

Feuille d'information

Avril 2013

Le combustible nucléaire, un matériau aux propriétés exceptionnelles

L'énergie nucléaire dispose d'une large palette d'options à long terme garantissant une alimentation électrique durable. Les propriétés exceptionnelles du combustible en sont la clé. A la différence de la combustion du charbon, du pétrole ou du gaz, le combustible nucléaire usé peut être retraité et réutilisé pour la production d'énergie. Dans l'économie nucléaire, un déchet n'est pas qu'un déchet mais également une matière première qui pourra être réutilisée pour l'alimentation énergétique des générations futures.

L'uranium présent dans la nature se compose principalement de deux noyaux atomiques: l'atome d'uranium 238 (99,3%) et l'atome d'uranium 235 (0,7%) dont le noyau comprend trois neutrons de moins.

Les centrales nucléaires produisent de l'énergie primaire à partir de la fission de l'uranium. La plupart des réacteurs traditionnels, tels que

ceux en exploitation en Suisse, fonctionnent essentiellement grâce à la fission de l'uranium 235, la plus grande partie de l'uranium 238, présent majoritairement, n'étant pas utilisée. En outre, pour ce type de réacteur, la part d'uranium 235 contenue dans le combustible neuf doit atteindre les 3-5% (grâce au processus d'enrichissement).

La fission de l'uranium 235 dans le réacteur d'une centrale nucléaire génère des noyaux atomiques plus légers, les *produits de fission*. Ceux-ci restent dans le combustible et fournissent grâce à leur radioactivité quelques pour cent supplémentaires dans le cadre de la production d'énergie du réacteur. Ils ne peuvent cependant être réutilisés.

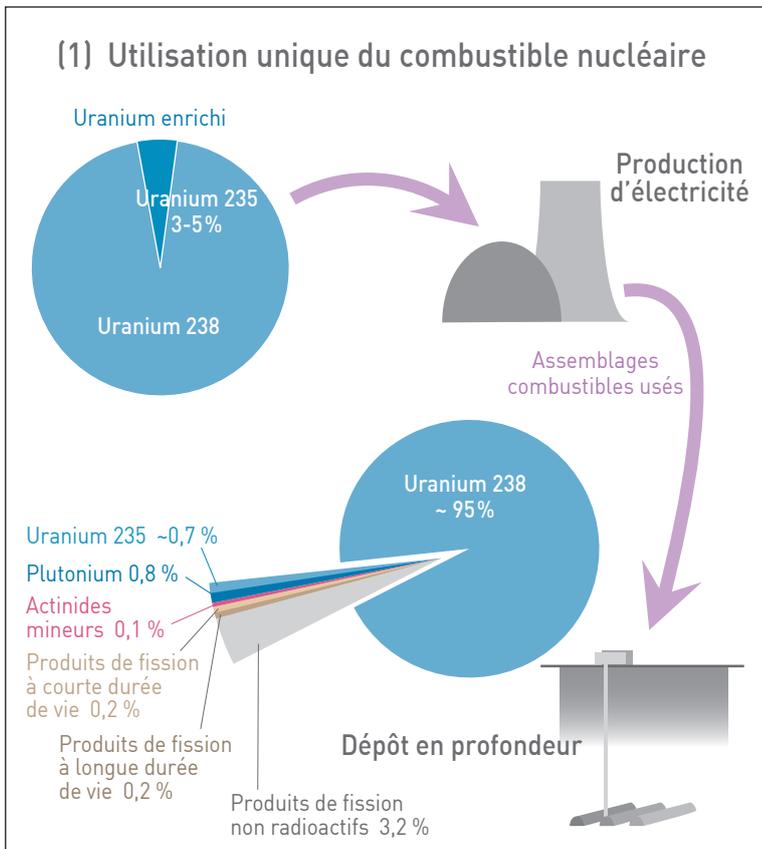
Plutonium

Un autre processus important se produit parallèlement dans le réacteur: la capture des neutrons, qui entraîne la transformation d'une petite partie de l'uranium 238, difficilement fissile, tout d'abord en neptunium puis en plutonium 239. Tout comme l'uranium 235, ce dernier est facilement fissile et participe à la production d'énergie dans le réacteur. Une partie de ce plutonium n'est cependant pas utilisée pour la fission mais est transformée en noyaux atomiques encore plus lourds. Ces nouveaux éléments créés dans le réacteur à partir de l'uranium, notamment le neptu-



Un matériau exceptionnel possédant une réserve d'énergie colossale pour l'avenir: montage d'un assemblage combustible à base d'uranium, utilisé dans un réacteur à eau légère traditionnel.

Photo: Advanced Nuclear Fuels GmbH



– **Le retraitement** du combustible utilisé a quant à lui pour objectif de récupérer une partie de la matière première énergétique contenue, et de stocker uniquement dans un dépôt en profondeur les matières restantes en tant que déchets nucléaires. La France, la Grande-Bretagne, les Pays-Bas ou encore la Russie se sont engagés dans cette voie.

Le retraitement

Les assemblages combustibles usés sont transportés dans des usines spécialisées en vue d'être retraités. Dans un premier temps, ils sont cisailés mécaniquement puis dissous dans de l'acide nitrique. L'uranium et le plutonium sont ensuite séparés par le biais d'un processus chimique en vue d'être réutilisés pour la fabrication de nouveaux assemblages combustibles (voir graphique 2).

L'uranium séparé peut être de nouveau enrichi et réutilisé dans la production d'électricité. La réintroduction du plutonium séparé s'effectue par le biais de la fabrication de combustible MOX. MOX est l'acronyme de **M**élange d'**O**Xydes. Dans ce type d'assemblage, le plutonium est mélangé à de l'uranium appauvri¹ afin d'obtenir la concentration de substances fissiles requises dans le réacteur.

Les matières restantes, à savoir les produits de fission et les actinides mineurs, sont coulées en un verre très solide, emballées dans des conteneurs en acier et réacheminées dans leur pays d'origine. Les conteneurs sont ensuite entreposés puis stockés en tant que déchets nucléaires dans un dépôt en couches géologiques profondes.

Préservation des ressources naturelles

Le retraitement du combustible nucléaire offre plusieurs avantages:

– **Préservation des ressources naturelles:**

Le recyclage des substances fissiles permet de produire jusqu'à 20% d'énergie en plus par rapport à l'évacuation directe, à partir de la même quantité initiale d'uranium naturel.

– **Décharge des dépôts en couches géologiques profondes:** Le retraitement présente également l'avantage de décharger les

nium, l'américium et le curium, sont appelés actinides mineurs, «mineurs» en raison de leur quantité réduite par rapport au plutonium.

«Usé» ne signifie pas «en fin de vie»

Ces processus physiques entraînent un changement de la composition du combustible présent dans le réacteur. Lorsqu'un assemblage combustible est déchargé d'un réacteur dans lequel il a été utilisé durant plusieurs années, il se compose encore d'une part importante d'uranium 238 et d'une part d'uranium 235 non fissile (voir graphique 1), auxquelles s'ajoutent désormais les produits de fission, le plutonium non transformé et les actinides mineurs.

Ce combustible utilisé peut être traité de deux manières différentes:

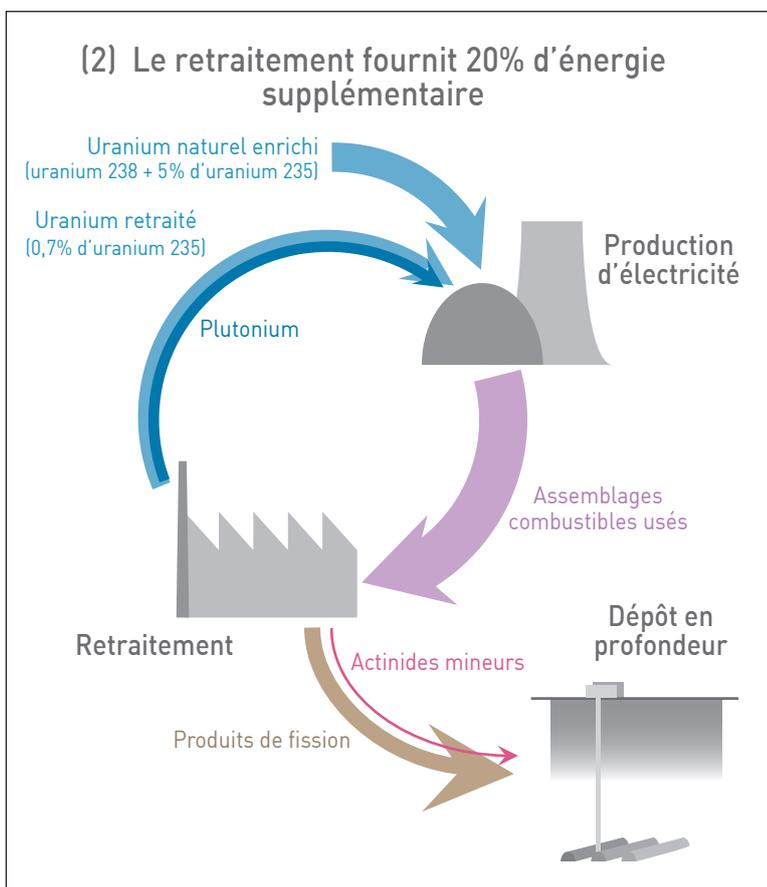
– **L'évacuation directe** consiste à stocker durablement les assemblages combustibles usés dans un dépôt en couches géologiques profondes après qu'ils aient été stockés dans un dépôt intermédiaire. C'est l'option choisie notamment par la Suède, la Finlande et les États-Unis.

¹ On désigne par «appauvri» la part d'uranium restante suite à l'enrichissement, c'est-à-dire dont la teneur en uranium 235 est inférieure au 0,7% d'uranium naturel.

dépôts en couches géologiques profondes du plutonium 239 à longue durée de vie. Les matières fissiles résiduelles présentes dans les déchets vitrifiés et les actinides mineurs se désintègrent beaucoup plus rapidement. La durée de désintégration des substances stockées au même niveau que l'uranium naturel diminue jusqu'à atteindre environ 16'000 ans.

- **Protection contre l'usage détourné:** Les déchets vitrifiés qui doivent être pris en charge ne contiennent plus de substances fissiles susceptibles d'être détournées à des fins militaires, et peuvent donc être stockés plus facilement.

Aujourd'hui, le retraitement est un processus éprouvé sur un plan technique. Il est déjà pratiqué à l'échelle industrielle dans certains pays. De grandes installations de retraitement sont en exploitation en Europe: en France (la Hague, en Normandie), et en Grande-Bretagne (Sellafield, au nord de l'Angleterre), et des plus petites sont utilisées en Russie, en Inde et au Japon.



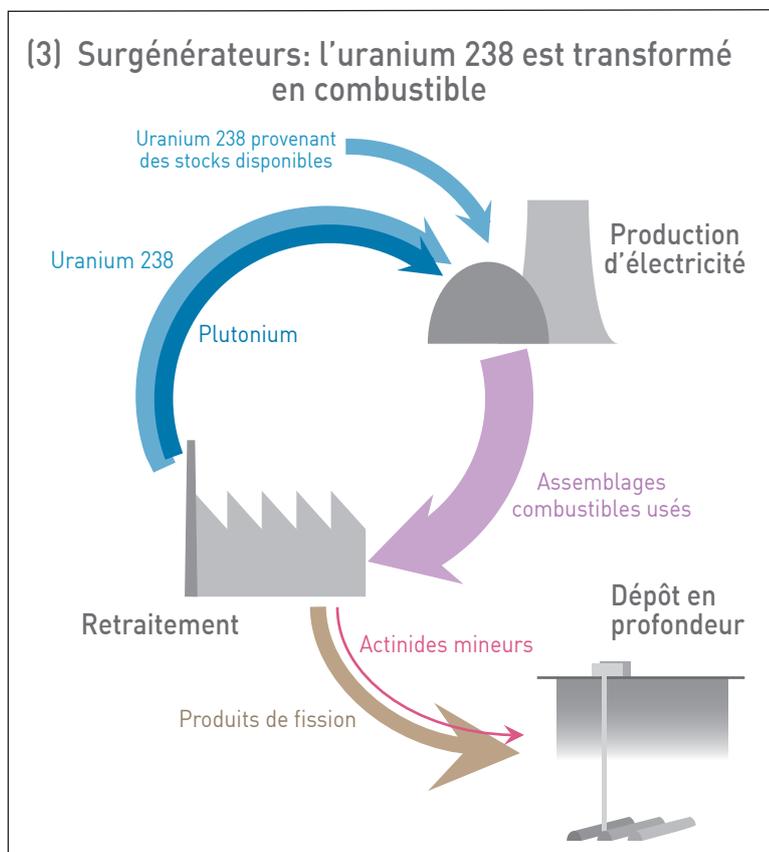
Environnement et prolifération

Parmi les inconvénients du retraitement, on cite souvent les impacts sur l'environnement, les dangers dus au transport ainsi que les risques de détournement incontrôlé de matières se prêtant à un usage militaire (prolifération). Mais la réalité est tout autre:

- **Environnement et transport:** Qu'il s'agisse d'un stockage direct en dépôt en profondeur ou d'un retraitement assorti d'une gestion environnementale moderne, les dégagements de substances radioactives se situent sensiblement en-dessous des valeurs limites, et ne représentent aucun risque pour l'homme et l'environnement. Il en est de même pour le transport du combustible, inévitable dans les deux solutions.
- **Prolifération:** Lors du retraitement, le plutonium séparé apparaît sous sa forme pure. Les usines de retraitement et usines de fabrication du combustible MOX font donc l'objet de contrôles nationaux et internationaux très stricts. En outre, en raison de la composition de son noyau atomique, le plutonium n'est pas du tout adapté à la fabrication d'armes nucléaires. Après avoir été recyclé en combustible MOX, il est même complètement incompatible avec les usages militaires. Le matériau de fission destiné aux armes nucléaires est fabriqué par les puissances atomiques dans des installations conçues spécifiquement à cet effet. Actuellement, il n'a encore jamais été recensé de cas de détournement de plutonium séparé dans une installation de retraitement et utilisé à des fins militaires.

Moratoire en Suisse

Afin de préserver les ressources et de réduire les stocks du plutonium, la Suisse a opté dans un premier temps pour la voie du retraitement. En 2006, le Parlement fédéral a cependant instauré un moratoire de dix ans selon lequel le combustible usé doit être transporté tel quel dans un dépôt intermédiaire, avant d'être stocké sous cette forme dans un futur dépôt en profondeur. Le retraitement reste cependant une option possible étant donné que les assemblages combustibles peuvent être retirés



le plutonium recyclé sont utilisés à la place de l'uranium 235.

Une réserve d'énergie colossale

La réserve d'énergie qui résulte de l'utilisation de surgénérateurs rapides et du retraitement est colossale: si l'ensemble du parc nucléaire mondial était complété de surgénérateurs rapides dans les décennies à venir, la quantité d'électricité produite à partir d'un kilogramme d'uranium naturel serait multipliée au moins par 50. Et l'importance des ressources d'uranium sur Terre augmenterait d'autant.

En cas d'utilisation de surgénérateurs rapides, les réserves d'uranium appauvri stockées jusqu'à aujourd'hui suffiraient théoriquement à elles seules à garantir la production mondiale actuelle de courant issu des centrales nucléaires pendant plus de 4000 ans, sans qu'il soit nécessaire d'exploiter une seule mine d'uranium.

La France, le Japon, la Russie et les Etats-Unis ont déjà exploité à l'échelle industrielle des surgénérateurs rapides depuis des décennies. Cette technologie est actuellement en cours de développement. Plusieurs variantes de surgénérateurs rapides sont par exemple prévues dans les projets de recherche et de développement dans le cadre du «Generation IV International Forum»² (voir la feuille d'information du Forum nucléaire suisse «Les futurs systèmes de réacteurs»). Actuellement, deux surgénérateurs rapides de haute puissance sont en construction en Inde et en Russie.

Le retraitement est la condition indispensable à l'introduction de systèmes de réacteur durables de quatrième génération.

à tout moment dans la mesure où le dépôt n'est pas scellé. Après le scellement, la manipulation reste possible mais est beaucoup plus fastidieuse.

Le combustible MOX, qui permet de préserver les ressources, a été utilisé en Suisse de 1976 à 2013 à la centrale de Beznau, et de 1997 à 2012 à celle de Gösgen.

² Des informations à ce sujet sont disponibles sous www.gen-4.org

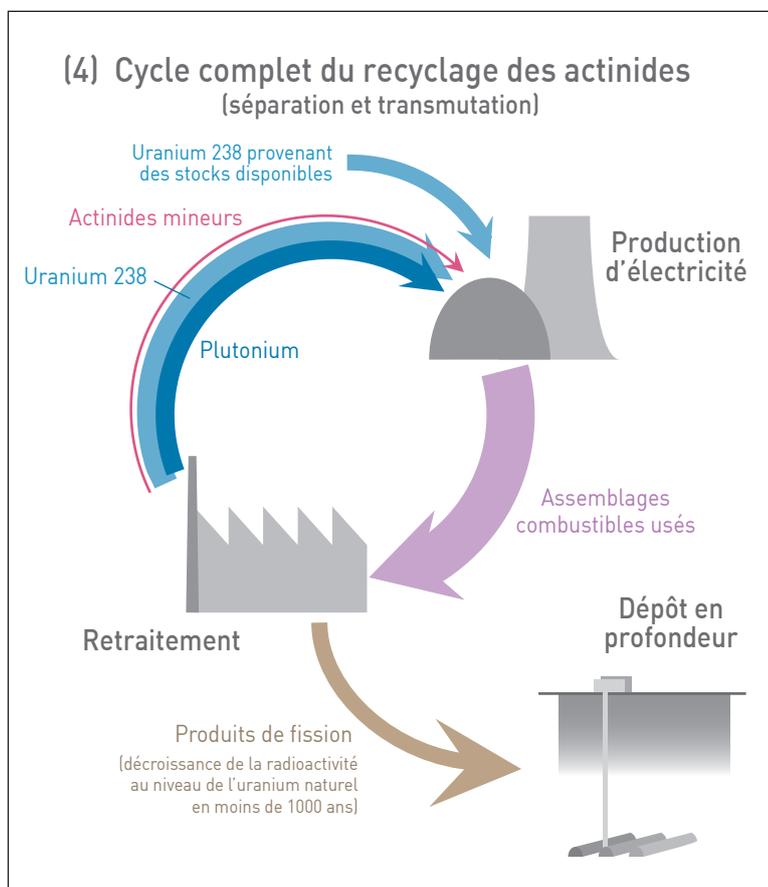
La Suisse est membre de cette organisation.

Recyclage dans les surgénérateurs

Les possibilités d'utilisation à long terme du combustible ne sont cependant pas toutes épuisées. L'uranium 238, difficilement utilisable dans les réacteurs traditionnels, est transformé en matière première énergétique dans des «surgénérateurs rapides». Les neutrons riches en énergie («rapides») présents dans ces réacteurs transforment l'uranium en plutonium 239 facilement fissile. En cas de besoin, il est même possible de générer («surgénérer») plus de noyaux atomiques facilement fissiles à partir de l'uranium 238 que ce que le réacteur en consomme. Dans un cycle du combustible de ce type (voir graphique 3), l'uranium 238 et

Recyclage des actinides mineurs

Dans un cycle du combustible faisant intervenir des surgénérateurs rapides, il est en principe possible de séparer également les actinides mineurs du combustible usé, et de réintroduire les actinides dans les centrales nucléaires. Ils peuvent alors y être transformés par fission en noyaux atomiques à durée de vie beaucoup plus courte tout en libérant de l'énergie (voir graphique 4). Dans le cadre d'une économie nucléaire de ce type faisant intervenir



processus industriel ayant un coût abordable. Une série de problèmes scientifiques et techniques doivent dans un premier temps être résolus dans le cadre d'une collaboration internationale. Les milieux scientifiques souhaitent aboutir à un processus permettant de récupérer le plutonium et les actinides mineurs ensemble, sous forme de mélange. Cela permettrait de se protéger encore davantage contre le détournement de matières servant à fabriquer des bombes.

Projet de l'UE en Belgique

La P&T est également possible par le biais de l'introduction de systèmes pilotés par accélérateur (Accelerator Driven Systems, ADS). Des essais réussis ont été effectués notamment à l'Institut Paul-Scherrer de Villigen (canton d'Argovie) dans le Domaine de l'EPF, dans le cadre de l'expérience «Megapie»⁴.

L'UE a l'intention de fabriquer dans les années à venir le premier prototype d'un réacteur de recherche polyvalent piloté par accélérateur, dans le centre de recherche SCK-CEN de Mol, en Belgique. Le projet «Myrrha» (Multi-purpose Hybrid Reactor for High-technology Applications) interviendra notamment dans le développement de processus P&T. Les coûts du projet sont estimés à 960 millions d'euros.

Des avantages limités liés à la gestion des déchets

Au vu du débat actuel concernant la gestion des déchets radioactifs, le fait que la P&T rende possible la transformation de substances hautement radioactives issues des réacteurs et possédant une durée de vie relativement longue en substances de durée de vie plus courte, tout en réduisant la quantité de déchets à prendre en charge, est particulièrement intéressant.

Il faut cependant bien noter que seuls les actinides peuvent faire l'objet d'une telle transmutation. De même, les produits de fission contenus dans les assemblages combustibles usés sont tout aussi peu adaptés à la transmutation que les déchets hautement radioactifs issus du retraitement et déjà vitrifiés. Le processus P&T induit également une augmentation de la quantité de déchets de faible et de

un recyclage multiple des actinides, seuls les produits de fission doivent en principe encore être recyclés. La radiotoxicité³ dans un dépôt en profondeur baisserait alors en dessous de la valeur de l'uranium naturel d'origine en moins de mille ans.

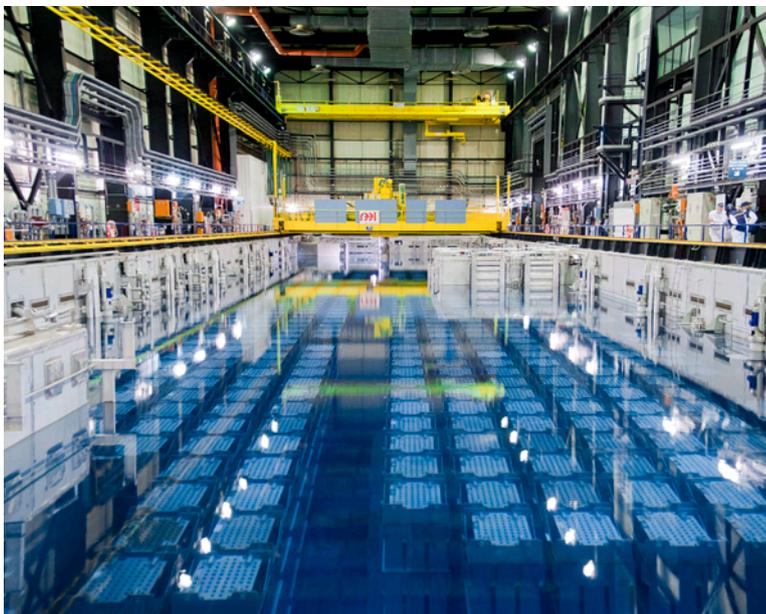
En pratique, les actinides réintroduits dans le réacteur ne sont pas entièrement utilisés pour la fission et des traces restent présentes dans les déchets même après plusieurs opérations de retraitement. Les résidus doivent alors être déposés dans le dépôt en profondeur, avec les produits de fission.

«Partitioning & Transmutation»

Le processus de retraitement et de réutilisation multiple des actinides mineurs est connu sous le nom de «Partitioning & Transmutation» (P&T, séparation puis transmutation). Afin qu'il soit possible, le retraitement doit encore être développé. Des processus correspondants ont par ailleurs déjà été éprouvés en laboratoire. Il n'existe cependant pas encore de

³ La radiotoxicité permet de mesurer le risque potentiel du rayonnement des substances radioactives pour la santé.

⁴ Des informations à ce sujet sont disponibles sous www.psi.ch/media/schluesselexperiment



Le retraitement du combustible, la clé d'une économie nucléaire durable. Ici: assemblages combustibles usés avant retraitement dans l'usine de La Hague, en Normandie.

Photo: Areva

moyenne radioactivité. En résumé: bien que les différents cycles du combustible conduisent à des compositions différentes des déchets, dans tous les cas, il subsiste des composants à longue durée de vie qui doivent être placés en dépôts en couches géologiques profondes conformément à la loi en vigueur.

La roche d'accueil, une protection à long terme

La P&T des actinides mineurs permettrait de réduire le potentiel de risque radiologique des déchets ainsi que leur conditionnement dans des emballages plus hermétiques étant donné qu'ils dégagent moins de chaleur. Concernant la surface, le processus n'aurait cependant aucune incidence majeure sur les objectifs environnementaux à long terme, visés par le législateur.

Le modèle de gestion des déchets choisi par la Suisse prévoit des dépôts en profondeur qui présentent une étanchéité sur une très longue période, et pour lesquels le type et la quantité des matières stockées sont donc secondaires. La P&T ne représente pas une amélioration majeure de la sécurité de stockage, la protection à long terme de l'homme et de l'environnement

étant assurée par une roche d'accueil argileuse qui garde particulièrement bien les actinides.

Aucun obstacle pour la génération III

Le développement et l'introduction de la P&T n'ont de sens que dans le cadre d'un programme nucléaire sur le long terme. Le processus sera particulièrement intéressant lorsque les surgénérateurs à neutrons rapides de quatrième génération, conçus dans une optique de durabilité, seront en exploitation (voir p. 4). Ils constituent de ce fait un domaine de recherche international important.

Il ne faut cependant pas oublier pour autant les réacteurs traditionnels de conception moderne. Ces systèmes de troisième génération, dits de génération avancée, sont actuellement en cours de construction en Europe, aux Etats-Unis, en Russie et en Asie orientale. Ils répondent à des exigences de sécurité élevées et ont été conçus dans le but de renouveler le parc nucléaire suisse actuel⁵.

Le besoin en uranium des réacteurs à eau légère de génération III est bien adapté à l'approvisionnement en combustible des futurs surgénérateurs. Ces derniers ne nécessitent pas d'uranium 235 mais de l'uranium 238 ou du plutonium, comme ceux contenus dans les assemblages combustibles usés des réacteurs traditionnels.

Dans un cycle du combustible faisant intervenir des surgénérateurs, il serait donc possible d'utiliser petit à petit pour la production d'électricité l'ensemble de l'uranium 238 et du plutonium contenus dans les «déchets» nucléaires d'un réacteur à eau légère. Dans le cadre d'une durée d'exploitation de 50 à 60 ans, une centrale nucléaire actuelle produirait assez de matière première énergétique pour pouvoir faire fonctionner un surgénérateur d'une puissance similaire pendant environ 1000 ans.

Conclusion: Les assemblages combustibles usés stockés dans les dépôts intermédiaires actuels représentent une réserve d'énergie colossale pour la génération future. Il faut encore ajouter les réserves d'uranium issues de l'enrichissement. Sur un plan technologique, la technique nucléaire commence tout juste à exploiter son vaste potentiel.

⁵ Les centrales nucléaires actuellement en exploitation en Suisse appartiennent aux installations de deuxième génération et ont été modernisées au cours des dernières décennies afin de répondre elles aussi à des exigences de sécurité élevées.