

**Le retraitement comparé à l'évacuation directe du combustible nucléaire irradié CANDU :
Possible application de la volatilité du fluorure**

Daniel Rozon et Derek Lister

Janvier 2008

Résumé : Bien qu'aucun procédé de retraitement du combustible irradié CANDU ne soit actuellement utilisé sur une base commerciale, une application de la volatilité du fluorure pourrait ouvrir cette possibilité. Ce document traite des avantages économiques du retraitement.

Introduction

Dans la solution actuelle de gestion qu'elle propose, la SGDN considère le combustible irradié CANDU comme un déchet. Bien que tout à fait possible sur le plan technique, le retraitement du combustible irradié CANDU à une échelle commerciale entraînerait des coûts prohibitifs, même en considérant les revenus tirés de l'électricité supplémentaire produite avec le combustible recyclé. Cela serait aussi le cas pour toutes les options de recyclage du combustible irradié des réacteurs à eau légère (LWR), mais dans une moindre mesure. En fait, le retraitement du combustible irradié des réacteurs à eau légère et le recyclage de l'uranium et du plutonium récupérés de ces réacteurs ou des futurs réacteurs à neutrons rapides (FBR) pourraient devenir économiquement viables si le prix de l'uranium naturel atteignait un jour un prix seuil. Une récente étude économique de l'Université Harvard a conclu que les cycles de combustible à passage unique des réacteurs LWR sont susceptibles de demeurer considérablement plus économiques que le recyclage pendant au moins 50 ans, même dans le cas d'une augmentation substantielle de l'utilisation de l'énergie nucléaire.¹

Pour que le retraitement devienne une possibilité envisageable au cours des 50 prochaines années au Canada, il nous faudrait rapidement trouver un procédé beaucoup plus économique d'extraire le plutonium du combustible CANDU, un procédé qui puisse être protégé et qui soit spécialement adapté au faible taux de combustion nucléaire du combustible CANDU. L'intérêt récent pour le recours à des techniques fondées sur la volatilité du fluorure pour recycler le combustible irradié des réacteurs LWR indique qu'une autre option pourrait peut-être se substituer à l'évacuation directe du combustible CANDU. Nous proposons ici que la SGDN étudie la possibilité de recourir à cette option.

L'opinion actuelle concernant le retraitement du combustible CANDU

Dans un précédent document de discussion présenté au Conseil consultatif de la SGDN, des aspects techniques de l'évacuation du combustible irradié CANDU ont été traités sous l'angle de la composition isotopique.² Il était noté que les motifs économiques de recourir au retraitement du combustible irradié des réacteurs à eau légère (LWR) sont beaucoup plus importants que pour le combustible irradié des réacteurs CANDU en raison du très faible contenu fissile du combustible irradié CANDU en comparaison avec le combustible irradié des réacteurs LWR. En fait, la teneur

¹ M. BUNN, J.P. HOLDREN, S. FETTER et B. van der ZWAAN, « The Economics of Reprocessing versus Direct Disposal of Spent Nuclear Fuel », *Nuclear Technology*, Vol. 150, juin 2005.

² D. ROZON, « CANDU Spent Fuel : a Waste or a Resource », document de discussion du Conseil consultatif de la SGDN, janvier 2005.

en U-235 de l'uranium du combustible irradié CANDU (approximativement 0,23%) est comparable à la teneur des résidus des usines d'enrichissement (0,2 % à 0,3 %). Par conséquent, il serait insensé de retraiter le combustible CANDU pour en récupérer l'uranium, puisque nous avons accès à de vastes quantités d'uranium appauvri non radioactif et chimiquement pur résultant des opérations d'enrichissement antérieures menées de par le monde (probablement bien davantage qu'un million de tonnes). Le seul motif économique de retraiter le combustible irradié CANDU serait donc de récupérer le plutonium. Cette option ne peut être entièrement exclue pour des applications particulières telles que la production de matière fissile pour de futurs cycles de thorium dans des réacteurs CANDU.³ À plus grande échelle, cependant, les coûts élevés associés à la technologie de retraitement commerciale actuelle (PUREX) et les difficultés liées à la manutention du plutonium isolé donneraient lieu à des coûts de recyclage exorbitants et à des préoccupations importantes sur le plan de la prolifération. Cela garantit en pratique que l'inventaire actuel des grappes de combustible irradié CANDU ne sera jamais retraité. Suivant ce raisonnement, le combustible irradié CANDU devrait donc être considéré comme un déchet.

Ce point de vue est conforme à la stratégie de la SGDN (la GAP), qui conduit à l'évacuation directe des grappes de combustible irradié dans une formation géologique profonde appropriée. L'annexe 9 du Rapport d'étude final de la SGDN contient un exposé détaillé sur le retraitement, lequel inclut les considérations évoquées ci-dessus. Les auteurs concluent que le retraitement, comme solution de gestion du combustible nucléaire irradié est jugé très peu envisageable au Canada en ce moment. Mais ils reconnaissent que le retraitement du combustible irradié pourrait se révéler possible dans le futur si un programme nucléaire est maintenu au Canada. Ils reconnaissent également que les conditions économiques pourraient être très différentes dans 50 ou 300 ans. La GAP est suffisamment souple pour parer à ce problème en assurant l'accès au combustible irradié pour une période suffisamment longue pour permettre aux générations futures de prendre des décisions concernant le retraitement du combustible CANDU.

L'étude de l'Université Harvard

Actuellement, approximativement un tiers du combustible irradié des réacteurs LWR a été retraité commercialement de par le monde, le restant étant entreposé sur les sites des réacteurs (y compris aux États-Unis). Les installations commerciales de retraitement emploient le procédé aqueux PUREX pour séparer l'uranium et le plutonium des produits fissiles et des actinides mineurs. Puisque seulement une petite fraction du plutonium séparé est actuellement recyclée sous forme de combustible MOX dans les réacteurs LWR, d'importantes quantités de plutonium s'accumulent dans le monde, en attendant qu'elles puissent être utilisées dans des réacteurs à neutrons rapides de quatrième génération. Bien que des avancées soient souhaitées dans le domaine des cycles de combustible et des nouvelles technologies de retraitement pour recycler le plutonium et l'uranium récupérés lors du retraitement, les efforts internationaux se concentrent naturellement sur la fermeture du cycle du combustible des réacteurs à eau légère (LWR).

On convient généralement que même en tenant compte des prix actuellement plus élevés de l'uranium, le retraitement et le recyclage sont plus onéreux que l'évacuation directe du combustible irradié des réacteurs LWR. S'il y a débat, c'est concernant l'ampleur de la différence de coût et le temps pendant lequel elle est susceptible de persister. L'étude de l'Université Harvard a abordé ce problème selon le point de vue d'un exploitant de réacteur LWR qui doit décider quelle solution est la moins chère pour gérer son combustible déchargé : l'évacuation directe ou le retraitement.

³ Le thorium naturel contient principalement du Th-232, qui n'est pas fissile, mais qui, lorsqu'utilisé comme combustible, peut produire *in situ* un isotope d'uranium fissile, l'U-233. Pour amorcer le cycle du thorium, il faut ajouter une certaine quantité de matière fissile dans le nouveau combustible, dans ce cas, le Pu-239 récupéré lors du retraitement du combustible CANDU.

La volatilité du fluorure (D. Rozon, D. Lister) Janvier 2008

Les deux solutions ont été comparées, en tenant compte notamment des éléments de coûts suivants :

a) dans le cas de l'évacuation directe :

- l'entreposage provisoire du combustible irradié
- le transport jusqu'au site du dépôt
- l'emballage des déchets
- l'évacuation

b) dans le cas de la solution du retraitement :

- le transport vers une usine de retraitement (après l'entreposage sur les sites des réacteurs)
- le retraitement du combustible irradié
- l'évacuation des déchets retraités (sur le même site?)
- le recyclage de l'uranium et du plutonium récupérés, *diminuant les quantités de combustible nouveau requises.*

La solution du recyclage comprend par conséquent un crédit associé à la diminution des quantités de combustible frais exigées, qui *dépend du prix de l'uranium*. En supposant que les coûts de retraitement sont plus élevés que les coûts de l'évacuation directe, une augmentation du prix de l'uranium réduira cette différence. Le prix de l'uranium auquel le *coût brut actuel* des deux cycles de combustible devient égal s'appelle le **prix seuil de l'uranium**.

En nous basant sur une hypothèse prudente d'un prix de 1 000 \$/kg pour le retraitement du combustible LWR (en dollars américains de 2003) ainsi que sur d'autres projections réalistes relatives aux coûts de fabrication du combustible recyclé et d'évacuation des déchets de haute activité, un prix seuil d'approximativement **370 \$/kg** d'uranium a été établi dans l'étude de l'Université Harvard, c'est-à-dire environ huit fois le prix de l'uranium en 2003.

Même au prix actuel plus élevé de l'uranium, la différence est toujours considérable. Le prix seuil est très sensible aux hypothèses associées aux coûts de retraitement, dépassant 600 \$/kg lorsque les coûts de retraitement atteignent 1 500\$/kg. En présumant que les coûts de retraitement demeureront toujours élevés et considérant les ressources d'uranium connues, l'étude de l'Université Harvard concluait que les ressources d'uranium disponibles étaient susceptibles de demeurer suffisantes pour soutenir les cycles de combustible LWR à passage unique pendant plusieurs décennies.

Volatilité du fluorure

Les méthodes de retraitement à sec, par opposition aux méthodes d'extraction à base de solvants comme le PUREX, ont été brièvement abordées à la section 3.2 du rapport Jackson sur le retraitement.⁴ La volatilisation du fluorure est une « *méthode jugée prometteuse pour l'extraction sélective des actinides* ». Il faut de plus rappeler que faire réagir de l'uranium avec du fluorure pour produire de l'hexafluorure d'uranium (UF₆) constitue la première étape de l'enrichissement de l'uranium. En fait, la plus grande partie de l'uranium canadien exporté est expédié sous cette forme.

Le recours aux techniques basées sur la volatilité du fluorure a également été envisagé dans le passé pour réduire les coûts du retraitement. Il a été proposé d'utiliser la volatilité du fluorure pour extraire la plus grande partie de l'uranium du combustible irradié, un procédé PUREX pouvant ensuite être utilisé pour extraire le reste de l'uranium, du plutonium et des autres produits fissiles. Des économies importantes étaient envisagées en raison de la diminution considérable du volume à l'étape de l'extraction du plutonium.

⁴ D.P. JACKSON, *Status of Nuclear Fuel Reprocessing, Partitioning and Transmutation*, Université Mc Master (Article commandé par la SGDN, 2005)

Une autre approche qui simplifierait énormément le processus de retraitement du combustible irradié LWR a récemment été proposée.⁵ Elle pourrait se réaliser en recyclant les deux sources de produits issus du procédé de volatilité du fluorure directement dans les réacteurs CANDU, sans recours à un autre procédé de purification ou de séparation. Outre la génération d'électricité issue du recyclage des deux sources, cette solution offre des avantages considérables :

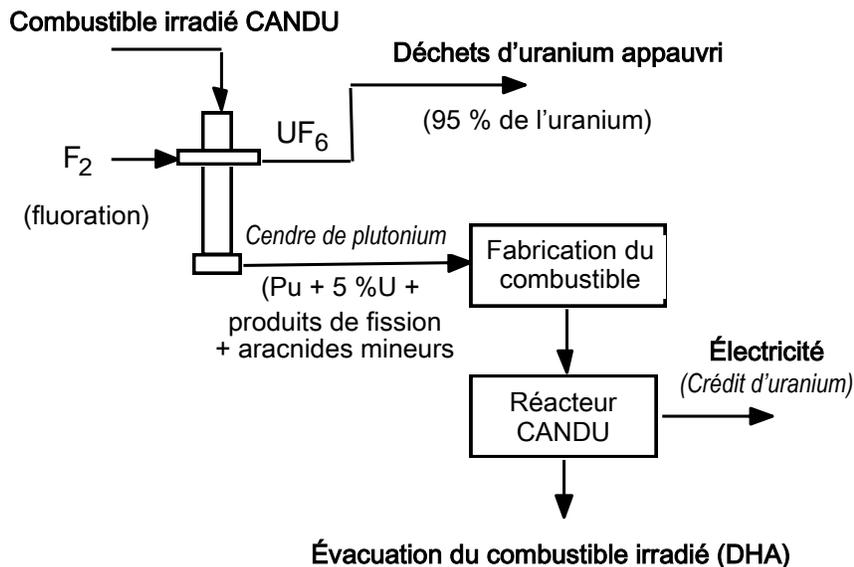
- elle élimine entièrement le procédé aqueux PUREX du schéma de conception (élément de coût majeur)
- elle permet d'atteindre un *degré élevé de résistance à la prolifération* parce que le plutonium demeure en tout temps mélangé à des produits de fission hautement radioactifs. De plus, le plutonium résiduel dans le combustible déchargé après le recyclage est considérablement dégradé (un élément fissile moindre), ce qui entraîne une diminution nette de l'inventaire total de plutonium.

Des calculs à l'aide du code WIMS ont été effectués à la référence 5 pour une grappe de combustible CANFLEX assemblée selon la configuration CANDU à partir de pastilles d'oxyde fritté composées de la cendre issue du procédé de volatilité du fluorure. Selon les simulations, le taux de combustion nucléaire du combustible déchargé pourrait atteindre près de 60 MWj/kg dans un réacteur CANDU avec ce combustible recyclé. Un taux de combustion aussi élevé apparaît possible parce que le combustible-cendre contient beaucoup moins d'uranium (seulement 40 %) et certains des produits de fission poisons initialement contenus dans le combustible s'épuisent à mesure que s'appauvrit le plutonium fissile. Cela diminue le taux de déclin de la réactivité du combustible et prolonge le cycle d'irradiation, entraînant un taux de combustion nucléaire plus élevé au moment du déchargement.

⁵ G.R. DYCK, T. MOCHIDA et T. FUKASAWA, *Application of Fluoride Volatility to the Recycling of LWR Spent Fuel into CANDU*, Actes de la conférence GLOBAL 2005, Tsukuba, Japon, 9 au 13 oct. 2005 (article 493)

Application de la volatilité du fluorure (FLUOREX) au combustible irradié CANDU

Notre intérêt ici réside dans le combustible irradié CANDU, et non dans le combustible irradié des réacteurs à eau légère (LWR). Considérons conceptuellement par conséquent l'application de la volatilité du fluorure comme solution de retraitement du combustible irradié CANDU. Cette application est illustrée dans le diagramme suivant :



a) Dégainage et immobilisation des produits de fission radioactifs gazeux

La première étape (non illustrée) consiste à retirer la gaine qui enveloppe le combustible. Une méthode prometteuse est le *dégainage oxydatif*,⁶ qui recourt au fait que lorsque l' UO_2 est oxydé en U_3O_8 , il gonfle et se transforme en poudre. La gaine est coupée de manière à permettre à l'oxygène d'atteindre l' UO_2 à l'intérieur et de réagir à une température élevée pour former de l' U_3O_8 . Le procédé fait gonfler le combustible, forçant l'ouverture de la gaine et libérant la poudre résultante. Selon la référence 5, plus de 99 % du combustible peut être extrait de cette façon, sous une forme granulée appropriée à l'étape de la fluoration qui suit (comme le montre l'illustration).

Le processus de dégainage libère aussi des produits de fission radioactifs gazeux qui doivent être immobilisés dans des filtres d'argiles pour être entreposés et évacués. Il est bon de souligner que le faible volume de DHA généré pendant le dégainage est constitué entièrement de produits de fission à courte vie qui se dégraderont. L'activité de ces déchets diminuera donc au niveau de DFA au cours d'une période d'approximativement 50 ans. Il faut aussi noter que certains produits de fission (comme le césium-137) sont des composants importants de la source de chaleur du combustible irradié. Leur retrait à ce stade pourrait diminuer le niveau d'activité de la matière à recycler et subséquemment diminuer les coûts de fabrication et d'évacuation du combustible recyclé.

b) Déchets d'uranium appauvri

Avec le procédé FLUOREX, la majeure partie de l'uranium dans le combustible irradié CANDU serait récupérée sous forme d'hexafluorure d'uranium. La référence 5 fait état d'une efficacité de

⁶ O. AMANO, G.R. DYCK et J. SULLIVAN, *Option du traitement à sec du combustible LWR et FBR*, Actes de la conférence GLOBAL 2005, Tsukuba, Japon, 9 au 13 oct. 2005 (article 521)

La volatilité du fluorure (D. Rozon, D. Lister)
Janvier 2008

95 % de l'extraction volatile. Il est important de noter que le flux d'uranium récupéré contient essentiellement de l'uranium appauvri (UA), contrairement au cas des réacteurs LWR, où l'uranium récupéré contient plus d'U-235 que d'uranium naturel. L'uranium récupéré peut ensuite vraisemblablement être considéré comme un déchet de faible activité (DFA) s'il ne contient pas trop de produits de fission contaminants. Autrement, une étape supplémentaire de purification pourrait être requise, ce qui augmenterait les coûts de retraitement et générerait un léger flux de DHA qui pourrait être recyclé avec la cendre de Pu. En principe, l'évacuation de l'UF₆ appauvri pourrait mener à une *réduction importante des coûts d'évacuation des déchets* comparativement à la méthode de l'évacuation directe, au moins pour 94 % du volume de combustible irradié. Évidemment, le 6 % restant générera par la suite des déchets de haute activité après le recyclage et la production d'électricité supplémentaire et ses coûts d'évacuation seront très élevés.

c) La cendre de plutonium

La « cendre » de plutonium contient la plus grande partie des produits de fission, le 5 % d'uranium résiduel et tous les autres actinides. La composition de la cendre de Pu peut être déterminée simplement en retirant 95 % de l'uranium du combustible irradié. Ce fait est illustré dans le tableau 1, où sont présentées les compositions de combustible irradié CANDU trouvées dans la référence 2 (taux de combustion de 7,5 MWj/kg). À noter :

- le retraitement de **16,5 kg de combustible irradié CANDU** avec la volatilité du fluorure génère **1 kg de matière combustible recyclable** contenant 82 % d'uranium appauvri, 6 % de plutonium et 12 % de produits de fission et d'actinides mineurs.
- avec une teneur en produits fissiles de près de 5 % (principalement du Pu-239), il est fort plausible que la matière recyclable serait suffisamment réactive dans une configuration CANDU pour aboutir à un **taux de combustion important au moment du déchargement**. *Seuls des calculs physiques détaillés pourraient confirmer cette hypothèse.*
- par comparaison, le combustible de cendre de LWR a une teneur de 7 % de produits fissiles et produit un taux de combustion de 60 MWj/kg. Compte tenu de la plus faible teneur en produits fissiles et du déclin plus rapide de la réactivité, nous spéculons qu'un taux de combustion moyen de **30 à 40 MWj/kg** pourrait être obtenu à partir du combustible de cendre CANDU.

Tableau 1 Composition du combustible avant et après extraction de 95 % de l'uranium du combustible irradié CANDU en employant la volatilité du fluorure (combustible de cendre de Pu)

Composition du combustible (g)	avant l'extraction de l'U	après l'extraction de l'U	
U-235	2,3	0,12	82 %
U-236	0,7	0,04	
U-238	985,8	49,29	
Pu-239	2,5	2,5	6 %
Pu-240	1,0	1,0	
Pu-241	0,2	0,2	
Pu-242	0,1	0,1	
P. f. + autres actinides	7,4	7,4	12 %
total	1000 g	60,6 g	100 %

d) Fabrication du combustible recyclé

La souplesse du réacteur CANDU par rapport aux cycles de combustible basés sur des matières combustibles recyclées a été démontrée. Par exemple, de nombreuses études réalisées en Corée et à Chalk River ont démontré la faisabilité du cycle DUPIC, où le combustible irradié PWR est réduit à l'état d'une fine poudre à l'aide d'un procédé de traitement à sec (OREOX) et refritté pour produire de nouvelles pastilles de combustible CANDU. Du combustible DUPIC expérimental a effectivement été produit à Chalk River à partir de combustible PWR et irradié avec succès dans le réacteur NRU. Des procédés de manutention à distance ont été évalués pour la fabrication du combustible et la performance du réacteur CANDU alimenté en combustible DUPIC a été étudiée en détail en Corée. Le recyclage de la cendre de Pu à l'aide du procédé de volatilité du fluorure décrit ci-dessus bénéficierait certainement de l'expérience acquise avec le combustible DUPIC.

La fabrication de combustible avec de la cendre de plutonium radioactive constituerait sans aucun doute un défi de taille. Elle pourrait même nécessiter une autre approche que le frittage (le tassement par vibrations, par exemple). Un nouveau modèle de grappe de combustible pourrait aussi être requis pour assurer une répartition adéquate de la puissance; des poisons combustibles pourraient être requis pour réguler la réactivité et limiter les pointes de puissance. Il faut par conséquent prévoir que les coûts de fabrication du combustible seraient considérablement plus élevés par comparaison avec le combustible d'uranium naturel. Un coût dix fois plus élevé ne serait peut-être pas une exagération.

En supposant qu'aucun changement important ne devrait être apporté à la conception du réacteur CANDU pour recevoir ce nouveau combustible, le combustible recyclé pourrait effectivement se substituer au combustible neuf dans un réacteur CANDU actuel. En réalité, le dénouement le plus probable serait qu'un nouveau réacteur CANDU spécialisé serait construit et que des équipements spéciaux seraient conçus et approuvés pour effectuer la manutention du combustible de recyclage radioactif.

e) Évacuation du combustible recyclé usé

Les coûts d'évacuation du combustible recyclé usé doivent aussi être inclus dans le coût total d'évacuation des déchets. Nous prévoyons que les coûts d'évacuation du combustible recyclé seraient *plus élevés* que les coûts d'évacuation de référence (pour le combustible irradié d'uranium naturel), en raison de la charge thermique considérablement accrue associée au taux plus élevé de combustion accumulée et de la teneur accrue en actinides dans le combustible recyclé déchargé.

Les coûts d'évacuation des DHA dépendront par conséquent du taux de combustion atteint pendant le recyclage. Le coût supplémentaire associé à l'évacuation directe du combustible recyclé usé comparativement au combustible original épuisé ne varie pas de façon linéaire avec le taux de combustion. Ce coût supplémentaire peut être considérablement réduit au moyen d'une stratégie appropriée d'insertion dans le dépôt. Néanmoins, la pénalité serait importante.

Estimation préliminaire du prix seuil de l'uranium

Le prix seuil de rentabilité entre l'évacuation directe et le retraitement peut s'exprimer simplement par l'équation suivante :

$$C_{Dir} = C_R + f \cdot C_{DFA} + (1 - f) \cdot (C_{rec} + C_{DHA}) - (1 - f) \cdot \frac{TC_{rec}}{TC_{nat}} \cdot (C_{fab} + C_U)$$

La volatilité du fluorure (D. Rozon, D. Lister)
Janvier 2008

C_{Dir} représente le coût unitaire (par kg) de l'évacuation directe du combustible irradié CANDU. Tous les autres termes de l'équation représentent des coûts ayant une incidence sur l'option de retraitement et sont définis ci-dessous. Au cours de cette étude, la SGDN a estimé les coûts de diverses options d'évacuation directe. Pour la solution de la GAP, qui a finalement été choisie par le gouvernement, un coût direct total de 22 milliards de dollars a été établi pour un inventaire de 3,7 millions de grappes, sans compter les coûts d'entreposage provisoire sur les sites des réacteurs et les coûts de transport jusqu'au dépôt (voir le tableau 11-3 du Rapport d'étude final). Ce coût se répartit sur 350 années. En appliquant un taux d'actualisation de 5,7 % pour tenir compte de la hausse des prix des matières premières et de la main-d'œuvre et un taux raisonnable de rendement sur les fonds en fiducie, une valeur actuelle équivalente de 4,6 milliards de dollars a été calculée (en dollars de 2004).

Pour une comparaison plus réaliste entre la solution de l'évacuation directe et celle du retraitement, les coûts unitaires dans l'équation ci-dessus devraient tous être actualisés à leur valeur actuelle, puisque les dépenses ne s'effectueraient pas au même moment dans les deux scénarios. Par exemple, C_{HLW} représente le coût de l'évacuation du combustible recyclé usé (par kg). L'évacuation du combustible recyclé usé pourrait s'effectuer beaucoup plus tard (années) que l'évacuation directe des grappes non traitées. Cela tendrait à réduire les coûts d'évacuation des DHA comparativement aux coûts d'évacuation directe du combustible irradié.

À des fins de comparaison grossière des options, nous emploierons tout simplement les coûts directs, négligeant les calendriers de mise en œuvre différents des deux options. Les estimations suivantes seront utilisées :

- C_{Dir} À 22 milliards \$ pour 3,7 millions de grappes, chacune contenant initialement 19 kg d'uranium naturel, le coût de l'évacuation directe (C_D) serait approximativement de **300 \$/kg**.
- C_R Un coût de 1 500 \$/kg est cité dans l'étude de la SGDN pour le retraitement du combustible CANDU au moyen d'un procédé PUREX commercial. Le coût d'extraction de l'uranium du combustible CANDU irradié à l'aide de la volatilité du fluorure devrait être considérablement moindre, puisqu'il s'agit d'un procédé de traitement à sec et que l'activité est beaucoup moins élevée que celle d'un combustible LWR irradié. Nous utiliserons pour C_R un *prix cible* de 10 à 20 % du procédé conventionnel, soit des valeurs variant de **200 \$/kg à 400 \$/kg**.
- C_{DFA} Une estimation de 19 milliards \$ a aussi été fournie dans le tableau 11-3 du Rapport d'étude final pour les coûts de la GAP sans le recours à un entreposage provisoire facultatif, ce qui représente une réduction d'approximativement 20 %. La mise en œuvre d'un entreposage provisoire à faible profondeur ressemble à ce qui pourrait être fait pour évacuer le volume important de déchets de faible activité générés par le procédé FLUOREX (UF₆ appauvri). Cela correspond à une valeur de $C_{LLW} = 0,2 C_D$, c.-à-d. **60 \$/kg** pour les coûts d'évacuation associés à l'uranium appauvri.⁷
- C_{rec} Nous utiliserons un coût hautement spéculatif de **600 \$/kg** pour la fabrication à distance des grappes de combustible à partir de la cendre de Pu résultant du procédé de la volatilité du fluorure. Cette valeur est conforme aux valeurs calculées dans des études de faisabilité de la fabrication du combustible DUPIC et a été choisie en raison des similitudes existantes (procédé OREOX, fabrication à distance de combustible contenant du plutonium hautement radioactif).⁸

⁷ Notons que l'uranium appauvri pourrait subséquemment facilement être utilisé par les futures générations comme ressource gratuite pour produire de vastes quantités d'électricité à partir de réacteurs à neutrons rapides.

⁸ H. Choi, W.I. Ko, M.S. Yang, « Economic Analysis on Direct Use of Spent Pressurized Water Reactor Fuel in CANDU Reactors – I : DUPIC Fuel Fabrication Cost », *Nuclear Technology*, vol. 134, numéro 2, mai 2001.

La volatilité du fluorure (D. Rozon, D. Lister)
Janvier 2008

C_{DHA} En raison de la charge thermique plus élevée, nous présumerons arbitrairement que le coût de l'évacuation directe du combustible recyclé sera 3 fois supérieur à celui de l'uranium naturel, $C_{HLW} = 3 C_D$, c.-à-d. **900 \$/kg**. Bien que C_{rec} et C_{HLW} semblent élevés, il s'agit de coûts unitaires et il faut se rappeler que les volumes sont beaucoup plus faibles (d'où le facteur de $1-f$ dans l'équation).

Cr_{fab} Le crédit accordé pour le combustible neuf non utilisé comprend le coût de fabrication des grappes de combustible neuf (uranium naturel), c.-à-d. approximativement **60 \$/kg**.

Cr_U L'élément le plus important du crédit d'uranium est le prix de l'uranium lui-même. Le cours du disponible de l'uranium (déc. 2007) est d'approximativement **230 \$/kg** (90 \$US/lb U_3O_8).⁹ Une estimation raisonnable pour les contrats à long terme serait donc de **150 \$/kg**. Nous utiliserons cette valeur comme référence.

Facteurs technologiques

f La part du combustible irradié qui se transforme en uranium appauvri. Dans l'exemple montré au tableau 1, où nous avons présumé que 95 % de l'uranium est extrait, $f = 0,94$. $(1-f)$ est par conséquent la part de combustible irradié contenue dans la cendre de Pu ($1-f = 6\%$). En adoptant cette valeur présumée, **16,3 kg de combustible CANDU au total seront nécessaires pour produire chaque kg de combustible recyclé.**

TC_{rec} Le taux moyen de combustion qui pourrait être atteint dans un réacteur CANDU avec le combustible recyclé. Le taux de combustion dans un réacteur CANDU alimenté d'uranium naturel (B_{nat}) est d'approximativement 7,5 MWj/kg. Comme nous l'avons noté plus haut, nous spéculons qu'un taux de combustion de 30 à 40 MWj/kg pourrait être obtenu avec ce combustible recyclé.

Ces deux facteurs technologiques ont une incidence directe sur le prix seuil de l'uranium ou sur la viabilité du retraitement. Ils sont étroitement liés, puisqu'une petite augmentation de l'efficacité de l'extraction volatile de l' UF_6 concentrera encore plus l'élément fissile et aboutira à un taux de combustion plus élevé lorsque recyclé. Pour $f = 0,94$, nous notons les caractéristiques suivantes :

- en présumant un taux de combustion de 40 MWj/kg, **1 kg de combustible recyclé équivaut à 5,3 kg de combustible d'uranium naturel** (pour un taux de combustion de seulement 7,5 MWj/kg);
- un réacteur CANDU de 1100 MWe fonctionnant à une capacité de 90 % consommerait approximativement 26 tonnes par an de combustible recyclé fabriqué par le retraitement de $16,3 \times 26 = 424$ tonnes de combustible irradié CANDU;
- puisque les réacteurs CANDU actuels produisent approximativement 150 tonnes de combustible irradié par GWe-an, un réacteur CANDU incinérateur d'actinides de 1 100 MWe pourrait donc recycler le combustible provenant d'une capacité CANDU installée de 3 000 MWe;
- pour un taux de combustion de 40 MWj/kg, l'inventaire actuel de combustible irradié CANDU (approx. 2 millions de grappes) pourrait fournir un réacteur de 1100 MWe pendant plus de 100 ans.
- le recyclage augmenterait l'énergie produite par l'uranium original d'approximativement **33 %**.

Prix seuil

⁹ www.uxc.com

La volatilité du fluorure (D. Rozon, D. Lister)
Janvier 2008

Une augmentation du prix de l'uranium n'a pas d'incidence sur aucun des coûts unitaires mentionnés ci-dessus, mais elle augmenterait la valeur du crédit accordé pour l'uranium non utilisé, ce qui rendrait l'option du retraitement plus viable par rapport à celle de l'évacuation directe. En utilisant les valeurs ci-dessus pour définir les coûts dans l'équation, nous obtenons un **prix seuil de l'uranium de 393 \$/kg**, c.-à-d. une valeur *2,5 fois plus élevée que le prix actuel* (~150 \$/kg).

il faut souligner que le prix seuil de l'uranium est très sensible au coût unitaire du retraitement, comme le montre le tableau suivant :

Coût du retraitement C_R (\$/kg)	Taux de combustion au moment du déchargement du combustible recyclé B_{rec} (MWj/kg)	Prix seuil de l'uranium C_U (\$/kg)
200	40	88
200	30	137
300	40	393
300	30	544
400	40	699
400	30	951

Lorsque le coût du retraitement diminue, le prix seuil de l'uranium diminue et peut atteindre le prix actuel du marché. En utilisant un prix actuel de l'uranium de 150 \$/kg, nous constatons que **le coût du retraitement à l'aide de la volatilité du fluorure devrait être inférieur à 220 \$/kg pour que l'option du retraitement soit viable aujourd'hui**, en présumant un taux de combustion de 40 MWj/kg du combustible recyclé.

Notons finalement que le prix seuil de l'uranium n'est pas tout à fait aussi sensible aux coûts d'évacuation des DHA. En utilisant une valeur de $C_{DHA} = 2 C_D$ (au lieu d'un facteur de 3), le prix seuil de l'uranium diminue à 337 \$/kg, une réduction de seulement 15 %.

Conclusion et recommandation à la SGDN

Notre examen préliminaire indique que le procédé de volatilité du fluorure rend plausible la viabilité de l'option retraitement du combustible irradié CANDU. Le prix de l'uranium a s'est déjà multiplié par 6 au cours des 10 dernières années. Puisque la demande d'uranium est susceptible d'entraîner une hausse du prix de cette matière, il y a une probabilité importante que le prix seuil de l'uranium soit atteint bien avant que la SGDN doive mettre en œuvre la Phase 3 de la GAP.

La rentabilité n'est certainement pas le seul facteur influençant les décisions en matière de retraitement. De nombreux autres facteurs devront être pris en considération, y compris ceux qui relèvent de questions environnementales et stratégiques. Ces questions seront examinées en temps opportun, mais le seuil de rentabilité et la faisabilité technique doivent être établis tôt dans le processus.

Nous recommandons que la SGDN réalise une étude plus détaillée pour déterminer combien coûterait l'application du procédé basé sur la volatilité du fluorure dans le contexte canadien. En particulier, il serait essentiel de confirmer que des taux d'efficacité f appropriés d'extraction de l'uranium peuvent être atteints avec le procédé FLUOREX. Des calculs devront être effectués à

La volatilité du fluorure (D. Rozon, D. Lister)
Janvier 2008

l'aide du code WIMS pour estimer le taux de combustion au moment du combustible recyclé déchargé (TC_{rec}) dans une configuration CANDU. Ces calculs de configuration pourraient aussi révéler la nécessité d'autres étapes d'extraction par volatilité pour retirer certains produits de fission de la cendre de plutonium afin de prolonger la période de combustion.

Bien que le retraitement du combustible irradié au Canada ne soit pas actuellement jugé rentable, il pourrait un jour devenir une option intéressante par rapport à l'évacuation directe et la SGDN doit se préparer à cette éventualité. Toutefois, ***les spéculations concernant le retraitement futur du combustible irradié CANDU ne doivent pas entraver le processus de sélection d'un site pour un dépôt géologique en profondeur.***

Peu importe les résultats des études de la SGDN sur la volatilité du fluorure, le combustible irradié actuellement entreposé sur les sites des réacteurs devra être transporté vers un site centralisé. Le site choisi devra être en mesure de recevoir tout le combustible irradié et reposer sur une formation géologique profonde capable de confiner tous les radionucléides contenus dans le combustible irradié. Le retraitement du combustible irradié et l'évacuation des DHA sur le site n'alourdiront pas le fardeau du dépôt. Il pourrait en fait le réduire, si un réacteur incinérateur d'actinides est également construit sur le site.

Le dossier de sûreté pour le dépôt futur devrait par conséquent prendre en compte à la fois le scénario de l'évacuation directe du combustible irradié et celui de l'évacuation des DHA issus du retraitement. Le retraitement ne devrait pas poser de problème d'acceptation sociale, puisque tous les DHA proviendront du combustible irradié tiré des réacteurs canadiens. Compte tenu des attitudes actuelles, il est peu probable que les gens accepteraient du combustible irradié ou des DHA provenant d'autres pays.