

ETUDE SYSTEMES ET SCENARIOS : BILAN ET PROSPECTIVES

S. David¹, X. Doligez¹, N. Capellan², D. Heuer², O. Méplan², E. Merle-Lucotte², A. Nuttin², P. Rubiolo²,
L. Giot³, M. Fallot³, N. Thiollière³

¹Institut de Physique Nucléaire d'Orsay, CNRS-IN2P3/Univ. Paris Sud

²Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie, CNRS-IN2P3/UJF/INPG

³Laboratoire Subatech, CNRS-IN2P3/Ecoles des mines de Nantes/Université de Nantes

L'IN2P3 a commencé les études des systèmes nucléaires et de leurs scénarios associés suite à la loi de 1991 (dite « loi Bataille ») pour répondre à la problématique sociétale de la gestion des déchets nucléaires et des technologies de réacteurs du futur. Pour cela, il a fallu développer de nouvelles méthodes de simulation, propres au monde académique, adaptées à tous types de réacteurs afin d'étudier le déploiement de réacteurs innovants, la robustesse de ces concepts dans des situations accidentelles et l'exploration de nouvelles stratégies, basées par exemple sur la transmutation des actinides mineurs ou l'utilisation du cycle thorium. En 2013, l'étude des systèmes et des scénarios nucléaires est une discipline de l'IN2P3 qui mobilise une douzaine de chercheurs.

Les études réacteurs doivent garder leur spécificité exploratoire et inventive, pour permettre une compréhension globale de la physique en jeu dans un réacteur nucléaire sans se cantonner à une technologie particulière. Cette approche foisonnante permet de développer une compétence globale sur les systèmes du futur et de bâtir une vision performante sur les études de scénarios suivant les hypothèses retenues. De plus, l'expertise globale des systèmes du futur permet d'établir un lien fort entre approches « universitaires » et « industrielles ». Cette condition est nécessaire à l'appropriation de ces travaux par les acteurs du nucléaire et à la reconnaissance de la recherche académique pour discuter la question du nucléaire du futur.

Les années à venir renforceront cette stratégie en perfectionnant et enrichissant notre capacité à simuler des réacteurs. Comme ces simulations sont les données d'entrée des études de scénarios, un effort sera porté sur la fiabilité des calculs réacteurs et la maîtrise des incertitudes tant du point de vue des données nucléaires que du point de vue des hypothèses de modélisation. Concernant les études de scénarios, le développement d'un code académique (le code CLASS) est nécessaire pour maîtriser les modèles physiques et numériques mis en jeu dans ce type d'étude et permettre ainsi à la communauté de porter un regard critique et objectif sur les choix futurs.

1. ETUDE DE SYSTEMES INNOVANTS

Par systèmes innovants, on sous-entend souvent des réacteurs régénérateurs de quatrième génération. Notre vision est pourtant plus large. Dans l'hypothèse d'une contribution significative du nucléaire au mix énergétique mondial et d'un retard prolongé des réacteurs de quatrième génération, la recherche d'améliorations des réacteurs existants (en particulier pour les REP) en termes d'économie des ressources est justifiée. Certaines hypothèses de réduction de la demande d'énergie nucléaire future justifient aussi l'optimisation de concepts pour incinérer les déchets ou pour en minimiser leur production. Certains systèmes étant plus adaptés que d'autres pour satisfaire des hypothèses précises, il n'existe pas de solution optimale pour chacun des critères d'évaluation des scénarios.

A. TRANSMUTATION ET CYCLE URANIUM-PLUTONIUM

La transmutation des actinides mineurs en ADS (Accelerator Driven System) a fait l'objet d'un certain nombre d'études. Dans l'ensemble des scénarios étudiés, les ADS considérés sont limités en puissance et les temps caractéristiques du cycle ne sont pas optimum, limitant leur intérêt pour une stratégie de transmutation. Des concepts multi-cibles (de spallation) sont étudiés spécifiquement à Subatech depuis plusieurs années, permettant d'aplatir la nappe de flux et donc d'augmenter la densité de puissance. Le concept est caractérisé par une puissance supérieure au GigaWatt thermique avec des cycles d'irradiation optimisés pour la transmutation. Il sera alors possible de quantifier l'apport de la transmutation en ADS dans diverses stratégies de gestion du plutonium.

Ces options devront également faire l'objet de comparaisons fines avec la stratégie de référence (recyclage du plutonium dans les réacteurs électrogènes). Les études alternatives en ce sens (recyclage de l'américium en REP et des actinides mineurs en RNR-Na) doivent être poursuivies, notamment du point de vue de la neutronique et de l'impact sur le cycle du combustible (via des études de scénario spécifiques). Enfin, le couplage avec la problématique du stockage est envisageable. Cela permettrait d'acquérir une expertise indépendante sur les avantages de la transmutation des AM par rapport au stockage.

Il faut noter que les études de transmutation peuvent être assez impactées par les décisions parlementaires et/ou ministérielles à venir.

B. POUR LE CYCLE THORIUM-URANIUM

I. THORIUM EN COMBUSTIBLE SOLIDE (REACTEURS A EAU, RNR)

Les études sur les réacteurs à eau ont montré que la régénération en cycle thorium n'était pas possible en REP. Cependant, des optimisations sont possibles, en envisageant par exemple, une forte sous-modération ou une variation de spectre, et doivent être étudiées. Par contre, les très bonnes performances du cycle thorium en CANDU ont été démontrées et justifient d'orienter dès aujourd'hui les études systèmes vers des calculs de transitoires accidentels, ce qui nécessite le développement de méthodes numériques innovantes faisant intervenir un couplage neutronique/thermo-hydraulique (présentées en 2.B).

L'introduction du thorium a aussi été étudiée dans les réacteurs à neutrons rapides. L'idée de cette étude était de voir si le thorium permettait de minimiser la problématique des déchets dans le cadre d'un nucléaire durable (parc français isogénérateur de RNR). Les performances d'un RNR-Na en combustible thorium ont été évaluées, en termes d'inventaire en cycle et de production de déchets. L'avantage du cycle thorium pour ce type de système réside dans l'amélioration forte du coefficient de vidange sodium même en cas de multi-recyclage des actinides mineurs, en revanche les avantages en terme de productions de déchets, souvent mis en avant, ont été relativisés.

II. THORIUM EN REACTEURS A SELS FONDUS

Le CNRS est à l'origine du concept MSFR (*Molten Salt Fast Reactor*) choisi comme concept de référence pour les réacteurs à sels fondus dans le cadre du forum international Génération 4. Le réacteur MSFR fonctionne en spectre neutronique rapide avec un cœur constitué de fluorures fondus. Ce sel liquide regroupe de manière indissociable les deux fonctions « combustible » et « caloporteur ». L'étude

du comportement neutronique, thermo-hydraulique et chimique du cœur du réacteur, nécessite donc un développement de codes spécifiques de simulation faisant intervenir un couplage fort entre ces différents aspects.

L'étude des aspects innovants d'un tel réacteur constitue un projet à long terme qui a été initié au début des années 2000. Aujourd'hui le concept semble être arrivé à maturation et les propriétés neutroniques prometteuses justifient des études plus poussées concernant la sûreté notamment, nécessitant là encore un couplage fin neutronique/thermo-hydraulique. Pour cela, il est nécessaire de détailler le design en prenant en compte les résultats des analyses préliminaires de sûreté. La démarche couplée « design by safety », propre aux systèmes de quatrième génération, est actuellement initiée dans le cadre du contrat européen EVOL (qui prend fin en 2013), du projet CLEF de Grenoble INP et de collaborations avec l'IRSN, (et éventuellement EDF et AREVA) pour une échéance à une dizaine d'années.

2. DEVELOPPEMENT DE METHODES, D'OUTILS ET DE CODES DE CALCUL

A. NEUTRONIQUE ET EVOLUTION DU COMBUSTIBLE

Pour évaluer les performances des systèmes, les chercheurs de l'IN2P3 ont développé des méthodes de calculs basées sur la méthode Monte-Carlo. Pour simuler l'évolution en cœur, le code de transport neutronique MCNP est couplé à un module d'évolution développé en interne. Il en existe essentiellement deux au sein des équipes académiques. D'une part, REM développé au LPSC, est particulièrement dédié aux réacteurs à sels fondus en prenant en compte un couplage avec le retraitement du combustible. D'autre part, MURE, co-développé à l'IPNO, au LPSC et à Subatech est utilisé pour les combustibles solides. MURE est disponible à la NEA depuis 2009. Il est aussi possible de coupler MURE à un code de thermo-hydraulique (COBRA) afin de réaliser des études de transitoires.

Cependant, beaucoup d'efforts sont encore à fournir concernant la fiabilité des calculs neutroniques. Les difficultés de convergence numérique (notamment sur les flux locaux) dans les calculs Monte Carlo, peuvent conduire à des déviations significatives sur les grandeurs cibles, en particulier lorsque ceux-ci sont couplés à une autre physique, comme l'évolution du combustible ou la thermo-hydraulique. C'est notamment pour cela que la simulation de l'évolution complète d'un cœur de réacteur est un travail complexe (en plus d'être très couteux en temps de calcul). Cet exercice a cependant été réalisé à Subatech pour le calcul des émissions de neutrinos dans le cadre de l'expérience Double Chooz. Il est impossible de généraliser cette approche pour les études systèmes et nous sommes contraints d'effectuer une modélisation simplifiée des calculs d'évolution dont nous pouvons maintenant vérifier leur représentativité en les comparant aux résultats de la simulation complète. La maîtrise des erreurs intrinsèques au processus de modélisation pour avoir des résultats représentatifs d'un vrai cœur industriel représente un enjeu majeur pour les années à venir.

B. SURETE

Tous les systèmes innovants étudiés ont besoin d'outils raffinés pour évaluer leur sûreté. Des études de transitoires sur des réacteurs en combustibles tant solides que liquides ont déjà été réalisées grâce au modèle de la cinétique point. Ce modèle est limité et il est nécessaire de développer des moyens fiables de prédiction du comportement global des réacteurs lors de transitoires de types très variés. Leur mise au point passe par un renforcement des compétences en cinétique des réacteurs, mais

aussi et surtout en thermo-hydraulique, discipline clé de la sûreté, qu'il faut inévitablement coupler. Pour cela, un nouveau code est développé au LPSC (NodalDrift). Il est basé sur une modélisation du cœur en quelques grandes zones homogènes, pour lesquelles il résout, en fonction du temps, les équations multigroupes de la diffusion. Les données locales de diffusions sont produites par des calculs cœurs statiques optimisés.

Le MSFR, ayant un combustible liquide en circulation, nécessite des outils de simulation neutroniques et thermo-hydrauliques différents de ceux généralement utilisés pour les réacteurs nucléaires à combustibles solides. Par ailleurs, la géométrie relativement simple de la cavité du cœur rend l'implémentation d'une approche multi-physiques et multi-échelles à la portée de nos capacités de calcul. Dans le but de développer un outil plus précis pour la simulation du MSFR ou d'autres réacteurs innovants, un couplage à l'aide du code neutronique MCNP et des codes de mécanique des fluides CFD (Computational Fluid Dynamics) OpenFoam et Fluent est en cours de développement. Dans un premier temps, un modèle stationnaire a été construit et par la suite, un modèle numérique en transitoire sera développé.

Pour acquérir une véritable expertise de sûreté et ne pas rester cantonner dans des modèles qui seraient dépendants d'une technologie donnée, il paraît important de confronter les méthodes habituelles aux systèmes vraiment différents. Cette démarche est initiée dans le cadre des RSF depuis trois ans, et est appelée (au moins dans le cadre des RSF) à être poursuivie. L'utilisation d'outils d'analyse systémique de risque (tel X-RISK) permettra de créer le modèle d'analyse de risque spécifique aux mécanismes du réacteur à sels fondus en intégrant les grands principes de la sûreté actuelle.

C. PROPAGATION DES INCERTITUDES

Une partie des difficultés liées à la propagation des incertitudes de données nucléaires tient au fait qu'il y a souvent confusion dans ce qui est appelées données nucléaires, entre les données mesurées, les données utilisées dans des modèles de physique nucléaire, ou les données mises en forme dans les outils de simulation des réacteurs. Nous nous efforçons de préserver au maximum la cohérence des incertitudes dans les différentes approches que nous avons développées, que ce soit sur la base d'outils équivalents à ceux des industriels ou dans nos outils de calculs d'évolution stochastiques. Nos études montrent l'importance de réactions parfois inattendues, comme la diffusion inélastique de ^{238}U , et l'importance des corrélations entre réactions. Nos travaux montrent aussi que la physique des réacteurs, en particulier au travers des réactions impliquées dans la normalisation de la puissance du réacteur, augmente l'importance des corrélations entre ces données nucléaires.

Les liens avec les données nucléaires doivent donc être renforcés par une meilleure prise en compte de la physique des réacteurs. Plusieurs projets sont initiés en ce sens comme, par exemple, l'introduction des distributions des produits de fissions mesurées à l'ILL dans les calculs de chaleur résiduelle et l'évaluation de l'incertitude associée. Il est ensuite envisagé d'introduire les données de décroissance des produits de fission mesurées par l'IN2P3 pour avoir une vue cohérente de la problématique des incertitudes de la chaleur résiduelle. Ce projet serait mené en collaboration entre Subatech, Le LPSC et l'IPNO.

3. ETUDES DE SCENARIOS

Pour réellement connaître les capacités des systèmes étudiés en termes globaux (réduction de déchets, économie de ressources naturelles,...), il est essentiel de les insérer dans des études de scénarios. Celles-ci permettent aussi d'évaluer de manière scientifique les différentes options concernant l'énergie nucléaire du futur et éclairer les choix à venir. Alors que les scénarios « officiels » se sont focalisés sur des hypothèses de déploiement de réacteurs régénérateurs (qui valorisent le plutonium), il faut explorer d'autres voies qui allient gestion des inventaires de fissile, minimisation des déchets et flexibilité quant aux choix des générations futures.

A. SCENARIO SYMBIOTIQUE ET FIN DE JEU

Il est montré qu'un parc de Réacteurs à Neutrons Rapides de 60 GWe met en jeu plus de 1000 tonnes de plutonium, auquel il convient d'ajouter une centaine de tonnes d'actinides mineurs si la transmutation est envisagée. Pour minimiser cet inventaire, il est envisageable de faire coexister les réacteurs de 4^{ème} génération avec les REP de façon durable. La matière fissile des combustibles usés des réacteurs thermiques (UOX et MOX) peut permettre d'alimenter les réacteurs rapides. On peut imaginer par exemple la poursuite du MOX en EPR tout en déployant quelques unités de RNR dédiées à utiliser le Plutonium contenu dans les combustibles MOX. Dans tous les cas, les inventaires combustibles deviennent des déchets à gérer dans le cas d'un arrêt du nucléaire. Cette gestion des déchets ultimes représente un enjeu capital, dans la mesure où elle est indépendante de la question de l'avenir de l'énergie nucléaire.

Il faut aussi noter que la production de déchets nucléaires de haute activité, qui focalisent l'attention du grand public, met en jeu des masses relativement faibles comparées aux inventaires du cycle (dont le plutonium) cités au paragraphe précédent.

Pour chacune des options envisagées pour le nucléaire du futur, il faut envisager différentes stratégies d'incinération qui pourront impliquer des réacteurs présents au moment de la décision d'arrêt, adaptés pour la circonstance (REP, RNR) ou des réacteurs consacrés à cette tâche (ADS, HTR...). Différents scénarios seront évalués, en premier lieu, en fonction de l'évolution de la radio-toxicité des déchets ultimes et, en second lieu, en fonction des risques liés aux flux de matières radioactives.

Notons enfin que si de nombreuses études de scénarios ont été menées ces dernières années au niveau français ou international, de nouvelles questions surgissent sans cesse selon les différentes visions sur le nucléaire du futur (réduction à 50% de l'électricité française, impact de Fukushima, de l'avènement du gaz de schiste US, ...). Cela nécessite de pouvoir tester rapidement différentes options de gestion des déchets ou matière valorisable pour quantifier la capacité de ces différentes stratégies à s'adapter aux différents choix politiques et industriels.

B. LE CYCLE THORIUM

L'étude de scénarios à l'équilibre intégrant les REP ou les CANDU thoriés montre que la haute conversion est nécessaire pour tirer avantage de l'introduction du thorium dans le cycle. C'est à cette condition qu'il sera possible de gagner sur la production de plutonium et donc d'actinides mineurs, mais aussi sur la consommation d'uranium naturel.

Dans tous les cas, la présence d' ^{232}U , inhérente à l'utilisation thorium, doit faire l'objet d'une attention particulière puisqu'il est responsable d'une émission gamma très énergique entraînant des difficultés sur le transport et la gestion des combustibles usés. Un code numérique (CHARS) a été développé à l'IPNO pour caractériser les matières irradiées et ainsi quantifier l'impact au niveau radiation du cycle du thorium. Ce module pourra alors être utilisé de manière plus systématique pour évaluer l'impact au niveau cycle de chacun des choix possibles d'un scénario. Il ressort de cette étude que les installations du cycle sont à repenser totalement (notamment concernant la fabrication du combustible) au vu des débits de dose mis en œuvre.

C. IDENTIFICATION DES SCENARIOS DE PROLIFERATION

Le groupe ERDRE de Subatech travaille depuis plusieurs années sur des simulations de scénarios de prolifération avec détection des antineutrinos des réacteurs. Ce sujet a donné lieu à des études génériques qui permettraient des discussions avec l'Agence Internationale de l'Energie Atomique pour définir des critères quantifiant l'aspect prolifération de différents systèmes ou cycle électronucléaire. Ces critères devraient être insérés dans les études de scénarios.

D. ASPECT TECHNICO-ECONOMIQUE

Les études de scénarios mises en œuvre dans les items précédents sont basées sur une description très détaillée des échanges et transformations de matières radioactives et utilisent une demande nucléaire « exogène ». A l'inverse, les outils de prospectives énergétiques technico-économiques comme POLES (Prospective Outlook for Long Term Energy Studies) sont basés sur une description très succincte des matières nucléaires mais sur des modèles très complexes pour décrire une « demande » nucléaire.

Des études réalisées avec POLES ont été initiées et permettent de faire ressortir des tendances à contre-courant des intuitions des physiciens. En effet, il a été montré que les réacteurs actuels et les réacteurs du futur ne seraient pas en compétition économique et qu'ils coexisteraient très certainement en symbiose. Il faut maintenant étudier plus finement ces effets de compétition en introduisant la possibilité du MOx dans les REP, ce qui remettrait en cause les capacités de démarrage des réacteurs du futur. Certains aspects de politique locale pourraient aussi être introduits (sortie du nucléaire, taxe carbone par exemple) pour identifier les sources d'énergies concurrentes du nucléaire.

Cette ouverture technico-économique permet de définir de nouveaux projets interdisciplinaires fédérant une communauté élargie à l'intérieur du CNRS.

E. DEVELOPPEMENT D'UN CODE DE SCENARIO

Pour étudier les options, leurs conséquences et les transitions du parc actuel vers un parc futur, il nous paraît indispensable de développer un code de scénario académique, ouvert, dont on maîtrise l'ensemble des approximations et des modèles. Dans toutes les études, la phase de transition de la situation actuelle basée sur le cycle uranium vers la situation étudiée est importante à décrire en détail, et notamment concernant la prise en compte de l'existant et de l'engagé ainsi que les temps mis en œuvre pour atteindre un équilibre. Les études de scénarios en phase de transition sont complexes et nécessitent la mise en œuvre de codes détaillés permettant de caractériser en détail le combustible aux différents instants du cycle : irradiation, refroidissement, fabrication.

Pour ces raisons, la communauté met au point un code, complet et détaillé, qui prend en compte l'ensemble (réacteur + cycle) simulant l'irradiation, le refroidissement, le retraitement et la fabrication du combustible (« de la mine au stockage »). Ce type de code nécessite des modèles d'évolution en cœur, du comportement des combustibles pour le recyclage et d'algorithmes spécifiques pour simuler la fabrication du combustible. Il nous paraît important de maîtriser chaque étape du code et le niveau d'approximation de chaque modèle mis en jeu dans le calcul. C'est pourquoi nous avons commencé à développer CLASS (Core Library for Advanced Scenario Simulation) depuis près de deux ans. Ce code, qui apparaît comme un enjeu majeur pour la physique académique, est d'ores et déjà développé en collaboration, notamment avec l'IRSN, portable et utilisable par les diverses équipes.

4. CONCLUSION

Les travaux « systèmes et scénarios » de l'IN2P3 contribue à alimenter les réflexions nationales notamment lors des auditions de la Commission Nationale d'Evaluation (CNE) ou en tant qu'expert mandaté par l'Office Parlementaire d'Evaluation Choix Scientifique et Technique (OPESCT). Cette discipline, par la valorisation des recherches de l'IN2P3 auprès des instances décisionnelles, permet d'ouvrir la recherche fondamentale à des questions plus sociétales. Nous avons particulièrement contribué à rendre visible la question des inventaires de plutonium dans les scénarios français de référence, ce qui a conduit la CNE à demander aux autres acteurs de travailler sur les scénarios de transmutation de l'inventaire en fin de filière. De la même façon, l'IN2P3 a été capable de répondre à différentes sollicitations sur le cycle du thorium en proposant une analyse scientifique mettant en lumière à la fois les avantages et les inconvénients inhérents à ce cycle.

Notre compétence est aujourd'hui reconnue par les autres acteurs nationaux et internationaux de l'énergie nucléaire, et largement mis à contribution dans l'effort de formation dans ce domaine. Sur la douzaine de chercheurs permanents impliqués, on peut compter trois quarts d'enseignants chercheurs (6 à Grenoble et 3 à Nantes). Ainsi, pour pérenniser la position stratégique du milieu académique, il semble nécessaire de renforcer les moyens humains de l'IN2P3 sur cette discipline, comme ce dernier est particulièrement sollicité par les instances décisionnelles, du fait de sa structuration et de son rôle national. La spécificité des équipes de l'IN2P3 réside dans l'indépendance vis-à-vis de la stratégie nationale. Cette indépendance permet de porter un autre regard et d'étudier toutes les conséquences des éventuels choix à venir.

Enfin, Notons que nos travaux permettent aussi d'ouvrir d'autres pans de la recherche et du développement à l'IN2P3 et plus largement au CNRS. Par exemple, les contraintes technologiques des ADS poussent les recherches en physique des accélérateurs sur la fiabilité des machines. Le couplage intrinsèque de la chimie et la neutronique dans un réacteur à sels fondus, mobilise également une communauté de radiochimiste et de physico-chimiste sur la problématique du retraitement pyrochimique du combustible nucléaire. Les études « systèmes et scénarios » représentent sans nul doute la jonction de l'ensemble des connaissances et des compétences sur la question de l'énergie nucléaire du futur, puisque chaque spécialité (neutronique, physique des accélérateurs, chimie du retraitement,...) alimente les données d'entrée de ces études.