



**Recherche sur l'énergie nucléaire dans les domaines du cycle du combustible, des réacteurs à eau légère et des réacteurs à neutrons rapides**

**B. BARRE et N. CAMARCAT**  
(CEA, 31-33, rue de la Fédération 75752 PARIS Cedex 15 - France)

**Résumé.** L'article présente les programmes de recherche menés par le CEA pour améliorer la sûreté de la prochaine génération de réacteurs, gérer le plutonium et les déchets de fin de cycle et accroître la compétitivité économique du nucléaire.

Les besoins énergétiques mondiaux vont croître durant les prochaines décennies alors que les ressources énergétiques fossiles sont limitées quand bien même elles apparaissent aujourd'hui à la fois abondantes et bon marché. Par ailleurs, les conséquences sur l'environnement de la production énergétique sont la source d'une inquiétude croissante de la part du public, et ceci doit être pris en compte dans le développement futur de tous les moyens de production énergétique.

Il en résulte que l'énergie nucléaire sera vraisemblablement appelée à apporter une contribution importante dans le paysage énergétique d'un nombre croissant de pays, pour satisfaire leurs besoins énergétiques, pourvu que les réacteurs futurs satisfassent aux impératifs suivants :

- une amélioration toujours plus grande de la sûreté nucléaire,
- une gestion de la fin du cycle du combustible et une réduction des déchets produits,
- un accroissement de la compétitivité économique.

La recherche au CEA dans le domaine des réacteurs à eau légère et des réacteurs à neutrons rapides est articulée autour de ces 3 objectifs.

1. Amélioration continue de la sûreté

"Une amélioration importante de la sûreté lors de la conception de la prochaine génération de centrales nucléaires (par rapport aux centrales actuelles) est possible et nécessaire malgré les résultats satisfaisants de l'exploitation des centrales dans les deux pays". Cette phrase est tirée d'un document [1] relatant la démarche de sûreté commune pour les réacteurs à eau sous pression (REP) du futur en France et en Allemagne.

Au cours des années 60 et 70, nombre d'améliorations ont été apportées à la conception des REP afin de réduire progressivement l'éventualité d'une fusion du coeur. Confiant dans l'approche probabiliste, les concepteurs, les constructeurs et les exploitants de centrales nucléaires avaient admis que le risque total, égal au produit de la probabilité d'accident par les conséquences potentielles pour le public, restait à un niveau "acceptable". L'accident de Three Miles Island (TMI), et la contestation publique qui en a résulté, a été la preuve du contraire, bien que plusieurs années se soient écoulées avant que nous ayons pu savoir avec certitude de combien nous avons frôlé une fusion totale du coeur.

Au début des années 80, beaucoup de travail et de réflexion ont été consacrés à la réduction draconienne de la probabilité d'un accident grave dans les réacteurs à eau légère, soit en se basant sur l'expérience des réacteurs en exploitation, ce qu'on appelle la voie "évolutionnaire", soit en mettant au point de nouvelles techniques faisant davantage appel à des dispositifs passifs de sûreté. La catastrophe de Tchernobyl, bien qu'elle ne se soit pas produite du tout sur un réacteur à eau légère, a ébranlé durablement la confiance du public en la sûreté de tous les types de réacteurs.

Cette constatation a conduit les exploitants et les autorités de sûreté française et allemande à exprimer de nouvelles exigences pour les réacteurs du futur : en plus de l'objectif de réduire encore davantage la fréquence d'une fusion de coeur, et même si la probabilité d'un tel accident est réduite à une valeur extrêmement basse, l'ensemble de ses conséquences doit être limité. Quelle qu'en soit la probabilité, le pire accident possible ne doit pas conduire à une évacuation prolongée des populations avoisinantes, ce qui exclut tout relâchement massif et précoce de radioactivité hors de l'enceinte du réacteur. Framatome et Siemens, par l'intermédiaire de leur filiale commune NPI, viennent de commencer la conception de l'European Pressurized Water Reactor (EFR), qui répond à ces impératifs.

Nous pensons que tout réacteur futur devra répondre à des impératifs identiques ou équivalents à ceux-ci. Il faudra faire la preuve que dans les cas (improbables) d'une fusion de coeur,

- soit le "corium" restera à l'intérieur de la cuve du réacteur (cas type TMI),
- soit, dans le cas où il percerait la cuve, le corium restera contenu dans l'enceinte de confinement, et que cette enceinte conservera son intégrité.

Cette deuxième condition implique à son tour qu'il faudra refroidir le corium pour empêcher qu'il traverse le béton (le syndrome chinois), prévenir toute surpression de vapeur ou explosion d'hydrogène, et évacuer la chaleur résiduelle.

Afin de faire la démonstration des nouveaux dispositifs destinés à réduire les conséquences d'une fusion de coeur, des programmes substantiels de recherche et d'études sont en cours, effectués pour beaucoup d'entre eux dans le cadre de coopérations internationales. Le but de ces programmes de recherche est :

- de comprendre et de modéliser les phénomènes physiques prenant place pendant et après la fusion du coeur. Ceci implique un certain nombre d'expériences "analytiques" afin de développer des modèles physiques et numériques représentatifs de chaque

phénomène, puis la mise au point de codes de calcul reliant tous les modèles afin de simuler une séquence complète d'accident, et la conception d'une expérience "globale" destinée à valider ces codes et conforter leurs résultats lorsqu'ils seront appliqués à des réacteurs grandeur nature.

- de proposer des solutions techniques (recueil du corium, recombinaison de l'hydrogène, etc.) qui garantissent l'atténuation des conséquences d'un tel accident et la protection de l'environnement.

Le Commissariat à l'Energie Atomique est fortement impliqué dans de tels programmes de recherche. Citons entre autres ses expériences PHEBUS-PF et VULCANO.

## 2. Gestion de la fin du cycle du combustible

### 2.1 Gestion du plutonium à moyen terme

Depuis le début du développement du nucléaire jusqu'à il y a environ 20 ans, l'énergie nucléaire était supposée croître bien plus rapidement qu'elle ne l'a fait en réalité, et tout le monde craignait que la croissance créerait des tensions importantes sur le marché de l'uranium, voire même un problème réel de ressources en uranium au début du XXIème siècle. Au vu de toutes ces menaces, il avait été prévu d'utiliser tout le plutonium en provenance du retraitement pour alimenter des réacteurs à neutrons rapides (RNR), un type de réacteur qui fait une bien meilleure utilisation de l'énergie potentielle contenue dans l'uranium.

Depuis lors les perspectives du nucléaire ont été largement réduites dans le monde. En l'an 2000 il y aura moins de 400 GWe installés dans le monde au lieu des quelques 1600 GWe prévus en 1975. Au lieu d'une pénurie d'uranium, on assiste à une pléthore avec des prix tellement faibles que de nombreuses mines sont conduites à la fermeture. Dans cette situation nouvelle du monde nucléaire, une montée en puissance précoce des RNR ne se justifie plus car leur technologie plus complexe les pénalisent par un investissement supérieur à celui des réacteurs à eau légère, un surcoût qui n'est plus compensé par un gain sur le cycle du combustible.

C'est ce qui a amené la France à se lancer dès 1987 dans le recyclage du plutonium dans les REP sous forme de combustible oxyde mixte d'uranium et de plutonium (MOX). Actuellement, 7 REP français sont exploités en mode recyclage MOX ; et MELOX, la première usine de fabrication de combustible MOX vient d'entrer en production à Marcoule. Le comportement du combustible MOX s'est montré être tout à fait satisfaisant, avec un taux de combustion atteignant 39 GWj/t. Du combustible chargé dans les réacteurs St Laurent B1 et B2 a fait son suivi de charge sans aucun problème. De plus, le retraitement du MOX a été démontré en 1992 lors de campagnes expérimentales au CEA à Marcoule puis lors de la dissolution de 4,5 tonnes à La Hague.

Dans la génération présente de centrales, le recyclage des MOX est limité au chargement d'un tiers du combustible sous forme MOX, ce qui implique la conception de coeurs dans lesquels des éléments MOX et UO<sub>2</sub> doivent coexister avec, comme contrepartie, une plus grande complexité et un surcoût de fabrication des MOX. De ce fait, nous pensons que

les centrales nucléaires futures devraient être conçues pour un chargement à 100 % de MOX, possibilité à l'étude dans le cadre du projet EPR et objet de recherches au CEA. Même avec un chargement partiel du MOX, comme c'est le cas aujourd'hui, l'électricien français EDF considère que le recyclage MOX est neutre sur le plan économique, mais deviendra favorable dès que les MOX seront autorisés à atteindre un taux de combustion aussi élevé que le combustible normal UO<sub>2</sub>.

Dans le cas de coeurs complets composés à 100 % de combustible MOX, l'option du recyclage du plutonium après retraitement devrait se montrer très intéressante.

Au plan industriel, l'électricien français EDF (5) recycle le plutonium issu des combustibles UOX dans le cadre d'une politique de monorecyclage fondée sur le principe de l'égalité des flux du plutonium issu du retraitement et du plutonium réintroduit dans les assemblages MOX. Il est toutefois normal de se poser la question de cyclages supplémentaires du plutonium des combustibles MOX après leur sortie des réacteurs. Il est à noter que les cyclages multiples du plutonium dans les réacteurs à eau légère ont des limites :

Chaque cycle dégrade la qualité isotopique du plutonium par accroissement de la proportion des isotopes "pairs" Pu 238, Pu 240, Pu 242 qui sont des poisons neutroniques. La volonté de conserver une valeur négative au coefficient de vide dans les coeurs de REP impose une limite supérieure à la concentration en plutonium total dans le combustible. Ceci a pour effet de limiter à son tour le nombre de recyclages possibles, dépendant de la politique adoptée pour le mélange de plutonium "frais" et de "n-ième" génération. Dans l'optique actuelle, le multirecyclage dans les REP n'apparaît pas offrir d'avantage économique.

Le plutonium dégradé pourrait en fait n'être utilisé que dans des réacteurs à neutrons rapides dans lesquels le rapport des sections efficaces de fission aux captures est plus favorable. Cette capacité des réacteurs rapides d'accepter n'importe quelle qualité de plutonium est l'objet principal du programme CAPRA [4] lancé par le CEA et mis en oeuvre dans un cadre international. Les mêmes caractéristiques neutroniques des RNR conduisent à étudier aussi dans le cadre du programme CAPRA leur capacité à transmuter les actinides mineurs à vie longue.

## 2.2 Gestion des déchets à long terme

En plus de la gestion du plutonium, matière nucléaire au contenu énergétique important (1g Pu > 1 tep), il importe de prendre en compte la gestion des déchets ultimes du cycle du combustible des réacteurs à fission : stériles de mines pour l'amont du cycle, produits de fission et actinides mineurs pour l'aval du cycle. Ces déchets sont actuellement entreposés dans des conditions de sûreté garanties. L'opinion publique est particulièrement sensible à leur stockage (*disposal*) de façon sûre sur une très longue période.

En France, où nous voulons garder la possibilité de réutiliser les sous-produits comme nous le faisons déjà, compte tenu de notre pauvreté en ressources énergétiques, nous sommes sortis d'une situation de blocage grâce à la loi Bataille de décembre 1991 qui a

défini une procédure et un « cahier des charges » qui correspondent bien aux attentes, à la fois du public et des industriels de l'électronucléaire.

Ce cahier des charges conduira l'industrie à démontrer la faisabilité des différentes voies qui pourraient être adoptées :

- si la réglementation demande une démonstration de la tenue du stockage et du confinement des déchets sur une période -déjà très longue - de quelques milliers d'années, cette démonstration est possible, et elle reposera surtout sur le conditionnement des colis.
- si la réglementation demande une garantie à beaucoup plus long terme, au-delà de ce que peut prédire avec précision la géologie, il faudra sans doute réduire le « terme source » par recyclages successifs du plutonium peut être associés à l'incinération de l'américium, voire d'autres déchets à vie très longue (à noter que cette voie passe presque obligatoirement par les RNR, du fait des propriétés physiques des neutrons rapides).

Dans ces conditions, il est urgent de ne pas choisir prématurément une solution « définitive » : les procédés mis en oeuvre actuellement sont éprouvés et permettent d'attendre en toute sûreté bien au-delà de 2006, date de rendez-vous avec le Parlement pour fournir les résultats de R & D qui fonderont le choix des Pouvoirs Publics.

Il est donc aujourd'hui nécessaire de garder ouvertes, sans irréversibilité, toutes les options qui figurent dans la Loi Bataille, ce qui veut dire :

- poursuivre la politique de recyclage, sous forme de MOX, du plutonium séparé par retraitement des combustibles de première génération, ainsi que celui de l'uranium de retraitement.
- se donner de la souplesse de gestion en aménageant des capacités d'entreposage (temporary storage).
- mener activement la R & D sur la séparation poussée des différents déchets, tronc commun à leur conditionnement ou à leur destruction par transmutation. Le CEA développe à cet effet le programme SPIN de séparation chimique avancée par rapport au procédé actuel PUREX (6).
- poursuivre l'acquisition des connaissances sur les RNR, et, en particulier, leur souplesse de gestion du plutonium, et leur capacité de transmutation des actinides mineurs.
- renforcer la qualification du conditionnement des colis.
- et enfin, mener à son terme l'expérimentation en laboratoires souterrains, car on ne peut, dans aucun scénario, se passer totalement de stockage en couche géologique profonde.

### 3. Compétitivité économique

Toute amélioration de leur cycle du combustible et même de leur sûreté serait inutile si le prix des réacteurs futurs sortait des limites du marché. Ce n'est ni la sûreté ni l'acceptation par le public qui est le frein principal à la reprise du nucléaire aux USA, mais l'économie. C'est seulement le très bon résultat d'exploitation des centrales d'EDF qui rend l'électricité nucléaire compétitive en France, bien que notre programme se distingue par une dimension sans égale et une normalisation. Prenant en compte tous les coûts, le nucléaire est meilleur marché que le charbon ou le pétrole pour la production d'énergie en base, mais avec les prix de combustible actuels, la marge n'est plus guère confortable, ce qui était le cas au début des années 80, à la suite des deux chocs pétroliers.

Le nucléaire demandant des investissements importants, les meilleurs moyens d'accroître sa compétitivité sont d'augmenter l'espérance de vie des centrales afin d'amortir l'investissement sur une plus longue période ainsi que le taux de disponibilité des centrales. Disposant d'un parc de plus de 50 centrales installées, un simple accroissement en disponibilité de 2 % équivaut à une centrale entière.

Le CEA apporte son soutien au programme "Durée de Vie" de l'EDF par ses recherches pour tirer le meilleur parti des possibilités des matériaux nouveaux, plus résistants au vieillissement et aux dommages dus aux rayonnements, moins susceptibles à la corrosion, moins activables, etc.

### Références

- [1] W. Frisch, A. Jahns, D. Quéniart, G. Gros  
Common safety approach for future PWR in France and in Germany  
ANS International Topical Meeting on Advances Reactors Safety, Pittsburgh, April 1994.
- [2] B. Barré, N. Camarcat, P. Caseau  
Nuclear Fuel Cycle and Nuclear Waste : how to prepare long term strategies  
Conference of the World Energy Council, Tokyo 1995.
- [3] J. Bouchard  
The effect of fuel cycle strategies on the choice of the next generation reactors  
ENS TOPNUX'93, April 25-28, 1993.
- [4] B. Barré, J. Bouchard  
Les stratégies d'emploi du plutonium à long terme  
Revue Générale Nucléaire  
RGN 1995-N° 1 January-February 1995.

- [5] B. Estève  
Aval du Cycle du Combustible Nucléaire  
Positionnement d'Electricité de France à Moyen et Long Terme.  
GLOBAL 1995 - International Conference on Evaluation of Emerging Nuclear Fuel  
Cycle Systems, Versailles 1995.
- [6] M. Viala, M. Salvatores  
The SPIN program.  
Global 1995 International Conference on Evaluation of Emerging Nuclear Fuel Cycle  
Systems, Versailles 1995.