

Pièce 2 : Sujet de thèse

Amélioration de la précision des calculs neutroniques déterministes pour les SMR-REP pilotés en eau claire, grâce aux techniques de “Machine Learning”

Référence PMT (EOTP) : 001/08/02/07

Lien avec les documents de démarche de recherche :

Cette proposition de thèse est en lien avec le document de recherche « Démarche de recherche relative au combustible, au cœur et à la chaudière en situation accidentelle » rédigé par Jean-Michel Evrard (référence PSN-RES/2018-00002). Elle s'intègre dans les programmes de recherche sur le comportement des cœurs de réacteurs, avec pour objectif de développer des méthodes innovantes visant à réduire les biais dans les calculs déterministes. Elle répond également aux nouveaux besoins de recherche de l'institut, suscités par l'émergence récente de nombreux concepts de Small Modular Reactors (SMR).

Objectif de la thèse en matière d'avancée(s) des connaissances :***Contexte et enjeux***

Face au réchauffement climatique, la recherche mondiale de nouvelles sources d'énergie propres, efficaces et fiables se poursuit à un rythme soutenu, motivée par les impératifs de décarbonation et de sécurité/souveraineté énergétique. Dans ce contexte, la recherche et le développement dans le domaine de la conception des réacteurs nucléaires explorent actuellement activement la mise au point de petits réacteurs modulaires refroidis à l'eau sous pression (SMR de type REP) afin de décarboner des secteurs comme la production d'électricité (concepts électrogènes) ou la production de chaleur à usage industriel ou urbain (concepts calogènes) [1, 2]. Dans ce cadre, plusieurs projets visent à concevoir des cœurs pilotés sans bore soluble (i.e. pilotage en eau claire) afin de mitiger les inconvénients associés à l'utilisation de ce poison neutronique (e.g. les concepts NUWARD [3] dans sa forme en fin d'avant-projet sommaire (APS), LDR-50 [4], CALOGENA [5], ARCHEOS [6], CAREM en Argentine [7], i-SMR en Corée du Sud [8], etc.). Le pilotage des cœurs REP en eau claire est facilité dans les SMR, car la sensibilité aux phénomènes d'oscillations de puissance dues au xénon est réduite dans les cœurs de faibles dimensions spatiales [9]. Puisque le développement des SMR est en plein essor, il est donc très probable que, dans les années à venir, l'expertise de l'IRSN soit sollicitée pour analyser la sûreté de divers concepts de SMR pilotés sans bore soluble français ou européens.

La simulation des réacteurs à eau pressurisée (REP) est étudiée depuis plusieurs années au Laboratoire de Neutronique du Service de Neutronique et des Risques de Criticité de l'IRSN (SNC/LN) ainsi que dans le Laboratoire d'Études des Cœurs et du Cycle au sein du Service de Physique des Réacteurs et du Cycle (SPRC/LE2C) du CEA. Ces recherches se concentrent principalement sur les réacteurs en activité dans le parc nucléaire français, en couvrant les divers modes de fonctionnement : de la production en base aux transitoires de puissance, en passant par le suivi de charge. La simulation de ces réacteurs peut être abordée par des méthodologies déterministes ou par des approches Monte-Carlo, chacune présentant des avantages et des inconvénients distincts. Par exemple, la méthode Monte-Carlo permet de ne pas recourir aux approximations inhérentes à la résolution des équations aux dérivées partielles (EDP), mais exige des ressources de calcul considérables et nécessite souvent d'effectuer des hypothèses simplificatrices pour la modélisation thermo-hydraulique du cœur. Ces facteurs rendent l'utilisation des méthodes Monte-Carlo peu adaptée pour modéliser l'évolution d'un cœur de réacteur sur l'ensemble d'un cycle d'irradiation du combustible. À l'inverse, les méthodes déterministes, plus rapides en termes de temps de calcul, permettent de modéliser aisément l'évolution d'un cœur de réacteur sur un cycle, tout en intégrant une prise en compte simplifiée des rétroactions thermo-hydrauliques. Néanmoins, ces méthodes induisent des approximations, comme la discrétisation en énergie des sections efficaces et du flux neutronique, la discrétisation spatiale du cœur, l'approximation de la diffusion, etc...

Les biais de calcul associés aux méthodes déterministes ont fait l'objet de nombreuses analyses et retours d'expérience, notamment en ce qui concerne la neutronique des REP déjà déployés (e.g. références [10, 11] pour les codes CASMO5 [12] et SIMULATE5 [13], utilisés à l'IRSN). Cependant, les schémas de calcul habituels pourraient voir leur précision diminuée lorsqu'ils sont appliqués aux SMR-REP pilotés en eau claire, ce qui affecterait la fiabilité des évaluations des paramètres de sûreté. En effet, une approche utilisée dans la plupart des concepts de SMR-REP gérés en eau claire pour contrôler la réactivité consiste à combiner l'insertion de barres de pilotage mobiles (gestion active de la réactivité) et l'introduction de poisons consommables, dont l'efficacité diminue avec l'irradiation du cœur (gestion passive de la réactivité, généralement sous la forme de crayons de combustible empoisonnés au gadolinium). Des réflecteurs en acier sont également souvent utilisés dans ces concepts afin de prolonger la durée du cycle d'irradiation du combustible. Ces choix technologiques associés à la petite taille des cœurs SMR induisent un comportement singulier au regard des REP de grande taille (fortes variations spatiales du flux neutronique à l'intérieur du cœur, impact plus important du réflecteur sur la distribution de la puissance dans le cœur, évolution du combustible différente en présence ou en l'absence de barres absorbantes, etc.). Ces éléments laissent supposer que les hypothèses communément effectuées dans les schémas de calculs neutroniques pourraient amener à des biais de calculs plus importants dans le cadre des SMR-REP pilotés en eau claire que dans le cadre des REP de grande taille, pilotés avec du bore soluble. Ainsi, des recherches anticipatives doivent être menées afin de revisiter les hypothèses utilisées au sein des schémas de calculs

classiques et de proposer des solutions innovantes pour améliorer la précision des calculs de neutronique voire des méthodes alternatives aux méthodes actuelles, si besoin.

La nécessité d'acquérir de nouvelles connaissances et de développer des méthodes innovantes de simulation pour les SMR est largement partagée par de nombreux acteurs du secteur nucléaire, tant en France qu'à l'international. Cette dynamique est illustrée par le lancement en 2024 du projet européen EASI-SMR (pour *Ensuring Assessment of Safety Innovations for SMR*). Ce programme de recherche rassemble des acteurs tels que VTT, Électricité de France (EDF), le Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA), l'IRSN, Framatome, le Karlsruhe Institute of Technology (KIT) et d'autres. Son objectif est de mener, avec plusieurs méthodologies, des simulations multiphysiques sur deux concepts de SMR-REP pilotés en eau claire (l'un électrogène, l'autre caloporteur) et de comparer les résultats issus de ces différentes modélisations, pour divers scénarios. C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent sujet de thèse, proposé en co-encadrement avec le SPRC/LE2C du CEA, pour lequel cette thématique revêt également un intérêt.

Modélisations neutroniques déterministes

De manière générale, la modélisation déterministe des REP nécessite d'employer des schémas de calculs en deux étapes (dites « réseau » et « cœur »). Le principe général d'une telle méthodologie est rappelé sous forme schématique par la figure 1.

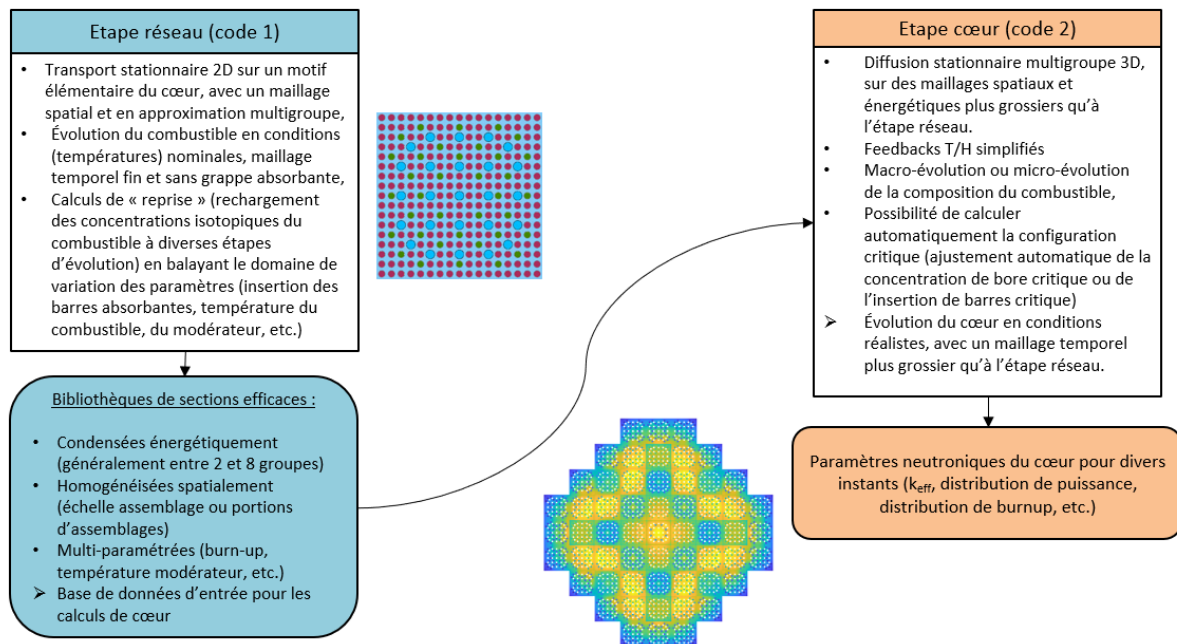


Figure 1 : Représentation schématique d'un schéma de calcul déterministe en deux étapes pour la modélisation neutronique des REP

La première étape, dénommée étape « réseau », consiste à résoudre l'équation du transport en deux dimensions d'espace, en mode fondamental (i.e. sur un assemblage 2D en réseau infini), sur des maillages spatiaux, énergétiques et temporels fins, pour générer des sections efficaces multiparamétrées qui serviront de données d'entrée au calcul de cœur. L'étape réseau est généralement décomposée en deux sous-étapes :

- Un calcul dans les conditions nominales moyennes d'exploitation (puissance volumique moyenne correspondante à l'état de pleine puissance, moyennes volumiques des températures du modérateur et du combustible en accord avec les températures nominales du cœur, etc.), en enchaînant des calculs statiques donnant le flux de neutrons et des calculs d'évolution où l'équation de Bateman est résolue sur un maillage temporel fin,
- Des calculs de reprise, où les compositions isotopiques des crayons combustibles sont rechargées à un moment précis de l'évolution nominale calculée précédemment. Pour chaque pas d'évolution d'intérêt, de multiples calculs de reprise sont effectués en balayant les gammes de variation des grandeurs physiques opérationnelles (insertion des différentes natures de barres absorbantes dans l'assemblage, température du combustible, densité du modérateur, etc.).

Les données issues de ces deux sous-étapes servent ensuite à générer des bibliothèques de sections efficaces multiparamétrées, dépendant notamment de l'épuisement du combustible, de la densité du modérateur, de la température du combustible, de l'insertion des barres absorbantes, etc. Lors de la deuxième étape, appelée étape « cœur », la bibliothèque de sections efficaces multiparamétrées est utilisée comme base de données d'entrée par un code de calcul de cœur en 3D. Les sections efficaces de chaque maille de ce calcul de cœur sont déterminées par interpolations multilinéaires dans les bibliothèques de sections efficaces déterminées précédemment. Le code de cœur résout généralement l'équation de la diffusion neutronique en trois dimensions d'espace, tout en prenant en compte de manière simplifiée les contre-réactions thermo-hydrauliques et l'évolution de quelques

isotopes particuliers (Xénon, Samarium), afin de modéliser la neutronique du cœur et son évolution dans différents scénarios réalistes, tels que l'évolution en conditions nominales au cours d'un cycle, un transitoire de puissance, etc.

En outre, un point potentiellement crucial concerne l'évolution du combustible en présence de grappes absorbantes. Cet aspect, généralement non pris en compte dans la génération des sections efficaces multi-paramétrées, est susceptible de jouer un rôle crucial dans l'évaluation de la neutronique des SMR-REP en eau claire. La présente proposition de thèse se focalise donc sur l'étude approfondie de ce facteur, susceptible de jouer un rôle clé dans l'évaluation des paramètres neutroniques du cœur.

Il convient également de mentionner que d'autres sujets, tels que l'usure des absorbants sous irradiation, la validité de l'approximation de la diffusion dans un milieu très hétérogène caractéristique d'un SMR-REP fonctionnant en eau claire ou encore la variabilité des sections efficaces du réflecteur en fonction du type de combustible et de l'insertion des barres absorbantes, sont d'intérêt et pourraient être explorés dans le futur.

Problématique de l'évolution du combustible en présence de grappes absorbantes

L'évolution sous irradiation de la composition isotopique du combustible nucléaire est décrite par un ensemble d'équation différentielles du premier ordre, appelées les équations de Bateman [14]. Dans les schémas de calcul déterministes, les équations de Bateman sont généralement résolues à l'étape « réseau » pour un grand nombre d'isotopes et d'étapes d'évolution, en supposant des flux constants entre deux étapes successives. Ces calculs sont souvent effectués dans des conditions dites « nominales », représentatives des conditions moyennes en cœur, sans considérer la présence de grappes absorbantes durant l'évolution du combustible. Si le choix est fait de réaliser une évolution microscopique à l'étape « cœur », les équations de Bateman sont également résolues, mais en règle générale sur la base d'approximations telles que l'utilisation de chaînes d'isotopes évoluant réduites, de mailles spatiales et énergétiques assez grossières à l'intérieur desquelles le flux neutronique est considéré comme un scalaire. Cette méthode constitue aujourd'hui la norme dans les schémas de calcul industriels.

Cependant, dans les SMR-REP refroidis à l'eau claire, les barres absorbantes sont insérées de manière prolongée dans le cœur et à un niveau d'insertion bien plus fort que dans les REP classiques pilotés avec du bore soluble. Cette insertion varie tout au long du cycle, pour compenser la perte de réactivité, ainsi qu'en fonction des fluctuations de puissance (suivi de charge). La présence des barres absorbantes modifie localement le spectre neutronique en le décalant vers des énergies plus élevées, ce qui influence l'évolution du combustible, notamment la conversion de l'uranium en plutonium. D'autres facteurs, comme la densité du modérateur, peuvent également altérer le spectre neutronique et donc l'évaluation de l'évolution de la composition du combustible, utilisée lors des calculs de reprise pour générer des bibliothèques de sections efficaces homogénéisées. Cela implique que, dans un SMR-REP piloté sans bore soluble, chaque segment axial d'un assemblage de combustible a suivi une trajectoire distincte, influencée par les périodes d'insertion et d'extraction des barres de contrôle et les variations d'autres paramètres modifiant le spectre neutronique, tels que la densité du modérateur. Les hypothèses effectuées dans les schémas de calculs déterministes standard impliquent une incapacité à retranscrire l'intégralité de ces effets d'histoire. Cette observation est particulièrement valable pour les modèles utilisant la macro-évolution (interpolation des sections efficaces macroscopiques en fonction du burnup). Cependant, même les modèles de micro-évolution (interpolation des sections efficaces microscopiques et calcul des concentrations isotopiques lors de l'étape cœur) pourraient voir leur précision diminuer, car ces calculs reposent sur des chaînes d'évolution réduites et des maillages énergétiques simplifiés, comme expliqué précédemment. Cette thématique revêt un intérêt d'autant plus grand pour les SMR-REP pilotés en eau claire, puisque les assemblages qui composent ces derniers sont en général empoisonnés avec de grandes quantités de gadolinium. Ceci induit une variation non linéaire de la réactivité des assemblages au cours de l'évolution, qui se caractérise par un « pic » de réactivité, souvent dénommé « pic gadolinium », comme le montre la figure 2 issue de la référence [15].

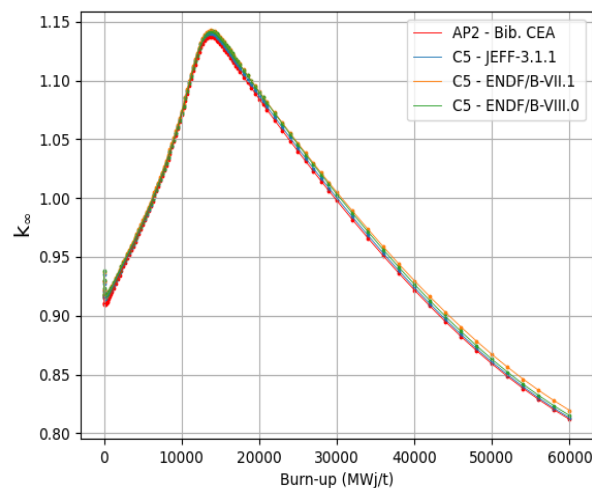


Figure 2 : Évolution du k_{inf} de l'assemblage interne du cœur PRATIC, évaluée avec divers codes de calculs et bibliothèques de données nucléaires [15]

Ce comportement s'explique par la disparition des isotopes 155 et 157 du gadolinium, dont les sections efficaces d'absorption font partie des plus importantes mesurées. Après le pic gadolinium, ces isotopes ont totalement disparu, modifiant significativement la répartition de la puissance à l'intérieur de l'assemblage combustible. Le suivi des paramètres neutroniques du cœur nécessite donc de caractériser précisément l'instant et l'amplitude du pic de gadolinium.

Il est donc nécessaire d'adopter une approche critique vis-à-vis des prévisions déterministes concernant l'évolution de la composition du combustible et de ses sections efficaces, afin de quantifier l'impact des hypothèses faites sur les paramètres neutroniques des réacteurs SMR-REP pilotés en eau claire. Pour cela, des analyses visant à évaluer l'impact réel de ces hypothèses doivent être menées, et des méthodologies de calcul alternatives pourraient être envisagées. Des travaux ont été menés au CEA, en particulier avec le développement de la méthode COHLISEE dans le cadre de la thèse de doctorat de Pierre Devaux [16]. Dans le cadre de cette thèse, la robustesse des modèles de micro-évolution a pu être testée. Pour ce faire, divers historiques d'insertion de grappes ont été modélisés dans un cluster d'assemblages, et les prédictions d'un modèle de micro-évolution ont été comparées à un calcul réseau de référence, en termes d'évolution du k_{eff} et des facteurs de puissance. Il a été démontré que les modèles de micro-évolution pouvaient présenter des biais moyens sur l'évolution de la réactivité du cluster, atteignant 568 pcm (cf. tableau 1). La méthode COHLISEE apporte une amélioration globale des prédictions, mais elle ne peut pas être généralisée à tous les phénomènes physiques susceptibles d'affecter l'évolution du combustible.

Tableau 1 : Récapitulatif des écarts de réactivité, en valeur absolue, moyennés sur l'ensemble de l'évolution pour le cluster G28-G0 (valeurs en pcm) [16].

	TGE-TGE		TGE-TGI		TGI-TGE		TGI-TGI	
	micro	COHLISEE	micro	COHLISEE	micro	COHLISEE	micro	COHLISEE
TGE-TGI	145	52	124	21	568	406	224	52
TGI-TGE	170	88	516	302	167	110	240	100
TGI-TGI	19	42	397	125	426	217	309	43
TGE-M-IN-10	106	42	121	40	470	339	167	52
TGE-M-EX-10	51	46	130	119	307	287	50	45
M-IN-10-M-EX-10	107	55	342	202	240	144	161	71
P-IN-5-P-EX-5	69	57	241	125	272	176	100	91

Cette proposition de thèse s'inscrit donc dans la continuité des travaux déjà effectués dans la littérature, tout en visant à explorer une nouvelle approche, qui se veut plus robuste et généralisable, basée sur l'utilisation de l'intelligence artificielle.

Contenu de la thèse :

L'objectif principal de la thèse proposée ici est de cartographier les biais de calcul inhérents à la modélisation déterministe des SMR-REP pilotés sans bore soluble et de chercher à les réduire par des méthodes de calcul adaptées. Parmi les observables d'intérêt sur lesquelles des améliorations sont attendues, on trouve la réactivité du cœur, les facteurs de puissance, l'efficacité des absorbants mobiles, les inventaires isotopiques des assemblages déchargés, etc. Comme expliqué précédemment, la principale difficulté que vise à adresser cette thèse réside dans la correspondance entre les histoires élémentaires très hétérogènes au sein du cœur (calcul du cœur) et la préparation des sections efficaces requises pour ce calcul (calculs de réseaux). Pour ce faire, il est nécessaire de pouvoir prendre en compte des effets d'historique (insertion des barres, température du modérateur, température du combustible, etc.) sur les compositions et sections efficaces du combustible. La considération de certains effets d'environnement (e.g., l'insertion de barres dans un assemblage adjacent à celui étudié, la nature de l'assemblage voisin, etc.) pourrait également s'avérer nécessaire, en particulier pour les assemblages où les barres ne sont pas insérées directement, mais se trouvent à proximité immédiate.

La solution envisagée pour résoudre ce problème consiste à développer une intelligence artificielle (IA) de type « machine learning » (e.g. un réseau de neurones) entraînée sur un large éventail d'historiques à l'échelle des réseaux. Cette IA interagira avec le calcul du cœur pour ajuster la composition isotopique et les sections efficaces du combustible en fonction de l'historique effectivement "perçu". Les paragraphes suivants donnent les principales étapes de la démarche des travaux de recherche tels qu'envisagés au vu des connaissances actuelles. Les différentes phases et thématiques de ce projet sont :

- recherches bibliographiques afin de déterminer le type d'IA le plus adapté à la problématique abordée dans cette thèse et définition de l'ensemble des paramètres d'intérêt (à l'étape réseau) pour l'entraînement du méta-modèle (insertion des barres absorbantes, température du modérateur, température du combustible, environnement, etc.),
- analyse de la sensibilité des compositions et sections efficaces du combustible à la variabilité des paramètres d'intérêt au cours du temps en utilisant un code déterministe réseau CEA,
- construction du méta-modèle (et de sa base d'entraînement et de validation) et couplage à un code déterministe cœur CEA,
- comparaison des prédictions du méta-modèle avec celles des méthodes traditionnelles de macro-évolution et de micro-évolution, ainsi qu'avec celles d'un calcul Monte-Carlo évoluant. L'exercice sera exécuté d'abord sur un cluster d'assemblages représentatif puis sur le cœur de PRATIC,
- interfaçage de l'IA avec une chaîne de calcul déterministe de l'IRSN (réalisation par les chercheurs du LN avec assistance du doctorant) et comparaison avec les résultats déjà obtenus.

Les codes de calcul envisagés pour réaliser le travail de thèse sont les suivants :

- CEA : APOLLO3 [17],
- IRSN : SERPENT2 [18] pour la partie Monte-Carlo, CASMO5 [19] et PARCS [20] pour la partie déterministe.

Comme dans tout projet de recherche, les premières étapes constituent une base pour la suite des travaux. Dans cette thèse, les résultats de l'étude de sensibilité permettront d'identifier les paramètres prédominants ainsi que la complexité et la précision des méthodes à mettre en place afin de prendre en compte leur variabilité dans le calcul d'évolution. Les paramètres importants seront retenus pour réaliser un ensemble de calculs de réseaux modélisant l'évolution du combustible pour différents scénarios indépendants. Ces calculs de référence seront réalisés avec le code déterministe APOLLO3 et constitueront des bases d'apprentissage et de validation pour construire un méta-modèle qui pourra interpoler, pour un instant donné, la composition du combustible (et ses sections efficaces) en fonction de l'histoire « vécue » par l'assemblage de combustible (prise en compte de la variabilité temporelle des paramètres d'intérêt). Le principe de cette méthodologie est représenté de manière schématique sur la figure 3.



Figure 3 : Représentation schématique d'utilisation d'un méta-modèle pour la prise en compte des effets d'histoire dans l'évaluation de la composition et des sections efficaces du combustible

Le méta-modèle pourrait être basé sur le krigeage, qui présente l'avantage d'estimer l'erreur introduite par le modèle sur les observables d'intérêt. Cependant, il peut être limité par l'hypothèse d'indépendance des paramètres interpolés, ce qui pourrait poser un problème pour déterminer les distributions de puissance ou d'autres paramètres corrélés. Les réseaux de neurones représentent une alternative intéressante pour prédire la composition du combustible et ses sections efficaces en tenant compte des effets d'histoire. Cette approche permettrait d'intégrer le modèle physique dans son ensemble lors de l'apprentissage, bien que la robustesse mathématique soit moindre et que l'estimation de l'erreur puisse être complexe. D'autres types de modèles pourraient également être envisagés après une analyse approfondie des méthodes disponibles.

Une fois le méta-modèle développé, il sera interfacé avec la partie cœur du code APOLLO3 afin de remplacer son module d'évolution. Dans cette configuration, le méta-modèle prendra en charge l'interpolation, pendant les calculs cœur, des compositions des assemblages de combustible et de leurs sections efficaces associées, en tenant compte de l'historique spécifique à chaque tranche axiale de chaque assemblage. Le CEA a déjà réalisé la substitution de l'interpolateur de sections efficaces d'APOLLO3 par un autre système, notamment lors de la thèse d'Olivier Truffinet, soutenue en 2024, sur laquelle ce projet pourra s'appuyer. Il est également à noter que cette technique, visant à remplacer le code réseau par un méta-modèle de type "réseau de neurones", a déjà fait l'objet de publications dans la littérature [21].

Les prédictions du schéma de calcul « APOLLO3+IA » seront ensuite confrontées à celles de divers modèles, à savoir :

- un calcul en macro-évolution (APOLLO3),
- un calcul en micro-évolution (APOLLO3),
- un calcul avec la méthode COHLISEE, implémentée dans APOLLO3 [16],
- un calcul Monte-Carlo évoluant (SERPENT2) qui servira de point de référence.

La comparaison avec le calcul Monte-Carlo en évolution a pour objectif de valider le schéma de calcul « APOLLO3+IA », tandis que les comparaisons avec d'autres modèles ont pour but d'évaluer la performance de la méthodologie développée par rapport aux méthodes existantes. Le travail de comparaison/validation sera réalisé dans un premier temps sur un cluster d'assemblage représentatif, afin de faire une démonstration de principe, puis sera étendu au cœur de PRATIC pour considérer un cas d'application réaliste. En parallèle, l'étudiant assistera les chercheurs du LN dans l'interfaçage de l'IA avec une chaîne de calcul déterministe de l'IRSN (CASMO5 + PARCS sont envisagés pour l'instant). Une fois cet interfaçage réalisé, les résultats de la chaîne « IRSN+IA » seront comparés aux autres méthodes de calcul, de sorte à quantifier si le comportement de l'IA est fortement dépendant de la chaîne déterministe sur laquelle elle a été entraînée.

La méthodologie développée dans cette thèse se distingue des approches traditionnelles en intégrant l'IA pour améliorer la précision des modélisations neutroniques dans l'évolution des cœurs de REP. L'utilisation de l'IA permet d'intégrer des effets d'historique et d'environnement tout en réduisant le nombre d'hypothèses effectuées, offrant ainsi une précision supérieure dans

la modélisation de ces effets, tout en maintenant des temps de calcul comparables aux méthodes classiques. De plus, les analyses menées lors du développement de l'IA contribueront à une meilleure compréhension des paramètres influençant l'évolution du combustible.

Enfin, la phase de validation permettra d'évaluer finement la robustesse des méthodes traditionnelles et de quantifier l'apport de l'approche développée pendant la thèse sur la précision des modélisations neutroniques des cœurs pilotés en eau claire. Ces travaux de validation s'appuieront sur le cœur PRATIC [22] (acronyme de "Petit REP Académique pour Tester, Innover & Concevoir"), qui est un benchmark neutronique de SMR-REP piloté en eau claire, développé au CEA sous licence Creative Commons, et déjà utilisé pour des benchmarks internationaux (projet européen EASI-SMR et projet OCDE/NEA/WPRS).

Déroulement de la thèse :

Le doctorant sera localisé au sein du SPRC du CEA (Cadarache) pendant la première moitié de la thèse et au sein du SNC de l'IRSN (Fontenay-aux-roses) pendant la deuxième moitié de la thèse. Des déplacements sont à prévoir pour présenter ses travaux lors de conférences. Le suivi hebdomadaire des travaux par les co-encadrants sera réalisé principalement par le biais de visio-conférences.

Moyens expérimentaux, outils de simulation, nécessaires à la réalisation de la thèse :

L'étudiant devra pouvoir utiliser des codes de neutronique déterministes CEA (APOLLO3) et IRSN (CASMO5, PARCS). L'étudiant devra également avoir à disposition un code de calcul Monte-Carlo (SERPENT2). L'étudiant devra avoir accès à des clusters de calculs comme MEZEL (CEA), TGCC (CEA), FARUX (IRSN), etc.

Partenariats envisagés

La thèse sera réalisée en co-encadrement entre l'IRSN et le CEA.

Intérêt du partenariat - Apport du partenaire

Ce sujet de recherche suscite l'intérêt des deux organismes : le CEA apporte son expertise en phénoménologie des REP sans bore ainsi que son expérience avec le code déterministe APOLLO3 et son interfaçage avec des routines externes. L'IRSN, de son côté, apporte ses compétences dans le domaine des méthodes d'apprentissage et des calculs Monte-Carlo en évolution. C'est pour ces raisons que cette thèse est proposée en co-encadrement entre le CEA et l'IRSN.

Le CEA accueillera l'étudiant pendant la première année et demie de la thèse, lui donnera accès au code de neutronique déterministe APOLLO3 ainsi qu'à ses infrastructures de calcul. L'IRSN accueillera l'étudiant pendant la deuxième année et demie de la thèse et lui donnera accès au code de neutronique Monte-Carlo SERPENT2 ainsi qu'à ses infrastructures de calcul. L'IRSN utilisera ses compétences en interne et son retour d'expérience sur l'intelligence artificielle pour appuyer l'étudiant dans la construction du méta-modèle, en collaboration avec le directeur de thèse.

Bibliographie

1. IAEA. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, 2022 Edition, A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). 2022.
2. NEA. The NEA Small Modular Reactor Dashboard: Second Edition. OECD Publishing, Paris, 2024.
3. Site web de NUWARD. Lien : <https://www.nuward.com/fr>, consulté en septembre 2024.
4. Site web de LDR-50. Lien : <https://www.ldr-reactor.fi/en/1099-2/>, consulté en septembre 2024.
5. Site web de CALOGENA. Lien : <https://www.calogena.com/>, consulté en septembre 2024.
6. Site web du Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA), projet ARCHEOS. Lien : <https://www.cea.fr/energies/iresne/Pages/Nos%20r%C3%A9alisations/Conception%20EF%BC%86%20innovation/Le%20projet%20Archeos.aspx>, consulté en septembre 2023.
7. Portail officiel de l'État argentin, page de CAREM. Lien : <https://www.argentina.gob.ar/cnea/carem/argentinian-nuclear-power-plant>, consulté en septembre 2024.

8. Jin Sun Kim, Gonghoon Bae, Jooil Yoon. Reactor core design with enriched gadolinia burnable absorbers for soluble Boron-Free operation in the innovative SMR. Nuclear Engineering and Design, Volume 428, 2024, 113557, ISSN 0029-5493, <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113557>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549324006575>)
9. K. Obaidurrahman, J.B. Doshi. Spatial instability analysis in pressurized water reactors. Annals of Nuclear Energy, Volume 38, Issues 2-3, 2011, Pages 286-294, ISSN 0306-4549, <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2010.10.015>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454910003841>)
10. J.D. Rhodes, J.M. Hykes, and R.M. Ferrer. CASMO5 Methods and Validation Report. Studsvik Scandpower Inc, Rev. 9, 2018.
11. L. Belblidia, K. Adielson and G. Anton. Application of the Studsvik Scandpower Core Management System to PWRs, SSP-18/307 Rev. 2, 2018.
12. J.D. Rhodes, J.M. Hykes, and R.M. Ferrer. CASMO5 A Fuel Assembly Burnup Program User's Manual. Studsvik Scandpower Inc, Rev. 12, 2017.
13. J.D. Rhodes, J.M. Hykes, and R.M. Ferrer. SIMULATE5 - Advanced Three-Dimensional Multigroup Reactor Analysis Code. Studsvik Scandpower Inc, Rev. 9, 2018.
14. CEA. La neutronique. e-den, Une monographie de la Direction de l'énergie nucléaire. Éditions Le Moniteur, 2013.
15. Q. Besson. Modélisation neutronique d'un réacteur modulaire à eau sous pression (SMR-REP) piloté en eau claire. Mémoire en vue de l'obtention de la 2^{ème} année du Master mention Ingénierie Nucléaire, UNIVERSITÉ CLERMONT AUVERGNE, IRSN, 2023.
16. Pierre Devaux. Développement d'un schéma de calcul neutronique pour la modélisation du pilotage des SMR (Small Modular Reactors) sans bore soluble. Thèse de doctorat. Université Grenoble Alpes, 2022. [\(NNT : 2022GRALI063\)](#). [\(tel-03997828\)](#)
17. D. Schneider, F. Dolci, F. Gabriel, J.-M. Palau, M. Guillo, et al. APOLLO3® CEA/DEN deterministic multi-purpose code for reactor physics analysis. *PHYSOR 2016 - Unifying Theory and Experiments in the 21st Century*, May 2016, Sun Valley, United States. [\(cea-02509714\)](#)
18. J. Leppänen. 2.2 SERPENT MONTE CARLO REACTOR PHYSICS CODE, 20th AER Symposium on VVER Reactor Physics and Reactor Safety, Espoo, Finland, 20 - 24 September 2010.
19. J.D. Rhodes, J.M. Hykes, and R.M. Ferrer. CASMO5 A Fuel Assembly Burnup Program User's Manual. Studsvik Scandpower Inc, Rev. 12, 2017.
20. T. Downar, Y. Xu, and V. Seker. PARCS v3.0, U.S. NRC Core Neutronics Simulator - USER MANUAL. University of Michigan, 2009.
21. S. Dzianisau, K. Saeju, H.C. Lee, D. Lee « Development of an artificial neural network model for generating macroscopic cross-sections for RAST-AI », Annals of Nuclear Energy 186, 109777 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2023.109777>
22. R. Vuiart, A. Eustache, S. Eveillard et G. Prulhière. PRATIC: a soluble-boron-free pressurized water cooled small modular reactor core with industrial-grade performance, à paraître dans EPJ-N, 2024.