

***Interactions entre énergie nucléaire et énergies renouvelables variables
dans la transition énergétique en France : adaptations du parc
électrique vers plus de flexibilité***

***Interactions between nuclear and variable renewable energies in the
French energy transition: adapting the power mix towards more
flexibility***

par Camille Cany

Résumé de thèse

Doctorat de Génie Industriel

Laboratoire Génie Industriel - CentraleSupélec

N° 2017 – ..



Camille Cany est née le 5 août 1989. Elle obtient son diplôme d'ingénieur en Génie Energétique et Nucléaire à Phelma-Grenoble INP en 2012. Elle obtient, en 2013, un double diplôme de l'Institut d'Etudes Politiques (IEP) de Grenoble où elle effectue le Master « Techniques, Sciences et Démocratie ». Son stage de fin d'études d'ingénieur, effectué au CEA, porte sur la validation d'un code de modélisation de scénarios d'évolution du parc nucléaire français. En parallèle, elle effectue son stage de master 2 avec l'IEP Grenoble pendant lequel elle analyse le processus de décision mis en place dans le cadre la loi sur la gestion des déchets radioactifs. Elle commence sa thèse en 2013 au sein de l'Institut de technico-économie des systèmes énergétiques (I-tésé) au CEA Saclay et avec l'équipe Economie Durable du Laboratoire de Génie Industriel de

CentraleSupélec. Elle s'intéresse dans ce cadre aux effets de l'intégration des énergies renouvelables variables sur le parc nucléaire français et propose des moyens d'adapter le mix électrique dans la période de transition.

Thèse soutenue le 16 mars 2017 à CentraleSupélec

Devant le jury composé de :

Mme Anna Creti, Professeur des universités, Université Paris Dauphine, **Rapporteur**
M. Marc Porcheron, Ingénieur chercheur sénior, HDR, EDF R&D, **Rapporteur**
M. Olivier Béthoux, Maître de conférences, Université Paris-Saclay, **Examineur**
M. Jean-Guy Devezeaux de Lavergne, Ingénieur chercheur, Docteur d'Etat, CEA, **Examineur**
M. Jan Horst Keppler, Professeur des universités, Université Paris Dauphine, **Examineur**
M. Jean-Claude Bocquet, Professeur émérite, CentraleSupélec, **Directeur de thèse**
M. Pascal da Costa, Professeur chargé de cours, CentraleSupélec, **Co-directeur de thèse**
Mme Christine Mansilla, Ingénieur chercheur, HDR, CEA, **Encadrante**

Publications scientifiques

C. Cany, C. Mansilla, P. da Costa and G. Mathonnière, 2017. *Adapting the French nuclear fleet to the integration of variable renewable energies thanks to the production of hydrogen: towards massive production of low carbon hydrogen?* International Journal of Hydrogen Energy, In press.

C. Cany, C. Mansilla, P. da Costa, G. Mathonnière, T. Duquesnoy, A. Baschwitz, 2016. *Nuclear and non-dispatchable renewables: two compatible supply options? The case of the French power mix.* Energy Policy 95, 135–146. doi:10.1016/j.enpol.2016.04.037

C. Cany, C. Mansilla, P. da Costa, G. Mathonnière, JB. Thomas, 2015. *Nuclear power: a promising back-up option to promote renewable penetration in the French power system?* In “Renewable Energy in the Service of Mankind Vol II”. Springer. ed. Sayigh, Ali. ISBN 978-3-319-18215-5.

Conférences

O. Tlili, **C. Cany**, C. Mansilla, J. André, C. Heller, Y. Perez, A. Le Duigou. *Rethinking the way to decarbonize the energy system: prospective study of hydrogen markets attractiveness.* 40th IAEE international conference, 18-21/06/17, Singapore, Malaysia. Accepted.

C. Cany, A. Chazottes, C. Mansilla, G. Mathonnière, P. da Costa. *Which value of nuclear flexibility to foster the integration of intermittent renewable energy sources? Prospective study on technical potentials and economic impacts in the French power system.* 39th IAEE international conference, Bergen, Norway, 19-22/06/16.

M. Leurent, **C. Cany**, 2016. *A comprehensive taxonomy of nuclear non-electrical markets. Application to the market perspectives for France.* 39th IAEE international conference, Bergen, Norway, 19-22/06/16.

C. Cany, C. Mansilla, P. da Costa, G. Mathonnière. *Nuclear and renewable synergies: towards massive low-carbon hydrogen production? The case of the French energy mix.* 21st World Hydrogen Energy Conference (WHEC) 2016. Zaragoza, Spain. 13-16/06/16.

C. Cany, C. Mansilla, P. da Costa, G. Mathonnière, T. Duquesnoy, A. Baschwitz. *Nuclear power fleet replacement: an opportunity for the French energy mix?* Global 2015, Paris, France, 21-24/09/15.

C. Cany, C. Mansilla, G. Mathonnière, P. da Costa. *Nuclear power: what optimal contribution to the French power mix?* 12th International Conference on the European Energy Market (EEM 2015), Lisbon, Portugal, 20-22/05/15.

C. Cany, C. Mansilla, G. Mathonnière, M. Muniglia, J.C. Le Pallec, J.M. Do, M. Berthélemy. *Can nuclear support the integration of renewables? The case of the French electricity mix.* Nugenia Forum, Ljubljana, Slovenia, 13-15/04/15

C. Cany, C. Mansilla, P. da Costa, G. Mathonnière, JB. Thomas. *Nuclear power: a promising back-up option to promote renewable penetration in the French power system?* 13th World Renewable Energy Congress (WREC), Londres, UK, 3-8/08/14.

Le mémoire de thèse et les publications sont disponibles auprès de :

Delphine Martin

Laboratoire Génie Industriel, CentraleSupélec

Campus de Châtenay, Grande Voie des Vignes, 92295 Châtenay Malabry Cedex

Tél : 01 41 13 13 88 – E-mail : delphine.martin@centralesupelec.fr

Résumé :

Le parc électrique français, caractérisé par une part élevée d'électricité nucléaire, est à l'aube d'une période de transition qui s'étendra au-delà de 2050. Cette transition est caractérisée par une augmentation de la part de l'éolien et du solaire et, en parallèle, une réduction de la part du nucléaire dans le mix électrique, laquelle devrait rester toutefois significative. L'intégration de l'éolien et du solaire dans un mix nécessite de mobiliser des moyens de flexibilité supplémentaires pour maintenir le niveau de fiabilité objectif du système, tant dans le court terme que dans le long terme. L'ensemble des leviers du côté de l'offre et de la demande électrique devra être mis en œuvre pour répondre à ces nouveaux besoins de flexibilité. Le parc nucléaire aura son rôle à jouer.

Dans ce contexte, comment la France peut-elle adapter son parc électrique vers plus de flexibilité, tout en conservant un mix bas-carbone et en maîtrisant les coûts associés ? L'objectif de la thèse est d'apporter des éclairages à cette question, par l'intermédiaire d'analyses technico-économiques.

Les interactions entre énergie nucléaire et énergies renouvelables variables sont analysées grâce à deux approches complémentaires : l'une, essentiellement technique, confronte les sollicitations futures du parc nucléaire à ses possibilités théoriques ; l'autre, technico-économique, évalue le coût pour le système électrique de voir assurée une partie de la flexibilité par le nucléaire et examine des leviers pour réduire ce coût et rendre compétitif un parc nucléaire fonctionnant en mode flexible. Ces deux approches sont basées sur la construction de scénarios aux horizons 2030 et 2050.

Nous montrons que les sollicitations en suivi de charge du parc nucléaire croîtront fortement avec l'augmentation de l'éolien et du solaire. Même si le parc possède des marges de manœuvre pour réaliser plus d'opérations de suivi de charge, celles demandées au parc nucléaire en présence de solaire et d'éolien à des taux supérieurs à 30% de la demande électrique paraissent difficilement soutenables techniquement par lui seul. Du point de vue de la gestion opérationnelle du parc nucléaire, nous remarquons qu'il est souhaitable de favoriser le développement de l'éolien par rapport à celui du solaire, puisque c'est ce dernier qui induit les sollicitations extrêmes en puissance.

Le coût de production du nucléaire pourrait augmenter significativement avec la réduction de l'utilisation du parc. Il apparaît alors essentiel de promouvoir un remplacement progressif du parc pour réduire l'impact économique d'une participation à la flexibilité dans la période de transition. Dans le cas de nouveaux investissements nucléaires, une augmentation du prix de la tonne de CO₂ pourrait rendre le back-up nucléaire compétitif face aux centrales à gaz à cycle combiné. Par ailleurs, anticiper le développement de nouveaux débouchés devient crucial pour éclairer les choix d'investissements électriques bas-carbone.

Pour contourner la difficulté posée par la réduction du taux d'utilisation du nucléaire, nous examinons la flexibilité du nucléaire comme un levier d'offre de service énergétique plus vaste, tout en contribuant à la fiabilité du système électrique. La production d'hydrogène permet des synergies entre renouvelables et nucléaire pour valoriser ses surplus de production. Cette solution paraît intéressante dès 2030 si les capacités du parc nucléaire sont conservées et que l'opérateur choisit une stratégie économique adaptée pour s'ouvrir à de nouveaux débouchés. Le développement des exportations ou des usages de la chaleur sont aussi des options envisageables pour l'utilisation des surplus.

Au global, nous recommandons, afin d'encourager les synergies possibles entre énergies bas-carbone, d'appréhender la part du nucléaire en France dans une dynamique adaptée à la pénétration des renouvelables, et au déploiement des marchés des coproduits nucléaires, dont l'hydrogène.

Mots clés : Energie nucléaire, Energies renouvelables, Transition énergétique, Flexibilité, Synergies, Hydrogène

Abstract:

The French power system is transitioning towards a more diversified low-carbon mix. The power mix is characterised by a high nuclear share which is to remain significant and the target to increase variable renewables (wind and solar) by 2050. When introduced massively, wind and solar trigger new needs for back-up power, both in the short and long term, to answer the flexibility required in order to maintain the reliability target level of the power system. All flexibility options should be complementarily developed, given their characteristics, and nuclear will have a role to play in this context.

How could the French power mix be adapted towards more flexibility while maintaining a low-carbon level and mastering associated costs? The purpose of this PhD thesis is to shed light on this issue thanks to a techno-economic analysis.

At first, interactions between nuclear and variable renewables are analysed thanks to two complementary approaches. On the one hand, a technical perspective is adopted by confronting prospective nuclear load-following requirements to the fleet theoretical capabilities. On the other hand, thanks to a techno-economic approach, we evaluate the additional cost of ensuring part of the flexibility requirements with the nuclear fleet and examine options to reduce this cost to make nuclear back-up competitive. These two approaches are based on the construction of realistic scenarios by 2030 and 2050.

The French nuclear fleet will be asked for a strong increase of the load following operations with growing wind and solar shares. Even if the nuclear fleet can enable higher power ramps and amplitude variations, when wind and solar account for more than 30% in the total demand, compensating for the power variations induced would require complementary means. From a fleet management perspective, it would be beneficial to favour wind compared to solar in the power mix. The latter induces extreme power ramps and amplitudes for the nuclear fleet. The nuclear production cost could be significantly increased with the decrease of the nuclear utilisation rate. In the transition phase, it would be of great importance to promote a progressive replacement of the nuclear fleet to compensate for the production cost increase. In the case of new nuclear investments, a carbon price increase could make nuclear back-up able to compete with combined-cycle gas turbine plants as the alternative back-up option. Anticipating the development of new outlets becomes crucial to guide future investments in low-carbon power plants.

To bypass the issue of the nuclear utilisation rate reduction, it would be worth considering taking advantage of the available excess energy to produce valuable products while providing flexibility services to the grid. Hydrogen production, as a flexible power demand, could enhance synergies between nuclear and variable renewables through new markets to valorise the excess nuclear energy. When wind and solar shares increase, along with the hydrogen market expected growth driven by mobility uses, opportunities are created for the nuclear operator. If the French nuclear capacities are maintained and if an adapted business model is developed, nuclear-hydrogen coproduction could answer the hydrogen demand by 2030. Other options could be considered to find outlets to the excess power such as the development of power exportations or the coproduction of heat and electricity.

Overall, in order to foster synergies between low-carbon power plants, the change of the nuclear share in the French power mix should be apprehended through dynamics adapted to the penetration of renewables as well as to the deployment of hydrogen markets, and new markets in general.

Key words: Nuclear energy, Renewable energies, Energy transition, Flexibility, Synergies, Hydrogen

L'Ecole Doctorale Interfaces de l'Université Paris-Saclay

L'Ecole Doctorale **INTERFACES - Approches interdisciplinaires: fondements, applications et innovations** rassemble des équipes dont les sujets de recherche se caractérisent par un positionnement principalement au **croisement de plusieurs disciplines** : la physique, la chimie, la biologie, mais également les mathématiques appliquées ou l'informatique.

L'ED Interfaces est co-opérée par 4 établissements de l'Université Paris-Saclay : Ecole Polytechnique, Université de Versailles - Saint-Quentin, CentraleSupélec, Ecole Nationale Supérieure des Techniques Avancées.

Le Laboratoire Génie Industriel

Le Génie Industriel se donne comme **défi scientifique** de "**maîtriser la conception et le management des systèmes complexes**".

- Maîtriser c'est modéliser, simuler, optimiser, dimensionner, spécifier ...
- La conception est traitée en termes de faisabilité, utilité, utilisabilité, opérabilité, maintenabilité
- Le management est vu sous ses aspects performance, création de valeurs, risques, sûreté de fonctionnement, métriques

Les systèmes complexes abordés sont indifféremment des systèmes techniques, organisationnels, opérationnels, informationnels, décisionnels, tactiques, stratégiques

Le Laboratoire s'organise en quatre équipes de recherche :

- ☞ **Equipe DE : Design Engineering**
- ☞ **Equipe DA : Decision Aid**
- ☞ **Equipe SR : Safety & Risks**
- ☞ **Equipe SE : Sustainable Economy**

Les thèses se font principalement dans l'un des domaines scientifiques relatifs à une équipe, même s'il peut arriver qu'elles se fassent transversalement à ces dernières. C'est la complexité des approches (robust-design, axiomatic-design, approche systémique, recherche opérationnelle, modèles stochastiques, évaluation des performances ...) qui fait la force, la performance et l'originalité du Laboratoire.