**Sujet de Thèse**

Évaluation technico-économique de la stratégie du multi-recyclage des matières dans le cycle nucléaire français.

**Directeur de thèse**: Nicolas THIOLLIERE, enseignant-chercheur, IMT Atlantique

**Co-encadrante**: Fanny COURTIN, enseignant-chercheur, IMT Atlantique

**Laboratoire d’accueil** : SUBATECH, 44300 Nantes

**Contact**: [fanny.courtin@subatech.in2p3](mailto:fanny.courtin@subatech.in2p3), [nicolas.thiolliere@subatech.in2p3.fr](mailto:nicolas.thiolliere@subatech.in2p3.fr)

## Volet « Physique du cycle »

À l’échelle internationale, la transition énergétique est un sujet au cœur de l’élaboration des politiques énergétiques. S’appuyant sur les constats scientifiques des risques associés au changement climatique, les stratégies de transition énergétique visent à réduire le recours aux énergies fossiles, en s’appuyant sur des sources d’énergie décarbonée et en garantissant la sécurité d’approvisionnement et un coût compétitif. Au niveau français, la stratégie de transition énergétique se base notamment sur la Programmation Pluriannuelle de l’Énergie (PPE)[1] établissant un plan pour la gestion des différentes sources d’énergie dans le but de satisfaire les objectifs de politique énergétique établis par le code de l’énergie. Dans le cadre de la dernière PPE, l’élaboration de la stratégie énergétique s’appuie, entre autres, sur la production d’énergie nucléaire, source d’énergie décarbonée.

Le parc nucléaire français actuel, développé depuis la fin des années 1970, se base sur la technologie des réacteurs à eau pressurisée (REP) chargés en combustible UOX et en combustible MOX, produit à l’usine de MELOX à partir du plutonium extrait des combustibles UOX usé retraité à l’usine de La Hague. Le renouvellement du parc REP ainsi que des usines de traitement-recyclage est au cœur de l’élaboration de la stratégie nucléaire française qui se discute notamment au sein du Conseil de Politique Nucléaire (CPN) [2]. Le parc de réacteurs devrait être graduellement remplacé par des REP de troisième génération (EPR) à partir de 2035. Le renouvellement des usines de traitement-recyclage, visé à l’horizon 2040, est dépendant du choix de la stratégie de gestion des matières nucléaires déployée dans le cycle. La dernière PPE a institué comme cadre de référence, le déploiement d’une stratégie de multi-recyclage de l’uranium et du plutonium dans les EPR (MRREP) à l’horizon 2050 ainsi que le report du déploiement d’un parc de réacteurs à neutrons rapides (RNR) à l’horizon 2100.

L’évaluation de ces stratégies du cycle du combustible peut se baser sur des modélisations dynamiques du cycle du combustible, fournissant un aperçu de l’impact des options possibles pour le déploiement de l’énergie nucléaire et une analyse des mécanismes physiques et des interactions dans le cycle du combustible nucléaire. Le volet « Physique du cycle » de cette thèse visera à modéliser ces différentes stratégies de cycle afin de caractériser les usines de traitement-recyclage requise, comme la quantification de leur capacité en flux de matières. Ces modélisations s’appuieront sur l’outil de simulation dynamique du cycle CLASS (Core Library for Advanced Scenario Simulation) [3] développé au CNRS/IN2P3 (laboratoire Subatech et IJCLab). Le code CLASS modélise les différents réacteurs, combustibles et unités du cycle et calcule les inventaires isotopiques et flux de matières au cours du temps. Il s’appuie pour cela sur des modèles de gestions combustibles développés grâce à des codes de neutroniques, en amont de la simulation dynamique du cycle [4,5,6].

## Volet « Technico-économie »

La thèse va dans un second temps se concentrer sur les aspects technico-économiques du cycle du combustible. Les coûts de production relatifs à un parc ouvert (REP UOX) et à un cycle semi-fermé (REP UOX et REP UOX/MOX) sont bien connus. Le doctorant devra en conséquence s’approprier les méthodologies standards associées sur la base de la littérature existante [7,8].

Il est acquis que la part inhérente au combustible (UOX ou MOX) est n’est pas une composante dominante du coût complet du cycle du combustible nucléaire. Cependant, le multi-recyclage des matières implique un changement de paradigme dans la mesure où cela s’accompagnerait d’un redimensionnement des usines de traitement-recyclage (La Hague et MELOX) au-delà du renouvellement considéré à l’heure actuelle.

Un des paramètres fondamentaux pour initier l’évaluation des coûts des stratégies de multi-recyclage en REP et en RNR réside dans les flux de matières (uranium, plutonium et actinides mineurs) transitant dans les usines du cycle. Ces données seront déterminées via le volet physique du cycle de la thèse et constituera l’input de l’évaluation technico-économique.

Sur cette base, le doctorant évaluera au premier ordre les besoins en capacités supplémentaires de traitement-recyclage et calculera les coûts d’investissement associés. Une attention particulière sera portée à l’anticipation des RNR à partir de la deuxième moitié du 21ème siècle. En effet, le traitement-recyclage des matières en RNR implique un dimensionnement différent et probablement plus contraignant qu’en REP. Dans le premier cas considéré, le multi-recyclage anticipe le développement des RNR et l’extension des usines s’adapte à cet objectif. Dans le second, le développement des RNR n’est pas envisagé et l’extension des usines se fera en deux temps et en fonction des besoins anticipés. Dans un premier temps, cette extension sera adaptée au recyclage en REP et dans un second temps, pour le recyclage en RNR.

Nous pourrons alors chiffrer l’éventuel surcoût du multi-recyclage des matières nucléaires via le développement d’un outil de calcul qui sera développé en python. Nous procéderons à une analyse comparative des stratégies suivantes :

* Cycle ouvert (REP UOX)
* Cycle semi-fermé (REP UOX et REP UOX/MOX)
* Cycle fermé (Multi-recyclage en REP sans anticipation des RNR)
* Cycle fermé (Multi-recyclage en REP avec anticipation des RNR)
* Cycle fermé (transition d’un parc REP UOX/MOX vers des RNR)

## Compétences requises

Le travail du doctorant reposera principalement sur le développement et l’utilisation d’outils de modélisation en python et en C++. Un intérêt du doctorant pour la programmation, la modélisation et le calcul scientifique est donc requis.

Une formation en économie de l’énergie n’est pas demandé, cependant une appétence pour ce domaine est nécessaire pour mener à bien ce travail de thèse inter-disciplinaire.

## Références

[1] PPE : Ministère de la transition énergétique, « Programmation pluriannuelle de l'énergie 2019-2028 », 2020.

[2] CPN : « Loi du 22 juin 2023 relative à l’accélération des procédures liées à la construction de nouvelles installations nucléaires à proximité de sites nucléaires existants et au fonctionnement des installations existantes », 2023.

[3] N. Thiolliere et al. A methodology for performing sensitivity analysis in dynamic fuel cycle simulation studies applied to a PWR fleet simulated with the CLASS tool. EPJ Nuclear Sci. Technol., 4 (2018) 13.

[4] Fanny Courtin, Baptiste Leniau, Nicolas Thiollière et al. Neutronic predictors for PWR fuelled with multi-recycled plutonium and applications with the fuel cycle simulation tool CLASS. Progress in Nuclear Energy, Volume 100, Pages 33-47, 2017.

[5] Martin Guillet, Xavier Doligez, Guy Marleau et al. Coupled CLASS and DONJON5 3D full-core calculations and comparison with the neural network approach for fuel cycles involving MOX fueled PWRs. Annals of Nuclear Energy, Volume 152, 2021.

[6] Maxime Paradis, Xavier Doligez, Guy Marleau, Marc Ernoult, Nicolas Thiollière. DONJON5/CLASS coupled simulations of MOX/UO2 heterogeneous PWR core, EPJ Nuclear Sci. Technol. 8, 4 (2022).

[7] De Roo, Guillaume & Parsons, John E., 2011. "A methodology for calculating the levelized cost of electricity in nuclear power systems with fuel recycling," Energy Economics, Elsevier, vol. 33(5), pages 826-839, September.

[8] Cour des comptes. Le coût de production de l’électricité nucléaire actualisation 2014.