

Optimisation de scénarios électro-nucléaires

Porteurs : Matthieu GUILLOT, Khaled HADJ-HAMOU

Laboratoire : DISP (Décisions et Information pour les Systèmes de Production)

Partenaires : CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique), Université Lyon 2 Lumière, INSA Lyon

Nature du financement demandé Stage de M2

Montant de la demande de financement : 3600 euros (6 mois * 600euros)

Résumé : (200 mots)

A l'heure de la décarbonation de nos industries, la production d'électricité par le nucléaire semble être une solution. Dans ce sujet en collaboration avec le CEA, on se propose d'étudier les possibles évolutions d'un parc électro-nucléaire. En particulier, ce stage a pour objet de modéliser les flux de combustibles, neufs et irradiés entre les réacteurs, les usines de retraitement et les usines de fabrication de combustible neuf.

On s'intéressera à la modélisation des flux de combustibles. Dans un premier temps, on procédera à la linéarisation des aspects non-linéaires intrinsèques aux procédés nucléaires (fabrication du combustible neuf, fonctionnement du réacteur...). Dans un second temps, on considèrera un modèle plus réaliste en prenant en compte certaines non-linéarités.

Une fois le modèle créé, il sera utile aux ingénieurs du CEA pour paramétrer leurs outils de simulation, en leur donnant des ensembles de paramètres induisant des trajectoires viables de scénarios, là où actuellement ce paramétrage n'est pas automatisé. Ce stage répond donc à un réel besoin du CEA, et pourra donner lieu à des futures collaborations si la preuve de concept que nous allons donner pendant ce stage porte ses fruits.

Sujet développé :

1. Contexte et motivation

Dans un contexte de lutte contre le changement climatique, la décarbonation de la production énergétique est une question centrale. La France a fait le choix de miser sur une production électrique fortement nucléaire le siècle passé, lui permettant d'afficher aujourd'hui des émissions de CO₂ faibles dans ce domaine. La gestion sur le long terme d'un parc nucléaire est un exercice difficile car sujet à de nombreuses incertitudes : combien de réacteurs seront déployés dans le futur ? Quel type de réacteur sera privilégié ? Quelle stratégie pour la gestion des matières nucléaires ?

Le "scénario électro-nucléaire" fait partie des outils à notre disposition pour travailler autour de ces incertitudes. Il consiste en la simulation dynamique d'un parc nucléaire du point de vue des flux de matières. Plus précisément, l'intégralité du cycle du combustible est modélisée, depuis l'extraction des ressources naturelles, en passant par les procédés de fabrication du combustible, l'irradiation de ce dernier dans le réacteur, le refroidissement du combustible irradié, le recyclage des matières et pour finir la production de déchets. La simulation de scénario repose sur des outils de calcul scientifique permettant une modélisation fine de l'irradiation en cœur ainsi que de l'évolution de la matière au cours du temps. A la fin de la simulation de scénario, il est possible d'accéder aux

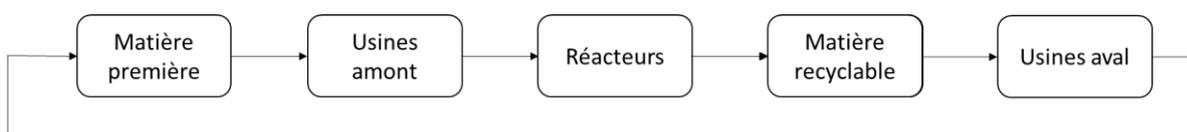
différents flux de matières qui ont eu lieu pendant la durée de la simulation, ainsi qu'à l'évolution des différents stocks suivis (masses de combustibles usés entreposés, masse de plutonium présente dans le parc, masse de déchets générés et stockés, etc.). En particulier, des limites physiques ou technologiques peuvent être mises en lumière grâce à la simulation de scénario. Par exemple, un manque de matière pour alimenter un réacteur peut être détecté, mettant de cette façon en défaut l'évolution du parc étudié. Ou encore, la quantification des flux à traiter au cours du temps donne des indications pour le dimensionnement des usines dans le futur.

2. Positionnement scientifique

Le CEA possède un simulateur qui valide ou non la viabilité des scénarios électro-nucléaires. Le choix des paramètres est un enjeu très important et fait pour l'instant de manière empirique. Cependant, il y a déjà eu au CEA des travaux traitant de l'optimisation dans le choix de ces paramètres, comme dans (Freynet *et al.*, 2016). Ce travail relate d'une optimisation grâce à des heuristiques (algorithmes génétiques), et des limites importantes concernant le passage à l'échelle y sont décelés. Cependant, l'intérêt d'avoir des planifications dynamiques pour les réacteurs est largement prouvé (Tirel *et al.*, 2022). Enfin, les scénarios optimisés faisant l'objet de notre stage devront être évalués en termes de robustesse et/ou résilience. Pour ce dernier point, des avancées importantes ont été faites dans notamment (Zhou *et al.*, 2020) et (Liang *et al.*, 2021).

3. Description du problème

Dans cette étude, on s'intéresse à la modélisation et à l'optimisation d'un scénario électro-nucléaire. On dispose d'un ensemble de combustibles irradiés issus de réacteurs existants. Ces combustibles sont classés selon leur composition. Chaque année, on prend une certaine quantité de matière de chaque type de combustible irradié. Après un retraitement dans des usines dédiées, il est possible d'extraire les isotopes de plutonium qui seront utilisés comme matière première de combustible. Ce combustible neuf ne peut être fabriqué que si la composition de la matière première est satisfaisante, et sera utilisé pour alimenter un réacteur nucléaire.



Par la suite, les combustibles irradiés sont récupérés à la sortie du réacteur et sont remplacés dans des cuves, en attendant d'être retraités. Alors qu'à ce stade les combustibles ne sont retraités qu'une fois, ici c'est un retraitement « illimité » qui est envisagé. Ce retraitement plus poussé permettrait notamment de mieux réutiliser les combustibles ce qui limiterait la consommation d'uranium.

Notre problème consiste à modéliser les flux de combustibles (neuf et irradié) afin de dimensionner les usines de retraitement et par conséquent extraire la bonne quantité de combustible irradié de chaque type à chaque pas de temps considéré sur un horizon de temps déterminé (typiquement 100 ans), tout en respectant deux contraintes dures : d'une part, on doit s'assurer que le stock de matière première ne soit jamais en rupture ; et d'autre part, on doit garantir que la composition de la matière première permette effectivement la fabrication du combustible neuf.

Dans le cadre de ce projet de Master2, on propose de modéliser le choix des quantités de combustibles irradiés et le déplacement des combustibles dans différents états comme un

programme linéaire, en simplifiant dans un premier temps les étapes induisant des contraintes non-linéaires.

Dans un deuxième temps, on pourra complexifier le modèle en introduisant des non-linéarités qui sont propres à certaines étapes de la vie du combustible. Par exemple, les réacteurs ont un comportement intrinsèquement non-linéaire, et la fabrication d'un combustible neuf à partir d'un combustible irradié n'est pas régit pas une des équations linéaires non plus.

Bibliographie

- D. Freynet, C. Coquelet-Pascal, R. Eschbach, G. Krivtchik and E. Merle-Lucotte (2016). Multiobjective optimization for nuclear fleet evolution scenarios using COSI. *EPJ Nuclear Sciences & Technologies*, 2(9).
- J. Liang, M. Ernoult, X. Doligez, S. David, L. Tillard and N. Thiollière (2021). Robustness study of electro-nuclear scenario under disruption. *Journal of nuclear engineering*, 2(1).
- K. Tirel, T. Kooyman, C. Coquelet-Pascal and E. Merle (2022). Coupling reactor design and scenario calculations: a promising method for scenario optimization. *EPJ- Nuclear Sciences & Technologies*, 8(7).
- W. Zhou, G. Krivtchik and P. Blaise (2020). Resilience of nuclear fuel cycle scenarios: Definition, method and application to a fleet with uncertain power decrease. *International journal of energy research*, 45(8).