

Systemes nucléaires et études de scénarios

Nos travaux de recherches s'articulent selon 3 axes qui permettent de développer une expertise académique sur l'énergie nucléaire dans un contexte énergétique global : la physique des réacteurs et la modélisation de l'évolution du combustible pendant l'irradiation (axe 1), l'étude des scénarios de perspectives nucléaires (axe 2) et l'analyse des scénarios énergétiques mondiaux (axe 3). Ces activités portés par le groupe PACS et menées conjointement aux activités dédiées à la chimie des actinides et à l'étude des données nucléaires permettent une meilleure compréhension d'une même thématique à différentes échelles (réacteur, cycle et système énergétique global) afin de mieux maîtriser les approximations des modèles qui s'y réfèrent et leurs interactions entre eux.

L'intégration des connaissances s'appuie sur des codes de simulation propres que nous développons et dont nous assurons le suivi. Il s'agit du code SMURE pour l'étude des réacteurs, du code CLASS pour l'étude des scénarios nucléaires, et plus récemment du code APESE pour analyser les scénarios énergétiques mondiaux. Ce rapport présente ces codes, les méthodologies associées ainsi que leur mise en application dans les principales études que nous mettons en avant ici. Elles concernent la question des incertitudes et biais de modélisation des réacteurs pour l'axe 1, l'étude de scénarios nucléaires (centré sur la problématique du statut du plutonium) pour l'axe 2 et l'analyse de scénarios énergétiques à l'échelle mondial pour l'axe 3.

Notre savoir-faire et notre expertise nous permet d'être au cœur de nombreuses collaborations pour assurer des recherches sur ces 3 axes. Ces collaborations sont développées dans ce rapport, et sont résumées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Résumé des collaborations pour l'activité système et scénarios

Organisme partenaire	Sujet de la collaboration
Subatech Nantes	
LPSC Grenoble	- Développement et maintien de SMURE - Etude des SMR (Master Projet IN2P3 ASSURANCE)
IRSN	- Méthodologie pour les scénarios (projet NEEDS PERMIS) - Encadrement de la thèse de Léa Thillard sur la modélisation des RNR-Na pour CLASS
CEA Cadarache (LECy)	- Méthodologie pour les scénarios (projet NEEDS PERMIS)
IPHC Strasbourg	Propagation des incertitudes des données nucléaires pour les calculs critiques (thèse Eliot Party)
University of Wisconsin-Madison's Department of Engineering Physics	Rôle des hypothèses dans le benchmarking des outils de simulations du cycle
Ecole Polytechnique de Montréal	Implémentation de calculs cœurs dans la modélisation des réacteurs pour les scénarios (Maitrise Martin Guillet)
CEA Saclay (SERMA)	Méthodologie d'échantillonnage et régression non linéaire pour la modélisation des systèmes
LEMNA (Laboratoire d'économie et de Management de Nantes)	Couplage économie/physique du cycle pour les scénarios (projet DIESE) »
EDDEN (Economie du développement durable et de l'énergie à Grenoble)	Couplage économie/physique du cycle pour les scénarios (projet DIESE)
LRGP (Laboratoire réactions et génie des procédés à Nancy)	Développement d'une modélisation du secteur énergétique (projet APESE)
MSE (Maison des Sciences Economiques) – université Paris I la Sorbonne	Couplage d'une modélisation du secteur énergétique et économique (projet APESE)
CEA - LITEN	Développement d'une modélisation du secteur énergétique (projet APESE)

Introduction

Les activités du groupe PACS dédiées à l'étude des systèmes nucléaires et des scénarios de perspectives se font en concertation avec les autres laboratoires de l'IN2P3 qui travaillent sur la thématique (LPSC à Grenoble et Subatech à Nantes). Alors que les équipes grenobloises travaillent plutôt sur les simulations des réacteurs (principes de conceptions, couplage neutronique thermohydraulique, étude de transitoire,...) et que l'équipe de Nantes est centrée sur la méthodologie d'analyse des scénarios nucléaires, le groupe PACS se positionne à l'interface entre les études systèmes et les scénarios. En effet, nous pensons qu'une connaissance poussée de la physique des réacteurs représente une forte valeur ajoutée dans la production et l'analyse de scénarios nucléaires qui nous permet en retour, d'avoir une vision pertinente des systèmes à étudier plus précisément. Historiquement, ce positionnement nous a permis d'explorer les potentialités du cycle thorium autant pour les réacteurs à neutrons rapides que pour les réacteurs à neutrons thermiques. L'objectif était alors l'économie d'uranium naturel et la fermeture du cycle la plus rapide possible tout en limitant la production d'actinides mineurs.

Cependant, les perspectives d'évolution du nucléaire mondiale à l'échelle mondiale ont été revues à la baisse en 2011, ce qui nous a motivées à nous recentrer sur les réacteurs à eau sous pression et les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium en étudiant plus particulièrement la problématique du statut du plutonium. Le développement d'un code de scénario IN2P3 (code CLASS et présenté dans la suite) et l'exploration des erreurs induites par un tel code nous a logiquement conduit à une réflexion sur les erreurs de modélisation dans les réacteurs, et spécifiquement dans les REP. La maîtrise des incertitudes à tous les niveaux (données nucléaires, études des réacteurs et étude des scénarios) et la maîtrise des modèles nous permettent aujourd'hui d'ouvrir de nouvelles questions comme celles des marges opérationnelles dans les scénarios (calcul des quantités de plutonium disponibles pour le déploiement de nouvelles technologies) ou l'étude des stratégies de ruptures (étude du comportement d'un parc suite à un changement brutal d'objectif, situation que l'on peut rencontrer suite à un accident majeur par exemple).

Les problématiques liées à l'énergie nucléaire du futur sont intimement liées à l'évolution du contexte énergétique global. Ceci est particulièrement vrai en France où le mix électrique est actuellement dominé par le nucléaire mais dont sa part est appelée à baisser avec la loi sur la transition énergétique. L'interaction entre le nucléaire et les autres sources d'énergie apporte de nouvelles contraintes sur les systèmes nucléaires et il est important d'étudier la faisabilité de certains scénarios en prenant en compte ces contraintes. Ce type d'études, réalisées en collaboration avec des économistes (de Grenoble et de Nantes), a débuté depuis 2 ans et nous éclaire sur les perspectives de l'énergie nucléaire. Au-delà de l'interaction sur le mix électrique, nous souhaitons aussi développer une expertise sur les scénarios énergétiques mondiaux. Cette réflexion a été initiée dans le cadre de COSIME (Construction d'un Monde Énergétique 2050) [1] porté par le groupe et qui nous a permis de développer le projet APESE, présenté dans la troisième partie de ce rapport.

Le développement et le maintien d'outils spécifiques reste une priorité à double titre. D'une part, le développement et la mise en œuvre de méthodes numériques innovantes nous permet de repenser certaines questions scientifiques (comme nous le montrerons dans la partie sur les scénarios). D'autre part, les codes nous permettent d'intégrer et d'assurer un suivi des connaissances et des compétences développées au cours des stages et des thèses que nous encadrons. Ainsi nous,

assurons aujourd'hui le suivi du code SMURE (code Monte Carlo évoluant développé par le CNRS/IN2P3 et présenté dans la première partie de ce rapport) et le code CLASS.

Ce rapport présente un bilan de la production scientifique des activités systèmes et scénarios des 3 dernières années environ soit la période 2014-2017. Le choix de 2014 n'est pas tout à fait arbitraire puisque c'est l'année où CLASS, le code de scénario électronucléaire du CNRS, a commencé à être opérationnel et c'est aussi l'année où nous avons initié notre collaboration avec les économistes de Paris I la Sorbonne (projets MESCEN et APESE développés dans la troisième partie de ce rapport). La partie sur les perspectives scientifiques est traitée selon le même temps caractéristique et se limitera aux projets scientifiques à 3-5 ans. Les projets à plus long terme que nous pourrions porter dépendront de la restructuration forte prévue pour le laboratoire dans les prochaines années.

1. La physique des réacteurs pour les scénarios nucléaires

Les activités du groupe se focalisent principalement sur l'évolution du combustible dans les systèmes nucléaires afin d'étudier les potentialités des réacteurs du futur pour la réduction de la production des déchets, leur possible recyclage ou pour économiser de l'uranium naturel. Pour cela nous avons développé et nous maintenons, en collaboration avec le LPSC de Grenoble, le code SMURE (Serpent/MCNP Utility for Reactor Evolution), disponible à la NEA depuis 2009. Il s'agit d'un package en C++ qui permet d'interfacer les codes neutroniques Serpent ou MCNP et de les coupler avec des méthodes d'évolution ou des codes de thermodynamique. Alors que Grenoble est en charge des études couplées avec la thermo-hydraulique, le groupe PACS se concentre sur les études d'évolution. SMURE permet donc de réaliser des études sur un concept particulier afin d'étudier et de quantifier les améliorations possibles sur les systèmes du point de vue des problématiques des ressources ou de la production de déchets.

a. SMURE : un code Monte Carlo évoluant

La résolution de l'équation du transport neutronique en milieu critique est, aujourd'hui encore, un enjeu de recherche en tant que tel. Deux méthodes sont utilisées : une résolution déterministe de l'équation de Boltzmann ou une résolution stochastique par méthode Monte-Carlo ; chacune des deux méthodes ayant ses propres atouts et ses limitations. La méthode Monte-Carlo possède l'avantage d'être « universelle » (pas de spécificités liées au combustible, à la technologie du réacteur ou au spectre neutronique) et c'est pour cette raison qu'elle est largement utilisée à l'IN2P3. La résolution de l'équation du transport des neutrons permet de calculer les taux de réactions neutronique de chacun des noyaux présents dans le combustibles pour résoudre l'équation d'évolution de la matière sous irradiation, appelée équation de Bateman et rappelé en équation 1, où N_i représente la concentration atomique de l'isotope i (resp. j), λ_i représente la constante de décroissance de l'isotope i , σ la section efficace (dépendant de l'énergie) et ϕ , le flux neutronique.

Équation 1

$$\frac{dN_i}{dt} = -(\lambda_i N_i + \sum_{r \in \text{réactions}} N_i \cdot \int \sigma_i^r(E) \cdot \phi(E) dE) + (\sum_{j \neq i} \lambda_{j \rightarrow i} N_j + \sum_{j \neq i} N_j \cdot \int \sigma_{j \rightarrow i}(E) \cdot \phi(E) dE)$$

Cependant, dans des géométries critiques de « grande taille » (i.e. dont la dimension caractéristique est très grande devant le libre parcours moyen des neutrons), les codes probabilistes induisent des biais forts et les estimations locales de flux ou de taux de réactions neutronique ne sont pas fiables. L'estimation des incertitudes réelles sur les taux de réactions intégraux avec les méthodes Monte-Carlo a été l'un des objectifs scientifiques du projet NEEDS **M2C2** qui a été initié en 2013 par Joachim Miss de l'IRSN et que le groupe a porté en 2014 et 2015. Ce projet était une collaboration CNRS/IN2P3, CEA/SERMA et IRSN/SNC. Des méthodes innovantes de « biaisage » des particules, basées sur les corrélations spatiales des sites de fission ont été développées dans le but d'améliorer le calcul local du flux neutronique. Cette problématique a été l'objet d'un sujet de stage de L3 (Aliz Matok - 2015)

Pour estimer les taux de réaction intégraux sans apporter d'incertitudes imputables à la méthode Monte-Carlo, nous cherchons donc à profiter des symétries présentes dans le réacteur pour ne simuler qu'une partie d'un assemblage avec des conditions périodiques adéquates. Cet artifice apporte de nouveau biais dans la modélisation du réacteur qui vont alors induire des incertitudes lors du calcul de l'évolution. Ces simplifications, comme nous allons le détailler, concernent essentiellement la gestion de la réactivité ainsi que la géométrie du réacteur qui ont un effet important sur les fuites de neutrons.

b. Représentativité des études assemblages vis-à-vis des irradiations industrielles

Les schémas de calcul déterministes classiques utilisent aussi une représentation simplifiée pour la résolution fine de l'équation de Boltzmann (équation du transport des neutrons). Cette résolution fine, appelée calcul cellule, permet de réaliser des évolutions qui sont ensuite tabulées selon différents paramètres (moyen de contrôle, température, etc...) pour être injecté dans une étape de calcul de cœur qui résout une équation simplifiée (équation de la diffusion) pour calculer le flux et le dépôt de puissance dans le réacteur. Cette étape du calcul cellule est donc réalisée en ayant recours à des hypothèses fortes (fuites négligées ou prise en compte avec une correction dite « de Buckling », moyen de contrôle non simulées, etc...). Nous avons donc entamé une réflexion de fond sur l'impact de ces hypothèses sur le calcul cellule (effectué à l'échelle d'un assemblage dans notre cas), soit pour l'évolution et donc l'étude des scénarios soit pour l'utilisation des données de diffusions ainsi calculées dans l'étape du calcul de cœur. Ces trois dernières années, nous avons essentiellement travaillé sur 2 axes distincts : les modèles de fuites et le suivi de réactivité.

Fuites neutroniques

La thèse d'Alice Somaini [2,3] a été dédiée à la précision du calcul cellule, notamment à l'étude des fuites neutroniques et à leur impact sur une modélisation simplifiée des assemblages REP en évolution. Cette étude poursuivait deux objectifs : la quantification des biais de modélisation qui devront être propagés dans les études de scénarios et la hiérarchisation des phénomènes physiques qui gouvernent l'évolution afin de proposer des schémas innovants. Nous avons ainsi montré que les grandeurs de diffusion calculées grâce à des codes Monte-Carlo étaient largement soumises à caution et qu'un schéma en deux étapes basé sur un couplage probabiliste/déterministe n'est pas encore envisageable comme les modèles de Buckling implémentés en Monte-Carlo n'étaient pas valables dans la majorité des cas.

Les biais d'inventaires sont parfois très conséquents (jusqu'à plusieurs dizaines de %) et doivent être pris en compte dans les études de scénarios. Une collaboration avec Polytechnique Montréal démarre sur ce sujet et est développée dans la partie dédiée aux prospectives : il s'agit d'essayer de modéliser la physique à l'échelle du cœur dans les calculs de scénarios pour réduire ces incertitudes de modélisation.

L'influence de l'environnement des assemblages a aussi été étudiée exhaustivement pendant cette thèse et a été l'objet de trois stages de M1 (Mateusz Maliki en 2014, Kevin Robert en 2015 et Catalin Sindile en 2016). Ces études ont permis de comprendre les effets de compensation d'erreurs qui permettent de négliger l'environnement pour les assemblages dans des réacteurs 100% UOx alors qu'ils sont fondamentaux pour les assemblages dans les réacteurs moxés.

Suivi de la réactivité

La sensibilité des inventaires de sortie à la modélisation du contrôle de la réactivité a aussi été étudiée et a été l'objet d'un stage L3 et d'un stage M1 (Paul Boulard en 2015 et Anthony Nittesh en 2016). Sans surprise, les effets de spectre induits par la concentration en bore diluée dans l'eau primaire sont de première importance et les sections efficaces (et par conséquent le flux neutronique) sont fortement impactés par la modélisation des moyens de contrôle.

Lors d'une irradiation dans un cœur de puissance, le niveau de bore varie d'environ 1200 ppm à 0 pendant toute la campagne. Nous pourrions simuler l'évolution du bore pendant l'irradiation si nous connaissions le temps de fonctionnement du réacteur. Or, il est impossible d'identifier a priori cette grandeur puisque c'est un résultat de nos calculs. Le bore est donc considéré comme constant et nous observons l'instant où la multiplication des neutrons n'est plus suffisante pour maintenir le réacteur critique pour identifier la fin d'irradiation en supposant une anti-réactivité constante des moyens de contrôle en début et en fin de cycle. Les biais apportés par cette hypothèse induisent des erreurs de plusieurs % sur les inventaires de sortie et sur l'estimation du burn-up maximal atteignable.

c. Les incertitudes dues aux données nucléaires

Comme nous venons de le voir, les résultats des calculs d'évolutions sont grandement biaisés à cause des approximations nécessaires dues à la modélisation des réacteurs nucléaires. Lorsque la finalité des études « systèmes » est l'étude de scénarios, ces biais de calculs n'entachent pas nécessairement les conclusions puisque nous cherchons avant tout des tendances et des sensibilités à certains paramètres précis. Cependant, lors de l'étude d'un concept particulier, ces biais deviennent des incertitudes qu'il faut comparer aux incertitudes imputables aux données nucléaires. La propagation de ces incertitudes aux calculs d'évolution a occupé une partie de nos efforts depuis 2012. En effet, nous avons cherché à explorer les méthodes possibles et développer des routines qui permettent ces estimations.

Il existe deux méthodes qui permettent de propager les incertitudes des données nucléaires : la méthode Total Monte-Carlo (dite TMC) et la théorie des perturbations généralisées. La méthode TMC consiste à tirer aléatoirement les paramètres du modèle optique du noyau ce qui permet de créer un grand nombre de bases de données neutroniques, dont la dispersion est représentative de l'incertitude des données nucléaires. Dans un deuxième temps, la méthode consiste à piocher aléatoirement dans ces évaluations pour réaliser les évolutions à l'aide de SMURE. Cette méthode, très coûteuse en temps de calcul, permet alors de calculer les erreurs liées aux évaluations d'un

noyau. Il est par contre difficile de comprendre quelles sont les sources prépondérantes d'incertitudes (quelle réaction et pourquoi) devant les très nombreuses contre-réactions en physique des réacteurs [4].

Nous avons alors étudié les possibilités de la théorie des perturbations généralisée en évolution que nous avons appliquée aussi bien à des réacteurs à neutrons thermiques qu'à des réacteurs à neutrons rapides afin de bien comprendre les possibilités et les limites d'une telle théorie. Le groupe PACS s'est engagé en 2016 dans le projet **SEC** financé par NEEDS (Sensitivity Coefficient Comparison) qui a permis de confronter les méthodes développées par l'IN2P3 aux méthodes de l'IRSN, du CEA et d'EDF.

Aujourd'hui le développement de méthodes d'analyse d'incertitude n'est plus une priorité de recherche pour le groupe. Mais nous avons développé une expertise et des outils propres que nous valorisons auprès des physiciens spécialistes des données nucléaires. Par exemple, afin que l'équipe GRACE de l'IPHC de Strasbourg s'approprie nos outils et méthodes, nous entamons une collaboration dédiée à l'amélioration des sections efficaces de l'²³³U et du ²³²Th et à la réduction des erreurs dans les calculs de réacteurs thoriés dans le cadre de la thèse d'Eliot Party.

2. Les scénarios nucléaires

L'outil SMURE, dédié aux études systèmes, nous permet de réaliser les calculs « réacteurs » d'évolution des matières dans un réacteur. Cependant, dès que l'on envisage la transition d'une stratégie mettant en œuvre des systèmes particuliers vers une autre, SMURE n'est plus adapté. Pour cette raison, le code CLASS (Core Library for Advanced Scenario Simulation) a été développé depuis 2012 à l'IN2P3 (Subatech et IPNO) en collaboration avec l'IRSN. En effet, cet outil permet de simuler l'évolution d'un parc nucléaire complet constitué d'un ensemble de réacteurs, d'usines de retraitement et d'installations de stockage liés entre eux. Il permet de réellement quantifier les consommations de matières naturelles et les productions de déchets quand le combustible nucléaire est recyclé.

Lors du développement de CLASS, nous avons focalisé nos efforts pour développer des algorithmes mettant l'accent sur une bonne représentation de la physique des réacteurs nucléaires. En effet, comme il est impossible de savoir à l'avance quelle sera la composition d'entrée d'un réacteur à un instant donné (évolution des matières en fonction de l'histoire du recyclage), des modèles de chargement (appelé aussi modèle d'équivalence) et des modèles d'irradiation sont utilisés. L'équipe PACS est essentiellement impliquée dans les tests, le développement des modèles d'irradiations et d'équivalence et la réalisation de scénario. A ce titre, nous avons développé un modèle de combustible MOX américié pour les REP et un modèle générique de RNR-Na afin d'étudier la transition d'un parc similaire au parc actuel à un parc qui pourrait préparer l'incinération des actinides mineurs dans les RNR.

Le développement de CLASS nous a permis de nous assurer pleinement une place dans la communauté internationale des scénarios nucléaires. Ainsi, nous avons pu tisser des liens particuliers avec l'université de Madison (Wisconsin) qui développe le code CYCLUS, nous avons intégré l'expert group de la NEA sur les scénarios nucléaires et nous avons organisé en 2016 un workshop international sur les scénarios (DYNAMIC NUCLEAR FUEL CYCLE : <https://lpsc->

indico.in2p3.fr/Indico/event/1357/other-view?view=standard). Ce workshop a été un succès et nous réorganisons la troisième édition en 2018.

a. Modélisation des systèmes pour CLASS

Pour créer un modèle de réacteur, il faut pouvoir prédire les quantités à charger en début d'irradiation et le comportement des matières au cours de cette irradiation, et ce, quel que soit le vecteur isotopique à charger. Il faut donc identifier l'ensemble des compositions isotopiques du plutonium qui pourrait éventuellement servir à charger un réacteur au cours du scénario. Dans le cas des REP, la géométrie est fixée et bien connue et seule la composition du vecteur Pu et l'enrichissement sont des paramètres libres pendant le scénario. Par contre, les géométries des RNR pouvant apparaître dans l'étude des scénarios sont très variables puisque certains sont conçus pour être isogénérateurs alors que d'autres sont conçus pour être incinérateurs de plutonium. L'ensemble des variables gérant l'irradiation du combustible des systèmes est donc dépendante du degré de maturité de la technologie.

Ces dernières années, nous avons créé 3 modèles distincts : un modèle REP avec des combustibles MOX américié (l'américium est considéré comme le plutonium), un modèle RNR générique (qui puisse être utilisé pour les RNR incinérateurs comme pour les RNR surgénérateurs en modifiant la géométrie du combustible) et un modèle pour les Small Modular Reactor chargé avec des combustibles UOX et des combustibles MOX.

Pour chacun de ces trois modèles, la méthodologie est identique : il faut pouvoir identifier la fonction qui prédit le burn-up (et donc le temps de cycle) en fonction de la composition du combustible (isotopie et enrichissement) et la fonction qui prédit les sections efficaces en fonction de la composition initial et du temps. Ces fonctions sont respectivement les fonctions f et g des équations 2 et 3, où ϵ représente l'enrichissement, \vec{Pu} représente le vecteur isotopique, t représente le temps, et $\langle \sigma_{isotope}^{reaction} \rangle$ représente la section efficace moyenne sur le spectre des neutrons présents dans le réacteur de réaction pour chaque isotope dont on suit l'évolution.

Équation 2

$$BU = f(\vec{Pu}, \epsilon)$$

Équation 3

$$\langle \sigma_{isotope}^{reaction} \rangle = g(\vec{Pu}, \epsilon, t)$$

La construction d'un modèle nécessite donc l'identification de l'espace des phases à explorer. Ensuite, nous réalisons un pavage homogène dont la densité dépend de la complexité de la physique en jeu, via un tirage aléatoire selon un hyper cube latin optimisé. Puis nous réalisons pour chacun de ces tirages un calcul précis d'irradiation avec SMURE. Les fonctions sont alors estimées numériquement à l'aide de réseaux de neurones et les régressions (entraînement et test des réseaux) sont effectuées grâce à la routine TMVA de ROOT (outil d'analyse développé par le CERN).

A l'aide de ces modèles (ensemble de fonction f et g des équations 2 et 3), le code CLASS peut, pour chaque irradiation en réacteur rencontrée pendant la simulation, estimer les différentes sections efficaces de capture, de fission et de réaction ($n, 2n$) de chacun des actinides d'intérêt. A

l'aide de ces estimations, l'équation 1 est résolue pour chaque réacteur ce qui permet d'estimer les quantités isotopiques au déchargement de chaque réacteur.

L'utilisation de méthodologies issues du domaine du *machine learning* est source de collaboration en physique des réacteurs [5]. Nous entamons une collaboration avec le CEA Saclay sur l'utilisation d'APOLLO3 pour la création de ces modèles de réacteurs qui se concrétisera avec un stage de M2 qui devrait débiter au printemps 2018. Une partie de notre collaboration avec Montréal est aussi dédiée à l'étude de la prise en compte de la physique à l'échelle cœur dans la construction des modèles pour les scénarios.

Précision du modèle d'irradiation

Le modèle d'irradiation est donc l'ensemble des régressions qui identifient les sections efficaces moyennes de réaction neutronique pour chacun des isotopes considérés en fonction du temps. Les précisions des réseaux de neurones sont excellentes mais ne permettent pas d'avoir une idée de la précision de l'ensemble de la simulation de l'irradiation dans CLASS par rapport à un calcul d'évolution de SMURE. Pour cela, nous comparons, pour chaque point de l'échantillon de l'espace des phases, les quantités en fin d'irradiation de chacun des actinides estimées par le modèle à une valeur de référence identifiée par MURE. Une représentation de cette précision est représentée en figure 1. Chaque point représente un écart entre MURE et le modèle créé ; chaque couleur, représentant un élément chimique. L'axe des abscisses représente l'écart alors que l'axe des ordonnées représente la proportion isotopique en fin d'irradiation de l'isotope considéré.

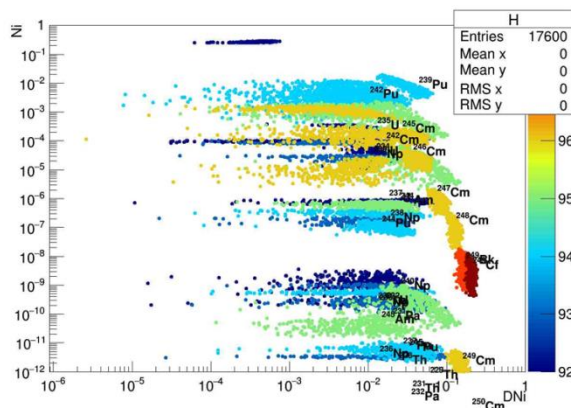


Figure 1.a : Précision du modèle d'irradiation des REP MOX-Am [6]

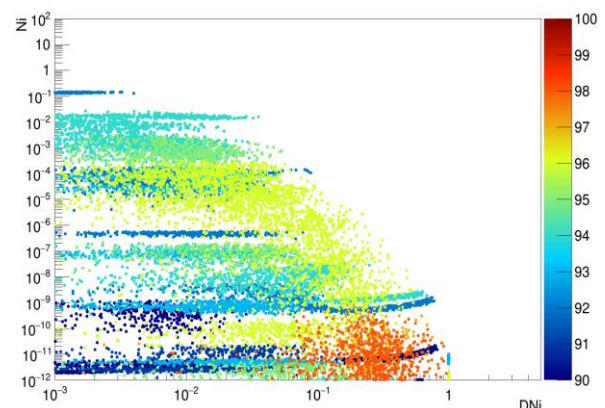


Figure 1.b : Figure 1.a : Précision du modèle d'irradiation des RNR-Na [7]

Nous observons ainsi que des écarts de plusieurs dizaines de % peuvent être observés sur les isotopes du californium et du berkélium. Ces écarts qui peuvent sembler importants sont en réalité acceptables au vu de la très faible proportion de ces isotopes en fin d'irradiation (moins de 0,01 ppm). Par contre, des écarts de près de 3% subsistent sur des isotopes du curium présent à près de 1 ppm malgré le grand nombre d'évolutions qui ont servi à construire le modèle. Une partie de ces écarts est explicable par la simplification de la chaîne de production des différents isotopes dans CLASS qui ne prend en compte que 3 réactions : la fission, la capture et la réaction (n,2n) alors que l'ensemble des réactions neutroniques est simulé dans MURE (n,3), (n,4n), (n,p), (n, alpha),... Ainsi, certains isotopes du plutonium créés par réaction (n,3n) comme le ^{236}Pu et ses descendants sont relativement mal estimés.

La création du modèle RNR-Na et son application dans le cadre de l'étude d'un scénario académique sera l'objet d'une communication orale lors de la prochaine conférence internationale PHYSOR [7] et l'étude de la précision de la base due à la simplification de l'arbre des noyaux et à la suppression de certaines réactions est le sujet de stage de M2 de Guy Liang (actuellement dans le groupe).

b. Méthodologies innovantes d'analyse des scénarios et application à l'étude REP-UOX REP-MOX

L'utilisation des modèles de réacteurs ainsi que l'accès facilité à une grande puissance de calcul permet d'aborder les scénarios nucléaires d'une manière nouvelle et de repenser la relation particulière entre hypothèses et résultats dans ces études. En effet, historiquement une étude de scénario repose sur un jeu de paramètres opérationnels (comme le burn-up des réacteurs, le temps de cooling, la disponibilité des matières et des technologies), parfois implicites (comme l'évolution de la puissance du parc par exemple) qui peuvent fortement conditionner les résultats. Ces paramètres sont des hypothèses qui nécessitent de vérifier spécifiquement la robustesse des résultats obtenus. Aujourd'hui, en considérant ces hypothèses comme des variables, et en échantillonnant ces variables via une approche de type Monte-Carlo, il est possible d'analyser directement la fiabilité des calculs et la méthodologie développée permet même d'inverser l'approche scientifique. Autrement dit, l'étude d'un scénario commence par la construction d'un jeu d'hypothèses qui permet de calculer une observable comme par exemple la quantité de plutonium dans des stocks de combustibles usés. Aujourd'hui, notre méthodologie permet d'identifier l'ensemble des paramètres, soit l'ensemble des parcs possibles, qui permettent d'atteindre un critère donné, soit, dans cet exemple une certaine quantité de plutonium dans les combustibles usés.

Pour illustrer cette méthodologie, considérons un scénario typique REP UOX – REP MOX [8] représenté par la figure 2. Dans ce scénario, la part de la puissance assurée par les réacteurs MOX est échantillonnée entre 0 et 20%, les temps de refroidissement des combustibles sont échantillonnés entre 2 et 18 ans, les burn-up des réacteurs échantillonnés entre 30 et 60 GWj/t et la stratégie de retraitement (quel assemblage est retraité en premier) est aussi tirée aléatoirement.

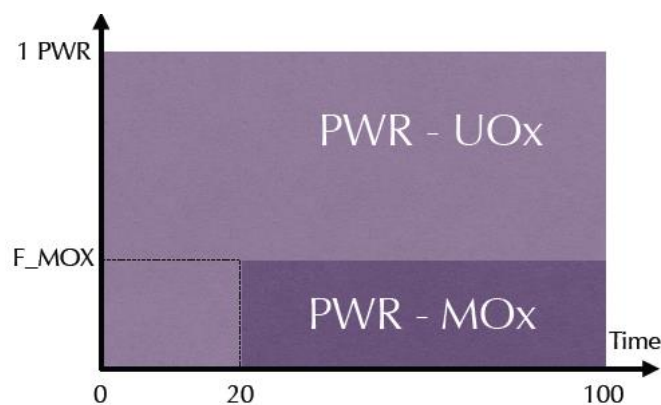


Figure 2 : évolution temporelle de la puissance des réacteurs considérés dans le scénario

Une approche de ce type nous a permis de montrer que la quantité de plutonium dans le Parc en fin de scénario n'est dépendante essentiellement que de deux paramètres : la fraction MOX du parc et le burn up des réacteurs UOX. Cette dépendance est illustrée en figure 3. Pour effectuer une étude exhaustive de la sensibilité aux différents paramètres qui peuvent être quantifiables ou non, nous

utilisons la méthode de Moris ou les indices de Sobol qui permettent de hiérarchiser l'importance des paramètres vis-à-vis d'une observable donnée.

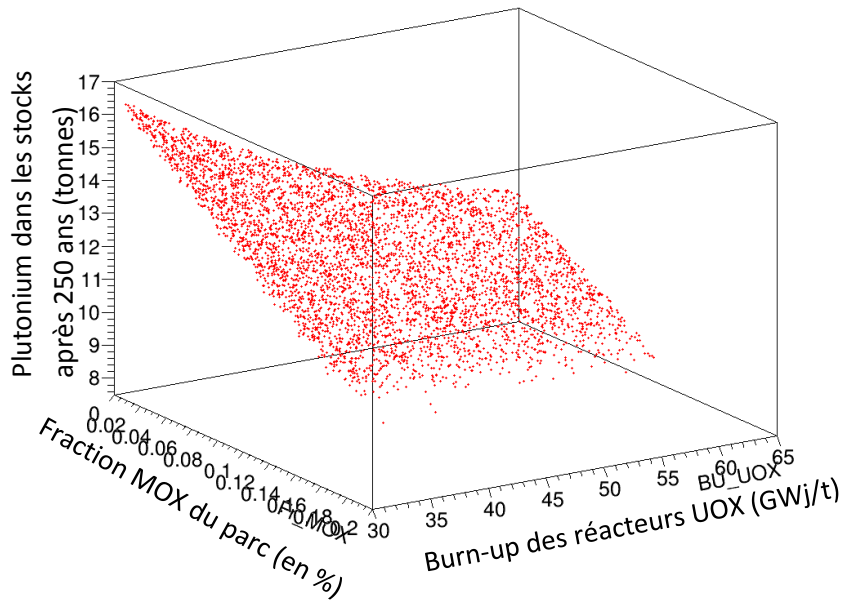


Figure 3 : Quantité de Pu dans les combustibles usés à la fin du scénario en fonction de la fraction des MOx et du BU des UOX

Nous pouvons aussi tracer la quantité de plutonium produit en fonction de la consommation d'uranium naturel (représenté dans la figure 4) et nous montrons ainsi que la production de Pu dans ce type de parc est bornée et qu'il faut au minimum 900 tonnes d'uranium naturel pour produire 1 tonne de plutonium.

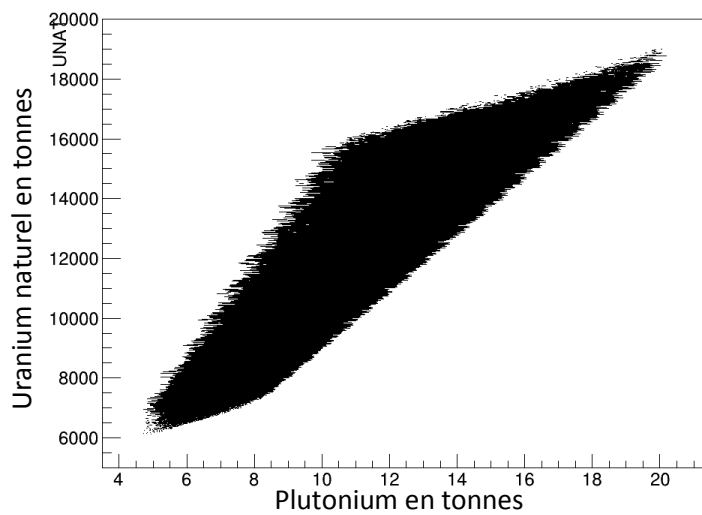


Figure 4 : Production de plutonium (en tonnes) en fonction de la consommation d'uranium naturel (en tonnes), chaque point représente un instant d'un scénario calculé

Cette approche et ce type de méthodologie sont utilisées pour la caractérisation des équilibres dans des parcs plus complexes (REP UOX – REP MOX – RNR) dans le projet **PERMIS** en collaboration avec le CEA Cadarache et l'IRSN et soutenue par NEEDS. Une publication est en cours de rédaction pour identifier les paramètres d'intérêts et la robustesse d'un équilibre à partir d'une perturbation.

c. Scénario pour l'économie de ressources ou la transmutation des actinides mineurs

Multi-recyclage du plutonium dans les REP en combustible uranium et thorium.

Le multi-recyclage du plutonium dans les REP a d'abord été étudié pendant la thèse de Marc Ernoult [9]. Différentes stratégies ont été étudiées et comparées pour quantifier les apports du thorium pour le recyclage du plutonium dans les REP. La conclusion est que l'apport du thorium est très limité vu les faibles performances des REP en termes de conversion de la matière fissile (i.e. production d'uranium 233 à partir du thorium). Nous avons donc démontré que la haute conversion (et donc une transition vers le cycle du thorium) était nécessaire pour optimiser le multi-recyclage du plutonium. Ces études se sont poursuivies dans la thèse de Fanny Courtin [10] qui s'est déroulée à Subatech Nantes sous la direction de Nicolas Thiollière et qui a été dédiée à l'étude dynamique du multi-recyclage du plutonium sur support d'uranium enrichi dans des EPR dans le cadre de l'évolution du parc français.

Mono-recyclage de l'Américium dans les réacteurs REP en MOX

Parallèlement, nous avons finalisé en 2016 l'étude du mono-recyclage des isotopes de l'américium en REP (étude initiée pendant la thèse de Robert Sogbadji soutenue en 2013). Nous avons montré que les taux d'incinération étaient très élevés (jusqu'à 50% pour des campagnes d'irradiations standards) dans ces réacteurs REP. L'étude des scénarios associés montre par contre que les gains au niveau du parc ne sont pas si importants puisque les quantités d'américium ne varient que de 10% dans une stratégie incinératrice par rapport à la stratégie actuelle. La raison vient essentiellement d'un sur-enrichissement des combustibles contenant de l'américium ce qui nécessite une proportion plus importante de combustible UOX dans le parc que dans une stratégie MOX classique. Nous remettons ainsi en cause la pertinence du taux d'incinération en réacteur, grandeur largement utilisée dans toutes les études de transmutation de la littérature.

L'utilisation de l'approche multi-paramétrique nous a aussi permis d'identifier les configurations des parcs qui produisaient le plus d'américium [11]. En effet, il n'était pas évident de trancher la pertinence de la mise en œuvre de combustible MOX-Am pour les REP sachant que le burn up des réacteurs ou le temps de refroidissement des combustibles usés pouvait être des paramètres de plus grande importance que les combustibles MOX ou MOX-Am. Nous avons ainsi montré que l'effet positif mais faible de l'utilisation des MOX-Am sur l'inventaire d'américium reste vrai sur l'ensemble de l'espace des paramètres considérés.

Intérêt des Small Modular Reactor (SMR) pour la gestion du Pu

Le troisième exemple d'étude de scénario que nous souhaitons présenter ici est issu d'un contrat de recherche entre EDF et l'IN2P3 pour étudier la pertinence des SMR à fort taux de conversion pour stabiliser le plutonium dans un parc composé de REP et de SMR. Une fois encore l'utilisation de notre méthode multiparamétrique nous a permis de montrer que les SMR n'offraient pas d'avantages en comparaison des REP pour cette problématique. Les caractéristiques des SMR (peu ou pas de rechargement partiel, petit cœur et fort taux de fuite, haut burn-up) impliquent un sur-enrichissement du combustible en début de cycle. Dans ce cas, les combustibles qui permettent le recyclage du plutonium doivent être fortement enrichis, dépassant les limites de sûreté et impliquant souvent des coefficients de vidange positif (pour les REP il s'agit souvent d'une limite d'enrichissement Pu proche de 11 %). Ainsi, très rapidement, le multi-recyclage du plutonium en

SMR imposera le recours à l'uranium enrichi et conduira à une production forte d'actinide mineur. Ces conclusions sont basées sur l'hypothèse que les limites en enrichissement Pu pour les SMR et pour les REP sont globalement les mêmes, des études de transitoires sur les SMR doivent être effectuées pour s'assurer de la validité de cette hypothèse et devraient être réalisées dans le cadre du master projet IN2P3 ASSURANCE.

L'étude de la physique des SMR a été le sujet d'un stage de M2 (Geoffrey Bonamy en 2017).

3. Scénarios énergétiques globaux

Comme dit en introduction, les études de scénarios permettent de comprendre comment les différentes performances des réacteurs se complètent (ou s'annihilent) lorsque ces réacteurs interagissent dans un parc électronucléaire via des échanges de matière. Cependant, les hypothèses (comme l'évolution de la puissance nucléaire par exemple) conditionnent parfois nos résultats et nous devons donc avoir un regard pertinent sur celles-ci. De plus, nos résultats sont parfois utilisés comme données d'entrée dans des études plus globales de mix-énergétique. Pour ces raisons, il est important (si ce n'est fondamental) d'ouvrir nos travaux vers des études technico-économiques de l'énergie.

a. L'étude des scénarios nucléaire via l'économie

Les coûts de l'électricité nucléaire dépendent de la durée de vie et du type de réacteurs, de leur taux de charge, des politiques de recyclage des combustibles usés, et de gestion des déchets ultimes. Suivant que l'on envisage un scénario de réduction vers 50% ou de maintien de l'énergie nucléaire avec recyclage des matières valorisable dans des réacteurs de nouvelle technologie (stratégie nationale actuelle), les coûts du nucléaire et de l'électricité seront sensiblement différents. Pourtant les études économiques de la transition énergétique calculent le coût de la transition avec des modèles simplifiés, indépendants de la stratégie nucléaire. Ces études se basent sur l'adéquation offre demande heure par heure mais ne prennent pas en compte l'importante capacité du nucléaire à s'adapter aux besoins du réseau. Celui-ci est systématiquement associé à la production d'électricité « de base ».

Parallèlement, les études de scénarios nucléaires font les estimations des inventaires en fonction du temps dans chaque installation du parc. Les besoins en radioprotection, en unité de retraitement et de fabrication du combustible mais aussi la quantité des déchets produits et les besoins en uranium naturel sont déduits de ces inventaires pour une stratégie donnée. Les outils font tous l'hypothèse d'une demande électrique exogène avec un taux de charge fixe pour les réacteurs, indépendante du coût de l'électricité (et de la stratégie) de l'évolution de la demande.

Dans le projet DIESE, initié par Nicolas Thiollière en collaboration avec le laboratoire EDDEN/GAEL de Grenoble et le LEMNA de Nantes et dans laquelle nous prenons une part importante, le développement d'un module économique pour CLASS permettrait de calculer les différents coûts de l'électricité nucléaire de lier la dynamique de l'énergie nucléaire à celle de la demande d'électricité. Un projet de plus grande envergure de couplage entre les études économiques de scénarios énergétiques et les études physiques des scénarios nucléaire a été le sujet de la demande ANR i-Teen déposée deux ans de suite mais qui n'a malheureusement pas passé la deuxième phase de sélection.

b. L'analyse des scénarios énergétiques mondiaux

Dans le but de développer nos compétences sur les scénarios énergétiques globaux tout en mettant à profit notre expertise sur l'énergie nucléaire, nous avons répondu favorablement à une demande de collaboration avec Gaël Giraud, économiste de l'université Paris I - la Sorbonne. De ce travail collaboratif entre économistes et physiciens a émergé un nouveau projet dont le but est de modéliser le secteur de production économique et son couplage avec le secteur de production énergétique. Ensemble, nous avons défini les grandeurs économiques et énergétiques pertinentes, les relations entre elles et leur évolution pour converger vers un ensemble d'équations couplées décrivant la dynamique de l'ensemble de ces grandeurs et de leurs effets mutuels.

En amont de ce couplage, le secteur énergétique fait l'objet d'une modélisation indépendante que nous avons construite à partir d'un modèle macro-économique basé sur une approche dynamique de Goodwin-Keen et couplé au formalisme « Input/Output » de Leontief. Elle a pour objectif d'analyser sous l'angle physique la mise en œuvre d'une transition énergétique donnée par un scénario en termes d'énergie « grise » ou auto-consommée pour la production d'énergie en tant que telle. Cette modélisation de la production d'énergie permettra à terme de l'insérer dans un modèle global intégrant le secteur de production économique afin d'analyser l'impact d'une transition énergétique sur l'économie.

Les paramètres d'entrée du modèle énergétique sont issus des scénarios en termes de déploiement de nouvelles installations, depuis l'exploitation de la source jusqu'à sa transformation en différents vecteurs (électricité, chaleur, carburant) et de leurs usages dans les principaux secteurs de consommation (industrie, transport et résidentiel/tertiaire). L'énergie finalement disponible i.e. servant à alimenter réellement l'économie s'obtient en déduisant l'énergie « grise » de l'énergie brute produite par un mix donné. Pour un scénario donné, il s'agit donc de déterminer la production des principaux vecteurs d'énergie, électricité, chaleur et carburant, à partir d'un mix de sources primaires, et de vérifier que cette production s'effectue dans les proportions permettant conjointement d'opérer la transition du secteur énergétique et de satisfaire les différents besoins des secteurs de consommation. Il convient donc que l'énergie « grise » consommée à la fois pour la construction des installations et leur fonctionnement soit quantifiée en termes de vecteurs d'énergie. La mise en œuvre de la modélisation du secteur de production d'énergie pour mener une analyse comparative des scénarios du point de vue de l'énergie « grise » consommée par la transition qu'ils proposent a donc nécessité le développement d'une méthodologie selon les 3 axes suivant :

Analyse de scénario en vue de transposer l'évolution d'un mix en grandeurs compatibles avec la modélisation du secteur de l'énergie

Les données relatives à un mix énergétique et le degré de détail des informations fournies sont différentes d'un scénario à l'autre. Le mix peut être présenté du point des sources primaires d'énergie et/ou des vecteurs qu'elles produisent et/ou de l'énergie finale disponible dans les différents secteurs de consommation. La production de vecteurs à partir des sources (gaz → chaleur, biomasse → biocarburant, panneaux photovoltaïques → électricité) et leur évolution lors de la transition est nécessaire pour notre modélisation car elle permet d'identifier les installations amenées à être déployées et donc le capital énergétique que leur mise en œuvre consommera. Cette production repose sur la transformation de l'énergie primaire en vecteurs qui obéit à certaines

conventions (énergie de stock/énergie de flux, production d'électricité à partir de chaleur) et relève de certaines hypothèses sur les performances des installations (rendement, facteur de charge) ainsi que sur les pertes liées au transport de l'énergie jusqu'au consommateur qui sont rarement explicitées dans les scénarios. Les mêmes difficultés sont également observées pour le passage de l'énergie sous forme de différents vecteurs en énergie finale effectivement disponible pour les consommateurs. La méthodologie mise en place a consisté à analyser en détail le mix énergétique mondial actuel en recoupant les informations issues de différents organismes comme l'AIE et les bases de données énergétiques de type ENERDATA. Ce travail a permis d'obtenir un ensemble de paramètres et d'hypothèses cohérentes pour corréliser production d'énergie primaire/ production de vecteurs/production d'énergie finale et caractériser les installations associées. Sur la base de ces valeurs et quelle que soit la façon dont le mix est présenté dans un scénario donné, nous pouvons ainsi calculer pour chaque source la quantité de chaque vecteur qu'elle est amenée à produire et les unités de production associées qui seront à déployer lors de la transition énergétique.

Identification des principales filières énergétiques

Pour analyser les scénarios mondiaux de manière cohérente et homogène, il s'est agi d'identifier les principales filières énergétiques que les scénarios appellent dans des proportions différentes pour opérer la transition énergétique. Pour construire cet ensemble de filières, nous nous sommes basés à la fois sur l'analyse de trois scénarios proposant des mix énergétiques très différents et à la fois sur l'expertise de nos partenaires notamment pour les technologies liées à la biomasse qui sont particulièrement foisonnantes. Les trois scénarios mondiaux sont ECOFYS-WWF où la biomasse et les énergies renouvelables jouent un rôle prépondérant ; BLUE MAP – AIE qui propose un mix plus diversifié où apparaissent dans des proportions semblables le nucléaire, les fossiles et les renouvelables ; Scénario mondial « tout électrique » tel que proposé par A. Garcia-Olivares, Energy Policy 41 (2012) 561.

De cette manière, nous avons pu identifier 25 filières énergétiques source primaire → vecteur pour lesquelles nous avons déterminé les procédés et les équipements lourds associés.

Energie « grise »

Une partie de l'énergie « grise » est imputable au capital, c'est-à-dire à la construction de l'ensemble des équipements et infrastructures des chaînes énergétiques appelées par le scénario, leur maintien à un niveau de production optimal et leur renouvellement. L'autre partie est consommée pour assurer le fonctionnement de ces installations, aussi bien au niveau de la source que des consommateurs. Dans les deux cas, nous avons adopté une méthodologie inspirée de l'Analyse de Cycle de Vie. Concernant le capital énergétique nécessaire à la construction des installations, son estimation s'effectue à partir des quantités des principaux matériaux utilisés : béton, acier, aluminium, cuivre, verre, silicium. A partir de l'énergie consommée pour l'élaboration de chacun de ces matériaux, depuis son extraction jusqu'à son usage, sous forme d'électricité, de chaleur et de carburant, nous pouvons calculer l'énergie consommée par la construction d'une installation ramenée à l'énergie totale qu'elle produira sur sa durée de vie. Concernant la production d'énergie, il s'agit de calculer l'énergie consommée en continu sous la forme de ces trois vecteurs pour les procédés associés.

Une première étude bibliographique avait mis en évidence une très grande disparité entre les valeurs de l'énergie consommée pour le capital et le fonctionnement lorsqu'elles existaient, et

surtout que les données disponibles ne couvraient pas l'ensemble des filières énergétiques identifiées. Grâce au consortium d'experts sur les différentes filières énergétiques que nous avons construit autour de ce projet et en s'appuyant sur les bases de données de type ECO-INVENT, nous avons pu obtenir pour les 25 filières énergétiques identifiées des premières estimations de l'énergie « grise » consommée sous forme de chaleur, d'électricité et de carburant, pour la construction des installations et leur fonctionnement lorsqu'elles produisent l'énergie. Ces valeurs ne concernent que la première étape de la conversion de l'énergie primaire en vecteur et constituent donc une estimation basse de l'énergie « grise ». A terme, nous envisageons d'inclure l'énergie « grise » associée à la consommation des vecteurs par les différents secteurs de consommation.

L'étude comparative des scénarios WWF et AIE feront l'objet d'une présentation orale lors du workshop « Science & Energy » qui se tiendra à l'école de Physique des Houches en mars 2018. De plus, un article est en cours de préparation sur notre modélisation et notre méthodologie d'analyse.

Depuis sa mise en œuvre en 2015, ce projet a obtenu un financement annuel de la mission pour l'interdisciplinarité du CNRS via le projet MESCEN puis le projet APESE. Il a notamment permis l'accueil d'un stagiaire de M2 (Lise Eychène) pendant 6 mois.

Perspectives

Les prochaines années devraient permettre de consolider les progrès réalisés par le groupe, autant du point de vue de l'étude des systèmes que du point de vue de l'analyse de scénarios nucléaires et énergétiques.

Les avancées sur la modélisation des systèmes nucléaires pour l'étude des scénarios se font notamment via deux collaborations :

- La première se fait dans le cadre de la thèse de Léa Tillard, réalisé à l'IRSN pour l'analyse des scénarios du Plan National de Gestion des Matières et des Déchets Radioactifs (PNGMDR) et dont nous prenons une part active dans l'encadrement scientifique. Cette thèse permettra notamment une modélisation physique des cœurs CFV (cœur dit « faible vidange ») dans les calculs de scénarios
- La deuxième concerne le travail commun initié avec Guy Marleau de l'école Polytechnique de Montréal, notamment via le co-encadrement de la Maitrise de recherche de Martin Guillet. Dans ce travail nous mettrons l'accent sur un couplage entre les calculs cœurs et les calculs de scénarios afin d'intégrer les considérations de physique à l'échelle du cœur du réacteur dans la modélisation des systèmes pour CLASS.

Ces deux actions poursuivent le même objectif : la maîtrise des schémas de calculs pour une modélisation physique des réacteurs de plus en plus représentative dans l'étude des scénarios. Parallèlement, nous engageons une réflexion sur l'exploitation des potentialités des méthodes de régression numérique non-linéaire en collaboration avec le CEA Saclay (SERMA). L'objectif est de trouver les méthodes optimales (compromis entre temps de calcul et précision) pour l'échantillonnage et les régressions qui permettent de prédire les sections efficaces et la réactivité en fonction de l'irradiation pour un système donné.

L'ensemble de nos collaborations et de nos projets de recherche en physique des réacteurs poursuivent un objectif scientifique global : la maîtrise de la physique à toutes les échelles (cellule, cœur, parc) afin de les intégrer dans des codes de simulation appropriés et dont nous contrôlons les incertitudes de A à Z. Avec une telle représentation et l'application des méthodes récemment développées, remettant en cause la distinction entre paramètres d'entrée et observables, nous pouvons aborder de nouvelles questions comme les marges opérationnelles (marge plutonium pour le déploiement des RNR par exemple), les stratégies dites de ruptures (quelle réponse à un parc donnée suite à un accident nucléaire majeur par exemple) ou encore la flexibilité d'une stratégie à changer de voie de sortie (comment déployer des RNR alors que le parc est engagé dans l'incinération du plutonium par exemple). La prochaine thèse que le groupe va porter et qui devrait débiter à l'automne 2018 portera notamment sur cette dernière question et on cherchera à étudier dynamiquement la possibilité d'un parc à entamer brusquement (et dans un horizon temporel aléatoire) une sortie du nucléaire alors que ce parc est conçu pour une transition REP/RNR classique.

Concernant les études de scénarios énergétiques mondiaux, les premiers résultats du code APESE montrent que la méthodologie proposée par le groupe peut discriminer les scénarios réalisables. En effet, il arrive que l'énergie nécessaire pour réaliser la transition représente plus de 50% de l'énergie totale produite par le système énergétique dans certains scénarios analysés, ce qui n'est clairement pas réaliste. Cependant, les résultats étant dépendants des données d'entrée, ceux-ci doivent être éprouvés via des études de sensibilités aux données de consommation énergétique de la construction de nouvelles installations et de leur fonctionnement. Devant les incertitudes inhérentes aux données, il faudra développer de nouvelles méthodologies comme par exemple des algorithmes de type Monte-Carlo pour analyser la dispersion des résultats. Ces méthodologies seront directement adaptées de celles que nous avons développées pour les scénarios nucléaires. Ce travail d'analyse de sensibilité alimentera aussi le consortium d'expert des différentes filières énergétiques pour concentrer les efforts sur la production des données de consommation énergétique pour le capital et le fonctionnement des filières qui présente la plus grande sensibilité.

Une fois le travail sur le secteur de production énergétique achevé, ce projet pourra se poursuivre sur son couplage avec le modèle économique dynamique proposé par Gaël Giraud et inspiré de Goodwin&Keen. Cette deuxième phase du projet vise à décrire précisément la dynamique de production économique à partir du formalisme de Leontief. Ce couplage permettra de quantifier les impacts d'un scénario de transition sur le secteur de production économique, en termes d'investissement de capital, d'emploi, de dette, de productions intérieures brute et nette.

Conclusion

Le groupe attache une importance particulière à l'ouverture interdisciplinaire qui permet une approche singulière de la thématique : à la fois approfondie et globale. En effet, nous souhaitons développer une vision académique sur la problématique de l'énergie du futur et notamment de l'énergie nucléaire via l'étude de la physique à toutes les échelles rencontrées. Pour cela, et afin de comprendre les limitations de chaque modèle, nous travaillons sur la résolution de l'équation du transport des neutrons couplée à l'évolution des matières sous flux neutronique (en maîtrisant les incertitudes associées), à la modélisation simplifiée des systèmes nucléaires pour les codes de scénarios et à l'étude physique des cycles du combustible possibles pour le futur. Une ouverture sur les scénarios énergétiques est indispensable pour compléter notre vision globale et notre savoir-faire

sur les scénarios nucléaire est valorisé dans les collaborations interdisciplinaires dans lesquelles nous sommes investis.

Les trois dernières années ont été particulièrement riches pour l'activité système et scénarios au CNRS/IN2P3, notamment grâce au développement du code de scénario CLASS qui a débuté en 2012 mais qui a réellement commencé à être opérationnel en 2014. Il est important de noter que l'énorme travail d'écriture du code et de développement d'algorithmes nouveaux a été essentiellement porté par l'équipe Nantaise et notamment par deux post-doctorants qui ne sont plus membres de l'IN2P3 aujourd'hui. Le développement de cet outil a permis à l'IPNO de se focaliser sur la modélisation des systèmes et notamment de l'évolution du combustible et de réaliser des études de scénarios en testant et améliorant les méthodes développées à Nantes. La relation particulière entre Nantes et Orsay nous a permis de rationaliser et d'optimiser nos efforts de recherches afin de gagner en efficacité. Après quelques années, nous estimons que le pari est presque réussi puisque nous avons réussi à développer des collaborations durables avec certains des grands acteurs de la recherche du nucléaire au niveau français et international. L'investissement contractuel conséquent entre 2014 et 2017, totalement en accord avec les besoins de l'activité, a permis une réelle montée en compétence de nos équipes mais le maintien du haut niveau d'excellence de cette thématique implique de garder constant le volume de travail de recherche.

Il faut noter que ces activités de recherches s'insèrent dans un contexte industriel et académique particulier dû à la thématique en elle-même mais aussi au site particulier d'Orsay. Il paraît évident que nos travaux doivent avoir des échos dans le milieu industriel mais aussi dans notre enseignement universitaire. Les liens que nous construisons avec les équipes de recherches de l'IRSN et du CEA vont dans ce sens mais nous n'avons toujours aucun lien avec EDF malgré nos nombreuses sollicitations et bien qu'EDF ait décidé de localiser une grosse partie de sa recherche sur le site de Saclay. De la même manière, nos moyens humains ne nous permettent pas de nous investir à la hauteur de notre ambition et de notre savoir-faire pour les formations universitaires liées à la thématique.

Principal production scientifique

[1] S. Bouneau, S. David, X. Doligez, J.-M. Loiseaux, O. Méplan, J. Treiner ; **Construction of an energy world in 2050 meeting climate constraint and reduction of inequalities** ; soumis à Applied Energy 2018

[2] A. Somaini ; **Analyse des erreurs induites par une modélisation simplifiée sur l'évolution des combustibles REP ; Impact des fuites neutroniques dans les calculs cellules** ; Thèse de doctorat, Ecole doctorale PHENIICS, 2017

[3] A. Somaini, S. David, X. Doligez, A.-A. Zakari-Issoufou, A. Bidaud, N. Cappelain, O. Meplan, A. Nuttin, P. Prevot, F. Courtin, B. Leniau, B. Mouginot, N. Thiollière ; **The Impact of Reactor Model Simplification for Fuel Evolution: A Bias Quantification for Fuel Cycle Dynamic Simulations** ; International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP), San Fransisco 2017

[4] A. Bidaud, X. Doligez, P. Olbratowski, E. Autino, M. Aufiero, B. Leniau, O. Meplan, S. David ; **Understanding Total Monte Carlo uncertainty propagation in burn up calculations with Generalized Perturbation Theory** The European Physical Journal Conferences, 2016

- [5] B. Leniau, B. Mouginot, N. Thiolliere, X. Doligez, A. Bidaud, et al.. **A neural network approach for burn-up calculation and its application to the dynamic fuel cycle code CLASS**. Annals of Nuclear Energy, Elsevier Masson, 81, pp.125–133, 2015
- [6] A.A. Zakari-Issoufou, X. Doligez, A. Somaini, Q. Hoarau, S. David, S. Bouneau, F. Courtin, B. Leniau, N. Thiollière, B. Mouginot, A. Bidaud, N. Capellan, O. Meplan, A. Nuttin ; **Americium mono-recycling in PWR: A step towards transmutation**. Annals of Nuclear Energy. 102. 2017
- [7] M. Ernoult, X. Doligez, N. Thiolliere, A.A. Zakari-Issoufou, B. Mouginot, A. Bidaud, S. Bouneau, J.B. Clavel, F. Courtin, S. David, A. Somaini ; **Global and flexible models for sodium-cooled fast reactors in fuel cycle simulations** ; PHYSOR 2018: Reactor Physics paving the way towards more efficient systems, Cancun – Mexique, 2018
- [8] N. Thiollière et al. **A methodology for performing sensitivity analysis in dynamic fuel cycle simulation studies applied to a PWR fleet simulated with the CLASS tool**. Submitted to The European Journal of Physics N (EPJ-N). 2017
- [9] M. Ernoult, S. David, X. Doligez, O. Meplan, B. Leniau, et al.. **Advanced plutonium management in PWR, complementarity of thorium and uranium** Progress in Nuclear Energy, Elsevier, 78, pp.330–340, 2015
- [10] F. Courtin, B. Leniau, N. Thiollière, B. Mouginot, X. Doligez, A. Somaini, A.A. Zakari-Issoufou, S. David, Sylvain, A. Bidaud, J.B. Clavel, **Neutronic predictors for PWR fuelled with multi-recycled plutonium and applications with the fuel cycle simulation tool CLASS**. Progress in Nuclear Energy. 100. 33-47. ,2017
- [11] A.–A. Zakari-Issoufou, X. Doligez, A. Somaini, M. Ernoult, S. David, et al. **Americium Early Transmutation in Thermal Reactors: An Option to a Better Nuclear Spent Fuel Management**. International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP2017),