

## **Les solutions étudiées : améliorations et options innovantes : les améliorations du cycle actuel**

M. Delpech

► **To cite this version:**

M. Delpech. Les solutions étudiées : améliorations et options innovantes : les améliorations du cycle actuel. École thématique. Ecole Joliot Curie "Production d'énergie nucléaire et traitement des déchets : des filières d'aujourd'hui aux solutions innovantes", Maubuisson, (France), du 9-14 septembre 1996 : 15ème session, 1996. cel-00652668

**HAL Id: cel-00652668**

**<https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00652668>**

Submitted on 16 Dec 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

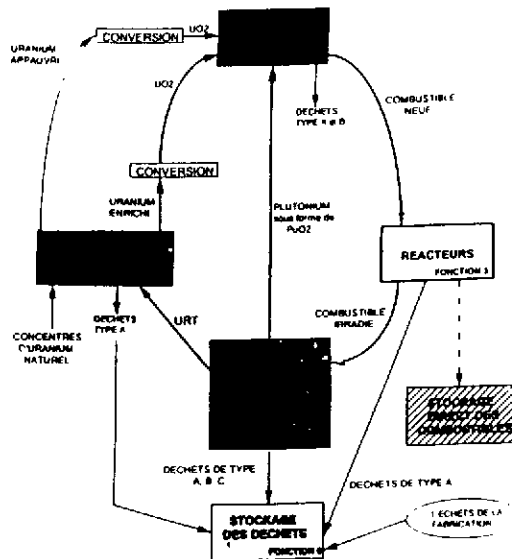
# Les solutions étudiées : améliorations et options innovantes

## Les améliorations du cycle actuel

Marc DELPECH  
DER/SPRC/LEDC  
CEA CADARACHE

### Introduction

Les améliorations du cycle actuel couvre la vie d'un combustible industriel, de sa fabrication à son retraitement. Le coût du cycle du combustible correspond au tiers du prix de vente de l'électricité. Il couvre l'extraction du minerai, sa transformation, son enrichissement en matière fissile, sa fabrication sous forme de crayon et d'assemblage ainsi que son retraitement. A la fabrication, le combustible standard Uranium est assez peu actif. En réacteur, le combustible se transforme par perte de matière fissile et production d'autres isotopes fissiles ou fertiles. Le cycle présenté ici concerne les opérations de l'extraction à l'enfouissement (voir schéma ci-après) :



Les étapes du cycle sont donc la fabrication, le passage en réacteur, le retraitement et le stockage.

Plusieurs objectifs peuvent être assignés pour l'amélioration du cycle actuel :

- améliorer la gestion de l'aval du cycle (minimiser les déchets au retraitement, leur volume, leur nocivité),
- améliorer l'économie et l'utilisation des ressources de matière naturelle
- améliorer la sûreté en réacteur et hors réacteur.

Les voies d'amélioration sont d'ampleurs plus ou moins limitées (de l'évolution à une révolution) et mettront en avant des solutions plus ou moins avancées. Il reste néanmoins une constante : la nécessité d'un stockage. En effet, les matériaux du retraitement, radioactifs, ne sont pas en totalité sujet à la transmutation et à la transformation en un temps court en éléments peu radioactifs. Il est nécessaire de disposer d'un stockage souterrain.

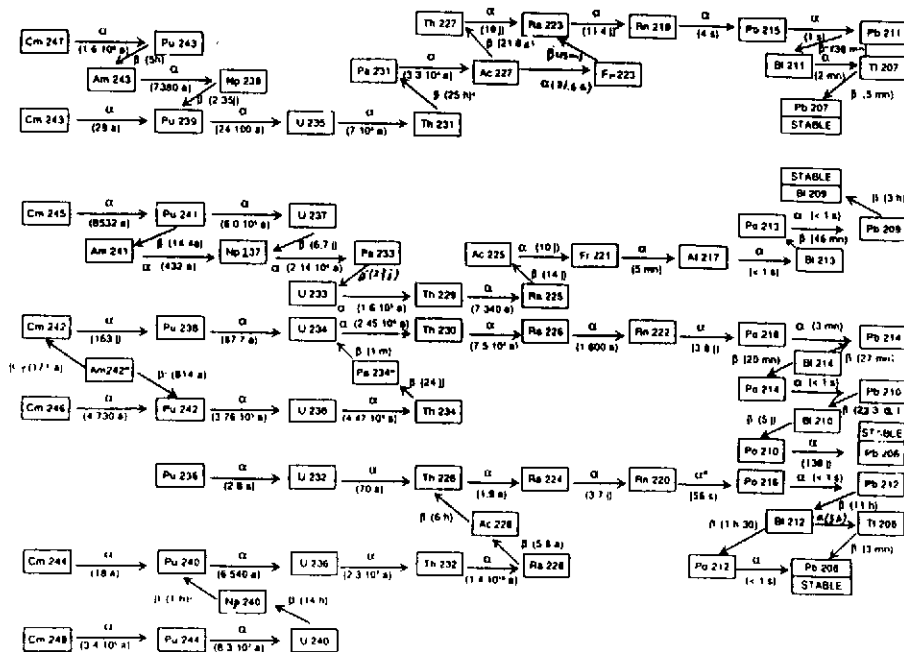
Les améliorations sont conduites par la physique du neutron et des noyaux composant le combustible. Le combustible subit des réactions nucléaires qui auront un impact à chaque étape du cycle. Il est donc utile d'évaluer cet ensemble afin d'améliorer le cycle actuel et de se donner des critères de comparaison dans les étapes du cycle avant de proposer des améliorations ou innovations.

## Objectifs de l'amélioration du cycle

La nécessité d'une amélioration du cycle actuel n'est pas si évidente. En effet, l'industrie nucléaire gère ses déchets en Europe Occidentale avec rigueur et produit de moins en moins de déchets par rapport à l'énergie produite.

En fait, les objectifs sont de répondre à des demandes sociales et économiques à long terme, de répondre à des demandes industrielle à court terme. Selon les axes d'amélioration, les objectifs sont différents car répondant à des contraintes particulières :

*Pour l'aval du cycle*, l'évolution des nucléides sous irradiation et hors irradiation entraîne des conséquences sur les activités dans les usines du cycle. La décroissance hors flux (en dehors du réacteur) est identique quelque soit le réacteur qui a irradié le combustible et produit l'énergie. Cette décroissance comprend 4 chaînes découplées (voir figure ci-après). Par contre, la formation des isotopes est fortement liée au réacteur d'irradiation (type de spectre, densité en neutron) par l'intermédiaire des sections efficaces de capture et de fission. Les spectres de type rapide favorisent, en relatif, la fission des isotopes et les spectres de type thermique, les captures.



L'ensemble formé par la formation sous irradiation et hors irradiation constitue le combustible irradié plus ou moins radioactif et radiotoxique.

*Pour l'économie de ressources naturelles*, il existe deux étapes :

une première pour l'utilisation optimale d'un combustible UOX (Oxyde d'Uranium) [A.1],

une deuxième par l'utilisation de la matière fissile contenue dans du combustible irradié, le Plutonium qui permet des gain de 20% en Réacteur à Eau sous Pression (REP) à 10 ou plus en Réacteur à Neutron Rapide (RNR). Un combustible irradié UOX contient environ 1% en masse de Plutonium [A.2].

*Pour la sûreté des réacteurs*, il s'agit d'améliorer le comportement du combustible en réacteur par une meilleure utilisation des assemblages [A.3], une augmentation de la souplesse de fonctionnement (suivi de charge) et par une diminution des pénalités de fonctionnement dues à des conservatismes parfois contraignant qui pourrait être ajustés.

*En terme de non-prolifération*, deux stratégies sont caricaturales vis à vis du Plutonium. L'une consiste à ne rien vouloir faire et donc à laisser le Plutonium parmi les autres déchets et l'autre, par un retraitement et réutilisation du Plutonium, de le dégrader et de le rendre plus difficile à utiliser à des fins pacifiques.

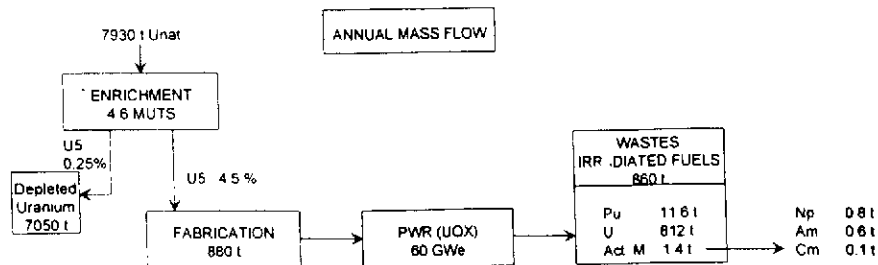
## Critères d'évaluation

Les critères d'évaluation permettent de choisir une solution adaptée aux objectifs. Ces critères couvrent la faisabilité dans les postes du cycle, en réacteur, au stockage. Les différents critères sont les flux massiques dans les opérations du cycle, la faisabilité en réacteur, le gain en énergie et en ressource naturelle et les conséquences au stockage. Le schéma suivant pour un cycle dit ouvert (sans retraitement) est un bon exemple de caractérisation des flux massiques dans le cycle.

*schéma scénario cycle ouvert*

FIGURE 1  
PARK OF PWRs (60 GWe) - 400 TWh/year  
Burn-up = 55 GWD/t    Frequency = 6

### 1. OPEN CYCLE



Le choix de la normalisation est important. La normalisation des effets à l'énergie produite ou à la masse de combustible permet de comparer une large gamme de solutions. Toutefois, certains objets *insolites* tel que des cibles de transmutation demandent de réadapter ces normalisations.

De plus, le choix des éléments peut se faire sur une partie ou l'ensemble des transuraniens, sur les produits de fission à vie longue ou l'ensemble des produits de fission. Ces éléments présentent des caractéristiques en réacteur, au retraitement et au stockage différentes et imposent des contraintes d'ordre différentes sur l'ensemble du cycle : Puissance résiduelle, Activité, Migration et retour à la biosphère, ...

Le Plutonium est la matière principale dans le retraitement car il présente un potentiel énergétique non négligeable et il est le principal contributeur à la radiotoxicité et l'activité du combustible irradié standard UOX.

## Etape de mise en oeuvre

Aujourd'hui, 7 réacteurs sur les 16 autorisés de type CPY 900 (900MWe) ont des chargements partiels en combustible de type MOX. Les limitations de l'utilisation de combustible MOX en REP sont :

- » les limitations en réacteurs
  - 30% ass. MOX, 5.3% en Pu total
- » les limitations dans le cycle (fabrication, retraitement)
  - 12% Pu total, de 50 à 170 Tonnes/an de combustible,
  - 5% en  $^{238}\text{Pu}$

Le retour d'expérience en REP porte sur environ 500 assemblages MOX irradiés, 10 Tonnes de Pu et 200 T de combustible MOX fabriqué. Le combustible irradié présente un taux de combustion maximal (Energie dégagée) de 44000 MWj/tML (mégawatt Jour par tonne de Métal Lourde). Celui des RNR concerne 800 assemblages dans

PHENIX correspondant à 31 Tonnes de Pu pour un taux de combustion maximal de 140000 MWj/t (mégawatt Jour par tonne d'Oxyde). Pour SUPERPHENIX, ceci concerne 31 Tonnes de combustible (Oxyde) et 625 assemblages. Pour l'utilisation en REP, un critère de EDF (exploitant) est de conserver la même souplesse d'utilisation des assemblage dit UOX et MOX. L'utilisation du Plutonium doit être transparente pour la gestion des centrales. Le retour d'expérience sur ce point est positif.

## Etape de mise en oeuvre

### Aujourd'hui, en réacteur :

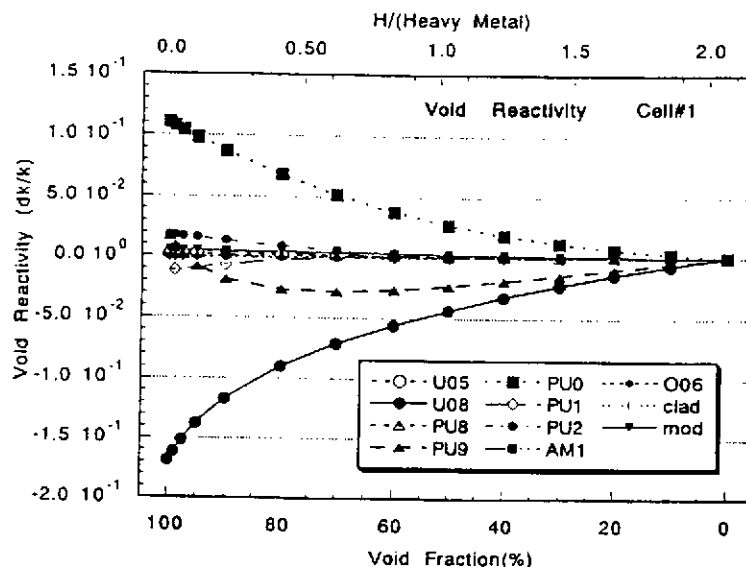
Afin de respecter les critères de sûreté des REP, le **trizonage** de l'assemblage MOX a été nécessaire. Il est dû à un spectre de neutron en énergie [A.4] très différents entre le combustible UOX et MOX. En effet, le chargement partiel à 30% d'assemblage MOX dans un coeur conduit à avoir des interfaces entre les assemblages UOX et MOX [A.5]. Cette écart de spectre conduit à avoir, aux interfaces et dans l'assemblage MOX, un niveau de flux de neutrons d'énergie thermique supérieur à celui qui serait présent sans interface avec un assemblage UOX. En effet, le spectre UOX présente un nombre de neutron plus élevé dans le domaine thermique qui, conjointement à des sections efficaces de capture et de fission des isotopes du Plutonium élevées dans ce même domaine d'énergie, conduisent à des pics de puissance dans l'assemblage MOX. Pour limiter ces pics de puissance, la teneur massique en Plutonium est réduite pour la zone périphérique de l'assemblage.

Une autre différence est la perte de réactivité sous irradiation des deux types de combustibles [A.6]. Ces différences conduisent à zoner l'assemblage et à ajuster la teneur en Plutonium afin de ne pas pénaliser le réacteur.

Les différences physiques des sections efficaces entre les isotopes du Plutonium (combustible MOX) et de l'Uranium (combustible UOX) ont pour conséquences des comportements différents du combustible en fonction des températures et de la densité du modérateur. Un réacteur est stable lorsque les coefficients sont négatifs, soit : une augmentation de température ou une diminution de densité diminue la réactivité (et la puissance). Parmi les transitoires importants pour la faisabilité et qui sont limitatifs lors de l'utilisation du Plutonium, les trois principaux sont l'effet de vidange, le transitoire de refroidissement et l'éjection de grappe.

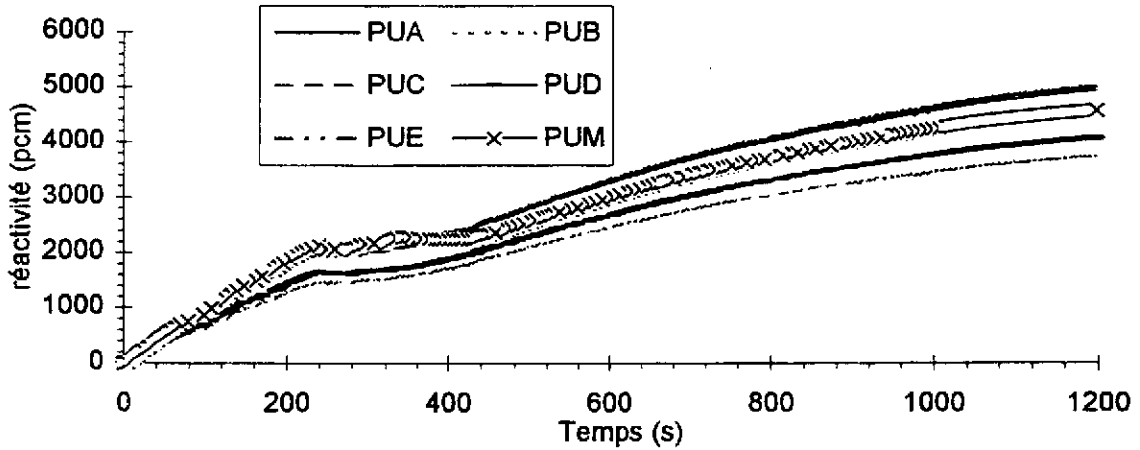
L'effet de vidange en REP peut être positif par l'utilisation du Plutonium. C'est un phénomène de petit effet avec des contributions de fortes ampleurs des isotopes principaux (voir la figure ci-après). En effet, par exemple, l'effet global de la vidange est parfois du même ordre de grandeur que le seul effet de la gaine.

### Effet de vidange



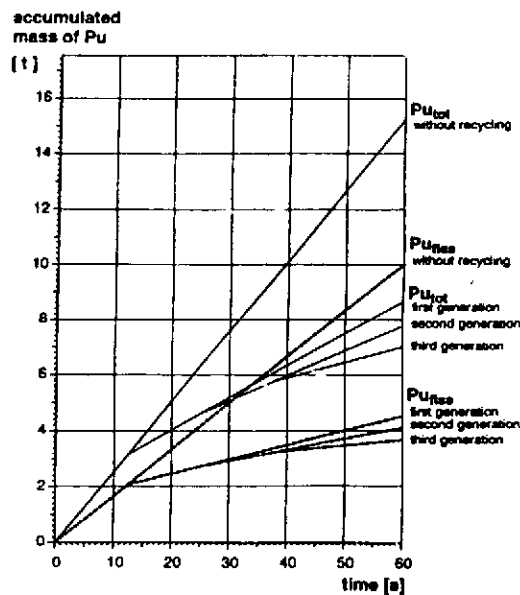
**Les transitoires de refroidissement** sont pénalisés par l'utilisation du combustible Plutonium. Deux effets :  
l'effet de la diminution du contrôle lors du Plutonium (moins d'antiréactivité initiale)  
l'effet du coefficient de température du modérateur, plus négatif qui conduit à une cinétique plus rapide.  
En conséquence, le réacteur peut atteindre un état surcritique lors du transitoire, ce qui n'est pas autorisé (voir figure ci-après).

*Transitoire de refroidissement*



En RNR, le recyclage du Plutonium n'est pas pénalisant sur la sûreté de fonctionnement. En effet, c'est le combustible de base de ce type de concept. Les concepts RNR brûleurs sont limités par les effets de la teneur en Plutonium sur l'effet Doppler et l'effet de vidange.

Le recyclage du Plutonium à l'équilibre est réalisable à long terme. Les études de scénarios permettent de caractériser cet équilibre et sa faisabilité. Toutefois, le recyclage dans des réacteurs actuel est limité. D'autres concepts de coeur ou de combustible permettent d'assurer la faisabilité en REP ou RNR Une image des gains de masses au stockage avec recyclage est présentée dans la figure ci-après :



Pour les études de scénarios, la cohérence des approches asymptotiques ou de transitoires plus réalistes aboutissent qualitativement aux mêmes états d'équilibre.

Le recyclage du Plutonium a des **conséquences au retraitement**. Celles-ci sont connues car ce retraitement est effectif pour le combustible UOX irradié. La Hague retraite 1600 Tonnes de combustible par an.

Le domaine de **qualification** des outils permet de s'assurer des améliorations à apporter au cycle. Les outils tels que les **réacteurs expérimentaux**, les réacteurs industriels et les **accélérateurs** permettent de définir des domaines de qualification des outils de calcul. Les **exercices internationaux** (benchmark) élargissent cette base et ont souvent pour objectif d'établir des conclusions physiques communes, mieux comprises et argumentées.

*Sur cette base, quels axes d'amélioration, innovation pour demain :*

**En réacteurs :**

Dans les REP, l'augmentation du rapport de modération qui a pour effet de thermaliser le spectre (rendre le spectre MOX plus proche de celui de l'UOX), permet d'assurer la faisabilité du recyclage du Plutonium, principalement vis à vis des transitoires de fonctionnement.

Dans les RNR, la recherche de performances accrues répondant aux objectifs est l'axe principal d'amélioration. Ce type de concept présente une grande souplesse d'adaptation.

**Par éléments :**

Le Plutonium est l'élément principal du retraitement. Toutefois, son utilisation augmente la production d'Américium et Curium. Ce sont donc des éléments à retraiter par la suite du retraitement avec le Neptunium. Les Produits à Fission à Vie Longue sont plus difficiles à incinérer efficacement.

Les conséquences au retraitement de l'incinération des Actinides Mineurs sont très élevés. La réponse à ce problème est la mise en oeuvre d'installations adaptées. La limitation du retraitement de ce type de combustible ouvre la voie du monorecyclage avec des taux de fission élevés.

Les axes d'amélioration, innovation sont donc

- Etude des solutions de recyclage, élément par élément
- Multirecyclage et arrêt
- Voie de recyclage de type homogène ou hétérogène
- Multirecyclage et Monorecyclage
- Compromis entre plusieurs de ces axes

## Les solutions

A partir de la physique du neutron et des noyaux pour les différents concepts de réacteurs (REP, REB, RNR, ...), une étude de sensibilité permet de déterminer les paramètres importants par domaine.

Les problèmes sont différents :

- pour les REP - contrôle, coefficient de réactivité
- pour les REB - contrôle, coefficient de réactivité, domaine de fonctionnement
- pour les RNR - effet de vidange, Doppler

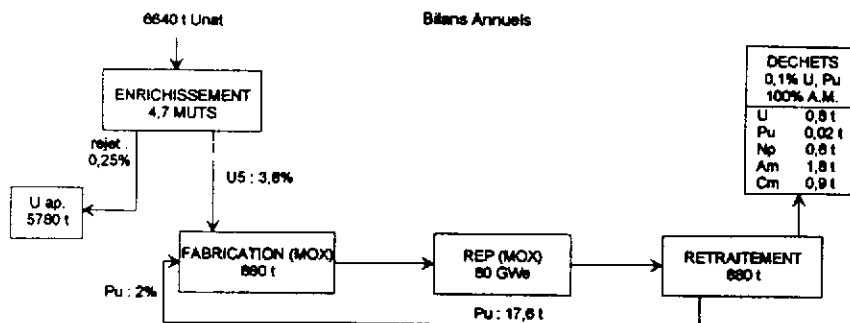
et ceci quelque soit les éléments considérés, Plutonium comme Actinides Mineurs. La dégradation et l'impact négatif sur la faisabilité des Actinides Mineurs est plus sensible que ceux du Plutonium.

Pour les P.F.FV.L., les concepts sont assez peu performants.

Pour chacune des solutions, par concept, par type de recyclage, un remontage permet de quantifier les impacts sur le cycle et le stockage, à l'équilibre puis en transitoire, selon plusieurs scénarios. Des exemples sont données dans les figures ci-après :

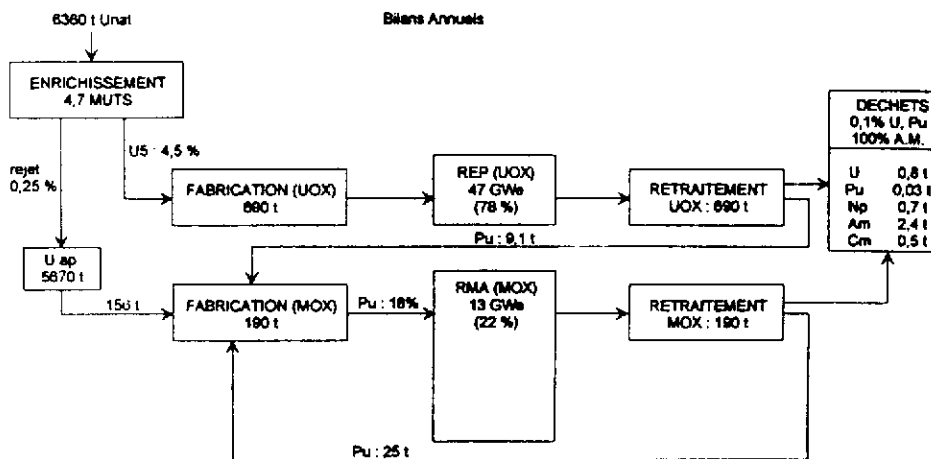
*Recyclage en N4, support U enrichi*

**RECYCLAGE DU Pu DANS TOUT LE PARC REP N4 (rapport de modération : 2, Support : U enrichi)**



*Recyclage en RMA*

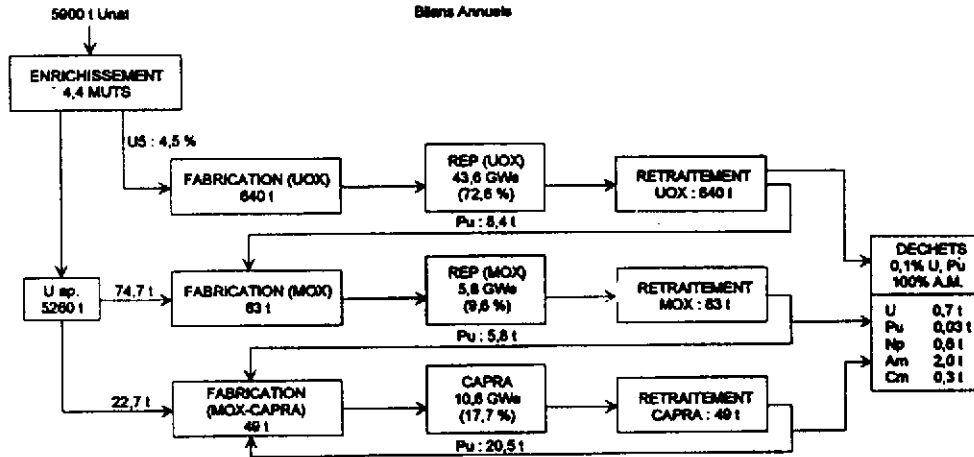
**MULTIRECYCLAGE DU Pu EN RMA (Rapport de modération : 4)**





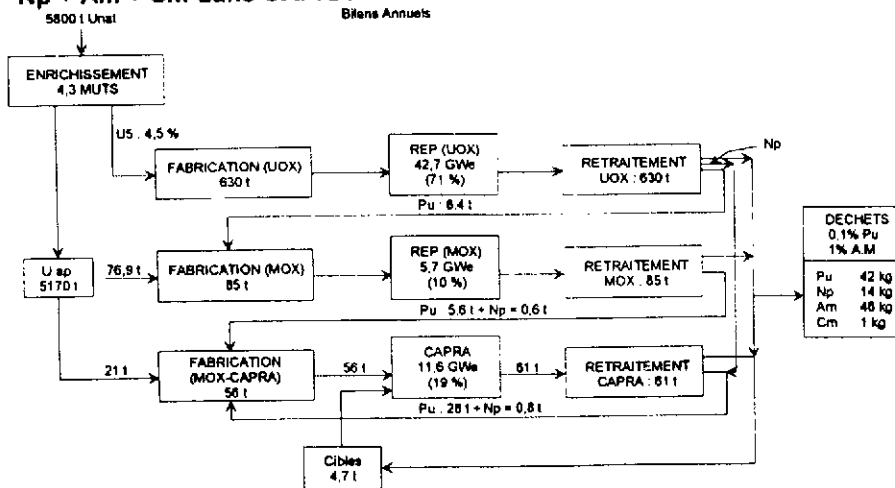
Recyclage en RNR, Pu seul

**MULTIRECYCLAGE : Pu 1 fois en REP (MOX) puis n fois en CAPRA**



Recyclage en RNR, Pu + A.M.

**MULTIRECYCLAGE : Pu 1 fois en REP (MOX) puis n fois en CAPRA, Np + Am + Cm dans CAPRA**



## Les solutions : trois axes

Les trois axes de recherche en réacteur sont :

**d'améliorer la faisabilité en REP** par des solutions qui consistent à :

soit diluer le problème dans l'ensemble des réacteurs (minimisation de la masse et des conséquences dans chaque réacteur) - recyclage homogène

soit concentrer dans quelques crayons dédiés (cibles) les éléments à incinérer, sachant que le nombre de ces crayons par réacteur est modulable en fonction des pénalités - recyclage hétérogène

et en parallèle, à définir des options de multirecyclage ou de monorecyclage à haut taux de fission.

**d'accroître les performances des RNR**

En effet, celui-ci présente des limites supérieures de faisabilité et donc, a une souplesse et une flexibilité intéressante à utiliser pour les problèmes de l'aval du cycle (incinération, transmutation).

**d'évaluer le potentiel et la faisabilité des systèmes hybrides sous-critiques.** C'est une étape complémentaire dans le cycle dans la mesure où ces systèmes acceptent des combustibles exotiques dédiés à une incinération poussée sous flux.

La recherche sur le combustible est essentielle. Elle porte sur les matrices inertes pouvant supporter des éléments actifs, des taux de fission élevés et sur le comportement du combustible (combustible plus ou moins innovant) sous irradiation dans des conditions normales ou accidentelles.

## Les outils expérimentaux

Pour l'ensemble de ces recherches et de ces études, il est nécessaire de disposer d'outils expérimentaux permettant de valider et de confirmer des options. Ces outils sont la base des expériences de physique couvrant les domaines des données nucléaires, le comportement du combustible, la technologie du combustible.

Les moyens au CEA sont

MASURCA et EOLE pour les maquettes critiques (mesure de paramètres intégraux permettant d'évaluer les données de base),

OSIRIS (REP) et SUPERPHENIX et PHENIX (RNR) pour l'irradiation technologique,  
et SATURNE, accélérateur permettant de mesurer les phénomènes physiques élémentaires.

Le PAC (Programme d'Acquisition des Connaissances) dans SUPERPHENIX est un outil de validation unique.

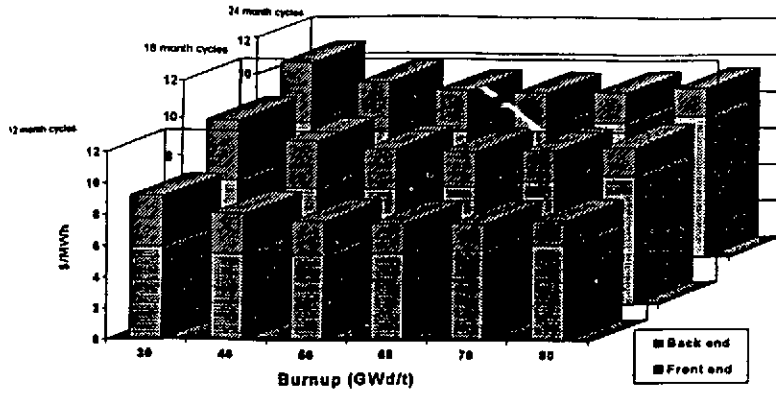
## Conclusion

L'amélioration du cycle couvrent des domaines qui vont de la meilleure utilisation du combustible actuel (court terme) à un cycle fermé Plutonium seul ou avec les Actinides Mineurs.

Des solutions acceptables existent pour tous les types de concepts. Le recyclage du Plutonium et des Actinides Mineurs n'augmentent pas la radiotoxicité du stockage et permet de réduire les masses au stockage. Ces facteurs de réduction sont fonction des stratégies adoptées.

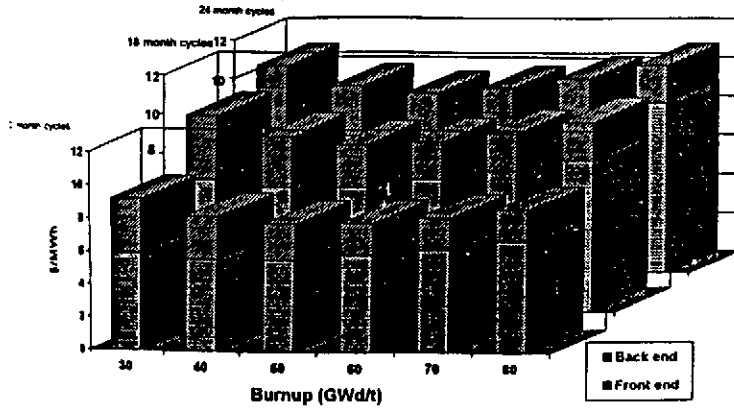
Chaque poste du cycle est important. C'est pourquoi ces études nécessitent des investigations dans plusieurs domaines (cycle, combustible, réacteurs).

**1: Fuel Cycle Costs - No Penalties**

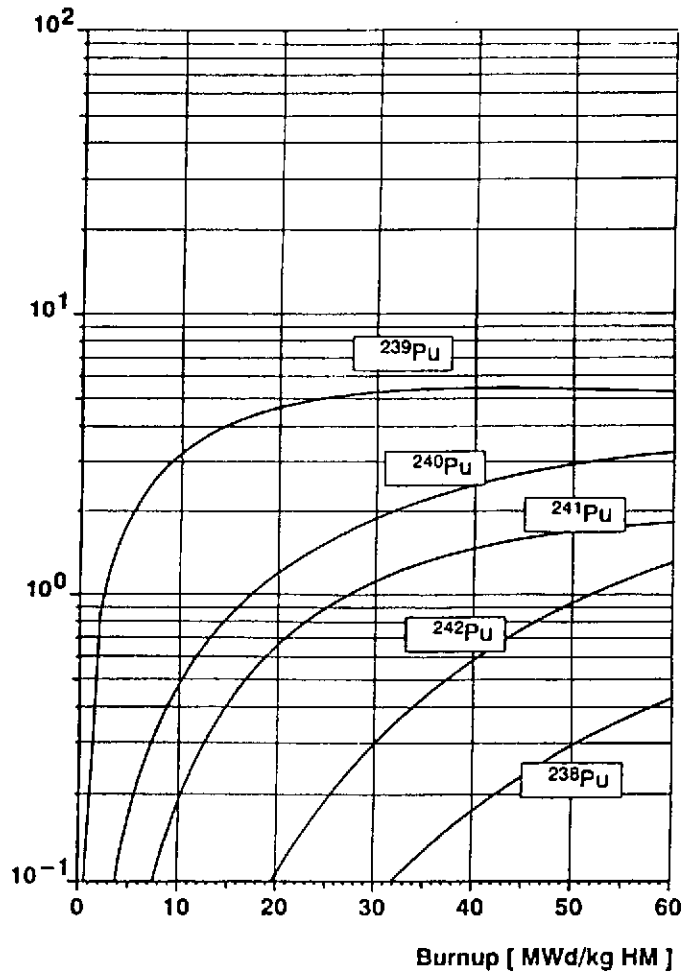


A 1

**2: Fuel Cycle Costs - With Penalties**



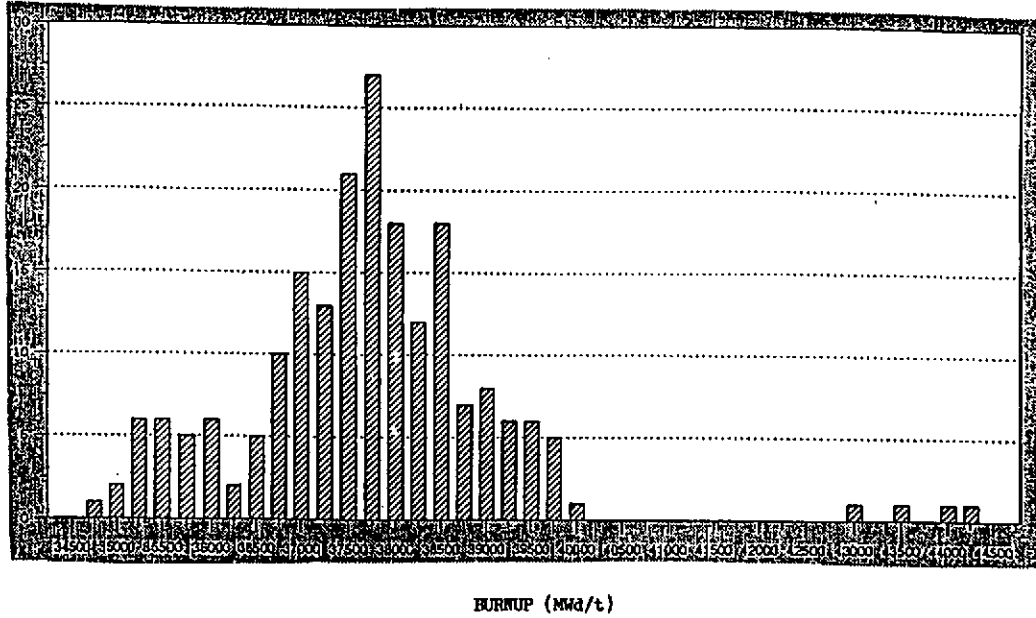
**Mass [ g/kg HM Initial ]**



A 2

DISCHARGE BURNUPS  
As at 13/02/1995 (204 MOX assemblies)

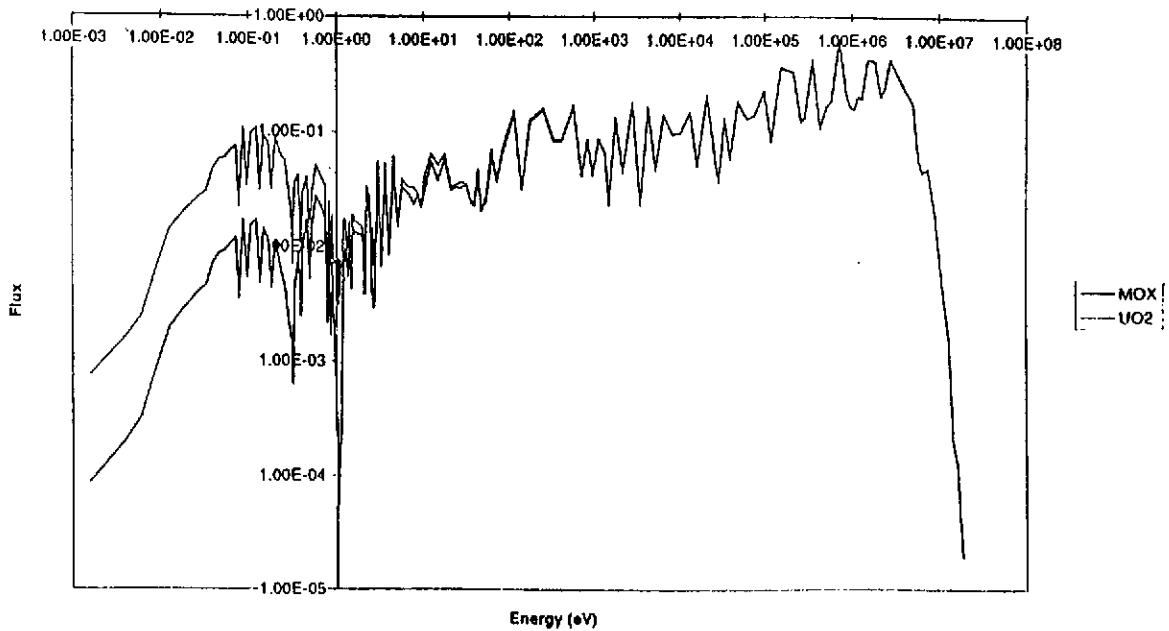
Number of assemblies



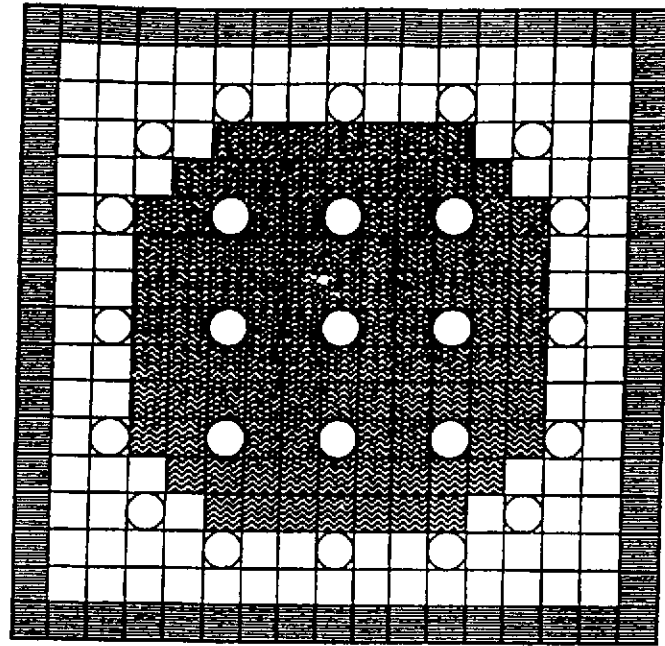
A. 3

## MOX and UOX Spectra





Comparison of flux in MOX/UO2 fuel



A 4



A 5

-  ZONE 1: 64 LOWER CONTENT RODS (3.35% PLUTONIUM)
-  ZONE 2: 100 INTERMEDIATE CONTENT RODS (5.10% PLUTONIUM)
-  ZONE 3: 100 HIGHER CONTENT RODS (6.75% PLUTONIUM)
-  GUIDE THIMBLES AND INSTRUMENTATION TUBE

## Reactivity Variation with Burnup

A 6

K-Inf vs. Burnup for UO<sub>2</sub> and MOX

