

# Modèles mathématiques de centres régionaux du cycle du combustible

par Leonard L. Bennett et Larry D. Reynolds

**L'idée de créer des centres régionaux du cycle du combustible (CRCC) qui permettraient de couvrir les besoins de nombreux pays a suscité un grand intérêt. Dans le cadre de l'Etude qu'elle consacre aux CRCC, l'Agence internationale de l'énergie atomique élabore des modèles mathématiques et les codes d'informatique qui leur sont associés pour analyser, sur les plans économique et logistique, diverses stratégies de gestion du combustible nucléaire irradié et des déchets radioactifs.**

L'Etude de l'Agence s'étend à toutes les activités de transport, de stockage, de traitement et de recyclage depuis le moment où le combustible irradié quitte les bassins de désactivation des réacteurs jusqu'au moment où le combustible recyclé se présente à nouveau sous forme d'éléments finis prêts à être expédiés vers un réacteur. Toutes les activités considérées comme pouvant être exercées par les CRCC sont représentées dans la figure 1 à l'intérieur du grand rectangle grisé. La production d'uranium neuf, la séparation des isotopes et la fabrication de combustible  $UO_2$  en sont exclues. On a envisagé deux groupes de réacteurs, l'un utilisant du combustible  $UO_2$  neuf et l'autre du combustible à mélange d'oxydes (MOX), avec ou sans addition du combustible  $UO_2$  neuf. On suppose que ces réacteurs sont situés dans les pays A, B, ....., N. Après déchargement du réacteur, le combustible irradié est placé dans des bassins de désactivation adjacents désignés sur la figure par "SCI".

Après un "refroidissement" initial approprié, le combustible irradié est transporté de chaque site de centrale à une installation de stockage collective située au CRCC. Pour la suite, il importe de comparer sur le plan de la rentabilité le stockage du combustible irradié sur une période de plusieurs années et le retraitement immédiat suivi du recyclage.

Tout d'abord il convient de se demander s'il faut retraiter le combustible irradié et dans quelles conditions économiques (prix de l'uranium, coût du travail de séparation et valeur du plutonium) il serait rentable de le faire. Si le retraitement se justifie économiquement, ou si le souci de ne pas épuiser les ressources de combustible le rend inévitable, il y aura lieu de déterminer à quel moment les installations du cycle du combustible devraient être réalisées et quelle serait leur capacité de traitement optimale.

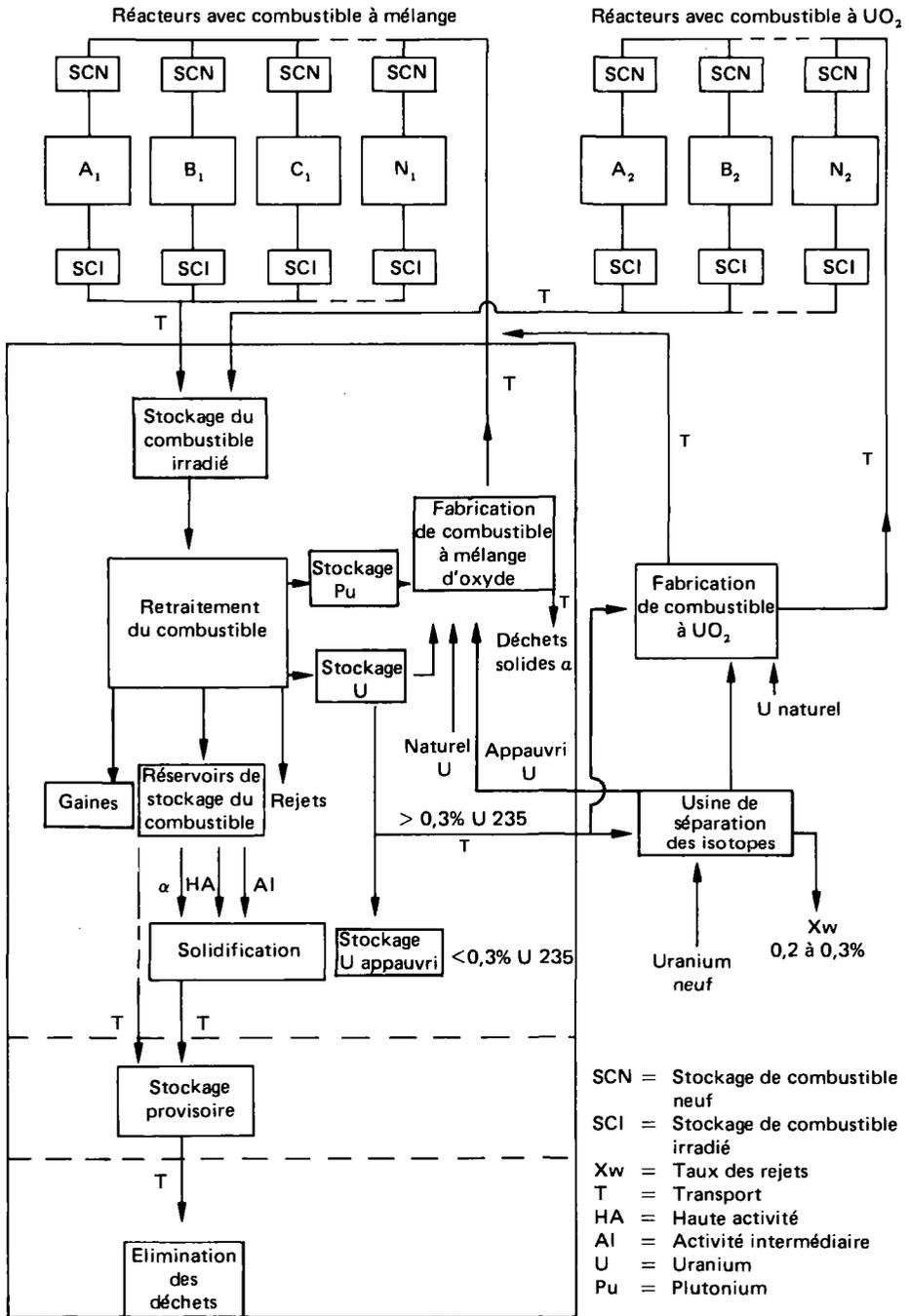
Un centre régional pourrait ne comporter au début que les installations dont on a immédiatement besoin, notamment pour le stockage du combustible irradié, et être équipé seulement par la suite pour d'autres opérations telles que le retraitement. Le calendrier optimal des agrandissements successifs varierait suivant le type et la puissance des réacteurs construits dans les différents pays, mais aussi suivant la valeur commerciale de l'uranium et du plutonium récupérables. En tout état de cause, le combustible irradié devrait être stocké jusqu'à ce que le volume et le rythme d'accroissement du stock accumulé permettent de rentabiliser la capacité de retraitement lorsque celle-ci est construite.

Les produits fissiles et les déchets radioactifs constituent les deux grandes catégories de matières obtenues à l'issue du retraitement. Les produits fissiles récupérés, uranium et plutonium, peuvent être réutilisés dans le cycle du combustible. Le plutonium peut être

M. Bennett est responsable des modèles mathématiques dans le cadre de l'Etude des CRCC et

M. Reynolds est membre de la Division de la documentation scientifique et technique.

Figure 1. Diagramme du Centre régional du cycle du combustible



mélangé à de l'uranium récupéré, naturel ou appauvri, et transformé en éléments combustibles à mélange d'oxydes (MOX), qui seront expédiés aux centrales qui peuvent utiliser ce type de combustible. L'uranium récupéré peut trouver plusieurs emplois. Une proportion de quelque 20% au maximum peut être mélangée au plutonium. Le reste peut être stocké ou être réutilisé dans des réacteurs à eau lourde, ou renvoyé à l'usine de séparation des isotopes, suivant son degré d'enrichissement et sa teneur en uranium 236 et en autres isotopes indésirables. Dans tous les cas, la réutilisation de l'uranium récupéré réduit les besoins d'uranium naturel neuf et constitue donc un avantage économique.

Les opérations relatives à la gestion des déchets sont le stockage, le traitement, le transport et l'élimination. Les installations de stockage provisoire et d'élimination définitive des déchets de haute activité peuvent être implantées sur le site même du CRCC, si le site s'y prête, ou ailleurs.

## OBJECTIFS DES MODELES MATHEMATIQUES

Un critère d'évaluation important des CRCC est le coût comparé de la gestion du combustible irradié dans des installations régionales intégrées et dans des installations nationales dispersées, étant entendu qu'il peut s'agir d'un stockage à long terme du combustible sans retraitement. L'échelonnement des investissements dans le temps et les besoins d'un CRCC en moyens logistiques sont des éléments importants pour l'évaluation globale.

Par l'établissement de modèles mathématiques on se propose principalement de mettre au point une méthodologie pour analyser, notamment sur le plan économique, les diverses stratégies possibles de gestion du combustible irradié. A cette fin, on élabore des programmes d'informatique qui décrivent les flux de matières, le calendrier de construction, l'échéancier des investissements et les frais de fonctionnement pour les installations de traitement du combustible irradié. Ces programmes se fondent sur un certain nombre d'études techniques dans lesquelles sont exploitées les données économiques et les données d'exploitation nécessaires .

## NATURE DES PROGRAMMES D'INFORMATIQUE

Les programmes d'informatique utilisés pour les analyses économiques comportent à la fois des procédés de simulation et des techniques d'optimisation. Un grand nombre de phases du cycle du combustible (déchargement du combustible irradié, stockage auprès du réacteur et transport au CRCC) sont décrites sur le plan matériel et économique grâce à des modèles de simulation, alors que d'autres (taille et calendrier de construction des usines de retraitement, répartition des charges de retraitement entre usines existantes, calendrier de construction des installations de stockage, etc.) font l'objet de procédés d'optimisation économique visant à déterminer parmi les solutions réalisables celle qui est la moins coûteuse.

Il est souhaitable de retarder la mise en place des installations de retraitement pour diverses raisons d'ordre économique:

1. Des économies d'échelle peuvent inciter à retarder le retraitement pour justifier par une forte accumulation de combustible irradié la construction d'une usine plus grande.
2. Pour que le coût du retraitement et du recyclage de l'uranium et du plutonium dans les réacteurs thermiques soit compensé par la valeur de l'uranium et du plutonium récupérés, il faut peut-être attendre que les coûts de l'uranium et de l'enrichissement aient augmenté. Une autre considération serait la valeur que confère au plutonium la possibilité de l'utiliser comme combustible dans les réacteurs surgénérateurs rapides.

Il est prévu d'établir un modèle de CRCC suffisamment détaillé pour permettre l'examen des avantages et inconvénients des différentes options et le choix à peu près optimal de la taille de l'usine de retraitement, des dates de mise en service et de la capacité des diverses installations. Le modèle sera donc souple et permettra de décrire et de traiter les informations sur les coûts pour toutes les options probables: stockage ou retraitement, retraitement différé ou immédiat, installations nationales ou régionales, etc.

La figure 2 est un schéma des différentes parties du modèle actuel de cycle du combustible établi aux fins de l'Etude. Chaque case représente un sous-modèle qui décrit les processus et coûts spécifiques de l'activité en question. Certains de ces sous-modèles comportent des procédés d'optimisation.

## MODELE DE SIMULATION D'UN CRCC

Ce modèle simule les flux de combustible et de déchets à travers les différentes installations de transport, de stockage et de traitement, et calcule le coût de la construction et du fonctionnement de ces installations.

Ce modèle se caractérise par le fait qu'il n'est pas doté d'un pouvoir d'optimisation et de prise de décision automatisé. L'utilisateur doit spécifier la date de mise en service et la capacité de traitement des principales installations, telles que les usines de retraitement et les usines de fabrication de combustible (MOX). Compte tenu du calendrier fixé, des quantités annuelles de combustible irradié déchargées de tous les réacteurs et des coûts, le modèle de simulation effectuera une analyse économique portant sur la construction et l'exploitation des installations envisagées. Ce calcul économique tient compte des éléments négatifs (frais de transport et de stockage du combustible irradié, frais de gestion des déchets) et des éléments positifs (valeur de l'uranium et du plutonium récupérés). En outre, l'ordinateur produit un état détaillé des quantités annuelles de ces matières à chaque stade du cycle du combustible.

Les paragraphes suivants contiennent une description des principales parties du modèle représenté schématiquement à la figure 2:

**Modèle de réacteurs.** Le modèle FURY sert à calculer les quantités annuelles de combustible irradié sortant des réacteurs dans chaque pays. Il utilise les données d'entrée suivantes:

- 1) Croissance projetée de la puissance nucléaire installée de chaque pays, par type de réacteur (par exemple réacteur à eau sous pression, à eau bouillante, à eau lourde);
- 2) Facteur de capacité moyen des centrales;
- 3) Caractéristiques du combustible irradié et quantités par GW(e) – année de fonctionnement des réacteurs.

Les caractéristiques du combustible irradié, retenues pour le traitement, ont été choisies de manière à permettre une description aisée du combustible sur le plan économique. Ce sont:

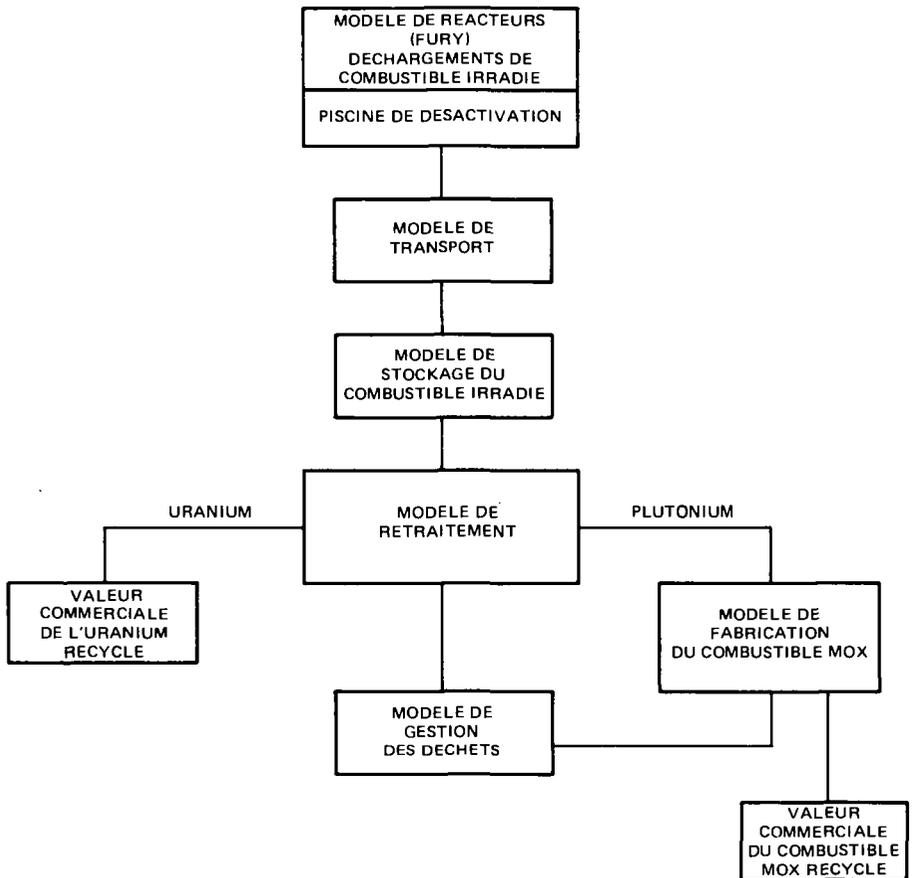
### A. La teneur en uranium

- 1) la quantité effective d'uranium;
- 2) l'équivalent en uranium naturel, compte tenu du taux d'enrichissement;
- 3) l'équivalent en unités de travail de séparation, compte tenu du taux d'enrichissement;

### B. La teneur en plutonium

- 1) Plutonium fissile;
- 2) Plutonium fissile et non fissile.

**Figure 2. Parties principales du Modèle de cycle du combustible pour l'Étude des CRCC**



Ces caractéristiques permettent de calculer une valeur commerciale appropriée pour l'uranium et le plutonium récupérés sans qu'il soit nécessaire de savoir quel est le degré d'enrichissement de chaque lot de combustible. On peut calculer la moyenne de ces caractéristiques pour un nombre quelconque de lots, alors qu'il serait incorrect d'en faire autant pour le degré d'enrichissement de l'uranium (encore que l'erreur soit faible lorsque les degrés ne diffèrent pas sensiblement).

**Modèle de transport de combustible irradié.** Il simule le passage du combustible irradié, préalablement stocké auprès du réacteur pendant une durée appropriée aux fins de la décroissance radioactive, par diverses opérations de manutention et de transport, et son arrivée à l'installation du stockage du CRCC. Cette simulation inclut le traitement des investissements nécessaires, les frais de fonctionnement et de transport, ainsi que les retards d'acheminement.

**Modèle de stockage du combustible irradié.** A l'arrivée au CRCC on place le combustible irradié en magasin pour constituer un stock tampon normal et permettre ainsi un approvisionnement continu de l'usine de retraitement et un groupage efficace du combustible irradié en "campagnes" de retraitement.

Une capacité de stockage supplémentaire sera nécessaire si les livraisons de combustible irradié se font à un rythme supérieur à celui du retraitement. Dans ce cas, le magasin du stock tampon ne peut absorber le combustible en excédent et une installation supplémentaire de stockage provisoire doit être prévue. Il est probable qu'il en sera ainsi notamment lors de la construction des usines de retraitement.

Le modèle informatique permet de calculer la quantité de combustible irradié reçue chaque année de même que la quantité qui peut être retraitée la même année. La différence représente la quantité qui doit être placée en stockage provisoire. La capacité de stockage totale nécessaire est déterminée compte tenu de toutes les entrées et sorties de combustible irradié du magasin. Chaque fois qu'elle dépasse la capacité de stockage disponible, on ajoute de nouvelles installations.

**Modèle d'usine de retraitement.** Le modèle actuel d'usine de retraitement est extrêmement simple. L'utilisateur peut fixer le calendrier de réalisation des tranches successives de l'usine de retraitement en choisissant parmi trois tailles d'installations. On ne peut mettre en service qu'une seule tranche chaque année. En outre, l'utilisateur spécifie pour chaque tranche les charges financières annuelles, les frais de fonctionnement annuels fixes et les frais de fonctionnement variables en fonction de volume traité (dollars/tonne de combustible irradié).

Pour le retraitement on accorde la priorité au combustible irradié déjà entré au stock provisoire depuis une ou plusieurs années. C'est donc la règle "premier entré, premier sorti" qui prévaut.

**Modèle de fabrication de combustible MOX.** Des données en cours d'élaboration doivent permettre d'estimer la charge financière et les frais de fonctionnement afférents à chacune des principales parties d'une usine de fabrication. Sur ces bases, on pourra calculer le coût de fabrication du combustible MOX en fonction de la taille de l'usine de fabrication et de la capacité utilisée.

**Valeur commerciale de l'uranium.** C'est sa valeur en tant que matière première pour l'usine de séparation des isotopes. A l'aide d'une formule d'enrichissement type, le code calcule la "teneur" de l'uranium récupéré en équivalent d'uranium naturel et en équivalent de travail de séparation. La valeur commerciale de l'uranium récupéré est ensuite déterminée à partir de tables selon le prix de l'uranium naturel et celui du travail de séparation.

**Valeur commerciale du plutonium.** On suppose que le plutonium sera réutilisé pour la fabrication de combustible MOX destiné à des réacteurs à eau légère. En utilisant un bilan masses relatif au cycle à l'équilibre pour un réacteur à  $UO_2$  et un réacteur à combustible MOX, le modèle permet de calculer la variation nette des diverses caractéristiques, qui résulte du passage d'un cycle à base d'oxyde d'uranium à un cycle fondé sur un combustible MOX. Le tableau 1 donne un exemple de ce calcul.

Les coefficients ainsi déterminés servent à affecter une valeur commerciale au plutonium récupéré. Ils permettent également d'ajuster les caractéristiques du combustible irradié déchargé pour tenir compte du fait que les déchargements futurs sont modifiés par le recyclage du plutonium.

34 Tableau 1. Modèle d'ajustement des flux de matières pour le recyclage du plutonium

CARACTERISTIQUES	SANS RECYCLAGE (RECHARGEMENT AVEC UO <sub>2</sub> )	AVEC RECYCLAGE		VARIATION NETTE DUE AU RECY- CLAGE DE PU	VARIATION NETTE PAR KG DE PU FISSILE RECYCLE
		FRACTION UO <sub>2</sub>	FRACTION MOX		
<b>AU CHARGEMENT</b>					
MASSE TOTALE DE U, KG	27 350	18 500	8 409	-441	-1,63
% DE U 235	3,200	3,200	0,711		
EQUIVALENT DE U NATUREL, KG	192 980	130 535	8 409	-54 036	-199,91
EQUIVALENT DE UTS	103 586	70 067	0,0	-33 519	-124,01
MASSE TOTALE DE PU, KG	0,0	0,0	441,0	441,0	1,632
PLUTONIUM FISSILE, KG	0,0	0,0	270,3	270,3	1,000
FABRICATION DU COMBUSTIBLE A UO <sub>2</sub>	27 350	18 500	0,0	-8 850	-32,74
FABRICATION DU COMBUSTIBLE MOX	0,0	0,0	8 850	8 850	32,74
<b>AU DECHARGEMENT</b>					
MASSE TOTALE DE U, KG	26 167	17 679	8 190	-298	-1,10
% DE U 235	0,930	0,930	0,320		
EQUIVALENT DE U NATUREL, KG	40 110	27 099	0,0	-13 011	-48,13
EQUIVALENT DE U APPAUVRI, KG	0,0	0,0	8 190	8 190	30,30
EQUIVALENT DE UTS	5 064	3 421	0,0	-1 643	-6,08
MASSE TOTALE DE PU, KG	254,9	172,4	273,1	190,6	0,705
PLUTONIUM FISSILE, KG	180,1	121,8	151,2	92,9	0,344

**Modèle de gestion des déchets.** La taille des installations de gestion des déchets et les quantités traitées dépendent principalement de la taille des usines de retraitement et des quantités que traitent celles-ci. Elles dépendent aussi du volume des déchets et rebuts de la fabrication de combustible MOX.

Les données suivantes serviront d'entrée pour toutes les opérations principales de gestion et d'élimination des déchets.

Installations de stockage, de traitement et d'élimination:

- a) Charge financière;
- b) Calendrier des investissements;
- c) Frais de fonctionnement fixes par an;
- d) Frais de fonctionnement variables en fonction de la quantité de combustible retraité, en dollars par tonne.

Opérations de transport:

- a) Coût du transport des matières considérées entre installations, en dollars par tonne de combustible retraité.

## DESCRIPTION DU MODELE D'OPTIMISATION D'UN CRCC

Ce modèle vise à déterminer le calendrier optimal sur le plan économique pour l'accroissement de la capacité de retraitement, compte tenu des quantités annuelles de combustible irradié déchargées de tous les réacteurs, des économies d'échelle que permet de réaliser une grande usine de retraitement, mais aussi du coût supplémentaire des installations de stockage provisoire où serait accumulé le stock tampon nécessaire pour l'alimenter. L'utilisateur fournit diverses données relatives à la charge financière et aux frais de fonctionnement pour plusieurs dimensions possibles d'usines de retraitement, ainsi que pour les installations de stockage provisoire. Le modèle détermine ensuite la solution la plus économique de stockage et de retraitement du combustible irradié, compte tenu de la valeur commerciale de l'uranium et du plutonium récupérés.

La méthode d'optimisation utilisée actuellement est celle de la "programmation dynamique à rebours". Cette technique permet de choisir le calendrier d'agrandissement optimal pour une usine de retraitement grâce à l'examen d'un nombre fini de situations possibles, ou "états", qui peuvent se réaliser au cours de chaque année de la période envisagée. Un "état" du système est caractérisé par une capacité de retraitement discrète et une quantité discrète de combustible irradié en stock. La procédure de programmation dynamique permet de déterminer le calendrier de mise en place des tranches successives de l'usine de retraitement et de la capacité de stockage correspondant au coût le plus bas.

## CONCLUSION

L'utilisation itérative des modèles d'optimisation et de simulation permet d'analyser en détail les stratégies de gestion du combustible irradié. Le modèle de programmation dynamique peut fournir un calendrier de retraitement correspondant à peu près au moindre coût, sans toutefois donner d'indications détaillées sur tous les éléments du coût. Ce calendrier peut ensuite servir de donnée d'entrée au modèle de simulation qui procédera à une analyse plus détaillée des étapes successives de la gestion du combustible irradié. Le modèle de simulation permet aussi de rechercher une plus grande optimisation des coûts grâce à l'examen d'éléments de détail qui ne peuvent pas être incorporés dans la programmation dynamique. Ainsi, les possibilités combinées des deux codes d'informatique devraient-elles permettre au planificateur du cycle du combustible d'analyser un large éventail de stratégies de gestion du combustible irradié.