

**DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE AUX DÉCHETS :
RECHERCHES ACTUELLES**

FROM NUCLEAR FUELS TO WASTE: CURRENT RESEARCH

La filière thorium, une option intéressante pour le nucléaire du futur

Jean-Marie Loiseaux^{a*}, Sylvain David^b, Daniel Heuer^a, Alexis Nuttin^a

^a Institut des sciences nucléaires, Université Joseph Fourier et IN2P3-CNRS, 53, avenue des Martyrs, 38026 Grenoble cedex, France

^b Institut de physique nucléaire d'Orsay, Université Paris XI et IN2P3-CNRS, 15, rue Clémenceau, 91406 Orsay, France

Reçu le 28 mars 2002 ; accepté après révision 24 juin 2002

Note présentée par Édouard Brézin.

Résumé

La forte croissance des besoins en énergie primaire au niveau mondial rend probable une sollicitation de l'énergie nucléaire à un niveau qui pour être significatif, conduit à une très forte augmentation de la production. Compte tenu des réserves d'Uranium, cette forte croissance nécessite l'utilisation de réacteurs surgénérateurs de matière fissile. L'étude des filières surgénératrices à base de combustible Uranium ou Thorium montre clairement que l'utilisation du Thorium présente des avantages déterminants, en termes de flexibilité, de quantité d'actinides mineurs dans le cycle du combustible, de même qu'en termes de radiotoxicités des inventaires et rejets. *Pour citer cet article : J.-M. Loiseaux et al., C. R. Physique 3 (2002) 1023–1034.*

© 2002 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

énergie nucléaire / cycle du thorium / radiotoxicités des déchets / option pour le combustible / réacteurs innovants / surgénérateur

Thorium fuel, an interesting option for future nuclear energy

Abstract

To satisfy a significant part of the primary energy demand at the world level by 2050, fission nuclear energy production has to grow by a large factor (more than 10). Due to the natural limitations of Uranium reserves (at a reasonable price) such a development makes necessary the use of breeder reactors. A comparative study of such breeder reactors using Uranium or Thorium based fuels shows that the use of Thorium based fuel has clear advantages in terms of flexibility, of minor actinides contents in the fuel cycle as well as for the inventory and disposal radiotoxicities. *To cite this article: J.-M. Loiseaux et al., C. R. Physique 3 (2002) 1023–1034.*

© 2002 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

nuclear energy / thorium cycle / waste radiotoxicities / fuel options / innovative reactors / breeder reactors

* Correspondence and reprints.

Adresse e-mail : loiseaux@isn.in2p3.fr (J.-M. Loiseaux).

1. Introduction

Comment définir le nucléaire du futur sans définir à priori l'ordre de grandeur de la part qu'il pourrait prendre dans la fourniture d'énergie à l'échelle mondiale et à une échéance raisonnable ? La demande d'énergie primaire, au niveau mondial est estimée devoir croître d'ici 2050 par un facteur 2 à 3, par rapport au niveau actuel. Les limitations dans l'utilisation des énergies fossiles (épuiement des ressources en gaz et pétrole et/ou rejets de CO₂), de même que les capacités limitées des énergies renouvelables, conduisent à des scénarios où le nucléaire devrait être sollicité pour fournir une part significative de l'énergie au niveau mondial (20 % de l'énergie primaire par exemple) et ce dès 2050.

Une telle projection conduirait à une extension de la puissance du parc de réacteurs nucléaires par un facteur compris entre 10 et 15. On remarquera ici qu'au niveau français, la part du nucléaire dans la consommation d'énergie primaire a atteint 30 % en moins de 20 ans. Au niveau mondial, le nucléaire du futur devrait donc se développer très rapidement pour pouvoir avoir un rôle significatif dans la fourniture d'énergie en 2050.

Un tel déploiement de l'énergie nucléaire est-il possible techniquement ? Quelles conditions doit-il remplir pour être raisonnablement acceptable à tous les sens du terme (durabilité, impact sur l'environnement, sûreté, adaptabilité aux besoins), quels types de réacteurs, quels combustibles utiliser ? Ces questions sont discutées ci-dessous en privilégiant l'aspect du choix du combustible et des propriétés de la filière Thorium.

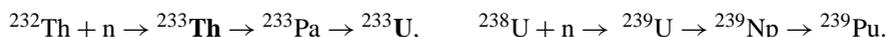
2. Les options possibles pour le nucléaire du futur

2.1. Les Réacteurs à Eau Pressurisée (REP)

L'extension rapide (facteur 10–15 d'ici 2050) du parc des réacteurs REP actuels utilisant de l'Uranium enrichi poserait plusieurs difficultés. En effet, avec une consommation d'environ 200 tonnes d'Uranium naturel par GWe-an, on aboutirait à un épuiement des ressources estimées (16 × 10⁶ tonnes) en 25 ans, une durée inférieure au temps de vie d'un réacteur. En supposant que des ressources additionnelles soient économiquement exploitables pour un fonctionnement de 40 ans, la production de Plutonium serait de 30 000 tonnes. La gestion des combustibles usés, de même que les besoins en usines d'enrichissement, poseraient de sérieux problèmes. Une généralisation d'un recyclage du Plutonium dans des combustibles MOX ne diminuerait la consommation d'Uranium naturel que d'environ 30 %. Un déploiement important et rapide à partir de cette filière ne semble donc pas réunir les conditions de durabilité au moins, ni d'impact sur l'environnement.

2.2. Les réacteurs surgénérateurs

Cette forte extension du parc de REP est d'autant plus difficile à envisager qu'il est possible d'utiliser à 100 % les ressources naturelles en Uranium naturel ou en Thorium naturel. En effet la production de 1 GWe-an nécessite la fission de seulement une tonne de noyaux lourds. L'utilisation complète de ²³⁸U ou ²³²Th pour la fission peut se faire via une régénération de la matière fissile (²³⁹Pu ou ²³³U) dans le réacteur lui-même, à partir des noyaux fertiles ²³⁸U et ²³²Th par les réactions suivantes :



Par un tel mécanisme, un réacteur de 1 GWe peut être iso-générateur ou surgénérateur en matière fissile, et permettre, dans ce dernier cas, le démarrage de nouveaux réacteurs.

Pour de tels réacteurs iso ou surgénérateurs le combustible doit être recyclé. En effet, les produits de fission se comportent comme des poisons neutroniques, et une extraction des produits de fission doit être réalisée périodiquement. Par ailleurs la consommation de matière fertile (1 t/GWe-an) doit être compensée par une alimentation en Uranium naturel ou Thorium naturel. Mais avec une consommation aussi réduite,

un parc de quelques 5000 GWe consommerait seulement 5000 tonnes d'Uranium naturel ou de Thorium par an, ce qui conduit à une durabilité d'une telle filière de quelques milliers d'années.

L'idée d'utiliser des Réacteurs à Neutrons Rapides (RNR) avec un combustible à base d'Uranium, pour un usage intensif de l'énergie nucléaire a été envisagée dès les années 60. Plusieurs réacteurs expérimentaux ont été construits de par le monde, et un réacteur à l'échelle industrielle, Superphénix, a été construit et a fonctionné. Les performances d'un tel système ont été amplement étudiées et expérimentées. L'Uranium naturel est complètement utilisé pour la fission. Le réacteur est à volonté iso ou surgénérateur.

Mais deux autres voies iso ou surgénératrices de matière fissile sont possibles. L'une consiste à utiliser un combustible à base de Thorium dans un réacteur à neutrons rapides de technologie similaire à celle utilisée pour le combustible à base d'Uranium. L'autre est basée sur l'utilisation d'un combustible à base de Thorium, dans un réacteur à neutrons thermiques et combustible mobile à des fins de retraitement en ligne (Réacteurs à Sels Fondus – RSF).

Mentionnons ici qu'une étape intermédiaire pourrait consister à utiliser partiellement le cycle Thorium–Uranium 233 dans des réacteurs thermiques de technologies existantes ou en développement tels que les REP ou les réacteurs à haute température. Ces réacteurs à combustibles solides ne pourraient être isogénérateurs et devraient donc être alimentés avec l'Uranium 233 issu de la conversion en Uranium 233 du Plutonium des REP à l'aide de réacteurs à neutrons rapides (voir Section 5).

En conclusion de cette section introductive sur les voies possibles pour un nucléaire du futur en forte expansion, il est clair que les trois voies iso-surgénératrices doivent être explorées et comparées quant à leurs propriétés, avec notamment la composition de leur inventaire, leur cycle du combustible, la composition et la radiotoxicité des rejets de retraitement, et enfin leur capacité d'extension pour répondre à une demande de croissance rapide du parc.

3. Les outils utilisés pour les études comparées des diverses filières ; études de scénarios et critères de comparaison

L'étude des performances et caractéristiques détaillées d'un parc de réacteurs est réalisée grâce à une utilisation couplée de deux types de codes. Un code de neutronique qui permet de calculer le flux neutronique, les taux de réaction sur tous les constituants du combustible, la réactivité du réacteur, la répartition spatiale de la densité de puissance. Le code, utilisé pour nos études, est le code Monte Carlo MCNP qui peut prendre en compte tous les détails de géométrie, de compositions, de paramètres physiques d'un réacteur. Un tel code basé sur le suivi individuel de l'histoire de chaque neutron ne nécessite aucune simplification géométrique, ni de traitement des neutrons par groupes d'énergie.

Utilisant les taux de réaction et la composition du réacteur à un instant t , un programme d'évolution calcule à un instant Δt plus tard la nouvelle composition du réacteur en tenant compte des taux de réaction et des éventuelles décroissances des éléments du réacteur. Un calcul MCNP permet alors de recalculer les nouvelles caractéristiques neutroniques du réacteur (réactivité, nouveaux taux de réaction, etc.). Le pas en temps peut varier de quelques jours à quelques mois suivant les temps caractéristiques d'évolution du réacteur.

L'étude d'une filière suppose donc d'abord une définition détaillée et réaliste du réacteur (configuration du combustible, du caloporteur, éléments de structure, choix d'un réflecteur, choix d'une puissance de réacteur, avec des contraintes sur la densité de puissance, etc.).

Les études de scénarios pour une filière donnée sont poursuivies jusqu'à ce qu'un état d'équilibre soit atteint, ce qui peut correspondre à quelques années ou à plusieurs dizaines d'années de fonctionnement de réacteur. Il y a donc nécessité de définir les caractéristiques du cycle du combustible (refroidissement, retraitement, taux d'extraction des noyaux lourds, re-fabrication des combustibles).

Les outils de simulation décrits ci-dessus permettent, avec une puissance de calcul raisonnable, d'obtenir une bonne précision à toutes les étapes d'une filière de son démarrage à son état d'équilibre s'il existe. La précision des résultats est en fait limitée par la précision des sections efficaces d'interactions neutroniques.

Ces études par simulation permettent de procéder aux choix de composition initiale du combustible, de fréquence de retraitement, d'injection ou de ré-injection de matière fertile et fissile qui permettent un maintien de la réactivité. L'évolution des combustibles est totalement prise en compte sur des périodes pouvant aller jusqu'à des centaines d'années. La comparaison de filières qui va suivre, se fait donc à partir des résultats obtenus par cette simulation numérique très détaillée.

C'est ainsi qu'une filière à l'état d'équilibre est caractérisée par la description de son inventaire dans le cycle par unité de puissance et de ses rejets par unité d'énergie produite.

À ce stade, la radioactivité et la radiotoxicité associée des inventaires et rejets sont évaluées. Pour la période de transition le cumul des rejets sur le temps de transition sera présenté.

Enfin, il est important de caractériser une filière par ses capacités de surgénération. En effet, comme nous l'avons indiqué brièvement dans l'introduction, il faut s'attendre à une forte sollicitation du nucléaire pour fournir une partie notable de l'énergie primaire mondiale à l'échelle 2050, et il faut donc prévoir une forte extension du parc de réacteurs et donc d'importants besoins en matière fissile.

La caractérisation complète d'une filière nécessiterait également que les paramètres de sûreté associés soient calculés en détail (effet Doppler, de vidange etc.) Ces études sont en cours mais ne sont pas présentées ici.

Nous allons donc expliciter quelques résultats concernant les deux filières de réacteur au Thorium utilisant l'une, un réacteur à neutrons rapides et l'autre, un réacteur à neutrons épithermiques. Les comparaisons seront faites avec la filière REP actuelle ou avec la filière RNR basée sur l'utilisation du combustible Uranium–Plutonium, largement étudiée par ailleurs.

4. Les caractéristiques des trois filières iso ou surgénératrices

La filière Uranium en Réacteur à Neutrons Rapides (RNR U–Pu) conçue pour prendre « naturellement » la suite d'un parc REP à Uranium enrichi, a fait l'objet de nombreuses études et développements. Le développement de cette filière en RNR refroidi au Sodium, bien que très avancé, a été arrêté ou très ralenti par la plupart des grands pays. Une autre technologie pour ce type de réacteur est actuellement à l'étude. Il s'agit de réacteurs à neutrons rapides toujours, avec un caloporteur gaz fonctionnant à haute température (voir exposé de F. Carré) ou avec le Plomb comme caloporteur.

Le cycle du combustible pour les RNR haute température, n'est pas complètement défini, mais il reste que l'extraction de l'Uranium et du Plutonium des combustibles usés est bien maîtrisée au niveau industriel, tandis que la faisabilité de l'extraction de l'Américium et du Curium a été démontrée à un stade préindustriel. Enfin la fabrication de combustibles MOX (U–Pu) est bien maîtrisée.

Les capacités de surgénération de matière fissile (ici le Plutonium) de cette filière ont été évaluées. Elles correspondent à un temps de doublement de l'inventaire dans le cycle de 40 ans ou encore une production de matière fissile de 300 kg/GWe-an.

Tableau 1. RNR U–Pu, caractéristiques inventaires dans le cycle à l'équilibre et rejets par GWe-an

RNR U–Pu	U	Pu	Np	Am	Cm
Inventaire dans le cycle en kg/GWe	96866	12000	350	530	135
Recyclage homogène					
Rejets : kg/GWe-an					
Recyclage homogène	–	1	0.05	0.4	0.1
Pertes : U, Pu 1/1000 ; Am, Cm 1/100					
Surgénération de matières fissiles : 300 Kg/Gwe-an					

Les questions qui restent à résoudre pour cette filière RNR U–Pu, sont outre le combustible et son retraitement si on emploie des combustibles réfractaires, la gestion et le recyclage des éléments Américium et Curium (voir exposé CEA [1]), qui sont en quantités notables et qui ne peuvent réellement être rejetés avec les produits de fission à cause de leur radiotoxicité à long terme. Une solution pourrait être de les incinérer dans des réacteurs spécifiques, et notamment les réacteurs sous-critiques pilotés par accélérateur.

5. La filière thorium en réacteur à neutrons rapides – (RNR Th–U3)

L'utilisation de RNR basé sur le combustible Thorium a été proposée de façon très explicite par Rubbia et al. en 1995 [2]. Sa proposition d'un réacteur piloté par accélérateur, et utilisant du plomb fondu comme caloporteur, a mis en évidence l'intérêt de ce combustible pour minimiser la radioactivité α ou la radiotoxicité des rejets en noyaux lourds. Dans le cadre du 4^{ème} PCRD, une étude a aussi été réalisée sur l'ensemble du cycle Thorium par Schapira et al. [3] et la faisabilité de réacteurs critiques avec ce combustible par Tomasi et al. [4].

Nous avons repris cette étude en détail, de façon à mettre en évidence l'influence du caloporteur, les possibilités de surgénération, les facteurs importants pour le maintien de la réactivité au cours de la combustion, et enfin pour caractériser complètement la phase de transition entre le démarrage de tels réacteurs et la phase d'équilibre. Nous avons réalisé en parallèle une étude de réacteur à neutrons rapides pour la filière RNR U–Pu et la filière RNR Th–U3 [5].

La filière Thorium à l'équilibre est caractérisée par un combustible oxyde $\text{ThO}_2\text{--UO}_2$ dans des proportions de 90 % et 10 %. Cependant au démarrage le réacteur est chargé avec un combustible composé d'oxyde de Thorium–oxyde de Plutonium, puisque l'Uranium 233 n'est pas disponible. Les RNR Th–(Pu)U3 atteignent assez rapidement (15 ans), leurs fonctionnement et composition d'équilibre pour ce qui concerne le remplacement du Plutonium 239 par l'Uranium 233. Ils mettent cependant plusieurs dizaines d'années à stabiliser puis réduire les inventaires en isotopes de masses supérieures à 239. Ces études ont été réalisées avec différents caloporteurs (plomb ou gaz) et nous n'avons pas observé de différences très notables.

On peut résumer les principaux résultats de ces études très détaillées de la façon suivante :

- L'utilisation du Plutonium issu des combustibles usés des REP actuels, permet de démarrer dans de bonnes conditions cette filière RNR Th(Pu)–U3. Durant la phase de transition ou à l'état d'équilibre les variations de réactivité sont très limitées pour un inventaire restant 5 ans en réacteur. Pour le cycle du combustible, le temps nécessaire à son retraitement et sa re-fabrication a été supposé égal à 5 ans. Pour un fonctionnement en continu du réacteur, il faut disposer de deux inventaires réacteur. Dans ces conditions, l'inventaire initial dans le cycle, le double de l'inventaire en réacteur, est de 10 à 12 tonnes de Plutonium pour chaque RNR Th–(Pu)U3 de 1 GWe. Le Plutonium nécessaire correspond à la production d'un REP de 1 GWe pendant 40 à 50 ans.

Tableau 2. RNR Th–U3, caractéristiques inventaires dans le cycle à l'équilibre et rejets par GWe-an

RNR Th–U3	Th	Pa	U	Pu	Am	Cm
Inventaire cycle kg/GWe	104 500	227	10 000	162	1,2	0,12
Recyclage homogène						
Rejets kg/GWe-an						
Recyclage homogène		0,2	1	0,016	0,001	0,0001
Pertes : U, Pu 1/1000 ; Am, Cm 1/100						
Surgénération de matières fissiles estimées : 170 Kg/GWe-an						

- On note que durant la phase de transition l'inventaire « s'enrichit » en actinides mineurs et notamment en Am et Cm dans des proportions proches de celles de la filière Uranium Plutonium. Pendant cette transition, il y a donc lieu de prévoir aussi comment on incinère ces deux éléments (Am et Cm) particulièrement difficiles à gérer. Les recycle-t-on de façon homogène, c'est-à-dire « mélangés » au combustible principal ou, de façon plus spécifique, les incinère-t-on dans des réacteurs dédiés comme les Réacteurs Hybrides pilotés par accélérateur ?
- On notera aussi la présence de quantités notables d'Uranium 232 (environ 2/1000 de l'Uranium 233). La chaîne de décroissance de cet isotope de l'Uranium de période 68.9 années comporte l'émission d'un gamma de 2.6 MeV, très pénétrant qui nécessite une protection renforcée lors de la manipulation des combustibles recyclés. Par ailleurs, cette propriété rend plus difficile et contrôlable les applications de type proliférant.

À l'équilibre, et en réacteur critique, le temps de doublement d'un inventaire d'Uranium 233 présent dans le cycle est estimé à 60 ans, soit une production de ^{233}U de 170 kg par GWe-an. Une réduction significative de ce temps de doublement peut être obtenue avec l'utilisation de système sous-critique piloté par accélérateur. Dans ce cas, le temps de doublement effectif peut être ramené à 40 ans pour un réacteur de $k = 0,97$ et une production de ^{233}U de 250 kg GWe-an.

Le déploiement d'un parc du nucléaire du futur se présente donc de la façon suivante.

Un parc REP après une durée de fonctionnement de 40 ans peut être reconverti en un parc de même puissance en RNR Th(Pu) U3. Ce parc ayant un temps de doublement de 60 ans, ne pourrait croître que d'un facteur 1,6 en 30 ans.

Cette filière permet donc :

- De reconvertir rapidement le parc actuel en un parc de réacteur à cycle fermé de même puissance, légèrement surgénérateur. La technologie des Réacteurs à Neutrons Rapides RNR Th–(Pu)U3 est similaire à celle utilisée pour la filière RNR Uranium.
- La teneur des inventaires et rejets en Américium et Curium est réduite d'un facteur supérieur à 400 par rapport au cycle U–Pu en RNR après la transition (cf. Tableaux 1 et 2).
- La capacité de cette filière RNR Th–Pu–U3 caractérisée comme la filière RNR U–Pu par un fort inventaire de matière fissile n'a pas la capacité d'une augmentation rapide du parc. La multiplication du parc par un facteur 10, demande en effet plus de 140 ans sans surgénération additionnelle par système ADS.

6. La filière thorium en réacteur à neutrons épithermiques

A l'inverse du combustible U–Pu de la filière Uranium, les propriétés neutroniques de la filière Th–U3 permettent une utilisation de ce combustible en mode régénérateur ou surgénérateur avec des réacteurs à neutrons thermiques ou épithermiques. Cependant, l'empoisonnement par les produits de fission est si rapide qu'il est nécessaire d'extraire les produits de fission en continu de sorte que l'inventaire de ceux-ci reste limité à quelques centaines de kg dans un réacteur de 1 GWe (En RNR il atteint 5000 kg) (cf. Fig. 2).

On satisfait à cette exigence en utilisant un combustible mobile qui permet cette purification en continu. Un schéma de principe illustre les principales caractéristiques d'un réacteur RSF pour réacteur à sels fondus où le combustible est composé de fluorures dans les proportions données Fig. 1. Le combustible qui sert alors de caloporteur est par ailleurs sous une forme qui permet une extraction en continu des produits de fission.

Ce type de réacteur a fait l'objet de développements et d'un test expérimental à Oak-Ridge (USA) dans les années 1960 avec le sigle MSRE pour Molten Salt Reactor Experiment. Ce réacteur a fonctionné de façon satisfaisante pendant 5 ans, démontrant la stabilité du sel, de même que le contrôle des effets de corrosion. Il a été de nouveau proposé comme incinérateur de déchets par Bowman à partir de 1990 [6].

Les études de ce type de réacteur (Fig. 1) ont été reprises plus récemment à l'initiative d'EDF (Projet AMSTER) et par les équipes CNRS en collaboration avec EDF. Des études par simulation comme celles

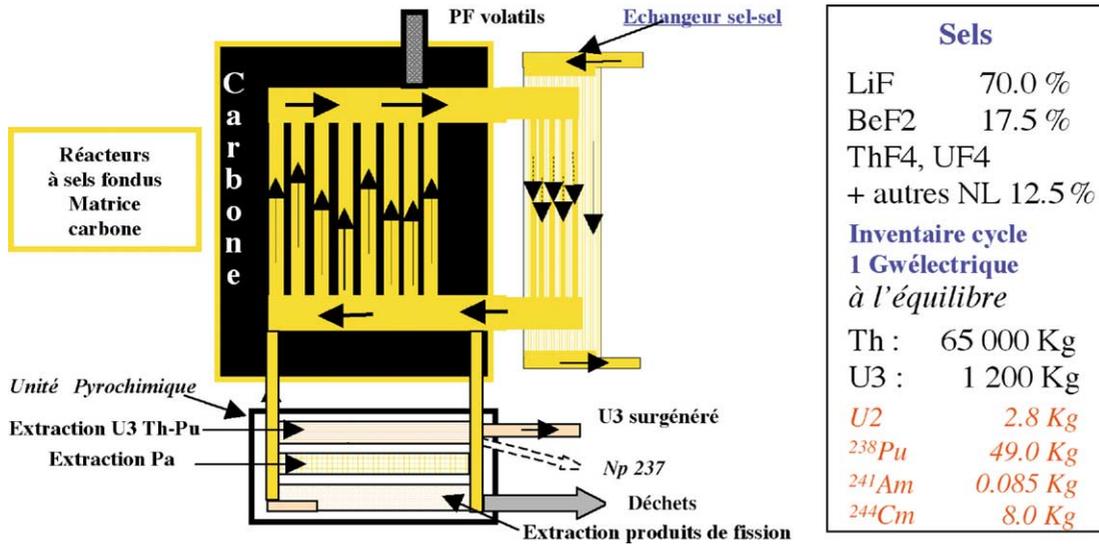


Figure 1. Représentation schématique d'un réacteurs à Sels Fondus. Caractéristiques, spectre épithermique, purification, dosage du combustible en ligne, faible inventaire, faible inventaire en matière fissile, faible réserve de réactivité.

Limitation de l'empoisonnement des produits de fission par extraction continue en réacteur à sels fondus, comparée au cas du combustible solide

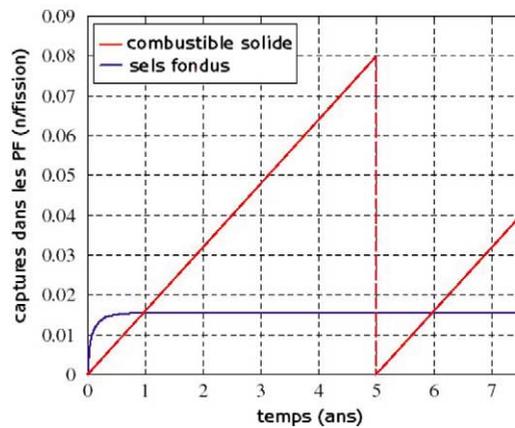


Figure 2. Évolution de la capture des neutrons par les produits de fission à partir du démarrage d'un réacteur à combustible solide (RNR) et d'un réacteur à combustible mobile retiré en ligne (RSF).

décrites plus haut ont permis de montrer la flexibilité et les performances potentielles de ce type de ce réacteur.

Le réacteur RSF est donc composé d'un massif de carbone pur, percé de canaux de diamètre 10 à 15 cm, dans lesquels circule le combustible sous forme de sels fondus. Une partie du sel qui circule est dérivée pour passage au travers d'une unité pyro-chimique qui a pour fonction globale d'extraire en continu les produits de fissions produits de façon à limiter leur inventaire, de contrôler la ré-injection de matière fissile (²³³U), d'alimenter le réacteur en Thorium et d'extraire éventuellement le ²³³Pa pour le laisser décroître en dehors du flux neutronique.

L'unité pyro-chimique ne sera pas décrite en détail ici. Remarquons que sa fonction essentielle est une fonction de purification du combustible de ses produits de fission et que par conséquent un taux d'extraction de 20 ou 50 % des produits de fission est tout à fait acceptable pourvu que la proportion de noyaux lourds co-extraits soit très faible. Ces produits de fission extraits sont en effet rejetés pour stockage, entreposage ou transmutation ultérieure.

Les apports dus à l'utilisation d'un combustible mobile sont nombreux et discutés ci-dessous.

- La réactivité du réacteur peut être en permanence ajustée par le réglage de la ré-injection de matière fissile, les temps caractéristiques de cet ajustement étant de l'ordre de l'heure pour une variation équivalente à 1β , soit 300 pcm. Ce réacteur n'a donc pas besoin de réserve de réactivité, ce qui bien sûr est positif du point de vue de la sûreté et de l'économie de neutron.
- Une partie notable des produits de fission est extraite par un bullage d'hélium qui entraîne les produits de fission gazeux et certains produits de fission métalliques sous forme de micro particules.
- L'unité chimique a essentiellement pour tâche de purifier le combustible des produits de fission de type Lanthanides. Cette extraction peut être plus ou moins rapide suivant les performances attendues du système en terme de surgénération. Les temps caractéristiques d'extraction de l'unité de pyrochimie peuvent varier de quelques semaines à un an selon qu'on veuille optimiser la surgénération ou qu'on se contente d'un fonctionnement en mode isogénérateur.

6.1. Les apports du point de vue de la sûreté

En cas de perte de refroidissement, il est en général prévu que le fluide combustible se vidange très rapidement dans un bac de rétention calculé pour que la chaleur résiduelle puisse s'évacuer de façon passive. Nous avons déjà indiqué que le stock de produits de fission en réacteur pouvait être réduit à quelques centaines de kg pour un réacteur de 1 GWe. Ce stock de produits de fission est donc 10 fois inférieur au stock moyen de produit de fission dans un réacteur à combustible solide qui reste 5 ans en réacteur.

6.2. L'inventaire en matière fissile

Dans la Fig. 1 on notera le faible inventaire en matière fissile d'un RSF de 1 GWe. Celui-ci est en effet inférieur d'un facteur 10 par rapport à celui d'un RNR Th-U3 ou RNR U-Pu. Avec des coefficients de pertes de noyaux lourds qui seraient comparables à ceux obtenus par les combustibles solides, les pertes en Uranium seraient donc 10 fois inférieures. Ce faible inventaire outre ses avantages du point de vue de la sûreté, se révèle un avantage majeur pour le démarrage ou le déploiement rapide d'une telle filière. Le temps de doublement de l'inventaire-cycle est d'environ 20 ans.

Le démarrage de cette filière nécessite néanmoins de la matière fissile. Il est possible d'utiliser le Plutonium issu des REP à cette fin. Mais les inventaires initiaux nécessitent des quantités importantes de Plutonium, notamment quand celui-ci ne comporte plus de ^{241}Pu . Une autre solution basée sur l'utilisation d'un parc mixte RSF Th-U3 et RNR U-Pu ou Th-Pu est discutée dans la section suivante.

6.3. La production de noyaux lourds

Avec un spectre neutronique de type épithermique, on s'attend à une accumulation des isotopes pairs en neutrons des éléments Pu, Am et Cm produits par captures successives compte tenu des rapports de section efficaces de capture et de fission. Une extraction en continu du ^{237}Np peut réduire cette accumulation par un facteur supérieur à 50, cf. Fig. 3.

La filière Th-U3 en combustibles mobiles type RSF a un intérêt potentiel considérable en termes d'inventaire de matière fissile et de radiotoxicité des rejets. Rapide à démarrer, elle est 10 fois plus rapide à consommer son inventaire en cas de décision d'arrêt. Il reste que la faisabilité de l'unité pyrochimique de purification du combustible de ses produits de fission doit être étudiée concrètement.

Figure 3. Quantités d’actinides mineurs présentes dans l’inventaire d’un réacteur RSF de 1 GWe avec ou sans extraction en ligne du Neptunium.

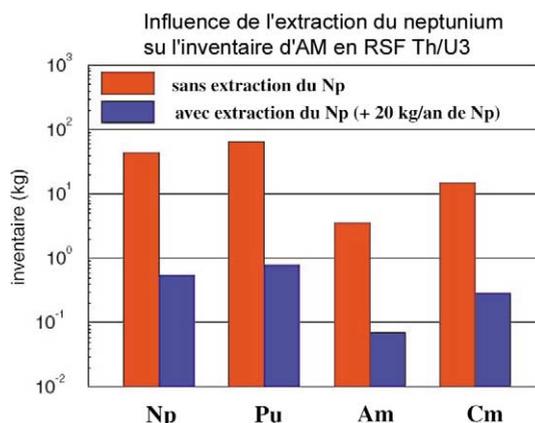


Tableau 3. RSF Th–U3, caractéristiques inventaires à l’équilibre pour un réacteur de 1 GWe et rejets par GWe-an

RSF Th–U3	^{232}Th	U (^{233}U)	Np	Pu	Am	Cm
Inventaire cycle Kg/GWe	65 000	2200	30	605	3,6	15
Recyclage homogène		(1200)				
Rejets kg/GWe-an						
Recyclage homogène		0,2	0,03	0,06	0,004	0,02
Pertes : U, Pu 1/1000 ; Am, Cm 1/100						
Inventaire cycle (Np extrait) kg/GWe	65 000	2200	0,5	0,8	0,07	0,3
		(1200)				
Rejets kg/GWe-an (Np extrait)		0,2	20	0,0001	0,0001	0,0003
Surgénération de matières fissiles : 60 Kg/Gwe-an						

7. Discussion comparative des filières RNR U–Pu, RNR Th–U3 et RSF Th–U3

L’examen des Tableaux 1, 2 et 3 montre que, par rapport au combustible à base d’Uranium on obtient une réduction d’un facteur supérieur à 400 des inventaires en Américium et Curium en faveur de la filière Thorium utilisant les réacteurs RNR ou RSF avec extraction du Neptunium. La filière Thorium permet donc de s’affranchir de la gestion difficile de ces deux éléments dans le cycle du combustible.

Les rejets étant liés directement aux inventaires, il s’ensuit un avantage considérable quand à la radiotoxicité potentielle des inventaires et des déchets. Cette forte réduction de la radiotoxicité à moyen et long terme (Fig. 4) est un facteur important si l’on pense que la puissance du parc électronucléaire pourrait s’accroître par un facteur 10 à 15. Réduire fortement les contraintes de stockage des déchets ultimes est un élément particulièrement sensible pour une acceptabilité d’un nucléaire plus intensif.

La question d’un déploiement rapide d’un parc électronucléaire pose inévitablement la question suivante. Dispose-t-on ou peut-on fabriquer suffisamment de matière fissile pour multiplier par 10 ou 15 le parc de réacteurs au niveau mondial ? Pour un tel déploiement, il est évident que les réacteurs RSF à combustible thorium avec un inventaire dix fois inférieur à celui des RNR et un temps de doublement de

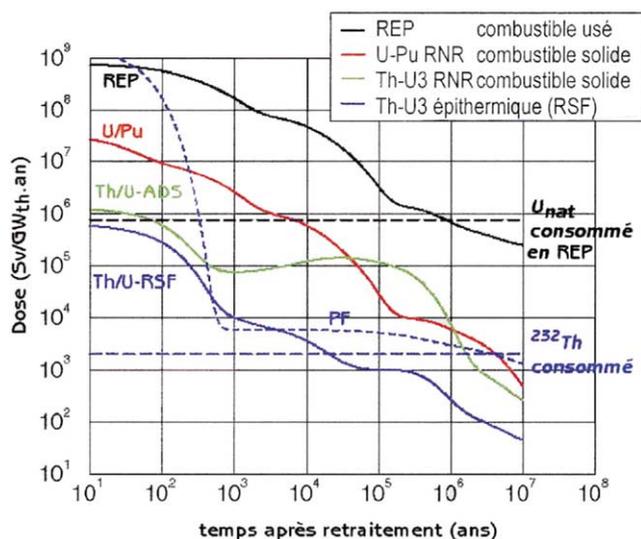


Figure 4. Conversion d'un parc REP de 50 GWe en un parc à deux composantes RNR – RSF ThU3. Extension avec gestion optimale du Pu et surgénération des RSF prise en compte.

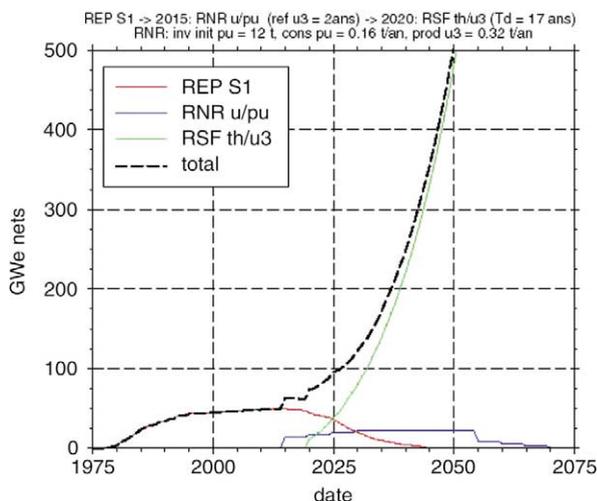
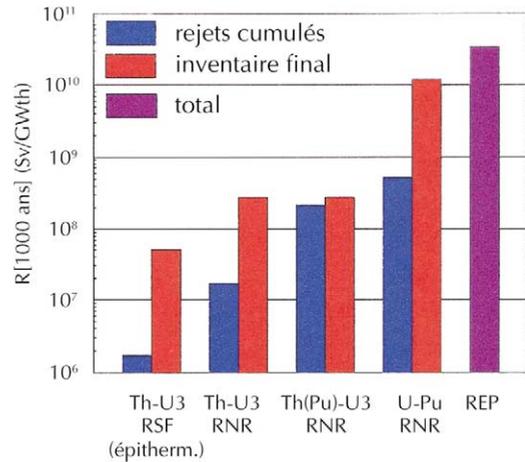


Figure 5. Extension possible du parc à deux composantes RNR – RSF ThU3 – gestion optimale du Pu et surgénération des RSF prises en compte.

seulement 20 ans, sont une option extrêmement prometteuse pourvu que l'on puisse les démarrer avec de l'Uranium 233. Pour un déploiement rapide des RSF Th–U233, on peut profiter de la forte capacité des RNR (U–Pu ou Th–Pu) à produire de la matière fissile (ici de l'U233) pour démarrer rapidement un parc de RSF. Un parc de RNR (U–Pu) ou (Th–Pu) peut en effet être utilisé pour convertir le Plutonium des REP en ²³³U. Une étude préliminaire montre que l'Uranium 233 produit dans la couverture de 20 RNR U–Pu permet de démarrer 5 à 7 RSF Th–U3 par an. Intégrant le temps de doublement des RSF on peut montrer qu'une extension du parc par un facteur 10 est techniquement possible d'ici 2050 du point de vue de la matière fissile. (Cf. exposé CNE 1-02-2002 et Fig. 5.)

On peut noter ici que pour démarrer le nucléaire du futur, quelque soit l'option prise, le plutonium produit par les REP actuels est pleinement utilisé en RNR. L'utilisation de ce Plutonium en RNR Th–Pu–U3 entraîne une production transitoire importante d'Américium et de Curium. Pour comparer les différentes filières entre elles, nous présentons, dans la Fig. 6, les radiotoxicités des différents cycles de combustibles

Figure 6. Radiotoxicité générée par différents cycles du combustible pour 200 ans de production d'énergie et après 1000 ans de décroissance.



(inventaires et cumul des rejets) pour 200 ans de fonctionnement, intégrant donc complètement les phases de transition.

On constatera sur la Fig. 6, que la filière RNR U–Pu et RNR Th–Pu diffèrent peu sur l'intégrale des rejets, mais que la radiotoxicité des inventaires est 50 fois plus grande pour la filière RNR U–Pu que pour la filière RNR Th–Pu. Par ailleurs, pour les filières Th–U3 RNR ou RSF, la radiotoxicité des rejets à l'équilibre est environ 30 fois inférieure à celle de la filière RNR U–Pu.

8. Conclusion

Au niveau mondial, un développement durable et intensif de l'énergie nucléaire est actuellement à envisager pour répondre aux besoins d'énergie primaire à l'échelle de 2050. Face à ce rapide développement possible, il nous a semblé important d'examiner de façon comparative les avantages et inconvénients de l'utilisation de combustibles à base d'Uranium ou de Thorium.

Les résultats des études de scénario présentées ici conduisent à des conclusions assez claires :

- La filière REP actuelle ne peut assurer, à elle seule, un tel développement pour des questions de ressources d'Uranium et de non fermeture satisfaisante du cycle du combustible.
- Le passage à des filières surgénératrices est nécessaire. Le Plutonium produit par une génération de REP permet de convertir le parc actuel en un parc de RNR U–Pu ou Th–(Pu)U3 de même puissance avec des temps de doublement de 40 à 60 ans. Mais, seuls, de tels parcs de RNR ne peuvent donc se développer très rapidement d'ici 2050.
- La filière Thorium en réacteur à sels fondus et neutrons épithermiques, couplée à un parc de RNR convertisseurs de Plutonium en Uranium 233 permet d'envisager une multiplication du parc d'un facteur 10 en moins de 40 ans.
- Dans tous les cas l'utilisation du combustible à base de Thorium permet une réduction d'un facteur 30 de la radiotoxicité des inventaires. Le même facteur 30 ou plus est obtenu pour la réduction de la radiotoxicité des rejets après la phase de transition.

Ainsi la filière Thorium apparaît-elle comme particulièrement intéressante pour le nucléaire du futur, puisqu'elle permet à la fois un rapide accroissement du parc de production d'énergie nucléaire de fission en même temps qu'une réduction déterminante de la radiotoxicité dans le cycle du combustible et celle de ses rejets ultimes.

Nous avons discuté de l'évolution de l'énergie nucléaire au niveau mondial sans discuter du cas très particulier de la France qui produit déjà 30 % de son énergie primaire avec des réacteurs nucléaires.

L'évolution de son parc est actuellement discutée, et il nous semble très important que celle-ci s'insère de façon optimale dans le contexte mondial évoqué plus haut.

Références bibliographiques

- [1] J.-B. Thomas, C. R. Physique 3 (2002) 783–796.
- [2] C. Rubbia et al., Conceptual design of a fast neutron operated high power energy amplifier, CERN/AT/95-44 (ET) 1995.
- [3] H. Gruppelaar, J.P. Schapira, Thorium as a waste management option, EUR-19142EN, Thorium cycle.
- [4] J. Tomasi, Thorium as a waste management option, EUR-19142EN, Thorium cycle.
- [5] S. David, et al., Fast subcritical hybrid reactors for energy production: evolution of physical parameters and induced radiotoxicities, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 443 (2000) 510–530.
- [6] C.D. Bowman, Nuclear energy generation and waste transmutation using an accelerator driven intense thermal neutron source, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 320 (1992) 336–367.

Discussion

Commentaire de R. Dautray

La comparaison des courbes de décroissance de radiotoxicité, qui sont couramment données pour hiérarchiser des cycles complets de combustibles, sont en coordonnées logarithmiques. Regardons ce que cela donne en coordonnées linéaires pour un cas simple, celui du cycle actuel d'U et de Pu. La perspective introduite change du tout au tout pour le non spécialiste.

Réponse de J.-M. Loiseaux

Ceci est tout à fait exact lorsque la puissance du parc est constante. Mais il ne faut pas oublier que le nucléaire du futur devrait voir la puissance du parc mondial croître d'un facteur supérieur à 10.

Commentaire de H. Métivier

Depuis deux jours j'entends parler de radiotoxicité, terme qui domine les débats et les enjeux.

Dans le document de l'Académie des sciences «Radiochimie : matière radioactive et rayonnements ionisants» il est écrit page 352 : «la radiotoxicité est basée sur la seule approche dosimétrique, sous tendant la relation dose/effet linéaire sans seuil pour l'apparition d'un effet stochastique, quels que soient les effets biologiques réellement observés.» On peut en douter pour la situation particulière de la gestion des déchets.

La loi Bataille, merveilleuse incitation à la recherche, a malheureusement oublié deux axes :

1. La relance d'études radio toxicologiques dédiées réellement aux déchets ;
2. Les études sociologiques sur l'acceptation du risque.

Réponse de J.-M. Loiseaux

Je suis convaincu aussi que la seule approche de la radiotoxicité potentielle est insuffisante à plusieurs égards. C'est la raison pour laquelle j'ai insisté surtout sur les inventaires de U233, Pu, Am et Cm dans le cycle par unité de puissance installée (1 GWe) pour chacune des options.