

# Rapport Prospectives IN2P3 à 10 ans : Etudes Systèmes et Scénarios

S. David, D. Ridikas

DRAFT 1.0

## **Contexte**

L'énergie nucléaire connaît aujourd'hui une période de transition, et le futur de ce type d'énergie est encore mal défini. Les politiques énergétiques de pays comme les Etats-Unis et la Chine devraient être clarifiées dans la décennie à venir, et devraient influencer fortement le contexte nucléaire mondial. Il est quasiment acquis que l'option nucléaire soit retenue au niveau mondial pour le siècle à venir, mais il est difficile de déterminer à quel niveau de production on se situera en 2050. Il convient donc d'étudier en détail divers types de scénario, afin de définir le rôle spécifique de chacune des filières envisagées, les réacteurs standards fonctionnant à uranium enrichi, les différents types de réacteur de 4<sup>ème</sup> génération régénérateurs, ainsi que les réacteurs sous-critiques dédiés à l'incinération de déchets.

L'objectif des études de systèmes et scénarios est d'obtenir une description précise des différentes filières envisagées pour le futur. Les critères de comparaison concerneront notamment les déchets produits, et la capacité de déploiement. Le projet s'attachera également à définir la souplesse des différents scénarios étudiés, c'est à dire leur capacité d'adaptation à diverses évolutions de la demande plus ou moins brutales (arrêt à court terme, déploiement brutal, etc...). Les inventaires de matière fissile et les déchets accumulés représentent dans ce cas les points clés.

## **Bilan**

Les études systèmes et scénarios ont démarrés à l'IN2P3 et au DAPNIA il y a une dizaine d'année environ, et ont été motivées dans un premier temps par l'axe 1 (séparation et transmutation) de la loi de 1991 concernant la gestion de l'aval du cycle électronucléaire français. Ces études ont permis d'obtenir des descriptions détaillées de différents systèmes, réacteurs sous-critiques fonctionnant au thorium, ou incinérateurs d'actinides mineurs (combustible solide ou liquide). La voie des réacteurs à gaz à haute température a également été étudiée dans l'optique de l'incinération de plutonium civil et militaire. La problématique s'est rapidement élargie à la production d'énergie, notamment aux réacteurs à sels fondus à spectre thermique basés sur le cycle du thorium.

## **Principe des études**

Ces études nécessitent dans tous les cas une description précise et détaillée d'un réacteur donné. Ces calculs de neutroniques permettent de calculer l'évolution de la composition du cœur du réacteur, et de calculer à tout instant ses coefficients de sûreté (coefficients de température et de vidange). Intégrés ensuite dans une étude de scénario globale, ces résultats de neutronique permettent une description complète d'une filière, en terme notamment de quantité de déchets produits. Les phases de transition du parc actuel vers une filière innovante est crucial pour quantifier le potentiel de déploiement de ces nouveaux concepts.

## **Thème de prospective : Les scénarios à étudier**

Les concepts de 4<sup>ème</sup> génération ou les incinérateurs sous-critiques sont très différents, et présentent chacun des avantages et inconvénients. Ils nécessitent également d'importants efforts de R&D avant de valider la faisabilité industrielle. En plus d'une comparaison détaillée des performances de ces systèmes en terme de potentiel de déploiement, et de radiotoxicité induite, il conviendra également de définir précisément les différentes étapes pouvant mener à la construction d'un prototype, et de mettre en lumière les différentes synergies possibles de R&D entre ces différents concepts (matériaux, combustible, tenue du graphite, retraitement pyrochimique, etc...). Ces travaux devront être fortement couplés aux autres groupes travaillant dans la problématique de l'énergie nucléaire, en physique des réacteurs expérimentale ou en radiochimie du retraitement. Nous listons ici les différentes à mener dans les années qui viennent afin d'avoir une vue globale des différents scénarios envisageables pour le nucléaire du futur.

### ***Scénarios d'arrêt du nucléaire à court terme***

Dans ce type de scénario, le plutonium domine la radiotoxicité des combustibles usés et doit être considéré comme un déchet. L'alternative à l'enfouissement direct est donc une incinération rapide du plutonium, afin d'en réduire les stocks, et de le rendre non proliférant en réduisant la proportion d'isotopes fissiles. Le concept de réacteur à gaz à spectre thermique est dans ce cas un système très efficace, et a été étudié en détail. Ces études ont concerné dans un premier temps l'incinération du plutonium militaire dans un réacteur de type GT-MHR, et ont été ensuite appliquées au plutonium civil. Il convient de poursuivre ces études en optimisant les taux d'incinération du plutonium et des actinides mineurs plus lourds. Diverses voies doivent être explorées :

- Incinération des actinides (Pu+AM) dans deux combustibles séparés pour obtenir des taux de transmutation optimisés
- Diminution progressive du rapport graphite/combustible afin de durcir le spectre de neutrons et de favoriser l'incinération des actinides mineurs plus lourds
- Option de recyclage du combustible usés afin d'atteindre un équilibre et un inventaire total minimisé

### ***Scénarios de poursuite des réacteurs standard à Uranium enrichi***

La filière actuelle consomme essentiellement l'U-235, présent à 0.7% dans le minerai d'uranium. Sa poursuite à long terme est envisageable seulement dans le cas où l'augmentation de la production d'énergie nucléaire était limitée à un facteur 2 ou 3 au cours du siècle à venir. Dans ce type de scénario, il sera incontournable de proposer une gestion optimisée de l'aval du cycle.

Les études se focalisent sur la gestion du plutonium et des actinides mineurs. Dans ce type de scénario, le plutonium domine la radiotoxicité des déchets, et ne constitue pas une matière fissile précieuse à court terme (tant que l'uranium peut être extrait à des prix raisonnables). Il faudra donc envisager une gestion optimisée du plutonium, qui pose beaucoup de problèmes lorsqu'on le multi-recycle en spectre thermique. Un de ces problèmes est une production

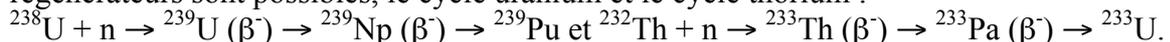
accrue d'actinides mineurs (Am et Cm notamment). Une option intéressante pour la gestion de ces noyaux non valorisables est l'incinération en réacteur dédié à spectre rapide. Pour des raisons de sûreté, ces réacteurs doivent être sous-critiques. L'objectif est donc d'obtenir une description comparative des différentes options basées sur la filière standard actuelle, avec ou sans multi-recyclage du plutonium, avec ou sans strate incinératrice d'actinides mineurs. Il faut noter que les réacteurs à gaz décrits dans les scénarios d'arrêt du nucléaire doivent être évalués également dans ce type de scénarios.

Pour incinérer les actinides mineurs en réacteur dédié, à spectre rapide, il est nécessaire d'utiliser des cœurs sous-critiques, alimentés par une source externe de neutrons, produits par un faisceau de protons de 1 GeV environ et d'une intensité de plusieurs dizaines de milliampères. Une étude quantitative des capacités d'incinération des systèmes hybrides nécessite la mise au point d'outils de simulation spécifiques, permettant de calculer tous les paramètres, du proton de haute énergie aux neutrons de multiplication. Ces outils devront en outre prendre en compte les développements actuels concernant la cible de spallation à utiliser et combiner ses propriétés à celle d'un réacteur à spectre rapide. Le développement de cette étude sera orienté sur un système hybride de référence (caloporteur et cible de spallation Pb-Bi) en s'appuyant sur les projets européens travaillant à la mise au point d'un démonstrateur et envisagera différents scénarios d'incinération (recyclage Am+Cm+Np, Am+Cm, Am seul).

Il faut enfin noter que dans une hypothèse de croissance limitée du parc nucléaire mondial, il conviendra également d'évaluer l'intérêt du cycle du thorium, qui permettrait de limiter la production de déchets et la prolifération des matières fissiles, par une utilisation d'un combustible Th/U/Pu (Le Pu est dégradé, et l'U-233 fissile est produit dans une matrice d'U naturel).

### ***Scénarios de passage aux réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération***

Dans le cas d'un déploiement massif du nucléaire dans la première moitié du siècle, le passage à des réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération devra s'opérer avant 2050. Deux cycles régénérateurs sont possibles, le cycle uranium et le cycle thorium :



Le cycle basé sur l'Uranium nécessite le recours à des réacteurs à neutrons rapides pour pouvoir régénérer la matière fissile consommée. Le cycle thorium peut atteindre la régénération en spectre thermique, en limitant ainsi considérablement l'inventaire de matière fissile à l'équilibre (2 tonnes d'U-233 pour 12 tonnes de Pu en RNR).

### ***Cycle Uranium en réacteurs à neutrons rapides***

Le cycle uranium en spectre rapide est très présent dans le forum Génération 4, destiné à étudier au niveau international les différents types de réacteurs durables, déployables dès 2030. A l'heure actuelle, seuls les réacteurs rapides refroidis au sodium sont considérés comme déployables à court terme, tout en posant des problèmes importants liés à l'utilisation d'une grande quantité de sodium liquide. Le plomb liquide pose des problèmes de corrosion importants qui rendent difficile l'utilisation industrielle de ce concept, le gaz quant à lui nécessite le développement d'un combustible spécifique. Nous souhaitons étudier ces différents concepts (Na, Pb, He) à l'aide de simulations neutroniques précises, et étudier dans quelles mesures ils sont capables de prendre la suite des réacteurs standards.

Du point de vue de la production de déchets, de nombreuses études sont à mener, concernant notamment l'impact d'un multirecyclage des actinides mineurs (Np, Am, Cm) sur le fonctionnement du réacteur. De plus, dans certains scénarios, il peut être demandé aux réacteurs rapides, de recycler leurs propres actinides, mais en plus d'incinérer les stocks d'Américium et de Curium issus des réacteurs actuels, qui auraient été accumulés après la mise en place d'une usine de séparation poussée (permettant ainsi de réduire la radiotoxicité à long terme des verres issus des REP/EPR). Il conviendra donc d'étudier très précisément les scénarios de transition de la filière actuelle vers une filière à neutrons rapides, en prenant en compte les différentes (et nombreuses) options de traitement des déchets (des réacteurs actuels et futurs). Etant donné les constantes de temps mises en jeu dans le nucléaire, ces études concernant des réacteurs déployables après 2035, doivent donner des indications claires et des recommandations afin d'optimiser la gestion des déchets actuels et ceux produits dans un futur proche.

#### *Scénarios basés sur le cycle thorium en réacteurs à sels fondus*

Comme il a été mentionné, le cycle du thorium permet d'atteindre des taux de régénération de matière fissile positifs même en spectre thermique. Mais cela nécessite l'utilisation d'un combustible liquide, qui permet d'être retraité en ligne, afin d'en extraire efficacement les poisons neutroniques (essentiellement les produits de fission qui s'accumulent) qui rendraient rapidement impossible la régénération.

La filière Th/U utilisant des réacteurs à sels fondus de type MSBR est aujourd'hui bien documentée en terme de simulation neutronique. Ces études doivent se poursuivre afin d'explorer les différentes voies possibles pour simplifier le retraitement du combustible, et de rendre ce système plus compétitif par rapport aux autres réacteurs « durables » sélectionnés par le forum GEN IV.

Les études précédentes ont mis en évidence que ces réacteurs à sels fondus devaient être démarrés dans un état proche de la situation d'équilibre, c'est à dire avec un combustible Th/U-233, ce qui pose naturellement la question de la production d'U-233 en amont de cette filière. Des études importantes ont été lancées cette année pour quantifier les performances de différents types de réacteurs pour produire de l'U-233 à partir de thorium et de plutonium. Les réacteurs de technologie actuelle font bien entendu partie des systèmes à étudier, notamment les réacteurs à eau légère pressurisée (REP ou EPR) et les CANDU (réacteurs refroidis à l'eau lourde), ces derniers ayant un bilan neutronique favorable. Les réacteurs type HTR (réacteurs à spectre thermique refroidis au gaz décrits plus haut) doivent également être étudiés en détail. Les résultats de neutronique devront ensuite être intégrés dans des scénarios décrivant les phases de transition du parc actuel produisant le plutonium, et les réacteurs RSF Th/U à l'équilibre, nécessitant de disposer d'U-233.

#### *Scénarios basés sur le couplage des cycles uranium et thorium*

On a vu qu'à l'équilibre, le cycle thorium seul nécessite l'utilisation de réacteurs à sels fondus, dont les avantages sont très importants, mais dont la technologie n'est pas encore acquise. Il est donc très intéressant d'imaginer des scénarios qui ne font pas appel aux combustibles liquides. Afin d'obtenir un nucléaire durable avec le cycle thorium en combustible solide (presque régénérateur), il faudra fournir en permanence de la matière fissile, afin de compenser celle qui n'est pas régénérée. Pour illustrer ceci, un réacteur thermique de 1GWe (soit une tonne de matière fissionnée par an environ) pourrait atteindre

des taux de conversion de 0.9, c'est à dire que le déficit de matière fissile serait de l'ordre de 100 kg/an. Une solution serait de coupler ces réacteurs thorium à combustible solide et spectre thermique à des réacteurs à neutrons rapides uranium-plutonium produisant de l'uranium-233 dans des couvertures de thorium. Des études très préliminaires ont montré que les bilans neutroniques doivent être favorables, ces réacteurs permettant de produire au moins 300 kg de matière fissile dans leurs couvertures. Concernant les réacteurs à neutrons thermiques, il s'agit d'évaluer les mêmes systèmes cités précédemment, mais optimisés pour atteindre des taux de conversion le plus proche possible de 1. Concernant les réacteurs à neutrons rapides, il s'agit d'étudier en détail leurs capacités à produire de l'uranium-233 dans des couvertures en thorium. Les trois caloporteurs envisageables pour les réacteurs rapides (sodium, plomb et hélium) devront être comparés précisément.

## **Simulation des systèmes**

### ***Evolution du combustible***

L'étude des scénarios décrits dans la partie précédente nécessite d'effectuer des simulations précises de neutronique, afin de calculer l'évolution du combustible et tous les paramètres de sûreté à différents instants. Nous utilisons le code validé Monte Carlo MCNP, développé à Los Alamos, couplé à différentes bases de données. Ce code permet de simuler des géométries les plus réalistes possibles, et de décrire l'ensemble des paramètres statiques du système (spectre, flux, sections efficaces moyennes, etc...). Le calcul de l'évolution du cœur nécessite la mise en place d'un code d'évolution, qui résout les équations différentielles (équations de Bateman) régissant l'évolution des centaines de noyaux présents dans le réacteur (actinides et produits de fission). Un développement important de bases de données spécifiques est également nécessaire, afin de prendre en compte les différents effets de température (modérateur, effet Doppler, ...) et de mener les calculs des coefficients de sûreté.

Il est envisagé de faire valider ce code de simulation afin de pouvoir le diffuser dans le milieu industriel (EDF étant déjà intéressé par les premières versions). Cet objectif demandera sans doute une aide spécifique dans les années à venir.

### ***Etudes de sûreté***

Les études de sûreté des différents concepts innovants sont primordiales. Pour chaque système (RSF, ADS, RNR He, etc, ...) des études spécifiques doivent être menées.

Dans un réacteur à sels fondus, les effets de température et de vidange sont très particuliers. Le couplage de la neutronique à la thermohydraulique doit être étudié en détail et représente un nouveau sujet de recherche qui doit être poursuivi, ce qui demande le développement de compétence et de créer des collaborations avec la communauté de spécialiste de thermohydraulique.

Dans le cas des réacteurs dédiés à la transmutation, la diminution de la proportion de neutrons retardés et des effets de température (Doppler, vidange) conduit à envisager des systèmes sous-critiques pilotés par accélérateur. Deux types de couplage peuvent être explorés :

- ADS Accelerator Driven System : la source de neutrons externe est simplement amplifiée par le cœur sous-critique fonctionnant relativement loin de la sous-criticité ( $k_{eff} \approx 0.95-0.97$ ), ce qui nécessite une puissance de faisceau de protons très importante.

- ACS Accelerator Coupling System : dans ce concept, le source de neutrons externe est directement reliée à la puissance du cœur en simulant les neutrons retardés « manquant » au pilotage d'un réacteur critique. L'intensité de l'accélérateur est donc piloté par la puissance du cœur. Cela permet d'envisager de travailler beaucoup plus proche de la criticité et de réduire ainsi la coût lié à l'accélérateur.

Dans ce contexte, un modèle simplifié a été mis au point et permet d'envisager des études de sûreté des différents systèmes envisagés. Il prend en compte une description de la thermo-hydraulique et de effets de contre-réaction du cœur. Il permet de caractériser les transitoires des concepts critiques et sous-critiques (ADS et ACS). Dans le futur, il doit être permettre une étude quantitative en terme de contrôle de sûreté des réacteurs sous-critiques dédiés à la transmutation (ADS et ACS), de réacteurs à combustibles liquides critiques ou sous-critiques et des réacteurs à gaz, à spectre thermique ou rapide.

### ***Calculs de sensibilité***

L'étude de systèmes innovants fait appel à des bases de données souvent non validées, l'étude des sensibilités aux données utilisées est alors très importante, afin d'une part de donner des barres d'erreur sur les différentes paramètres calculés, et d'autre part d'orienter les mesures de données nucléaires appliquées aux systèmes du futur.

Des études sont en cours pour développer et valider un ensemble d'outils permettant l'analyse des sensibilités de la criticité, et de paramètres intégraux (taux de combustion, paramètres de contre-réaction, etc...) aux données, ainsi que les incertitudes associées. Ces études se focalisent aujourd'hui sur les réacteurs à sels fondus au thorium et sur les systèmes sous-critiques incinérateurs, et devront dans le futur être élargies aux autres types de réacteurs innovants.

Les méthodes utilisées aujourd'hui pour la théorie des perturbations sont basées sur des solutions déterministes des équations de transport des neutrons dans les réacteurs. L'utilisation de programmes stochastiques pourrait dans le futur permettre de limiter les hypothèses (discrétisations spatiales et énergétiques) nécessaires aux calculs déterministes. L'application de la théorie des perturbations aux équations d'évolution du combustible conduirait à accéder aux incertitudes sur les quantités finales de déchets produits sur l'ensemble du cycle. Des outils stochastiques et déterministes 3D portés sur machines parallèles seront tout à fait indispensables.

### ***Application au démantèlement***

Le démantèlement des centrales civiles nécessite de gérer une grande quantité de matière irradiée pendant toute la durée de vie de la centrale. Afin de minimiser les volumes à traiter et de définir une stratégie optimale de stockage de ces matières radioactives, il est nécessaire d'évaluer précisément l'activation des structures entourant le cœur du réacteur. Dans ce contexte, le groupe du SPhN s'est engagé à jouer un rôle majeur dans le démantèlement de différentes installations (reacteur de l'Université de Strasbourg, réacteur Ulysse (INSTN), réacteur Rapsodie (CEA), accélérateur Saturne (CEA) et Lure (CNRS)). Ces études se font en collaboration avec EDF, et consistent à simuler par méthode Monte Carlo la vie du réacteur et de calculer l'activation de son environnement. L'expérience acquise dans ce domaine pourra être appliquée au design de réacteurs innovants, notamment du point de vue du choix des matériaux environnants.

## **Couplage aux autres groupes travaillant dans la problématique de l'énergie nucléaire**

Ces études générales de systèmes et scénarios sont bien entendu étroitement liées à d'autres thèmes de recherche, plus expérimentaux. Citons en particulier la physique des réacteurs expérimentale, telle qu'elle est menée dans les expériences MUSE et TRADE ou PEREN. Un couplage plus fort avec cette discipline est indispensable à court terme, si l'on souhaite aller vers la validation expérimentale des systèmes étudiés par simulation.

Dans tout concept du futur, le retraitement prend une place très importante, que ce soit en combustible liquide ou solide. C'est pourquoi une collaboration étroite entre physiciens et chimistes est à encourager. Le concept de réacteur à sels fondus fonctionnant au cycle du thorium permet en ce moment un fort rapprochement entre physiciens et chimistes, et il est souhaitable que ce genre de collaboration étroite soit encouragé, et élargi aux autres systèmes du futur, notamment autour du combustible (et de son retraitement) pour réacteurs à gaz (spectre thermique ou rapide), ou des combustibles solides à base de thorium, qui serviraient à produire l'U-233 en amont d'une filière à sels fondus.

### **Conclusion**

Dans les 5 années à venir, il existe un grand nombre de systèmes et scénarios à étudier en détail, de la neutronique fine du réacteur à l'étude plus globale du déploiement de la filière. Ces études par simulation commencent à sélectionner les voies intéressantes pour le futur. A l'horizon de 10 ans, il apparaît clairement qu'un couplage fort avec l'expérience doit être encouragé, qu'il s'agisse de physique des réacteurs expérimentales, ou de chimie de retraitement.