de chacun dans son parcours à l'école, ses choix d'orientation, ou bien la façon d'exercer son futur métier d'ingénieur, à partir de temps d'introspection guidée/réflexion sur des situations concrètes exposées (témoins, vidéos, apports théoriques). Il mène à une prise de conscience et une capacité de questionnement individuel sur l'adéquation entre ses actes et décisions, et ses valeurs propres.

Il implique un engagement et travail individuel conséquent (lectures, et Travaux Inter Séances).

Objectifs de l'électif: prise de conscience de son propre fonctionnement individuel ainsi que celui des autres, pour une meilleure autonomie et résilience face aux choix et différentes étapes de la vie étudiante, puis professionnelle. Eveiller les étudiants sur ce qui influence leur prise de décision, ceci dès leurs choix de cursus et d'emploi. Avoir confiance et inspirer confiance.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6 (en semaine bloqué)

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

1 – Mon passé et mon présent : Module connaissance de soi : Intro qui constate la difficulté de se relier à soi (ref à Edgard Morin, Henri Bergson) dans le monde actuel volatile, complexe, incertain - Questionnaire de préférences Myers Briggs Type Indicator qui permet de repérer nos préférences profondes (au quotidien, avec les autres, dans nos environnements de travail) – Cours sur les intelligences multiples : repérer ses ressources parmi les différentes formes d'intelligences recensées (8) afin de m'en servir au mieux – Temps de réflexion sur mes valeurs et leviers de motivation à mettre au cœur de mon projet de vie - temps d'intégration des différents apprentissages (cours, API, APP, associations, sports, rencontres entreprises, stage op...).

2 – Mon futur : Utilisation d'outils de Design Thinking pour découvrir et développer sa capacité à générer des nouvelles idées lorsqu'on est bloqués face à un choix, et pour adopter la bonne attitude face à la fin d'un cycle

(fin des études, fin d'un job ou d'un stage) afin de préparer le rebond vers le cycle suivant - Exercice de rédaction (life view / work view) - Travail de réflexion sur 3 scénarios futurs possibles (tranche de 5 ans) – Temps d'intégration des différents apprentissages à l'école (cours, API, APP, associations, sports, rencontres entreprise, stage op..).

## Déroulement, organisation du cours

Alternance Découverte de nouveaux modèles théoriques et exercices pratiques. Alternance de réflexion individuelle et partage en petits groupes - Exercices d'entraînement à l'oral - rédaction de prises de recul individuelles ou à deux - conception de tableaux de bord visuels pour élaborer différents scénarios - production de vidéos. Lecture d'1 livre.

## Organisation de l'évaluation

Présence – Implication – Productions personnelles et d'équipe (rédactions + video) entre chaque séance - lecture de livre et présentations

## Moyens

- Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : Fabienne Bergé - Catherine Chapuis
- Taille des TD (par défaut 35 élèves) : 35 élèves maxi

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de :  
mieux faire ses propres choix, se présenter à des recruteurs, être moins dépendant du regard des autres, être agile dans un monde volatile et incertain où il faut savoir se situer, mieux évaluer ses priorités et acquérir de bons réflexes pour gérer les ruptures ou rebonds à opérer au cours de la vie professionnelle, acquérir une meilleure capacité de recul, développer sa capacité à générer des idées.

**Compétences travaillées : C3, C7.2, C7.3, C9**

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C3 : Agir, entreprendre, innover en environnement scientifique et technologique

C7.2 : Comprendre les besoins et les attentes de ses interlocuteurs. En tenir compte de façon évolutive. Susciter des interactions. Créer un climat de confiance

C7.3 : Convaincre en travaillant sur soi. Etre à l'aise. Se montrer convaincu. Manifester de l'empathie. Gérer ses émotions; Convaincre en travaillant les techniques de communication

C9 : Agir en professionnel responsable. Penser, agir de façon éthique.



# 2IN2100 – Communiquer la Recherche scientifique durable

Responsables : **François CLUZEL, Bich-Lien Doan, Simon Meunier**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT GÉNIE INDUSTRIEL ET OPÉRATIONS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **45**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Non**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Au cœur de la crise environnementale que nous connaissons, transmettre et diffuser le savoir scientifique et technique est une expertise majeure pour l'ingénieur et le chercheur. Ce cours est une initiation grandeur nature à la médiation scientifique : en l'espace d'une semaine, l'objectif est de s'approprier, vulgariser, et mettre en forme, via différents médias, un discours scientifique et de recherche. En travaillant sur un véritable projet de recherche porté par un chercheur de l'école, il s'agira de le valoriser en concevant un outil de médiation scientifique sur mesure.

Ce cours a pour objectif de faire découvrir aux élèves la médiation scientifique, par une pédagogie active mettant en œuvre des projets de recherche durable, des chercheurs, des experts du domaine et un public dans un environnement réel. Il sera ponctué par des conférences de vulgarisateurs accomplis.

La médiation scientifique est une discipline qui consiste à établir un lien entre le monde scientifique et la société. Il s'agit aussi bien de vulgarisation et de dissémination de la culture scientifique que de dialogues à vocation éthique ou politique. Cette discipline s'adresse donc autant au grand public qui souhaite satisfaire sa curiosité ou prendre des décisions citoyennes, qu'au décideur politique qui doit comprendre le monde scientifique et s'approprier ses connaissances. Les ingénieurs formés à CentraleSupélec, par la variété de leurs compétences scientifiques et leur familiarité avec les enjeux techniques, économiques et sociétaux, sont dans une position favorable pour participer à cette médiation.

Dans ce cours, les sujets abordés par les intervenants et les élèves seront tous liés aux Objectifs du Développement Durable de l'ONU, qui représentent un enjeu particulièrement important de médiation scientifique à notre époque, et auxquels il est essentiel de sensibiliser toujours plus le grand public et la classe politique.

Lien vers le flyer du cours (copier-coller le lien dans un navigateur pour qu'il fonctionne correctement) : [https://drive.google.com/file/d/19mqtBO5U\\_Bwd0wt9vVpsBslw9BZGk9jE/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/19mqtBO5U_Bwd0wt9vVpsBslw9BZGk9jE/view?usp=sharing)

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée de SG6

## Prérequis

Une forte motivation ! Cette semaine nécessite un engagement significatif pour produire un support de médiation qui soit à la hauteur de la qualité des intervenants et des experts sollicités.

## Plan détaillé du cours (contenu)

- o Introduction au cours, ses objectifs et son organisation
- o Cours de présentation des objectifs de développement durable (ODD) énoncés par l'ONU dans son Agenda 2030, mise en contexte, nécessité de la médiation et des outils principaux de vulgarisation scientifique

o Conférences et discussions animées par des grands témoins, médiateurs ou vulgarisateurs accomplis : découvrir l'environnement de la médiation scientifique, ses habitudes et ses méthodes, apprendre les bases de la médiation et les conseils d'experts, découvrir les coulisses de projets d'ampleur

o Projet de vulgarisation scientifique sur un média cible : les élèves rencontrent des chercheurs de CentraleSupélec et s'approprient leur projet de recherche, puis choisissent un type de média pour restituer ce travail à un public non spécialiste du domaine ou au grand public. En plus des chercheurs, les élèves sont accompagnés par les encadrants du cours et par des experts en vulgarisation ou médiation, spécialistes du média qu'ils ont choisi.

### **Déroulement, organisation du cours :**

L'électif est coordonné par une équipe d'encadrants afin d'assurer une cohérence depuis le cours introductif jusqu'à la soutenance des projets.

- Lundi :

o Matin : Introduction et cours de présentation des enjeux de la semaine, des outils de médiation

o Après-midi : Bourse aux projets, rencontre entre les chercheurs et les élèves, animée par les encadrants de l'électif. Choix des sujets et des médias

- Mardi :

o Début du travail en mode projet, avec coaching par les encadrants et intervention d'un expert média

o CHALLENGE : Mon Projet en 180 secondes

- Mercredi :

o Matin : Conférence et discussion avec des grands témoins

o Après-midi : Travail en mode projet coaché par les encadrants et intervention d'un expert

- Jeudi :

Matin : Travail en mode projet coaché par les encadrants et intervention d'un expert.

- Vendredi :

• Matin : Finalisation du projet

• Après-midi : Restitution du projet et soutenance (session de pitches face à un jury d'experts + forum de présentation des résultats pour tout public)

### **Exemples de grands témoins passés :**

- Sylvestre Huet, journaliste scientifique (Le Monde)

- Aurélien Déragne, créateur de la Fresque du Numérique

- Anatole Chouard, youtubeur et vulgarisateur scientifique

- Célia Quilleret, journaliste scientifique (France Inter)

### **Exemples d'experts media passés :**

- Célia Quilleret, journaliste scientifique (France Inter)

- Laure Andrivot, designeuse, spécialiste du design appliqué aux enjeux environnementaux

- Hugo Cayla, ingénieur-docteur, vidéaste et membre du collectif 7pointsproduction

**Exemples de projets traités les années passées** (copier-coller le lien dans un navigateur pour qu'il fonctionne correctement) :

- 2021 : <https://www.centralesupelec.fr/fr/ingenieurs-vulgarisateurs-de-science>

- 2022 : [https://www.linkedin.com/posts/projet-celsius\\_retour-sur-la-semaine-exceptionnelle-que-activity-7008022036262330368-3iuJ?utm\\_source=share&utm\\_medium=member\\_desktop](https://www.linkedin.com/posts/projet-celsius_retour-sur-la-semaine-exceptionnelle-que-activity-7008022036262330368-3iuJ?utm_source=share&utm_medium=member_desktop)

## **Déroulement, organisation du cours**

- Conférence et discussion avec des grands témoins

- Travail en mode projet, avec coaching par les encadrants et intervention d'un expert média

- CHALLENGE : Mon Projet en 180 secondes

## **Organisation de l'évaluation**

Evaluation sur la qualité du projet, ainsi que la qualité de la soutenance de fin de semaine. Evaluation par les pairs et par l'équipe d'encadrement.

## **Moyens**

- Diapositives des encadrants et experts

- Moyen de prototypage physique, audiovisuel et digital

- Responsables de l'électif : Bich-Liên Doan, François Cluzel et Simon Meunier
- Equipe pédagogique : François Cluzel, Bich-Liên Doan, Simon Meunier, Projet Celsius (<https://www.projetcelsius.com/>), experts de la médiation et du développement durable
- Taille des groupes : groupes de 3 élèves

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Créer un support de vulgarisation simple à destination d'un public précis
- Mener à bien un projet de vulgarisation, de la recherche des idées à la présentation du support
- Connaître les enjeux de la communication scientifique, dans le contexte du développement durable
- Évaluer la qualité d'une information vulgarisée, et savoir la corriger ou l'améliorer le cas échéant
- Décrire les différents environnements favorables à la communication scientifique, leurs avantages et leurs habitudes
- Exploiter des travaux de recherche pour transmettre leurs connaissances à un public non initié
- Choisir un support de communication favorable en fonction du sujet abordé et du public visé

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C1.1 Étudier un problème dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un problème dans ses dimensions scientifiques, économiques et humaines
- C3.5 Proposer des solutions/outils nouveaux soit en rupture soit en progrès continu
- C6.7 Exploiter les connexions possibles entre objets et personnes
- C7.1 Convaincre sur le fond. Être clair sur les objectifs et les résultats attendus. Être rigoureux sur les hypothèses et la démarche. Structurer ses idées et son argumentation. Mettre en évidence la valeur créée
- C7.4 Maîtriser le langage parlé, écrit et corporel. Maîtriser les techniques de base de communication
- C9.2 Percevoir le champ de responsabilité des structures auxquelles on contribue, en intégrant les dimensions environnementales, sociales et éthiques
- C9.4 Faire preuve de rigueur et d'esprit critique dans l'approche des problèmes sous tous les angles, scientifiques, humains et économiques

# 2IN2180 – Gestion des achats

Responsables : **Thierry Reboud**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Non**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Le cours a pour objectif de permettre aux étudiants de comprendre les principes et de maîtriser les processus clef du métier achat, en forte interaction avec presque toutes les autres fonctions de l'entreprise.

En tant que futurs managers, les étudiants seront en mesure de mieux percevoir la fonction achat comme levier essentiel de création de valeur pour l'entreprise, et de mieux appréhender les outils de pilotage de cette fonction stratégique (organisation, politique achat, mesure de performance, objectifs).

Le cours et les études de cas sont en anglais, la langue incontournable des achats internationaux.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée en fin de SG8

## Prérequis

Aucun prérequis

## Plan détaillé du cours (contenu)

Le cours est scindé en différents modules

1 - Qu'est-ce que l'achat? L'objectif est d'introduire les concepts de base (clarification du vocabulaire, objectif de l'achat, champ d'activité, etc.)

2 - Politique d'achat - Approche marketing. L'objectif est d'expliquer le concept de «stratégie d'achat» (pourquoi ?, quoi ?, comment?)

3 - Prix. L'objectif est de bien comprendre l'écart fondamental entre "coût" et "prix de vente"

4 - RFQ - Sélection du fournisseur. L'objectif est de comprendre les 4 étapes du processus de sélection, comment choisir les critères pertinents pour évaluer les offres et comment organiser la sélection.

5 - Faire ou acheter. L'objectif est de comprendre les différents aspects à prendre en compte lors d'une décision de fabrication ou d'achat et de la manière de la traiter.

6 - Juridique. L'objectif est de fournir l'arrière-plan juridique demandé dans l'activité achats et d'identifier les principaux risques juridiques liés aux achats.

7 - IP. L'objectif est de souligner l'importance de la protection de la propriété intellectuelle et d'expliquer comment sécuriser la propriété intellectuelle dans les relations avec les fournisseurs.

8 - Négociation. Les buts sont de :

- comprendre pourquoi et comment préparer les négociations, identifier les comportements de négociation réussis pour un acheteur,

- fournir des informations sur certaines situations de négociation spécifiques (conflictuelles, multiculturelles, équipe de négociation, etc.)

- donner un aperçu des outils de "vente aux enchères".

9 - Evaluation du fournisseur - Durabilité. L'objectif est d'identifier la liste des critères utiles, de comprendre comment procéder à une telle évaluation et de définir un contexte financier permettant de détecter les risques liés à la durabilité.

10 - Création de valeur - Performance. L'objectif est d'expliquer le but de l'évaluation de la performance des achats, et comment la mettre en œuvre, quelle est la «valeur» pour une entreprise, quels sont les KPI, comment

les choisir

11 - Éthique et gestion: les objectifs sont d'identifier les principales compétences et qualités réussies pour une fonction d'achat et de donner un aperçu des principaux problèmes éthiques pouvant résulter des relations avec les fournisseurs.

## Déroulement, organisation du cours

Le support de cours et les études de cas sont distribués aux étudiants au moins 24h avant chaque séance, afin d'être lus et assimilés, et pour générer des questions et des discussions qui sont encouragés en séance. En les mettant en situation de cas concrets les plus proches de la réalité, dans le contexte de chaque module en cours d'étude, les étudiants pourront expérimenter la complexité et parfois les contradiction entre les objectifs donnés à un manager achat et ses multiples interlocuteurs. Au cours de discussions, ils devront convaincre et agir dans l'intérêt du rôle assigné, face à d'autres étudiants assignés à d'autres rôles aux objectifs différents.

L'étude de cas écrit pour la note doit être creusé dans tous ses détails afin de démontrer une maîtrise adéquate. La seule restitution de la théorie du cours n'est pas suffisante.

## Organisation de l'évaluation

Les étudiants sont évalués à l'aide de deux notes de coefficient identique:  
la première évalue la présence participative (présence en cours et interventions active, durant le cours et l'étude de cas)  
la deuxième est donnée pour l'analyse d'un cas, à faire individuellement ou en groupe, hors du cours.

Acquisition de compétence:

C4 (sens de la création de valeur): QCM écrit, hors cours

C7 (savoir convaincre): En cours de développement.

## Moyens

Les sessions combinent une revue formelle du sujet spécifique et une ou plusieurs analyse (s) de cas distribués aux étudiants à l'avance pour préparation. Le but de ces analyse de cas est de pouvoir mieux comprendre comment adapter au mieux la théorie à la réalité du 'terrain'.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet apprentissage, l'étudiant sera en mesure de

- identifier et mettre en oeuvre les principaux processus achat
- construire une politique d'achat cohérente avec la stratégie de l'entreprise
- identifier les principaux risques résultants des relations avec des fournisseurs.
- Evaluer les fournisseurs et comparer les propositions, selon les critères adaptés à la situation.
- Préparer et mener des négociations efficaces
- Identifier le potentiel de création de valeur du pouvoir de négociation.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C4: sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients

C7: Savoir convaincre

# 2IN2310 – Individus, Travail, Organisations

Responsables : **Cynthia Colmellere**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS, ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ, CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **45**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **27,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

A partir des fondamentaux de la sociologie, de la psychologie, de la philosophie, de la science politique, il s'agit de:

- Mieux connaître l'entreprise et les différents cadres de travail de l'ingénieur sous l'angle de leur organisation et de leur gestion,
- Les contextes sociaux et politiques et économiques de ces différents cadres de travail,
- Comprendre les dimensions techniques, scientifiques, sociales, humaines, économiques et managériales du travail et leurs relations,
- Comprendre les comportements individuels et collectifs dans le travail,
- Comprendre les relations et les mécanismes de pouvoir dans des situations de coopération, de négociation, de conflits,
- Comprendre les phénomènes de déviance et de fraude,
- Comprendre les échecs et les réussites des démarches de changement dans les organisations.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée de SG6 et SG8

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

Quelques exemples de cours proposés:

- Négociation et management
- Eléments de psychosociologie appliqués au monde professionnel
- Conflit, médiation, éthique en entreprise

## Organisation de l'évaluation

- Travail écrit à rendre une semaine à dix jours après le cours (au moins 50% de la note finale)
- Participation orale
- Travaux intermédiaires individuels ou en groupes En cas d'absence justifiée à l'un des contrôles intermédiaires, la note de ce dernier est remplacée par celle du contrôle final.

# 2IN2320 – Enjeux de Société

Responsables : **Cynthia Colmellere**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS, FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **45**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **27,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Les cours de ce séminaire ont pour objectif principal d'aider les élèves à orienter leurs actions face aux « grands défis contemporains ».

Pour cela, les fondamentaux de la psychologie, de la sociologie, de la science politique, de l'économie, de l'anthropologie seront mobilisés pour les amener à

- Comprendre et analyser les enjeux liés aux problématiques environnementales, humaines et sociales contemporaines : par exemple : réchauffement climatique, défis énergétiques, justice sociale, participation de la société civile...
- Comprendre les effets des pratiques humaines sur l'environnement naturel, économique, social.
- Comprendre les dimensions éthiques, politiques sociales et économiques des actions de l'ingénieur face à ces problématiques.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée de SG6 et SG8

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

Parmi les cours proposés :

- Entreprises, fraudes et déviances : perspectives managériales et sociologiques
- Exclure/Inclure dans les sociétés contemporaines : le regard des sciences sociales
- Les médias : dispositifs socio-techniques de contrôle social?

## Déroulement, organisation du cours

Les cours alternent apports théoriques, études de cas, mise en situation.

Les supports utilisés sont variés: textes (articles scientifiques et de vulgarisation), vidéos, podcasts.

## Organisation de l'évaluation

Travail écrit à rendre une semaine à dix jours après le cours (au moins 50% de la note finale)

- Participation orale
- Travaux intermédiaires individuels ou en groupes

## Moyens

Les cours sont donnés en classe de trente élèves maximum par un enseignant spécialiste du sujet proposé.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Capacité d'analyse : savoir identifier les différentes composantes et acteurs de la situation, les examiner de manière à comprendre les relations entre eux, faire apparaître les liens non évidents

Capacité de synthèse : synthétiser les éléments d'une situation, en dégager les points d'appuis et les difficultés.



# 2IN2330 – Science, Technologie, Société

Responsables : **Cynthia Colmellere**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS, ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **45**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **27,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

## Présentation, objectifs généraux du cours

Les enseignements proposés ont pour objectif principal d'aider les élèves ingénieurs à mieux comprendre les représentations de la science et du progrès technique pour mieux situer leur action et ses effets. Ils s'appuient principalement sur la sociologie des sciences, la sociologie de l'innovation, l'histoire des sciences et des techniques, la science politique, la philosophie et l'éthique.

Comprendre et analyser dans différents contextes et situations :

- L'élaboration des savoirs scientifiques et techniques
- Leur diffusion,
- Leur appropriation,
- Leurs usages
- Leurs effets sur les individus et la société, notamment en termes de controverses sur les risques qu'ils génèrent.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6 et SG8

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

Parmi les enseignements proposés :

- Historical, Philosophical and Ethical Perspectives on AI and Data Science
- An introduction to philosophy of science from the perspective of measurement
- Introduction aux controverses scientifiques et techniques

## Organisation de l'évaluation

- Travail écrit à rendre une semaine à dix jours après le cours (au moins 50% de la note finale)
- Participation orale
- Travaux intermédiaires individuels ou en groupes

## Moyens

- Les cours sont donnés en classe de trente élèves maximum par un enseignant spécialiste du sujet proposé.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Mieux contextualiser les problèmes auxquels les ingénieurs seront confrontés dans leur travail, en appréhender les différentes dimensions (techniques, managériales, humaines, organisationnelles...) et leur prise directe avec les dynamiques de la société

Identifier les cadres normatifs, les visions du monde, les enjeux économiques, éthiques et sociétaux des différents acteurs concernés (collaborateurs, citoyens, scientifiques ou institutionnels), et par conséquent leurs positions respectives

Comprendre des situations d'innovation, d'incertitude, de controverses, de crise, de mutations économiques, technologiques...pour construire les solutions les plus pertinentes.

Savoir concilier, articuler et intégrer dans ses analyses, ses décisions et ses actions, les savoirs techniques et scientifiques (« durs ») et les savoirs traitant les dimensions humaines, sociales et culturelles.

# 2IN2340 – Innovation, Arts et créativité

Responsables : **Cynthia Colmellere**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS, FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **45**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **27,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Le principal objectif des cours proposés dans ce séminaire est d'aborder l'innovation à travers le travail de création artistique. Pour cela, les différents enseignements amèneront les élèves ingénieurs à :

- Comprendre les relations des différents domaines de la création artistique avec la science et la technique
- Appréhender le travail de production d'œuvres artistiques dans différents domaines : architecture, peinture, littérature, design...
- Aborder les dimensions individuelles et collectives de ce travail
- Mieux comprendre l'influence des contextes culturels, sociaux, économiques et politiques dans lesquels ils se déroulent.

Les principales disciplines mobilisées sont la sociologie, l'histoire de l'art, l'architecture, la science politique, la philosophie.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée de SG6 et SG8

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

Parmi les cours proposés :

- Art, territoires, écologie
- Addressing Fiction : storytelling, literacy and fake news
- From cradle-to-grave : Tech won't save us

## Déroulement, organisation du cours

Les cours sont donnés en classe de trente élèves maximum par un enseignant spécialiste du sujet proposé.

## Organisation de l'évaluation

- Travail écrit à rendre une semaine à dix jours après le cours (au moins 50% de la note finale)
- Participation orale
- Travaux intermédiaires individuels ou en groupes

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Capacité d'analyse : savoir identifier les différentes composantes et acteurs d'une situation, d'un lieu, d'un milieu de création/innovation, les examiner de manière à comprendre les relations entre eux, faire apparaître les liens non évidents

# 2IN4000 – Jeux d'entreprise

Responsables : **Xavier Leon**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS, FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Les jeux d'entreprise proposent une approche pratique, ludique et synthétique de l'économie, de la gestion et de la psychosociologie. Ils constituent une expérience de la décision collective, de l'interdépendance et de l'organisation d'équipe, de la gestion des conflits, de la prise de rôle et du positionnement personnel dans un groupe. Les objectifs principaux sont :

- Découvrir l'entreprise et ses principales fonctions
- S'initier à la gestion et à la comptabilité
- Expérimenter et prendre conscience des processus qui se développent dans une équipe de travail (décision, organisation, etc.)
- Analyser sa contribution au groupe de travail

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine intercalaire avant la ST5

## Prérequis

Des connaissances de base en gestion et une expérience du travail en groupe sont utiles

## Plan détaillé du cours (contenu)

Les jeux d'entreprise sont des simulations de la vie de plusieurs entreprises en concurrence sur un même marché. Une unité de jeu est constituée de 5 ou 6 équipes de 5 ou 6 joueurs chacune. Chaque joueur prend une responsabilité particulière : production, finances, ressources humaines, marketing, direction générale. Au départ la situation des entreprises est identique. La tâche de chaque équipe est d'analyser cette situation de départ et de prendre des décisions : objectifs de vente, de production, prix, etc. Les décisions de chaque équipe, agrégées et confrontées entre elles, dessinent alors un nouvel état du marché où les situations des entreprises se différencient. L'analyse de cette nouvelle situation donne lieu à de nouvelles décisions et plusieurs cycles se succèdent ainsi.

## Déroulement, organisation du cours

Les jeux se déroulent sur 4 journées consécutives, alternant des séquences de simulation et de débriefing.

## Organisation de l'évaluation

Trois dimensions sont prises en compte dans l'évaluation des jeux : • les apprentissages réalisés en économie gestion et en sciences humaines et sociales • la participation (leadership, implication dans le rôle) • la qualité des analyses lors des débriefings tant sur le plan stratégie/gestion que sur celui de la vie de l'équipe au delà d'une journée d'absence injustifiée, les élèves ne valident pas le jeu d'entreprise

## Moyens

Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : Il y a deux types d'enseignants: les animateurs en charge des sessions de jeu et les spécialistes (SHS) en charge des sessions de discussions et débriefings

- Taille des TD (par défaut 35 élèves) : sans objet
- Outils logiciels et nombre de licence nécessaire : sans objet
- Salles de TP (département et capacité d'accueil) : sans objet

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Comprendre le vocabulaire de la gestion d'entreprise
- Comprendre les conditions de croissance et de difficultés d'une entreprise
- Comprendre l'utilité des documents comptables de synthèse
- Comprendre l'interdépendance entre stratégie et décisions opérationnelles
- Comprendre les articulations de fonctions dans un groupe
- Comprendre les phénomènes humains se produisant dans un groupe
- Situer sa contribution personnelle dans une équipe

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Développer une posture de professionnel pertinent, réflexif et éthique (C9)

# 2IN5010 – Bridge Building challenge

Responsables : **Guillaume Puel**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ENERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS, FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Le principe de ce module expérimental est de construire, selon un cahier des charges donné, une maquette de pont en carton capable de supporter la charge la plus grande possible. L'objectif principal est de souligner les interactions entre modélisation, expérimentation et simulation numérique.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée de SG6 et en fin de SG8

## Prérequis

1EL5000 (Mécanique des milieux continus) ou 1EL4000 (Matériaux) ou ST2 CVT (Modélisation, simulations et expérimentations pour la conception de véhicules et d'ouvrages) ou ST4 CVT (Jumeaux numériques pour des constructions et des transports performants)

## Plan détaillé du cours (contenu)

- Lundi, toute la journée (en parallèle) :
  - Caractérisation des propriétés mécaniques du carton
    - essais de traction sur éprouvettes de carton découpées selon différentes directions, afin de déterminer les modules d'élasticité, coefficient de Poisson (par suivi de marqueurs) et les contraintes à la rupture (chaque groupe propose deux éprouvettes différentes et contribue ainsi à l'élaboration d'une base expérimentale collective)
  - Réflexions sur les architectures possibles pour le pont
    - i. utilisation d'un logiciel d'optimisation topologique (TopOpt)
    - ii. étude de premiers modèles simples sur Comsol
- Mardi, toute la journée (en parallèle) :
  - Essais « structurels »
    - essais de compression sur poutres « profilées »
    - essais de traction sur poutres assemblées par collage
    - (éventuellement) essais d'assemblages quelconques
  - Conception des maquettes de ponts
    - dimensionnement précis des maquettes à l'aide de modèles numériques plus fins sur Comsol et des essais structurels
- Mercredi, toute la journée (en parallèle) :
  - Construction des maquettes de ponts (découpe laser des pièces dimensionnées à la Fabrique)
  - Modèles numériques (voire essais expérimentaux) complémentaires
  - Préparation des présentations du lendemain matin
- Jeudi :
  - Matin : présentation des différentes maquettes
    - chaque groupe d'étudiants doit annoncer la charge que pourra supporter leur maquette
    - les groupes votent également pour la maquette qu'ils pensent voir gagner
- Vendredi :

- Matin : test des maquettes de ponts dans une configuration « concours », analyse des résultats des tests et interprétation des écarts avec les prédictions
- En hors présentiel : rédaction d'une note de synthèse sur les apprentissages de l'activité

## Organisation de l'évaluation

Travail au sein du projet + soutenance intermédiaire + note de synthèse finale.

## Moyens

- Outils logiciels : Comsol (module Structural Mechanics)
- Salles de TP : laboratoire LMPS (bloc Matière du bâtiment Eiffel), accueil groupe par groupe pour effectuer les essais

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, les élèves seront capables de :

- mener des essais de caractérisation mécanique d'un matériau ou d'une structure
  - déterminer expérimentalement les propriétés mécaniques d'un matériau en vue de son utilisation dans une structure réelle
  - mener des essais sur des structures réelles afin d'évaluer leurs performances mécaniques
- dimensionner une structure du point de vue mécanique
  - proposer des modèles, analytiques ou numériques, et de complexité croissante, de structures réelles
  - obtenir, à l'aide de ces modèles, des quantités pertinentes pour faire des choix de conception
- présenter de façon convaincante et argumentée une démarche de conception mécanique
  - a. présenter les choix de modélisation et les résultats issus d'un dimensionnement mécanique
  - b. expliquer les différences de performances de la structure réelle par rapport au(x) modèle(s) développé(s)

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Les validations des jalons 2 des compétences C1, C2 et C8 sont liées à l'évaluation du travail individuel tout au long de la semaine, et de la soutenance et de la note de synthèse d'un point de vue collectif.

# 2IN5015 – Numérisation 3D sans contact

Responsables : **Pascal MORENTON**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT GÉNIE INDUSTRIEL ET OPÉRATIONS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Non**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Depuis une vingtaine d'année, les procédés de numérisation 3D (scan 3D) sans contact, notamment par triangulation laser, se sont démocratisés et se sont largement répandus dans de nombreux secteurs d'activités de la construction, de l'industrie ou de la création. L'objectif de cette activité est une première prise de contact avec les techniques de numérisation 3D sans contact, en découvrir les champs d'application possibles, leurs caractéristiques, les méthodologies mises en œuvre. Des questions de métrologie seront notamment abordées pour évaluer la qualité et la fiabilité des numérisations réalisés.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée en fin de SG8

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

Introduction aux techniques de numérisation 3D et à la métrologie  
Prise en main de moyens de numérisation 3D sans contact, réalisation de premiers scans  
Introduction aux logiciels de traitement de nuages de points  
Identification des paramètres influençant la qualité des mesures  
Conception et réalisation de dispositifs permettant d'évaluer les performances  
Réalisation d'une ou plusieurs étude de cas  
Analyse des travaux réalisés et formulation de recommandations méthodologiques pour la mise en œuvre des moyens de numérisation 3D

## Déroulement, organisation du cours

Travaux pratiques et travail expérimental

## Organisation de l'évaluation

Soutenance oral et rédaction d'un rapport d'activités.

## Moyens

Scanners 3D

Logiciels de reconstruction et d'ingénierie inverse



## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Identifier les différentes techniques de numérisation 3D sans contact et leurs principes  
Pratiquer un ou plusieurs moyens de numérisation 3D sans contact  
Déterminer et classer les différents paramètres influençant la qualité de la mesure  
Proposer une méthodologie de mesure adapté au moyen utilisé

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques  
C2 : Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers  
C6 : Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

# 2IN5020 – Innovation des semi-conducteurs

Responsables : **Tanguy Phulpin**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SYSTÈMES D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Non**

## Présentation, objectifs généraux du cours

Le marché des semi-conducteurs, de 1947 à nos jours, a connu une croissance hors du commun. Ils sont aujourd'hui un **pilier** de nos sociétés, et **indispensable** dans quasiment toutes les **innovations**. Cet électif, d'ouverture sur le sujet est indispensable, afin de comprendre l'origine de ces dispositifs et son évolution, ainsi que leur fonctionnement, leur verrous et leur réalisation à travers différentes étapes expérimentales.

Le programme est le suivant, avec en introduction le jeudi après midi précédent des conférences introductives du directeur de la recherche du CEA et de SOITEC et l'IPVF, ... puis le lundi, 6h de cours permettant d'aborder l'aspect physique du sujet: Introduction à l'étude des semi-conducteurs, principe des bandes d'énergie, étude d'une jonction PN et du contrôle par champ électrique, procédés de fabrication des semi-conducteurs et fabrication des composants électroniques.

Dès le mardi, les étudiants seront invité à se rendre dans le laboratoire partenaire du C2N et ou GeePs à Saclay pour manipuler ces composants: fabrication, caractérisation, simulation à tour de rôle  
Le vendredi sera destiné à la rédaction d'un rapport sur les mesures réalisées.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée en SG6

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

Suite à des conférences introductives par le directeur technique du CEA mais aussi SOITEC et l'IPVF, P. Molinié fera le lundi un cours de 2\*3h sur la physique des semi-conducteurs. Vous y verrez le modèle de bandes d'énergie, les matériaux utilisés en électronique, les différents courants, les interfaces dans un composant électrique avec notamment l'étude d'une jonction PN, base de l'électronique. Enfin ce cours vous permettra de comprendre le fonctionnement d'un composant bipolaire et d'un composant MOSFET, base des circuits intégrés certes mais pas que, base de nombreux capteurs et notamment de cellules solaires.

Suite à cette approche, les élèves iront pour 3 jours en laboratoire pour faire un projet de fabrication de composant MOSFET. Les élèves seront séparés en 3 groupes de 6 élèves qui feront une journée fabrication, une journée caractérisation et une journée simulation.

A la suite de ce projet, un temps est réservé pour la rédaction d'un rapport à remettre le vendredi après midi.

A noter que des possibilités de stage et de césure sont souvent proposés par les industriels à l'issue de cet enseignement

## Déroulement, organisation du cours

Attention: 2 jeudi après midi seront occupé. L'un pour des conférences introductives. Et l'autre durant le projet.

En gros, conf le jeudi après midi, puis cours le lundi avant de travailler en projet au C2N ou au GeePs jusqu'à jeudi soir. Ensuite le vendredi est libre pour la rédaction d'un rapport

## Organisation de l'évaluation

Rapport

## Moyens

- Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : P. Molinié, T. Phulpin
- Taille des groupes : 9 binomes soit 18 élèves

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Notions de physique des semi-conducteurs, bande d'énergie, champ électrique, densité de courant, effet de champ, résistance à l'état passant, jonction PN, cellule photovoltaïque  
Par ailleurs, manipulation de semi-conducteur en salle blanche, caractérisation des composants ainsi que simulation des semi-conducteurs

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

A l'issue de cours, les élèves auront acquis les bases pour comprendre le fonctionnement de base des semi-conducteurs.

Ils auront découverts différentes voies existantes pour travailler dans le domaine (réalisation et caractérisation) et quels impacts peuvent apporter ces matériaux dans le monde que nous voulons créer (osons inventer l'avenir!). Ils auront aussi appris à utiliser certains outils de laboratoire (salle blanche, microscopie, ...) et ils auront eu la possibilité d'échanger avec des chercheurs qui développent des solutions technologiques permettant d'améliorer la qualité et la structure de ces matériaux présents par milliards dans le monde qui nous entoure

# 2IN5030 – Travail expérimental de physique

Responsables : **Brahim Dkhil**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT PHYSIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Non**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Il s'agit d'un apprentissage expérimental en physique qui a pour objectifs (i) d'illustrer et mettre en pratique expérimentalement le contenu de l'enseignement de physique de CentraleSupélec, (ii) de faire preuve de créativité et d'initiative, (iii) de travailler en groupe et de façon concertée, (iv) de transmettre le savoir. Pour atteindre ces objectifs, les élèves auront à disposition un ensemble d'équipements et d'appareillages à partir desquels, aidés de leurs enseignants-encadrants, ils devront imaginer et mettre en œuvre leurs propres expériences afin d'illustrer les 5 thèmes physiques suivants : structure de la matière, interaction rayonnement-matière, transition de phase, phénomène de transports, conversion d'énergie.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée de SG6 et de SG8

## Prérequis

Physique de base

## Plan détaillé du cours (contenu)

Chaque groupe sera formé de 10 élèves répartis en 5 binômes (un binôme = un thème physique) et devra avoir un fil rouge (ligne directrice) commun. Les capacités d'accueil et d'encadrement (4 enseignants) permettent d'accueillir 30 élèves au total.

En début de séquence, au cours de deux séances d'une demi-journée, séances qu'on appellera « préparatoires », et avec l'ensemble des encadrants, les élèves devront se répartir et auront le libre arbitre pour définir leur fil rouge et les expériences qu'ils auront à mettre en œuvre et à présenter en avril sur 4 journées.

Au cours des séances préparatoires, les élèves auront accès à une liste des appareillages et matériels (visite salle InnoPhysLab + équipements du laboratoire SPMS) qui leur seront mis pleinement à disposition pour mener à bien leurs expériences. Dans une certaine limite et en fonction des besoins émis, du petit matériel supplémentaire pourra être acheté afin de compléter le matériel déjà mis à disposition.

Chaque groupe aura 4 jours pour monter ses expériences en adéquation avec les thèmes physiques, faire les mesures, critiquer les résultats, et réaliser une vidéo type « youtube » qui sera soumise à un comité externe formé d'enseignants de physique de CentraleSupélec.

## Déroulement, organisation du cours

- 2 séances de 3h de préparation du travail expérimental
- 4 journées de 7,5h de mise en œuvre du travail expérimental et présentation

## Organisation de l'évaluation

L'évaluation se fera sur la base du comportement et travail réalisé au cours de l'ensemble des séances, et de la vidéo présentée.

## Support de cours, bibliographie

Fiches sécurité des différents postes expérimentaux

## Moyens

- Equipe enseignante : 4 enseignants pour 30 élèves
- Taille des groupes : 3 groupes de 10 élèves = 30
- Outils logiciels et nombre de licence nécessaire : aucun a priori
- Salles de TP (département et capacité d'accueil) : Physique, jusqu'à 30 élèves
- Accès à la salle InnoPhys et équipements du labo SPMS

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

consolider les acquis en physique  
savoir mettre en place un protocole expérimental  
travail en groupe, échange et organisation du travail  
prise d'initiative et créativité  
savoir transmettre

# 2IN5050 – Découverte de la radio logicielle

Responsables : **Jacques ANTOINE**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SIGNAL, INFORMATION, COMMUNICATION**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Le spectre radio est une ressource rare partagée au niveau mondial par de nombreux acteurs pour des applications variées (diffusion de contenus multimédias, internet des objets, 5G, systèmes radionavigation par satellite, transports). Ce module expérimental a comme ambition de permettre aux élèves de faire une immersion dans le monde de la radio et de découvrir les technologies sous-jacentes par la pratique en participant à un défi qui consiste à décoder des signaux de radiodiffusion.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée SG6 et SG8

## Prérequis

Traitement du signal, Modélisation, Python. Cet électif pourra être l'occasion de mettre en pratique des notions abordées dans d'autres cours électifs (qu'il n'est pas nécessaire d'avoir suivi) : Principes des télécommunications sans fil, From information theory to IoT networks, Systèmes Electroniques, Théorie des communications, Réseaux de communications mobiles.

## Plan détaillé du cours (contenu)

Une première partie du module expérimental est consacrée à la découverte du spectre radio et des systèmes de radiocommunication. Elle introduit les concepts clés de la radio logicielle (SDR, Software Defined Radio). Les étudiants ont à leur disposition deux cartes de type SDR pour concevoir et réaliser un émetteur et un récepteur, le valider et tester ses performances. L'objectif est d'apprendre toutes les étapes nécessaires pour transformer des données en un signal modulé, l'émettre puis détecter les signaux pour décoder les informations utiles, à la fois d'un point de vue théorique et architecture fonctionnelle et matérielle.

Dans un deuxième temps, un défi sera lancé aux étudiants : choisir un système de diffusion et décoder les signaux correspondants ; par exemple nom d'une station FM(\*) (système RDS(\*)) ou position d'un avion civil (système ADS-B(\*)).

(\*)ADS-B : Automatic dependent surveillance-broadcast ; FM : Frequency Modulation ; RDS : Radio Data System.

Planning de la semaine :

- Introduction à la technologie SDR
- Apport sur les systèmes de diffusion terrestres et sur l'utilisation du spectre radio
- Apport sur les modulations numériques et réalisation d'une transmission entre deux cartes SDR
- Défis : choix d'un système de diffusion et décodage

## Déroulement, organisation du cours

Travaux pratiques alimentés par quelques apports théoriques.

## Organisation de l'évaluation

Un rapport sera remis sur les travaux expérimentaux réalisés. Une présentation sera effectuée à l'issue du défi pour expliquer les choix effectués pour décoder le système de diffusion choisi.

## Support de cours, bibliographie

Présentation des normes étudiées. Compléments de cours.

## Moyens

Equipe enseignante: Jacques Antoine, Raul De Lacerda  
Outils logiciel (GNU radio) et matériel (carte SDR).

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce cours, les élèves seront capables de concevoir et d'implémenter des systèmes de communications numériques sans fil à partir des cartes radio logicielles. Ils seront familiarisés avec les paramètres principaux et le fonctionnement d'une chaîne de transmission numérique.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.2 Modéliser : utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes

C1.3 Résoudre : résoudre un problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation

C2.1 Approfondir un domaine des sciences de l'ingénieur ou une discipline scientifique

C2.2 Importer des connaissances d'autres domaines ou disciplines

C6.3 Traiter des données

C8.1 Construire le collectif pour travailler en équipe

# 2IN5060 – Traitement du signal audio

Responsables : **Jose Picheral**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SIGNAL, INFORMATION, COMMUNICATION**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

La branche du traitement du signal dédiée aux signaux sonores débouche sur de nombreuses applications : séparation de sources sonores, localisation de source, imagerie acoustique, étude des réverbérations de salles, compression...

Dans le cadre des signaux sonores, les études expérimentales sont relativement simples à mettre en place car il est d'une part facile de contrôler les sources sonores (par exemple à l'aide de hauts-parleurs) et d'autre part l'acquisition de signaux sonores se fait aisément à l'aide de microphones.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée SG6 et SG8

## Prérequis

Traitement du Signal, Statistiques et Apprentissage

## Plan détaillé du cours (contenu)

Trois ateliers pourront être abordés dans le cadre de cet électif.

### Acoustique des salles, réverbération

Le son perçu dans une salle est sensiblement différent du son émis en raison des réverbérations sur les objets et les murs de la pièce. Cet effet de réverbération peut être modélisé comme la convolution du signal émis avec la réponse impulsionnelle de la pièce.

L'objectif de cet atelier consiste à réaliser des mesures expérimentales et à mettre en œuvre les traitements nécessaires pour identifier la réponse impulsionnelle de différentes pièces afin de caractériser l'environnement acoustique (par exemple estimation du temps de réverbération) et de synthétiser des signaux réalistes tels qu'on pourrait les entendre dans la pièce.

### Séparation de sources

Le mixage d'un enregistrement audio consiste à mélanger différentes pistes audios pour produire une piste mono, deux pistes stéréo, ou plus (5.1, etc.). Inversement, la séparation de sources a pour but de retrouver ces sources, sans connaissance des gains utilisés pour générer les pistes audios, et avec plus de sources que de pistes. Ce type de technique peut être utilisé pour démixer un enregistrement musical ou séparer des locuteurs dans une pièce.

### Détection de points bruyants (imagerie acoustique)

L'imagerie acoustique consiste à établir une cartographie de la scène sonore considérée de manière à obtenir une image où chaque pixel correspond à l'intensité sonore émise par les sources acoustiques. Grâce à l'imagerie acoustique, on peut ainsi détecter précisément la position de points bruyants sur objet ou dans une scène acoustique quelconque.

Ce type de méthode est rendu nécessaire un réseau de microphones de taille importante afin d'avoir une résolution suffisante. Dans le cadre de cet électif, on disposera d'un réseau de 32 micros.



## Déroulement, organisation du cours

La majorité du temps sera dédié aux travaux pratiques.

Les apports théoriques nécessaires à la compréhension des phénomènes physiques et des traitements seront réalisés sous la forme de courtes interventions orales des enseignants.

## Organisation de l'évaluation

Le travail réalisé sera évalué lors d'une soutenance en trinome.

## Moyens

Les systèmes d'acquisition nécessaires seront mis à disposition des étudiants, par ailleurs des briques logicielles en python seront aussi fournies pour les traitements les plus standards.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Pour chacun des ateliers, il s'agira de concevoir un protocole expérimental de mesure, de le réaliser et de traiter les signaux. L'objectif est de développer une méthodologie permettant de valider les résultats expérimentaux et d'évaluer les performances des traitements utilisés.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C1. Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques
- C2. Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers
- C6. Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

# 2IN5070 – Semaine d'immersion dans les biomatériaux

Responsables : **Pedro Esteves Duarte Augusto**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ENERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **HORS CAMPUS**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif :

Niveau avancé :

---

## Moyens

Platforms of the Chair of Biotechnology to carry out the experimental activities.

Teaching:

- Pedro Augusto: Professor

+ other IEs and IRs of the Chair of Biotechnology

+ lecturers from academic or industrial partners of the Chair of Biotechnology

# 2IN5080 – Physique des décharges électriques (plasmas froids)

Responsables : **Michael Kirkpatrick, Giacomo GALLI, Emmanuel Odic**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SYSTÈMES D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Non**

## Présentation, objectifs généraux du cours

Le plasma, parfois qualifié de quatrième état de la matière, est un gaz ionisé globalement neutre d'un point de vue électrique. Cette neutralité implique que le nombre de porteurs de charge des deux signes est sensiblement égal sur une échelle spatiale dépendant à la fois de la pression et du degré d'ionisation du gaz. Ce dernier paramètre conditionne également la température du plasma. Dans les plasmas à fort degré d'ionisation, comme dans les étoiles ou les réacteurs de fusion nucléaire, la température peut atteindre plusieurs millions de Kelvins. Dans le cas de l'arc électrique, la température peut atteindre 5000 K et dans le phénomène de foudre, 30 000 K (produisant ainsi le tonnerre).

Mais il existe également des plasmas à faible degré d'ionisation (de l'ordre de  $10^{-4}$ ), pour lesquels la température des électrons est de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers de Kelvins alors que la température du gaz reste proche de l'ambiante, traduisant un caractère hors équilibre thermodynamique fort. Ces plasmas sont alors qualifiés de plasmas hors équilibre thermodynamique, également appelés plasmas non thermiques, ou encore plasmas froids.

Ces plasmas, dont le feu de Saint-Elme est un exemple illustrant l'activité électrostatique de l'atmosphère, ont trouvé de nombreuses applications industrielles. Ainsi, dans le domaine du traitement de surface, le bombardement ionique des surfaces au moyen d'un plasma basse pression est utilisé pour la gravure des substrats de silicium (wafers). On utilise également des plasmas à pression atmosphérique pour le traitement de surface de polymères afin d'augmenter leur énergie de surface et de leur conférer des propriétés hydrophiles. Dans le domaine du traitement de fumées, le précipitateur électrostatique ou électrofiltre (procédé Cottrell- 1907) met en œuvre un plasma froid pour collecter les particules. Enfin, le procédé Siemens est utilisé depuis le début du 20ème siècle pour la production industrielle d'ozone, notamment destinée au traitement d'eau. Enfin, les propriétés émissives des plasmas sont également exploitées, par exemple pour l'éclairage à l'aide de tubes fluorescents ou encore plus récemment avec les écrans de grandes dimensions.

Dans la majorité des cas, le plasma est produit par décharges électriques en imposant aux bornes d'un intervalle gazeux un champ électrique intense au moyen d'une paire (au moins) d'électrodes. Cette situation peut donc se rencontrer dès l'instant que des niveaux de tension élevés sont appliqués à un système. Des plasmas sont donc susceptibles d'être produits de façon involontaire dans le secteur de la production, du transport et de la distribution d'énergie électrique. Les décharges constituent alors une nuisance pouvant conduire à la défaillance de composants. Dans le cadre de l'électrification des transports (terrestre et aéronautique), le risque est amplifié par l'augmentation de la tension du réseau embarqué.

Qu'il s'agisse d'un phénomène mis en œuvre au sein d'un réacteur, ou accidentellement produit sur un système de transport/conversion d'énergie électrique, le plasma lui-même et son comportement peuvent être décrits et caractérisés à l'aide de la physique des gaz et de la mécanique des fluides, et en utilisant des grandeurs macroscopiques habituelles, telles que densité, la température, la pression, la vitesse d'écoulement.

Le plasma froid est un milieu à la fois très intéressant et très complexe, et le but de cet cours électif est de donner aux élèves un premier aperçu de la physique de ce phénomène physique en utilisant la décharge électrique comme objet d'étude pour mettre en œuvre des expériences.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée en SG6 et SG8

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

Le premier jour, les élèves suivront un cours général sur les plasmas en classe entière. La classe sera ensuite divisée en deux groupes au sein desquelles des binômes seront constitués ; un groupe explorera la simulation numérique pendant que l'autre conduira des expériences. Les groupes seront par la suite interchangés afin que tous les élèves puissent pratiquer l'activité expérimentale et la simulation.

A la fin de chaque journée, la dernière heure sera utilisée pour avoir un échange constructif (Q&A) entre les élèves, avec le soutien des enseignants.

## Déroulement, organisation du cours

Il s'agit d'un cours basé sur l'expérience qui vise à familiariser les élèves avec la physique des décharges, les questions relatives à la mesure, ainsi qu'à l'influence du profil de tension d'alimentation sur le comportement de la décharge.

La pratique expérimentale sera accompagnée de rappels et compléments théoriques, ainsi que de simulation multiphysique.

## Organisation de l'évaluation

Soutenance de projet

## Support de cours, bibliographie

Les étudiants auront à leur disposition :

- tous les supports utilisés pendant les cours,
- un document-guide comportant les informations nécessaires (expérience, simulation et théorie),
- des articles scientifiques illustrant différents aspects de l'activité et l'état de l'art dans les différents domaines,
- la documentation relative aux instruments utilisés pendant les expériences (alimentation électrique, systèmes de vide, mesures électriques et de pression).

## Moyens

Salle de cours (18 pers) reconfigurable, avec vidéoprotection et WiFi, COMSOL Multiphysics, Alimentations haute tension, enceintes à vide et groupe de pompage, systèmes de mesure des décharges électriques.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

L'objectif est de familiariser les élèves avec l'étude des décharges électrique (plasmas froid). Développer leur esprit critique lors de manipulations/simulations. Apprendre à travailler de concert dans un groupe en alternant et en reliant les concepts théoriques avec les résultats expérimentaux et de simulation. Apprendre à la fin de chaque journée à poser des questions et/ou à restituer/expliciter ce qui a été appris de manière claire et concise à ceux qui le demandent. Effectuer une présentation de 15 minutes (en respectant le temps imparti) en groupe, claire, concise et cohérente, dans laquelle les élèves décrivent et interprètent les résultats obtenus, critiquent de façon constructive les analyses réalisées et les méthodes employées.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

C8 : Mener un projet, une équipe

C2 : Développer une compétence approfondie dans un domaine scientifique ou sectoriel et une famille de métiers

C7 : Savoir convaincre

# 2IN5106 – Le marketing et ses outils: vers un marketing responsable ?

Responsables : **Emmanuel Helbert**

Département de rattachement : **CAMPUS DE METZ**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Non**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

A quoi peut bien servir le Marketing à un ingénieur ? L'objectif de ce cours est de montrer que le marketing n'a pas pour vocation de faire vendre de l'inutile mais peut être un levier pour détecter, initier, accompagner des changements sociétaux majeurs, et un moteur d'innovation technologique en la positionnant comme un moyen et non pas une fin en soi. Les différents concepts et outils seront abordés avec le prisme de l'ingénieur en illustrant comment ils viennent en support de son métier.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée SG6

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

1. Introduction :
  - Définitions
  - Stratégies de l'entreprise/stratégie marketing
  - Marketing stratégique/marketing opérationnel
  - Impact du développement durable sur la démarche Marketing - Opportunités ou contraintes
2. Le marché :
  - a. Des marchés
  - b. Le consommateur
  - c. Les études
  - d. Outils : SWOT, PESTEL
3. La stratégie marketing
  - a. Segmentation
  - b. Ciblage
  - c. Positionnement
4. Le marketing opérationnel
  - a. Mix marketing et développement durable
  - b. Gestion de marque
  - c. Gestion de produit
  - d. Distribution
  - e. Prix
  - f. Communication et responsabilité sociétale des entreprises
  - g. Focus : Marketing digital, marketing de contenu, marketing B2B
5. Le marketing d'aujourd'hui

- a. Lean Start-Up
- b. Design Thinking

## Déroulement, organisation du cours

Alternance entre la présentation des concepts et des travaux de groupe (3-4 étudiants). Chaque groupe explorera un projet qui sera le fil rouge de la semaine permettant la mise en pratique des concepts.

## Organisation de l'évaluation

Alternance entre la présentation des concepts et le travail en groupe (3-4 élèves). Chaque groupe explorera un projet qui sera le fil rouge de la semaine permettant de mettre les concepts en pratique.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À l'issue de ce cours, l'étudiant :

- comprendra la place du Marketing dans les organisations et les liens avec les autres métiers
- comprendra les grands principes du Marketing, son vocabulaire et connaîtra un panel d'outils et leur mise en œuvre.
- Comprendra l'impact d'une démarche « développement durable » sur la stratégie marketing et sur le marketing opérationnel des entreprises

# 2IN5110 – Ethique et Responsabilité

Responsables : **Jean-Marc Camelin**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT DÉVELOPPEMENT PROFESSIONNEL ET MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Oui**

## Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours aborde la question de l'éthique et de la responsabilité dans le métier d'ingénieur, à partir de situations concrètes exposées tout au long de la semaine de séminaire (témoins, vidéos, apports théoriques) telles que les ingénieurs les vivent, et mène à une prise de conscience et une capacité de questionnement individuel sur l'adéquation entre ses actes et décisions et ses valeurs propres.

Cet électif s'adresse aussi bien aux étudiants se dirigeant vers un métier de management, puis éventuellement de décideur à très haut niveau (exemple : prise de décision en conscience), qu'aux étudiants s'orientant vers les métiers de la recherche, y compris fondamentale (exemple : représentation des utilisations futures de sa recherche). Les objectifs sont les suivants :

- Confronter chaque étudiant aux conséquences d'ordre éthique, social, sociétal, économique et politique de son action future comme ingénieur, dans un contexte multiculturel de plus en plus important
- Aider les étudiants à développer leur conscience des grands enjeux éthiques et sociétaux actuels et dans leur carrière future
- Éveiller les étudiants sur ce qui influence leur prise de décision, ceci dès leurs choix de cursus et d'emploi

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée en fin de SG6

## Prérequis

Électif de niveau avancé demandant d'avoir fait l'API de 2<sup>ème</sup> année sur l'éthique

## Plan détaillé du cours (contenu)

- Introduction à l'éthique : la responsabilité, le concept, historique, textes de référence, les "agir" concernés, le sens.
- Illustrations de la problématique : travail (concept, rôle, souffrance au travail, émancipation par le travail), environnement (développement durable, choix à poser, impact), grands enjeux mondiaux
- Compréhension du système : le système actuel (capitalisme, régulation économique, impact sur les actes posés par les décideurs, que mesure-t-on vraiment, PIB), les alternatives (comment penser autrement le monde, microcrédit, économie virtuelle), l'ingénieur du 21<sup>ème</sup> siècle et la science (rôle de l'ingénieur au sein du système, son influence sur les questions éthiques, la recherche et ses impacts)
- L'éthique comme action : aspect individuel (je prends mes décisions, je pose des actes en conscience), décision politique (donner des orientations à l'ensemble de la société), élargir le débat (échelons global-international-national-local, relation au temps court-moyen-long terme, le processus de prise de décision d'un Directeur Général : stratégie, innovation), vous comme étudiants (comment je comprends mon environnement et comment je me projette à l'avenir dans mon métier d'ingénieur, ma césure, mes rêves professionnels)

## Déroulement, organisation du cours

Alternance de séances en plénières et d'ateliers en demi-promo, conférences, témoignages d'Alumni

## Organisation de l'évaluation

Présentation orale d'un projet en groupe réalisé tout au long du séminaire.  
Prise en compte de la participation active lors des conférences.  
Auto-évaluation et évaluation entre pairs sur les compétences

## Support de cours, bibliographie

Support de cours, bibliographie : fournie aux étudiants en introduction du cours

## Moyens

Support de cours, bibliographie : fournie aux étudiants en introduction du cours

Equipe enseignante :

- Fabienne Bergé - enseignante coordinatrice de pôle projet et de l'électif DYW – psychologue du travail
- Bruno Lefèbre - Associé Fondateur Alteralliance - spécialiste psycho-dynamique du travail
- Patricia Midy - enseignante APP/API - coach indépendante
- Gilles Lecerf - Enseignant HEC en Philosophie & technologie
- Conférenciers extérieurs

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Savoir prendre le recul nécessaire par rapport au contexte professionnel pour envisager l'aspect éthique de l'action
- Comprendre les contraintes issues du système socio-économique pour être capable de les questionner
- Faire preuve d'esprit critique et de discernement face au système
- Transformer les difficultés et contraintes en opportunités de mener sa carrière en respectant son éthique personnelle

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

C5.2 Écouter, se faire comprendre et travailler avec des acteurs de diversités, cultures, codes, formations, disciplines, etc. variés

C7 Convaincre

C9 (C9.1-2-3-4) Penser et agir en ingénieur éthique, responsable et intègre en prenant en compte les dimensions environnementales, sociales et sociétales



# 2IN5120 – Finances publiques

Responsables : **Pierre Bertinotti**

Département de rattachement : **CAMPUS DE METZ**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Non**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

A partir de données factuelles : concepts, procédures, chiffres... permettre à chaque étudiant d'élaborer sa propre réflexion sur les grandes problématiques actuelles des finances publiques.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée SG8

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

Introduction

Les finances publiques : de quoi parle-t-on ?

1. Les grandes problématiques liées à la dépense publique et à la fiscalité :  
Les rapports avec la politique, l'économie et la société

2. Les finances de l'État :

Élaboration du budget :

Le contenu : missions, programmes, actions

La procédure : le semestre européen et le semestre national

Les ressources financières de l'État : fiscalité et dette

Exécution du budget : les principales règles de gestion

Contrôle des dépenses et évaluation des actions

3. Les finances des collectivités locales :

Qui finance quoi ? Compétences et dépenses

L'autonomie financière des collectivités territoriales : la fiscalité locale

Élaboration, exécution et contrôle des budgets des collectivités locales

4. Les comptes de la protection sociale :

Le champ de la protection sociale : les différentes prestations sociales

Le financement de la protection sociale : cotisations, impôts et contributions publiques

La protection sociale : une question politique

## Déroulement, organisation du cours

la participation active des étudiants sera privilégiée : brefs exposés introductifs, cas concrets, jeux de rôles... La réflexion collective sera encouragée.

## Organisation de l'évaluation

Regroupés par 3 ou 4, les étudiants réaliseront un mémoire d'une quinzaine de pages sur un thème en liaison avec le cours, décidé en accord avec l'enseignant.

La présentation pourra se faire oralement à l'aide des outils informatiques et numériques habituels.

## Support de cours, bibliographie

### Bibliographie

1. Waserman F., *Les finances publiques*, La Documentation Française, 10ième édition, 2023.
2. Bouvier M., *Les finances locales*, L.G.D.J, 18ième édition, 2020
3. Bouvier M., Esclassan M.-C., Lasalle J.-P., *Finances publiques*, L.G.D.J, 19ième édition, 2020

### Liens utiles

- INSEE <https://www.insee.fr/fr/accueil>
- La plateforme des finances publiques, du budget de l'État et de la performance publique <https://www.budget.gouv.fr>
- Vie publique <https://www.vie-publique.fr>
- Collectivités locales <https://www.collectivites-locales.gouv.fr>
- Légifrance Le service public de la diffusion du droit <https://www.legifrance.gouv.fr>
- Cour des Comptes <https://www.ccomptes.fr/fr>
- Assemblée Nationale <https://www.assemblee-nationale.fr>
- Sénat <http://www.senat.fr>
- La sécurité sociale <https://www.securite-sociale.fr/accueil#>
- Direction de la recherche, des études, de l'évaluation et des statistiques : L'expertise statistique publique en santé et social <https://drees.solidarites-sante.gouv.fr/systeme-de-protection-sociale>
- Agence France Trésor <https://www.aft.gouv.fr>
- Commission européenne [https://ec.europa.eu/info/index\\_fr](https://ec.europa.eu/info/index_fr)

## Moyens

Une présentation PowerPoint servira de support au cours. Elle sera accompagnée de podcasts, de séquences visio et de consultations de sites en ligne.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À l'issue de cours, l'étudiant ou l'étudiante sera en mesure de comprendre les informations quotidiennes sur les finances publiques qu'il s'agisse de l'Etat, des collectivités territoriales, de la protection sociale ou de l'Europe. Il ou elle pourra replacer ces informations dans leur contexte politique et économique. Ces données relatives aux finances publiques constituent un élément essentiel de l'environnement de l'entreprise. Elles influencent les décisions d'investissement et de recherche des entreprises. Elles structurent le comportement économique et social de tous les agents économiques

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Compétences juridiques: notions de droit public, droit parlementaire, droit constitutionnel, droit budgétaire

Compétences en sciences politiques: fonctionnement de l'Etat, des collectivités territoriales et des institutions européennes

Compétences économiques: les interactions entre les finances publiques et l'économie au plan local, national et européen

Des compétences générales pour permettre à chacun d'approfondir ses réflexions politiques

# COURS de LANGUES et CULTURES

# LC0100 – Anglais

Responsables : **Mark Pitt**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT LANGUES ET CULTURES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **30**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **21,00**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

En 1ère et 2ème année, deux cours par an sont proposés, s'étendant chacun sur deux séquences consécutives. En 3A des cours de durée variable sont proposés selon le profil de l'élève.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Deux modules longs par an, chacun s'étendant sur deux séquences, 1 et 2 et/ou 3 et 4

## Prérequis

Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu)

Des cours généraux et thématiques sont proposés, en fonction du niveau et de l'emploi du temps de l'élève

## Déroulement, organisation du cours

Pédagogie active, utilisation du principe de la classe inversée, travail en classe entière ou en petits groupes. Une heure hebdomadaire minimum de travail maison est à prévoir, en renforcement ou en suivi de chaque cours.

## Organisation de l'évaluation

Contrôle continu pour au minimum 80% de la note finale : divers exercices à l'oral et à l'écrit.

## Support de cours, bibliographie

Des supports très variés, allant d'articles et exercices créés pour le cours aux œuvres littéraires et aux manuels d'anglais en fonction du cours choisi.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Consolider et développer les quatre compétences linguistiques (compréhension écrite et orale, expression écrite et orale) qui fourniront les outils pour communiquer dans un environnement scolaire, professionnel et/ou personnel internationalisé et varié.
- **C5** : Consolider et développer les outils d'une compréhension interculturelle qui permettront aux élèves d'amorcer l'ouverture culturelle et d'aborder l'International.
- **C7** : Travailler la compétence savoir convaincre
- Permettre à chacun de développer les moyens de continuer son apprentissage en favorisant l'autonomie et la responsabilité dans le processus d'apprentissage

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

- L'élève aura progressé vers (voire au-delà de) le niveau **C1** requis pour le diplôme CentraleSupélec.
- L'élève aura travaillé et amélioré la compétence interculturelle (**C5**)
- L'élève aura travaillé et amélioré la compétence savoir convaincre (**C7**)

# LC0200 – Français Langue Etrangère

Responsables : **Geraldine Offerdinger**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT LANGUES ET CULTURES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ, CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **30**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **21,00**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Cette fiche concerne l'ensemble des cours de 1re, 2e et 3e année.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

S5 de septembre à janvier S6 de février à juin

## Prérequis

Aucun.

## Plan détaillé du cours (contenu)

Ces cours hebdomadaires sont organisés selon plusieurs niveaux en fonction des résultats obtenus au test de niveau de français. Les cours consistent en ateliers de travaux pratiques permettant de travailler systématiquement : compréhension et communication orale ; compréhension et communication écrite ; compétence structurale (grammaire, vocabulaire). Les étudiants seront amenés à travailler et à présenter en groupe et en individuel des dossiers thématiques variés concernant la culture française contemporaine dans sa relation au passé historique.

## Déroulement, organisation du cours

Chaque élève, après un test de niveau, est placé dans un cours correspondant à son niveau : A1, A2, B1, B2, C1 (cadre européen commun de référence)

## Organisation de l'évaluation

L'évaluation est organisée sous deux formes : contrôle continu et contrôle de fin de semestre.

## Support de cours, bibliographie

Spécifique à chaque cours et établi en fonction du niveau du groupe par le professeur. Documents écrits (presse, littérature, ...), audiovisuels (films, enregistrements sonores, ...), manuels de cours, ...

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Consolider et développer les quatre compétences linguistiques (compréhensions écrite et orale, expressions écrite et orale) qui fourniront les outils pour communiquer dans un environnement scolaire, professionnel ou personnel internationalisé et varié. Consolider et développer les outils d'une compréhension interculturelle qui permettront aux élèves d'amorcer l'ouverture culturelle et d'aborder l'international. Permettre à chacun de développer les moyens de continuer son apprentissage en favorisant l'autonomie et la responsabilité dans le processus d'apprentissage.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Maîtriser le français comme langue d'enseignement supérieur, langue commune de communication internationale sur le campus et dans la communauté de l'école, langue de communication professionnelle. Maîtriser la langue française comme moyen de communication pour accéder aux différents aspects de la culture française contemporaine

# LC0300 – Allemand

Responsables : **Daniela Moncys Moncevicus**

Département de rattachement : **LANGUES ET CULTURES, DÉPARTEMENT LANGUES ET CULTURES**

Langues d'enseignement : **ALLEMAND**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE METZ, CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **28**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **21,00**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

Des cours d'allemand général allant du niveau A0 au niveau C1, avec une spécialisation (cours thématiques) possible à partir du niveau B1+.

Possibilité de E-Tandem avec la RWTH d'Aix-La-Chapelle pour des élèves de niveaux avancés.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

S5 de septembre à janvier S6 de février à juin

## Prérequis

Des cours de niveau débutant (A0) ne sont possibles qu'au premier semestre de la première année.

Si l'on a étudié l'allemand précédemment, le niveau minimum requis à l'issue de la première année est le niveau A2+ et à l'issue de la deuxième année le niveau B1-.

## Plan détaillé du cours (contenu)

ALLEMAND GENERAL

Niveau débutant : Pratique des compétences orales et écrites. Introduction à la culture et à l'actualité des pays germanophones.

Niveau A1-B1 : Acquisition des compétences de base, avec une insistance particulière sur la langue orale et écrite. Approche interculturelle des pays et cultures germanophones.

COURS THEMATIQUES : A partir du niveau B1+ Pratique de la langue allemande à un niveau intermédiaire et avancé d'une part au moyen de séquences thématiques : économie, sciences, histoire, actualité, culture, arts et autres - en fonction aussi de la motivation des apprenants - et d'autre part au moyen de débats hebdomadaires. Tous les cours incluent des exercices de grammaire et de structure à l'écrit et à l'oral. Préparation aux certificats de l'Institut Goethe (B1 à C2) possible.

## Déroulement, organisation du cours

Chaque élève, après un test, est placé dans un cours correspondant à son niveau : A0, A1-A2, B1-B2, C1 (selon le cadre européen commun de référence).

Pendant toute sa scolarité, il suivra - en progressant en niveau - des cours hebdomadaires d'1h30 entre lesquels il fournira un travail individuel ou de groupe d'1h environ.

Les principes de la classe inversée peuvent être appliquées, laissant pendant la séance de cours pleinement place à l'interaction, à l'échange et à la mise en situation.

## Organisation de l'évaluation

Contrôle continu et implication en cours au moins 80%, pouvant aller jusqu'à 100% ; possibilité d'un examen de fin de semestre (examen écrit/test auditif/oral) qui compte au maximum pour 20% de la note

Evaluation écrite et orale du niveau de sortie requis à la fin des cours de langues en 3A : A2- pour ceux qui ont débuté l'allemand à CS, B1 voire plus pour ceux qui ont déjà étudié l'allemand auparavant

## Support de cours, bibliographie

Des supports variés : manuels, documents audio, vidéo, documents écrits, exercices interactifs qui mettent l'accent sur la pratique de la langue et le travail en équipe.

## Moyens

Des cours diversifiés, variés, communicatifs et interactifs adaptés aux intérêts et besoins des apprenants et tournés vers les grands thèmes et tendances de nos sociétés, la culture et l'actualité économique, politique et sociale dans les pays germanophones ainsi que l'interculturalité

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Consolider et développer les quatre compétences linguistiques (compréhension écrite et orale, expression écrite et orale) qui fourniront les outils pour communiquer dans un environnement scolaire, professionnel et/ou personnel internationalisé et varié. Consolider et développer les outils d'une compréhension interculturelle qui permettront aux élèves d'amorcer l'ouverture culturelle et d'aborder l'International. Permettre à chacun de développer les moyens de continuer son apprentissage en favorisant l'autonomie, la responsabilité, le travail en équipe et en mode projet ainsi que l'esprit critique dans le processus d'apprentissage. Proposer, tout au long des trois années d'études, des approches variées et innovantes permettant à chacun de se retrouver dans un enseignement qui convient.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Comprendre et s'exprimer en allemand à l'écrit et à l'oral, aussi bien dans la vie quotidienne que dans un contexte professionnel et académique (stages, échanges académiques, e-tandem ...). Acquérir les compétences interculturelles permettant une meilleure communication avec les interlocuteurs des pays germanophones. Consolider les compétences de l'ingénieur **C5** et **C7** (compétences interculturelles, argumenter et convaincre)



# LC0400 – Espagnol

Responsables : **Antonio Barrejon Lopez**

Département de rattachement : **LANGUES ET CULTURES, DÉPARTEMENT LANGUES ET CULTURES**

Langues d'enseignement : **ESPAGNOL**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE METZ, CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **28**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **21,00**

---

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

S5 de septembre à janvier S6 de février à juin

## Plan détaillé du cours (contenu)

ESPAGNOL GENERAL Niveau débutant : Pratique des compétences orales et écrites. Sensibilisation à la culture et à l'actualité de l'Espagne et de l'Amérique Latine. Niveau A1-B1 : Renforcement des notions fondamentales, avec une insistance particulière sur la langue orale et écrite. Ouverture sur la civilisation de l'Espagne et de l'Amérique Latine. COURS THEMATIQUES - A partir du niveau B2 Bien que l'aspect linguistique reste une composante essentielle de ce cours, les supports utilisés permettent une approximation aux réalités historiques et culturelles des pays hispanophones. -Civilisation et culture espagnoles. -Civilisation et culture latino-américaine. -Espagnol économique. -Cinéma. -Préparation à l'examen officiel de niveau, DELE (« Diploma de Español Lengua Extranjera ») de l'Institut Cervantes.

## Déroulement, organisation du cours

Chaque élève, après un test, est placé dans un cours correspondant à son niveau : A1-A2, B1-B2, C1 (selon le cadre européen commun de référence).

## Organisation de l'évaluation

Contrôle continu 80% minimum ; examen écrit/test auditif/oral à la fin de chaque semestre 20% maximum.

## Support de cours, bibliographie

Les supports sont variés : manuels, documents audio, vidéo, étude de documents écrits, exercices interactifs mettant l'accent sur la pratique de la langue et le travail en équipe.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Consolider et développer les quatre compétences linguistiques (compréhension écrite et orale, expression écrite et orale) qui fourniront les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement scolaire, professionnel et/ou personnel internationalisé et varié. Consolider et développer les outils d'une compréhension interculturelle qui permettront aux élèves d'amorcer l'ouverture culturelle et d'aborder l'International Permettre à chacun de développer les moyens de continuer son apprentissage en favorisant l'autonomie et la responsabilité dans le processus d'apprentissage. Proposer, tout au long de trois années d'études, des approches variées et innovantes permettant à chacun de se retrouver dans un enseignement qui convient.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

Comprendre et s'exprimer en espagnol, aussi bien dans la vie quotidienne que dans un contexte professionnel et académique (stages, échanges académiques ...). Acquérir les compétences interculturelles permettant une meilleure communication avec les interlocuteurs des pays hispanophones.

# LC0500 – Italien

Responsables : **Claude Mezin-Wilkinson**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT LANGUES ET CULTURES, LANGUES ET CULTURES**

Langues d'enseignement : **ITALIEN**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ, CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **28**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **21,00**

---

## Plan détaillé du cours (contenu)

Cours de langue général par niveaux (de débutant à avancé) axé sur le développement des compétences linguistiques (compréhension écrite et orale ; expression écrite et orale en continu et en interaction) afin d'acquérir les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement scolaire, personnel ou professionnel. Les cours visent également à consolider la compréhension culturelle et interculturelle.

## Déroulement, organisation du cours

A l'issue d'un test, les élèves primo arrivants sont placés dans un groupe correspondant à leur niveau. Les niveaux sont actualisés à la fin de chaque semestre, et les groupes constitués avec ces informations. Les cours ont une durée de 1h30 hebdomadaires.

## Organisation de l'évaluation

Contrôle continu 80-100%

Examen écrit/test auditif/oral à la fin de chaque semestre 0-20%

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Consolider et développer les compétences linguistiques (compréhension écrite et orale, expression écrite et orale) qui fourniront les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement scolaire, professionnel et/ou personnel internationalisé et varié.

Consolider et développer les outils d'une compréhension interculturelle qui permettront aux élèves d'amorcer l'ouverture culturelle et d'aborder l'International.

Permettre à chacun de développer les moyens de continuer son apprentissage en favorisant l'autonomie et la responsabilité dans le processus d'apprentissage.

Proposer, tout au long de trois années d'études, des approches variées et innovantes permettant à chacun de se retrouver dans un enseignement qui convient.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

**C5** : Être à l'aise dans un environnement multiculturel et international, et plus particulièrement **C5.1**

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de communiquer selon les compétences du CECR, avec une aisance et justesse accrues.

# LC0600 – Portugais

Responsables : **Claude Mezin-Wilkinson**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT LANGUES ET CULTURES, LANGUES ET CULTURES**

Langues d'enseignement : **PORTUGAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **28**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **21,00**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

### Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

S7 et S8

### Plan détaillé du cours (contenu)

Cours de langue général par niveaux (de débutant à avancé) axé sur le développement des compétences linguistiques (compréhension écrite et orale ; expression écrite et orale en continu et en interaction) afin d'acquérir les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement scolaire, personnel ou professionnel. Les cours visent également à consolider la compréhension culturelle et interculturelle.

### Déroulement, organisation du cours

A l'issue d'un test, les élèves primo arrivants sont placés dans un groupe correspondant à leur niveau. Le niveau des élèves poursuivant leur apprentissage, est actualisé à la fin de chaque semestre, et les groupes constitués avec cette information. Les cours ont une durée de 1h30 hebdomadaires.

### Organisation de l'évaluation

Contrôle continu 80% Examen écrit/test auditif/oral à la fin de chaque semestre 20%

### Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Consolider et développer les compétences linguistiques (compréhension écrite et orale, expression écrite et orale) qui fourniront les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement scolaire, professionnel et/ou personnel internationalisé et varié.

Consolider et développer les outils d'une compréhension interculturelle qui permettront aux élèves d'amorcer l'ouverture culturelle et d'aborder l'International.

Permettre à chacun de développer les moyens de continuer son apprentissage en favorisant l'autonomie et la responsabilité dans le processus d'apprentissage.

Proposer, tout au long de trois années d'études, des approches variées et innovantes permettant à chacun de se retrouver dans un enseignement qui convient.

### Description des compétences acquises à l'issue du cours

**C5** : Être à l'aise dans un environnement multiculturel et international, et plus particulièrement **C5.1**

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de communiquer selon les compétences du CECR, avec une aisance et justesse accrues

# LC0700 – Chinois 2A

Responsables : **Claude Mezin-Wilkinson**

Département de rattachement : **LANGUES ET CULTURES, DÉPARTEMENT LANGUES ET CULTURES**

Langues d'enseignement : **CHINOIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE METZ, CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **28**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **21,00**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours

### Plan détaillé du cours (contenu)

Cours de langue général par niveaux (de débutant à avancé) axé sur le développement des compétences linguistiques (compréhension écrite et orale ; expression écrite et orale en continu et en interaction) afin d'acquérir les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement scolaire, personnel ou professionnel. Les cours visent également à consolider la compréhension culturelle et interculturelle.

### Déroulement, organisation du cours

A l'issu d'un test, les élèves primo arrivants sont placés dans un groupe correspondant à leur niveau. Le niveau des élèves poursuivant leur apprentissage, est actualisé à la fin de chaque semestre, et les groupes constitués avec cette information. Les cours ont une durée de 1h30 hebdomadaires.

### Organisation de l'évaluation

Contrôle continu 80% Examen écrit/test auditif/oral à la fin de chaque semestre 20%

### Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Consolider et développer les compétences linguistiques (compréhension écrite et orale, expression écrite et orale) qui fourniront les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement scolaire, professionnel et/ou personnel internationalisé et varié.

Consolider et développer les outils d'une compréhension interculturelle qui permettront aux élèves d'amorcer l'ouverture culturelle et d'aborder l'International.

Permettre à chacun de développer les moyens de continuer son apprentissage en favorisant l'autonomie et la responsabilité dans le processus d'apprentissage.

Proposer, tout au long de trois années d'études, des approches variées et innovantes permettant à chacun de se retrouver dans un enseignement qui convient.

### Description des compétences acquises à l'issue du cours

**C5** : Être à l'aise dans un environnement multiculturel et international, et plus particulièrement **C5.1**

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de communiquer selon les compétences du CECR, avec une aisance et justesse accrues

# LC0800 – Japonais

Responsables : **Claude Mezin-Wilkinson**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT LANGUES ET CULTURES, LANGUES ET CULTURES**

Langues d'enseignement : **JAPONAIS**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE METZ, CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **28**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **21,00**

---

## Plan détaillé du cours (contenu)

Cours de langue général par niveaux (de débutant à avancé) axé sur le développement des compétences linguistiques (compréhension écrite et orale ; expression écrite et orale en continu et en interaction) afin d'acquérir les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement scolaire, personnel ou professionnel. Les cours visent également à consolider la compréhension culturelle et interculturelle.

## Déroulement, organisation du cours

A l'issue d'un test, les élèves primo arrivants sont placés dans un groupe correspondant à leur niveau. Le niveau des élèves poursuivant leur apprentissage, est actualisé à la fin de chaque semestre, et les groupes constitués avec cette information. Les cours ont une durée de 1h30 hebdomadaires.

## Organisation de l'évaluation

Contrôle continu 80% Examen écrit/test auditif/oral à la fin de chaque semestre 20% En cas d'absence justifiée à l'un des contrôles intermédiaires, la note de ce dernier est remplacée par celle du contrôle final.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Consolider et développer les compétences linguistiques (compréhension écrite et orale, expression écrite et orale) qui fourniront les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement scolaire, professionnel et/ou personnel internationalisé et varié.

Consolider et développer les outils d'une compréhension interculturelle qui permettront aux élèves d'amorcer l'ouverture culturelle et d'aborder l'International.

Permettre à chacun de développer les moyens de continuer son apprentissage en favorisant l'autonomie et la responsabilité dans le processus d'apprentissage.

Proposer, tout au long de trois années d'études, des approches variées et innovantes permettant à chacun de se retrouver dans un enseignement qui convient.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

**C5** : Être à l'aise dans un environnement multiculturel et international, et plus particulièrement **C5.1**

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de communiquer selon les compétences du CECR, avec une aisance et justesse accrues

# LC0900 – Russe

Responsables : **Claude Mezin-Wilkinson**

Département de rattachement : **LANGUES ET CULTURES, DÉPARTEMENT LANGUES ET CULTURES**

Langues d'enseignement : **RUSSE**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE METZ, CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **28**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **21,00**

---

## Plan détaillé du cours (contenu)

Cours de langue général par niveaux (de débutant à avancé) axé sur le développement des compétences linguistiques (compréhension écrite et orale ; expression écrite et orale en continu et en interaction) afin d'acquérir les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement scolaire, personnel ou professionnel. Les cours visent également à consolider la compréhension culturelle et interculturelle.

## Déroulement, organisation du cours

A l'issue d'un test, les élèves primo arrivants sont placés dans un groupe correspondant à leur niveau. Le niveau des élèves poursuivant leur apprentissage, est actualisé à la fin de chaque semestre, et les groupes constitués avec cette information. Les cours ont une durée de 1h30 hebdomadaires.

## Organisation de l'évaluation

Contrôle continu 80% Examen écrit/test auditif/oral à la fin de chaque semestre 20% En cas d'absence justifiée à l'un des contrôles intermédiaires, la note de ce dernier est remplacée par celle du contrôle final.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Consolider et développer les compétences linguistiques (compréhension écrite et orale, expression écrite et orale) qui fourniront les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement scolaire, professionnel et/ou personnel internationalisé et varié.

Consolider et développer les outils d'une compréhension interculturelle qui permettront aux élèves d'amorcer l'ouverture culturelle et d'aborder l'International.

Permettre à chacun de développer les moyens de continuer son apprentissage en favorisant l'autonomie et la responsabilité dans le processus d'apprentissage.

Proposer, tout au long de trois années d'études, des approches variées et innovantes permettant à chacun de se retrouver dans un enseignement qui convient.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

**C5** : Être à l'aise dans un environnement multiculturel et international, et plus particulièrement **C5.1**

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de communiquer selon les compétences du CECR, avec une aisance et justesse accrues

# LC1000 – Arabe

Responsables : **Claude Mezin-Wilkinson**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT LANGUES ET CULTURES, LANGUES ET CULTURES**

Langues d'enseignement : **ARABE**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE METZ, CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **28**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **21,00**

---

## Plan détaillé du cours (contenu)

Cours de langue général par niveaux (de débutant à avancé) axé sur le développement des compétences linguistiques (compréhension écrite et orale ; expression écrite et orale en continu et en interaction) afin d'acquérir les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement scolaire, personnel ou professionnel. Les cours visent également à consolider la compréhension culturelle et interculturelle.

## Déroulement, organisation du cours

A l'issue d'un test, les élèves primo arrivants sont placés dans un groupe correspondant à leur niveau. Le niveau des élèves poursuivant leur apprentissage, est actualisé à la fin de chaque semestre, et les groupes constitués avec cette information. Les cours ont une durée de 1h30 hebdomadaires.

## Organisation de l'évaluation

Contrôle continu 80% Examen écrit/test auditif/oral à la fin de chaque semestre 20% En cas d'absence justifiée à l'un des contrôles intermédiaires, la note de ce dernier est remplacée par celle du contrôle final.

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Consolider et développer les compétences linguistiques (compréhension écrite et orale, expression écrite et orale) qui fourniront les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement scolaire, professionnel et/ou personnel internationalisé et varié.

Consolider et développer les outils d'une compréhension interculturelle qui permettront aux élèves d'amorcer l'ouverture culturelle et d'aborder l'International.

Permettre à chacun de développer les moyens de continuer son apprentissage en favorisant l'autonomie et la responsabilité dans le processus d'apprentissage.

Proposer, tout au long de trois années d'études, des approches variées et innovantes permettant à chacun de se retrouver dans un enseignement qui convient.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

**C5** : Être à l'aise dans un environnement multiculturel et international, et plus particulièrement **C5.1**

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de communiquer selon les compétences du CECR, avec une aisance et justesse accrues

# LC1200 – Hébreu

Responsables : **Claude Mezin-Wilkinson**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT LANGUES ET CULTURES, LANGUES ET CULTURES**

Langues d'enseignement : **HEBREU**

Type de cours :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **28**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **21,00**

---

## Plan détaillé du cours (contenu)

Cours de langue général par niveaux (de débutant à avancé) axé sur le développement des compétences linguistiques (compréhension écrite et orale ; expression écrite et orale en continu et en interaction) afin d'acquérir les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement scolaire, personnel ou professionnel. Les cours visent également à consolider la compréhension culturelle et interculturelle.

## Déroulement, organisation du cours

A l'issue d'un test, les élèves primo arrivants sont placés dans un groupe correspondant à leur niveau. Le niveau des élèves poursuivant leur apprentissage, est actualisé à la fin de chaque semestre, et les groupes constitués avec cette information. Les cours ont une durée de 1h30 hebdomadaires.

## Organisation de l'évaluation

Contrôle continu 80% Examen écrit/test auditif/oral à la fin de chaque semestre 20%

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Consolider et développer les compétences linguistiques (compréhension écrite et orale, expression écrite et orale) qui fourniront les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement scolaire, professionnel et/ou personnel internationalisé et varié.

Consolider et développer les outils d'une compréhension interculturelle qui permettront aux élèves d'amorcer l'ouverture culturelle et d'aborder l'International.

Permettre à chacun de développer les moyens de continuer son apprentissage en favorisant l'autonomie et la responsabilité dans le processus d'apprentissage.

Proposer, tout au long de trois années d'études, des approches variées et innovantes permettant à chacun de se retrouver dans un enseignement qui convient.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

**C5** : Être à l'aise dans un environnement multiculturel et international, et plus particulièrement **C5.1**

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de communiquer selon les compétences du CECR, avec une aisance et justesse accrues