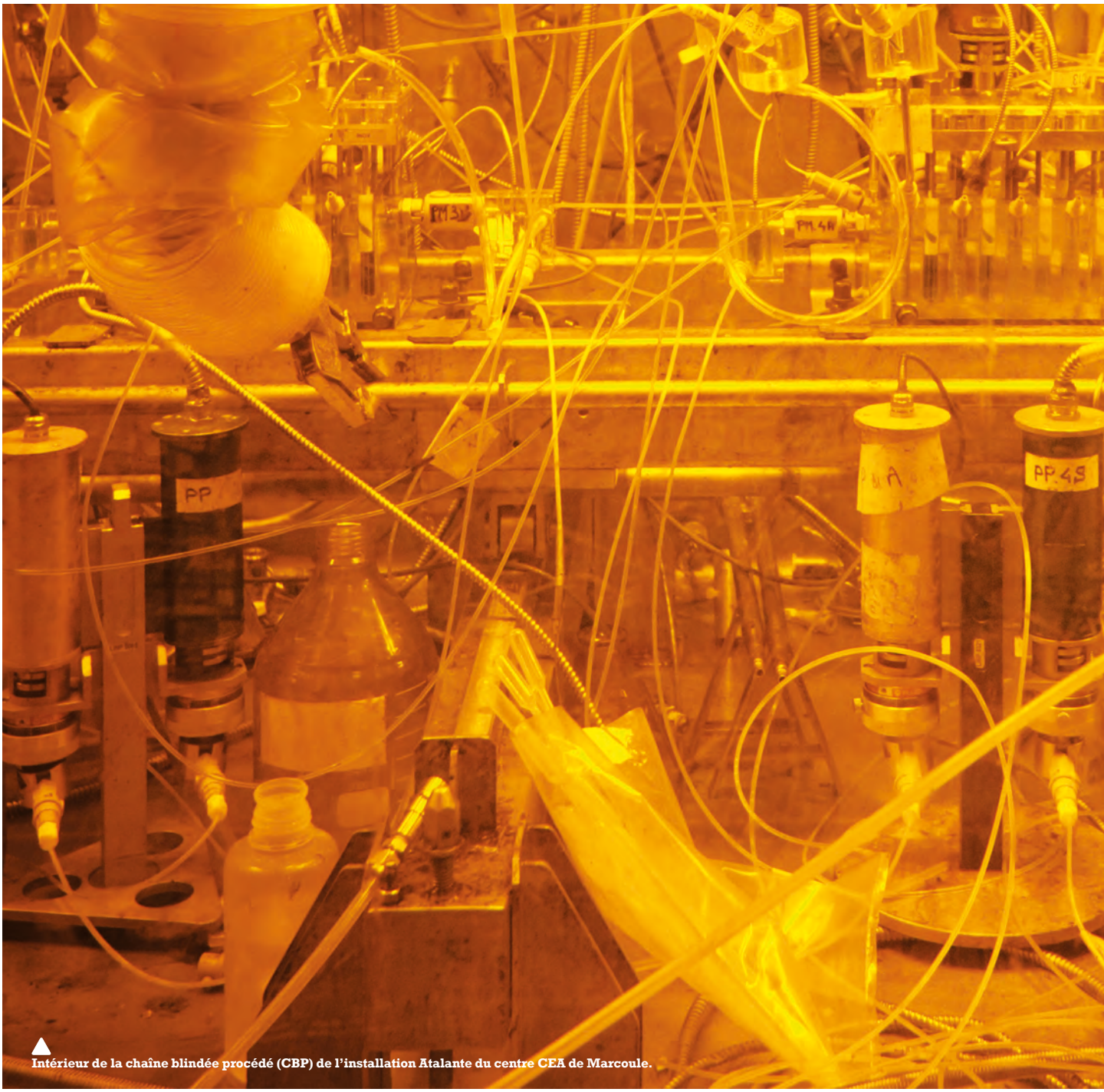
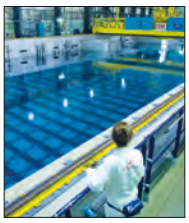
LE COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE FAIT DES TOURS



Intérieur de la chaîne blindée procédé (CBP) de l'installation Atalante du centre CEA de Marcoule.

Plus d'informations sur www.cea.fr

©S.Le Coustet/CEA



La France a fait le choix d'une politique de traitement-recyclage des combustibles usés. Cette option, déjà déployée industriellement depuis les années 1990, trouvera sa pleine mesure avec la quatrième génération. La direction de l'Énergie nucléaire du CEA (CEA-DEN), qui a mis au point les procédés actuellement mis en œuvre, poursuit aujourd'hui des recherches pour améliorer, compléter et adapter les technologies aux enjeux de demain.

Dossier réalisé par Patrick Philipon

LE CHOIX D'UN CYCLE FERMÉ

Infographie

LES PROCÉDÉS DU CYCLE FERMÉ

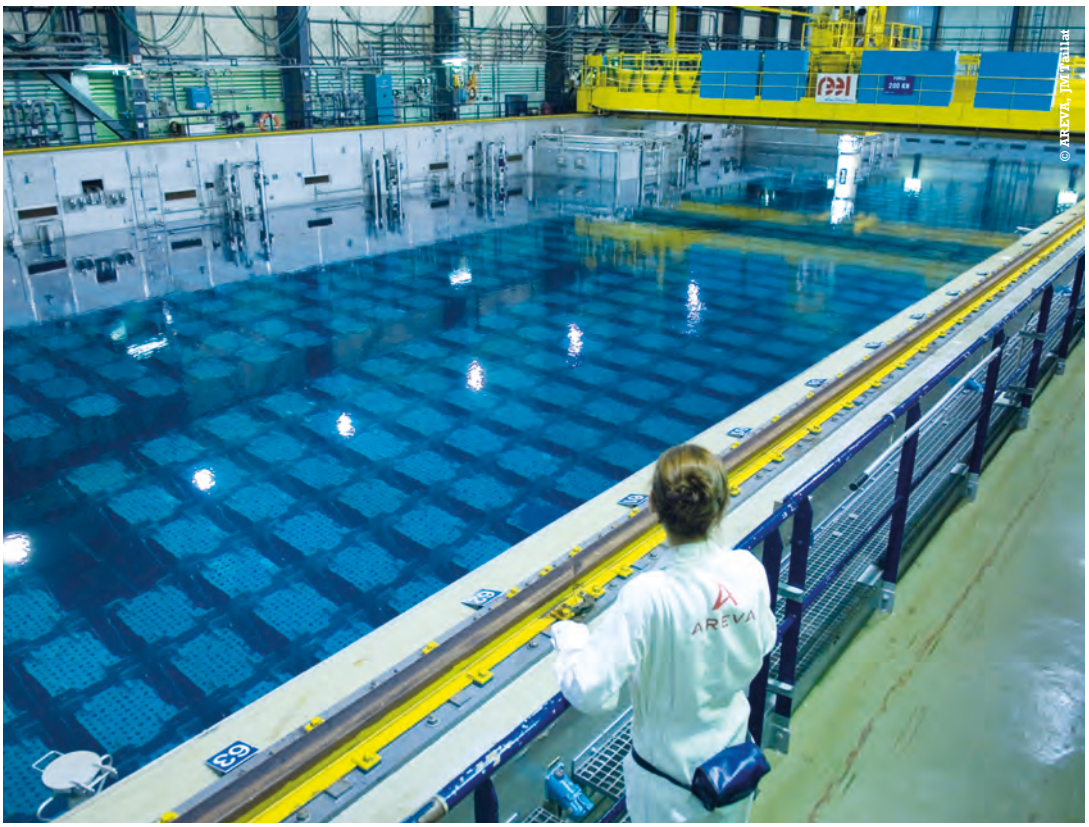
L'AMONT DU CYCLE : DU MINERAI BRUT À L'URANIUM ENRICHI

L'AVAL DU CYCLE : LA DEUXIÈME VIE DU COMBUSTIBLE

ET DEMAIN : MULTIRECYCLER EN GÉNÉRANT TOUJOURS MOINS DE DÉCHETS

LE CHOIX D'UN CYCLE FERMÉ

La France a fait le choix du « cycle fermé » qui permet de recycler les matières valorisables des combustibles usés (uranium et plutonium) et d'optimiser la gestion des déchets ultimes.



© AREVA, JM Vallat

Piscine d'entreposage du combustible usé à La Hague.

« *C'est dans une vision durable de l'énergie nucléaire que s'est bâtie la stratégie de la France, ce qui l'a conduit à opter pour le recyclage* » affirme Bernard Boullis, directeur du programme « aval du cycle nucléaire » de la direction de l'Énergie nucléaire du CEA (CEA-DEN). Il convient dès lors de chercher à apporter les meilleures réponses aux problématiques relatives à la disponibilité des ressources naturelles en uranium et à la gestion des déchets ultimes. Pour bien appréhender ces enjeux, il faut se remémorer ce qui entre et sort des réacteurs nucléaires actuels, les **REP**•. Le combustible neuf « normal » comprend environ 4 % d'uranium 235 (^{235}U) fissile[1], le reste étant de l'uranium 238 (^{238}U). En sortie de réacteur, il reste encore l'essentiel de l'^{238}U, une partie de l'^{235}U initial ainsi que des **produits de fission**• hautement radioactifs et à la durée de vie de l'ordre du siècle. À cela s'ajoutent 1 % de plutonium et 0,1 % d'**actinides mineurs**•. Or, ces éléments radioactifs seront encore présents dans des dizaines de millénaires. Que faire alors des matières réutilisables (uranium et plutonium) et des éléments inutiles et toxiques ?

Le choix du cycle fermé

Les pays ayant décidé d'abandonner le nucléaire à brève échéance ont logiquement opté pour un « cycle ouvert ». En clair : le combustible usé est considéré dans son intégralité comme un déchet et stocké définitivement en couche géologique profonde. C'est par exemple ce qu'a envisagé la Suède après sa décision de ne pas construire de nouveaux réacteurs. À l'opposé, le « cycle fermé » (recyclage des combustibles nucléaires) prend tout son sens

• **REP :** réacteur à eau sous pression, représentant en France la majorité des réacteurs de la filière actuelle.

• **Produits de fission :** nucléides générés par la fission d'^{235}U ou par la désintégration des fragments de la fission nucléaire.

• **Actinides mineurs :** noyaux lourds (neptunium, américium, curium) formés dans un réacteur par captures successives de neutrons par des noyaux du combustible.

pour les pays, comme la France ou le Japon et demain la Chine et l'Inde, souhaitant exploiter durablement l'énergie nucléaire. L'uranium et le plutonium sont alors extraits du combustible usé pour être recyclés dans de nouveaux assemblages de combustible. Seuls les produits de fission et les actinides mineurs, considérés comme des déchets ultimes, sont **vitrifiés**• et stockés[2]. Résultat : un volume de déchets bien moindre, à l'impact radioactif divisé par dix car le plutonium en a été retiré. La France étant pionnière dans cette voie, c'est le CEA-DEN qui a développé les technologies de retraitement, aujourd'hui utilisées dans l'usine de La Hague. La Chine s'engage dans la même voie et s'intéresse aujourd'hui à la technologie française.

Le MOX : première étape du recyclage

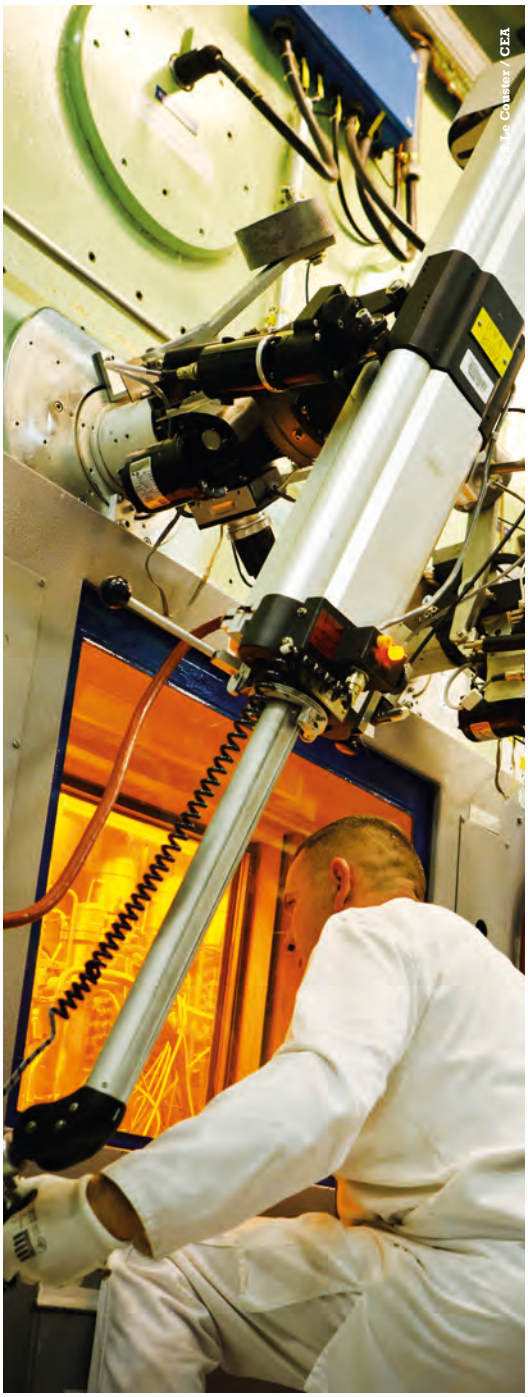
Tel qu'il est actuellement pratiqué, le cycle fermé consiste à mélanger le plutonium récupéré avec de l'uranium appauvri[3] pour fabriquer du **MOX**•, lequel va de nouveau alimenter des réacteurs. Malheureusement, cela ne « marche » bien que pour un tour : une fois usé, le MOX contient en effet des isotopes[4] de plutonium difficilement utilisables dans la filière actuelle des REP. De plus, le problème de l'épuisement à long terme des ressources reste entier car le rendement du MOX est comparable à celui du combustible classique : seulement 1 % de l'énergie potentielle contenue dans l'uranium naturel a été « consommé ». Or, si le recours à l'énergie nucléaire doit se développer durablement, les ressources naturelles « facilement » exploitables risquent de ne pas pouvoir répondre aux besoins à l'horizon de quelques décennies. La solution consiste à trouver un moyen d'utiliser l'^{238}U (99,3 % de l'uranium naturel). Le recyclage sous forme de MOX dans les réacteurs à eau doit ainsi être considéré comme une étape visant, à la fois, à tirer le meilleur parti des ressources dans les réacteurs actuels, et à conditionner au mieux les déchets ultimes, tout en préparant l'avenir. *« Un "tour" dans la filière MOX dure une quinzaine d'années, la suite appartient aux réacteurs à neutrons rapides (RNR) de IVe génération »* souligne Bernard Boullis.

RNR : en route vers le nucléaire du futur

Ces réacteurs valorisent tous les isotopes de plutonium ce qui permet un recyclage récurrent du combustible. Le plutonium consommé peut également être directement régénéré dans ces réacteurs, suite à la capture de neutrons rapides par l'^{238}U. Le taux de production est d'ailleurs réglable : soit, les réacteurs en produisent plus qu'ils n'en consomment (mode « surgénérateur ») ; soit, ils le « brûlent » (mode « sous-générateur ») ; soit, ils en produisent autant qu'ils en consomment (« mode isogénérateur »). C'est cette dernière option que développe le CEA-DEN. Dans ce cas de figure, après amorçage du réacteur grâce au stock de plutonium issu du retraitement du MOX, le parc de RNR produirait lui-même son combustible fissile jusqu'à épuisement de l'^{238}U initial. Un RNR extrait en effet de 100 à 150 fois plus d'énergie de l'uranium naturel que les réacteurs actuels. Les réserves connues d'uranium deviendraient alors la plus grande ressource énergétique naturelle, très loin devant les hydrocarbures fossiles. *« À très long terme, la France pourrait même se passer totalement des mines car le stock d'uranium appauvri déjà entreposé sur le territoire suffirait pour plusieurs millénaires de production électrique »* assure Christophe Poinssot, chef du département Radiochimie & Procédés du CEA-DEN à Marcoule.

Autre avantage : les RNR créent quatre fois moins d'actinides mineurs que les réacteurs à neutrons thermiques, tout en produisant la même quantité d'électricité. Surtout, ils seraient capables de « brûler » ces éléments pour obtenir des produits de fission à la durée de vie beaucoup moins longue (*voir p 25*). Cette opération, dite de **transmutation**•, fait l'objet de recherches poussées depuis une vingtaine d'années, tant en France, par le CEA, qu'au Japon et aux États-Unis. Les déchets ultimes sans actinides mineurs – constitués essentiellement de produits de fission – retrouveraient en trois siècles une radioactivité comparable à celle du minerai d'uranium, au lieu de plusieurs dizaines de millénaires : *« cela nous ramène à une échelle compatible avec l'histoire et la mémoire humaine »* estime Christophe Poinssot.

En attendant, le CEA-DEN, qui a développé toutes les technologies actuelles de retraitement avant de les transférer à la Cogema, devenue Areva, continue avec cette dernière d'améliorer les procédés mis en œuvre à La Hague. Plus en amont, les équipes de Saclay, Marcoule et Cadarache mettent au point le cycle du combustible du futur. ●



Installation Atalante à Marcoule, dédiée aux études sur le cycle du combustible.

• **Vitrification :** incorporation des déchets radioactifs dans une matrice de verre pour stabiliser leur conditionnement.

• **MOX** (*Mixed OXydes*) **:** combustible nucléaire composé d'un mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium.

• **Transmutation :** transformation d'un atome en un autre atome par réaction nucléaire. En l'occurrence, il s'agirait de fissionner les actinides mineurs pour obtenir des éléments toujours radioactifs mais à durée de vie moins longue.

Notes :

1. *Le noyau d'un atome fissile peut se scinder en libérant une grande quantité d'énergie sous un flux de neutrons. L'^{235}U est le seul élément fissile naturel.* A contrario, *l'^{238}U, de loin le plus abondant, n'est pas fissile mais fertile : il peut donner des éléments fissiles après capture de neutrons.*

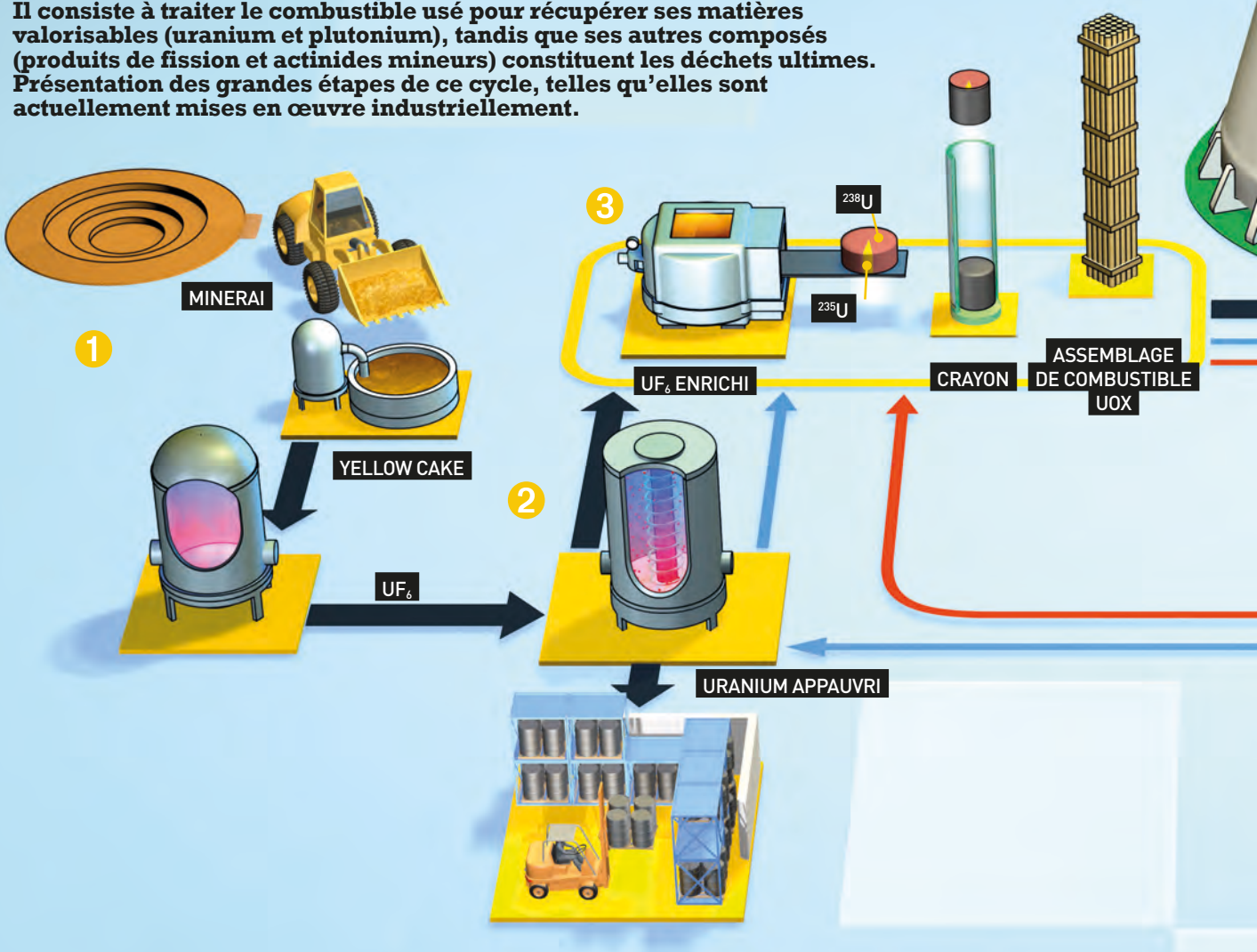
2. *Beaucoup de pays, n'ayant pas encore déterminé leur politique, entreposent le combustible usé de manière réversible. C'est le cas des USA, par exemple.*

3. *Uranium résiduel après opérations d'enrichissement, pratiquement exempt d'^{235}U, lequel a été extrait pour fabriquer du combustible nucléaire (« enrichi » en ^{235}U).*

4. *Les noyaux des différents isotopes d'un élément comportent tous le même nombre de protons (caractéristique de l'élément) mais pas le même nombre de neutrons : ^{235}U et ^{238}U sont des isotopes de l'uranium, par exemple.*

LES PROCÉDÉS DU CYCLE FERMÉ

La France a fait le choix d'un cycle du combustible nucléaire dit « fermé ». Il consiste à traiter le combustible usé pour récupérer ses matières valorisables (uranium et plutonium), tandis que ses autres composés (produits de fission et actinides mineurs) constituent les déchets ultimes. Présentation des grandes étapes de ce cycle, telles qu'elles sont actuellement mises en œuvre industriellement.



AMONT DU CYCLE

1 Extraction et conversion

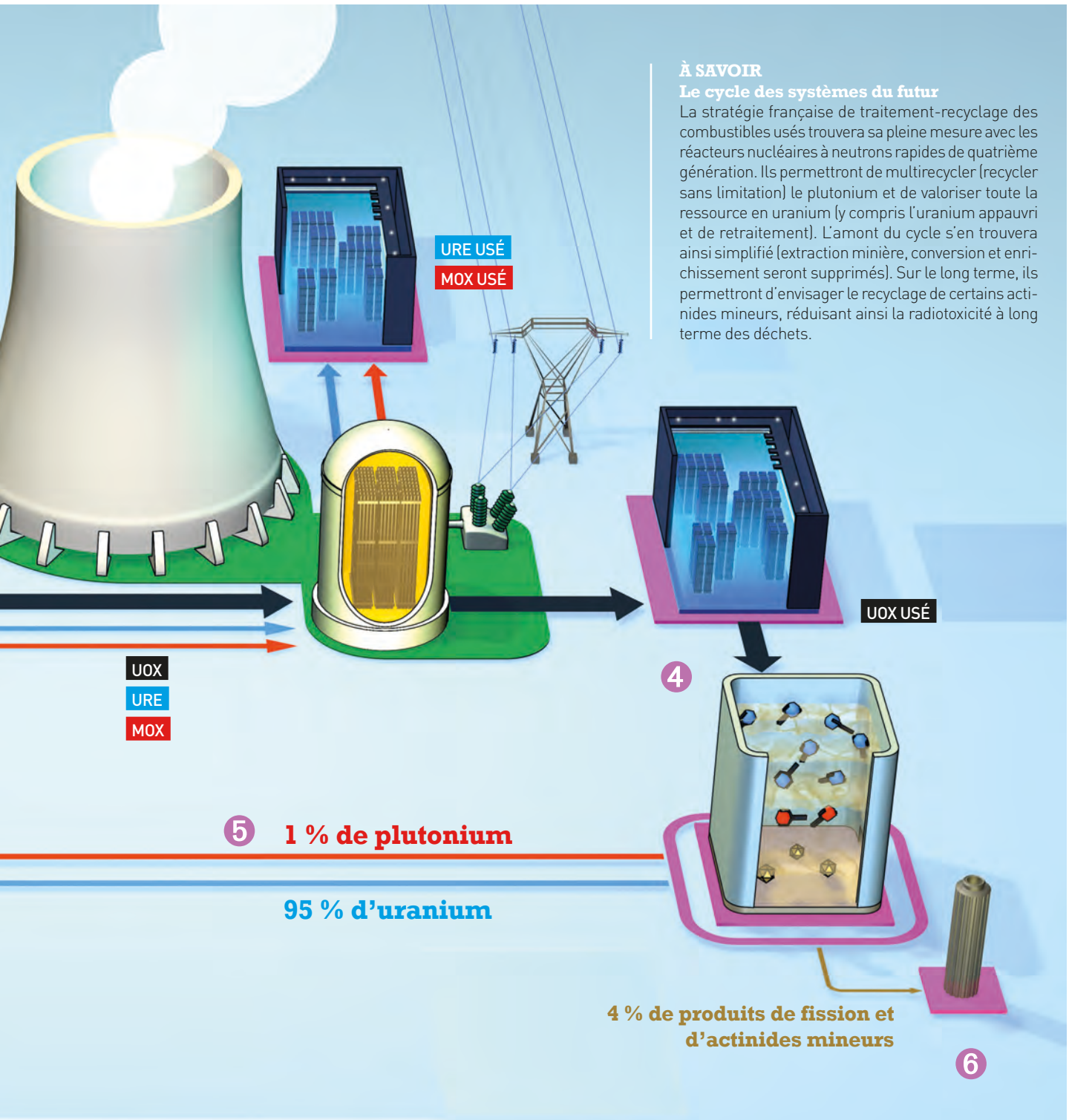
L'extraction du minerai uranifère, dans des gisements souterrains ou à ciel ouvert, fournit les ressources nécessaires à la fabrication du combustible. Contenant de 1 à 200 kg d'uranium par tonne, le minerai est dissous par voie alcaline ou acide puis traité pour obtenir une poudre jaune, le *yellow cake* (99,27 % d'^{238}U et 0,7 % d'^{235}U) qui est ensuite converti en un gaz : l'hexafluorure d'uranium (UF_6).

2 Enrichissement

Seul l'isotope 235 de l'uranium est fissile (générant de l'énergie lorsque son noyau est cassé par un neutron) ; or il est présent en très faible proportion dans l'uranium naturel (0,7 %). Grâce à l'enrichissement, par un procédé de centrifugation gazeuse, sa proportion augmente entre 3 et 5 %.

3 Fabrication du combustible

L'UF_6 gazeux est converti en poudre d'oxyde d'uranium (Uox). Celle-ci est comprimée en pastilles de 7 grammes qui sont empilées dans des tubes en alliage de zirconium, les « crayons ». Ces derniers sont ensuite réunis en faisceaux dans des assemblages combustibles qui sont chargés dans le réacteur. Par exemple, un réacteur à eau pressurisée (REP) de 900 MWe compte 157 assemblages de 264 crayons.



À SAVOIR

Le cycle des systèmes du futur

La stratégie française de traitement-recyclage des combustibles usés trouvera sa pleine mesure avec les réacteurs nucléaires à neutrons rapides de quatrième génération. Ils permettront de multirecycler (recycler sans limitation) le plutonium et de valoriser toute la ressource en uranium (y compris l'uranium appauvri et de retraitement). L'amont du cycle s'en trouvera ainsi simplifié (extraction minière, conversion et enrichissement seront supprimés). Sur le long terme, ils permettront d'envisager le recyclage de certains actinides mineurs, réduisant ainsi la radiotoxicité à long terme des déchets.

AVAL DU CYCLE

4 Séparation des éléments

Après environ quatre ans en réacteur pour produire de l'électricité, le combustible usé se compose de 96 % de matières valorisables (95 % uranium, 1 % plutonium) et de 4 % de déchets ultimes (produits de fission et environ 0,1 % d'actinides mineurs). Il est dissous dans une solution d'acide nitrique, qui est ensuite mélangée à une solution contenant des molécules extractantes spécifiques pour séparer les matières réutilisables des déchets.

5 Recyclage des matières

Le plutonium (1 %) et l'uranium (95 % dont un peu moins d'1 % d'^{235}U) sont recyclés, respectivement en combustibles MOX (Oxyde mixte uranium-plutonium) utilisés par 20 des 58 réacteurs du parc actuel, et en URE (uranium de retraitement enrichi). Mais après avoir été réintroduits une fois en réacteur, les combustibles MOX et URE usés ne peuvent plus être recyclés. Ils sont alors entreposés dans l'attente d'un usage différé dans des réacteurs à neutrons rapides de quatrième génération.

6 Conditionnement des déchets ultimes

Les déchets ultimes sont piégés dans une matrice de verre : c'est le procédé de vitrification, développé au CEA et mis en œuvre dans les usines d'AREVA La Hague. Ces déchets vitrifiés sont ensuite coulés dans des conteneurs en inox et entreposés en puits, en attendant d'être stockés en couche géologique profonde.

Infographie : Fabrice Mathé - Texte : Aude Ganier

L'AMONT DU CYCLE : DU MINERAI BRUT À L'URANIUM ENRICHI

De la mine jusqu'au réacteur, toute une chaîne industrielle assure la transformation de l'uranium contenu dans le minerai pour obtenir l'oxyde d'uranium (UOX) qui constitue les pastilles de combustibles. Extraction sélective, purification, enrichissement… autant d'enjeux scientifiques et techniques pour les équipes du CEA-DEN.

Pour fonctionner, les réacteurs nucléaires exigent de l'uranium très pur, ce qui représente un grand enjeu de chimie car l'uranium doit être épuré de tous les autres éléments présents dans le minerai. Or, comme le rappelle Marc Delpech, chef du programme « amont du cycle » au CEA-DEN : *« L'uranium représente au mieux quelques pourcents en masse de ce minerai. De plus, l'uranium naturel ne contient que 0,7 % d'^{235}U fissile (le reste étant de l'^{238}U), alors que le combustible des REP doit comprendre environ 4 % d'^{235}U »*. Ainsi, dès les années 1950-1960, le CEA-DEN a conçu et mis en place toute la chaîne industrielle allant du minerai brut[1] jusqu'à l'uranium enrichi.

Après une période de relative abondance de la ressource sur le marché, le rebond de l'industrie nucléaire en 2005 a changé la donne, tout comme la réduction des ressources secondaires. Aujourd'hui, près de 55 000 tonnes d'uranium sont extraites annuellement pour une consommation de 65 000 tonnes[2]. *« À terme, avec l'épuisement des mines existantes, il faudra apprendre à exploiter des gisements plus pauvres et à un coût raisonnable dans les meilleures conditions environnementales »* prévient Marc Delpech. La R&D sur tout l'amont du cycle du combustible s'est adaptée…

Extraire l'uranium et le purifier

Tout commence à la mine où l'uranium est extrait. Le minerai est concassé, broyé puis imprégné d'une solution acide oxydante pour dissoudre l'uranium à hauteur de quelques grammes par litre. L'uranium est ensuite sélectivement extrait de la solution par une molécule spécifique, utilisée depuis les années 1970. Viennent ensuite plusieurs étapes de purification avant d'obtenir un concentré minier d'uranium appelé *yellow cake*. *« Nous voulons supprimer les dernières étapes, consommatrices en eau et en réactifs, en développant une nouvelle molécule extractante afin d'atteindre, dès la première opération, une solution suffisamment purifiée »* explique Marc Delpech. À plus long terme, les chimistes souhaitent davantage diminuer la consommation d'eau en repensant la phase d'extraction elle-même.

Un autre mode d'exploitation est également utilisé : l'*in situ leaching*[3]. Lorsque la géologie s'y prête, on peut en effet se passer d'excavation : on récupère l'uranium en injectant directement une solution acide oxydante dans le gisement puis en pompant la solution. Là aussi, les chercheurs essaient de supprimer des étapes de purification en améliorant la méthode d'extraction[4].

Du *yellow cake* à l'uranium enrichi

À l'usine Comurhex de Malvési, le *yellow cake* subit une purification complémentaire avant d'être converti en tetrafluorure d'uranium, lequel est ensuite transformé, à l'usine Comurhex de Pierrelatte, en hexafluorure d'uranium par réaction avec du fluor. Ce dernier étant un produit très coûteux, les experts du CEA-DEN travaillent à son recyclage. Arrive l'enrichissement, lors duquel du ^{235}U est diffusé dans une fraction du flux gazeux, ce qui crée une autre fraction appauvrie (0,2 à 0,3 % d'^{235}U). La première usine d'enrichissement, Georges-Besse, utilisait la diffusion gazeuse, seule technologie mature à l'époque de son démarrage (1978). Aujourd'hui, Georges-Besse II utilise la technologie d'ultracentrifugation gazeuse qui consomme 40 à 50 fois moins d'énergie. Une fois enrichi, l'hexafluorure est de nouveau converti en oxyde d'uranium solide utilisé pour la fabrication des combustibles. Les chimistes essaient aujourd'hui de récupérer le précieux fluor lors de cette opération afin de le réutiliser au cours de l'étape précédant l'enrichissement. Tout en gardant un œil sur l'émergence de nouveaux procédés qui pourraient supplanter l'ultracentrifugation… ●

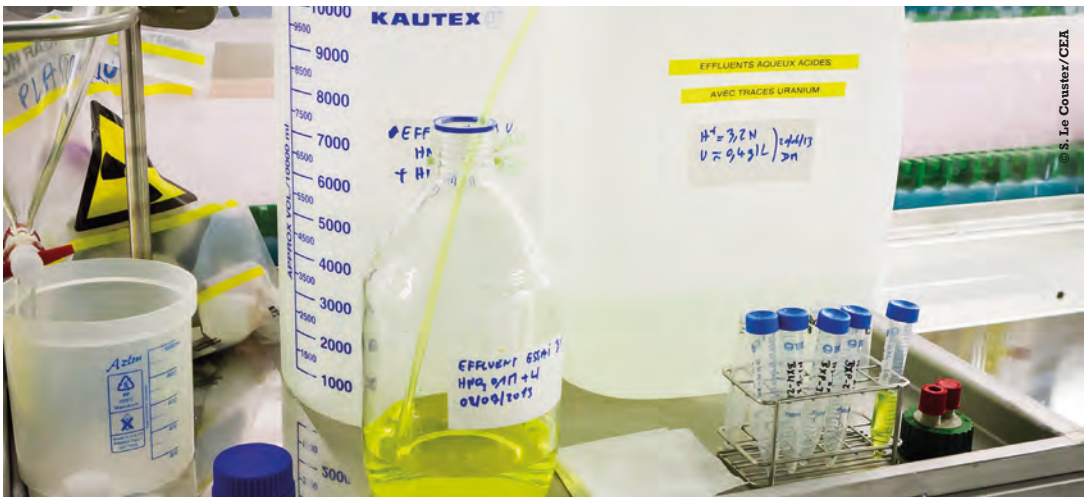
Notes :

1. *Le CEA était chargé de la prospection minière, avant de transférer cet aspect à la Cogema en 1976.*

2. *Données de 2012.*

3. *Méthode de plus en plus utilisée, en particulier au Kazakhstan, également appelée* in situ recovering.

4. *L'extraction se fait par passage de la solution sortant du puits sur une résine échangeuse d'ions.*



Préparation d'expériences d'extraction sélective de l'uranium sur le centre CEA de Marcoule.

Vue d'ensemble du prototype évolutif de vitrification équipé du creuset froid nucléarisé à Marcoule.

L'AVAL DU CYCLE : LA DEUXIÈME VIE DU COMBUSTIBLE

Si les différentes étapes de l'aval du cycle sont aujourd'hui bien maîtrisées pour valoriser les matières réutilisables du combustible usé et conditionner les déchets ultimes, les chercheurs du CEA-DEN poursuivent des recherches en soutien aux industriels pour optimiser l'ensemble de ces procédés.

Depuis 1987, EDF alimente une vingtaine de ses réacteurs avec du MOX, à raison d'un tiers de MOX et deux tiers d'**UOX**• dans les assemblages de combustible. Le plutonium fournit ainsi en France environ 10 % de l'électricité nucléaire. *« Ayant fait le choix du* cycle fermé, *la France ne stocke plus de plutonium dans les déchets ultimes : tout est réutilisé en MOX »* précise Christophe Poinssot, chef de Département au CEA-DEN. Ainsi, chaque année, le parc nucléaire ne génère plus que 50 tonnes de déchets ultimes, contre 1 200 tonnes avec un cycle ouvert, et 200 tonnes de combustible usé, entreposé avant une utilisation ultérieure. En France, les étapes de l'aval du cycle du combustible nucléaire – extraction de l'uranium et du plutonium du combustible UOX usé, fabrication du MOX avec le plutonium récupéré, vitrification des déchets ultimes – sont pleinement opérationnelles dans les usines de La Hague et MELOX, à partir de technologies créées pour la plupart par le CEA-DEN[1]. Les procédés sont si efficaces que plus de 99,9 % du plutonium est aujourd'hui récupéré. Quant aux contaminants, il n'en reste qu'un millionième voire un milliardième de la charge de départ. Est-ce à dire que tout est définitivement au point ?

Optimiser les procédés de vitrification des déchets

« Les performances sont déjà remarquables mais le CEA-DEN poursuit sa R&D en lien étroit avec Areva. Il s'agit d'adapter les procédés à l'évolution des combustibles. Nous voulons aussi les optimiser afin d'obtenir les mêmes résultats à moindre coût et en cherchant encore à optimiser la gestion des déchets ultimes », répond Bernard Boullis, directeur de Programme au CEA-DEN. L'essentiel de ce travail se déroule à Marcoule. Par exemple, l'extraction et la purification du plutonium et de l'uranium, aussi performantes soient-elles, se déroulent aujourd'hui en trois étapes et autant d'ateliers. *« Nous travaillons sur une nouvelle approche qui permettrait de tout réaliser en une étape, dans un seul atelier, avec des quantités plus faibles de produits chimiques afin de réduire les rejets de l'usine »* explique Christophe Poinssot.

Une fois le plutonium et l'uranium récupérés, les déchets ultimes – produits de fission et actinides mineurs – sont calcinés, vitrifiés et coulés dans des « colis » destinés au stockage géologique profond (*voir encadré page suivante*). Si les colis eux-mêmes sont parfaitement définis, ▶▶

• **UOX** (Uranium OXydes) : combustible nucléaire, habituellement utilisé dans les réacteurs, à base d'oxyde d'uranium.

Coulée d'un verre de conditionnement des déchets radioactifs à Marcoule.

il reste des pistes d'optimisation des procédés. Ainsi, l'élaboration du verre fondu contenant les déchets s'effectue classiquement à plus de 1 000 °C dans des pots de fusion métalliques qui s'endommagent sous l'effet de la corrosion et de la chaleur. Il faut donc régulièrement les remplacer, ce qui constitue autant de déchets technologiques à gérer. Les équipes du CEA-DEN de Marcoule ont mis au point une nouvelle technique, implantée en 2010 sur une des six lignes de vitrification de l'usine de La Hague : le « creuset froid ». Dans ce procédé, la paroi métallique du « pot » est refroidie par circulation d'eau froide. Le creuset est alors rempli d'une charge de verre qui est fondue par induction avant l'introduction des déchets. Une fine couche de verre solide se forme au contact de la paroi froide, séparant la paroi du four du verre fondu et des déchets radioactifs. Ainsi protégé de la chaleur et des radiations, le creuset dure beaucoup plus longtemps et permet l'élaboration de matériaux plus corrosifs.

Vers un nouveau procédé pour traiter les déchets issus de la production du MOX

Autre projet de développement mené par le CEA[2], en lien avec l'Andra[3] et Areva : le traitement et le conditionnement des déchets technologiques solides, mélange de métaux et de matières organiques (vinyles, polyéthylène, gants en polymères) issus du fonctionnement de l'usine MELOX qui produit le MOX. Beaucoup moins radioactifs que les déchets du combustible, ils doivent cependant être stockés dans des colis idoines. C'est là qu'interviendrait un procédé innovant, appelé PIVIC, qui vise à les traiter et les conditionner en une seule étape. Son principe : les déchets sont introduits dans un four et sont incinérés par une torche à plasma sur un bain de verre fondu. Les cendres résultantes sont incorporées au verre et le métal fondu se retrouve au fond du creuset qui constitue le conteneur primaire du déchet. *« Ce procédé, aujourd'hui à l'étude, rassemble toutes nos compétences : incinération par torche à plasma, vitrification, fusion par induction, traitement des gaz, etc. »* souligne Luc Paradis, chef du Département Études du traitement et du conditionnement des déchets du CEA-DEN. Le développement de PIVIC, qui devrait entrer en service à la Hague vers 2020, mobilise aujourd'hui une quinzaine de personnes à Marcoule.

De manière générale, les équipes du CEA-DEN apportent en permanence leur soutien à Areva pour faire évoluer l'usine de La Hague. Ces experts interviennent régulièrement sur place utilisant notamment les codes de simulation numérique de l'usine, développés à la DEN, afin d'étudier des questions comme l'arrêt-redémarrage ou le vieillissement, par exemple. *« Cette usine est encore là pour longtemps mais nous travaillons déjà sur des procédés innovants destinés aux usines futures »* indique d'ailleurs Christophe Poinssot. ●

Notes :

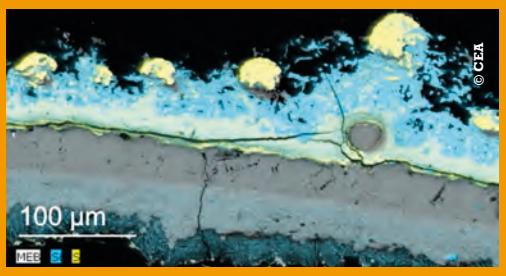
1. *Aujourd'hui, seul Areva produit du MOX dans le monde.*

2. *Dans le cadre du programme Investissements d'Avenir.*

3. *Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs.*

LA TOUTE FIN DE CYCLE : LA QUESTION DU STOCKAGE

En 2006, l'Andra est chargée de concevoir et d'implanter un Centre industriel de stockage géologique (Cigéo). Les déchets y arriveront sous forme de « colis ». Le CEA, qui a largement contribué à leur conception, mène, en lien avec les industriels qui les produisent, des études pour fournir à l'Andra toutes les données sur leur comportement à long terme, en particulier leur évolution en conditions de stockage au cours des millénaires à venir. Il réalise notamment des expériences en accéléré sur des verres inactifs ou radioactifs (à Marcoule dans l'installation Atalante) pour identifier les mécanismes physico-chimiques d'altération. Ces expériences n'étant pas suffisantes pour extrapoler le comportement à long terme du verre en situation de stockage géologique, d'autres études sont conduites sur des analogues naturels (roches volcaniques) ou archéologiques (verres antiques trouvés en Méditerranée). Les résultats obtenus permettent d'établir et de qualifier des modèles mathématiques de l'évolution des colis. *« Ils montrent que leur durée de vie dans les conditions d'un stockage souterrain, telles qu'on les envisage aujourd'hui pour le projet Cigéo, dépasserait plusieurs centaines de milliers d'années »*, conclut Luc Paradis.



Exemple de corrosion observée dans une étude, réalisée par le CEA pour l'Andra, sur le comportement des matériaux de stockage.

ET DEMAIN : MULTIRECYCLER EN GÉNÉRANT TOUJOURS MOINS DE DÉCHETS

Multirecycler le plutonium, valoriser encore mieux la ressource en uranium et, sur le plus long terme, explorer la possibilité de transmuter les déchets les plus radioactifs, tels sont les principaux enjeux des systèmes nucléaires du futur.

Les essais de séparation poussée sont menés dans l'installation Atalante à Marcoule.

« Le cycle du futur, c'est d'abord le multirecyclage du plutonium dans un parc comportant des RNR[1]*. La transmutation des actinides mineurs viendra ensuite… »* prévoit Bernard Boullis. Si la France décide de lancer cette filière, il faudra adapter le retraitement des combustibles usés. Dans un premier temps, il s'agira d'extraire le plutonium du MOX usé, actuellement entreposé, et de le mélanger (à hauteur d'environ 15 %) à de l'^{238}U appauvri pour alimenter un « premier » tour dans les RNR. *« Le traitement de combustibles MOX ne pose pas de réelles difficultés : Areva a déjà traité 70 tonnes de MOX usé dans ses usines de La Hague. Le principal enjeu provient de la proportion plus importante de plutonium »* souligne Christophe Poinssot, chef de Département au CEA-DEN. Cela requiert d'adapter l'usine à ce flux de plutonium, mais les bases du procédé restent essentiellement les mêmes.

Un recyclage récurrent du plutonium

Lorsque tout le plutonium du MOX usé sera épuisé, les RNR commenceront à « brûler » le plutonium qu'ils auront eux-mêmes créé par irradiation de l'^{238}U. Il faudra donc retraiter leur combustible usé. *« Le principe de base est identique : on dissout le combustible dans de l'acide et on extrait le plutonium avec des molécules très spécifiques »* souligne Bernard Boullis. Il n'empêche. Les assemblages de combustible des RNR n'ont ni la même géométrie, ni les mêmes gaines (elles seront en acier et non en zirconium) que les assemblages actuels. Cela implique de revoir la « tête » de l'usine, cette partie dédiée au cisaillage des assemblages. Christophe Poinssot reste cependant optimiste : *« Nous avons démontré que nous savons techniquement le faire puisque nous avons déjà retraité 27 tonnes de combustible usé de Phénix et Superphénix, que ce soit au CEA à Marcoule ou à La Hague. Il s'agit essentiellement d'adapter ces procédés à l'échelle industrielle. »*

À ce stade, un parc de RNR de puissance équivalente à celle du parc REP actuel, fonctionnant en cycle fermé, consommerait chaque année 50 tonnes d'^{238}U appauvri issu du stock déjà entreposé – en se passant ainsi d'uranium naturel – et produirait 50 tonnes de déchets ultimes (sans plutonium)[2].

Séparation et transmutation : réduire l'activité des futurs déchets

Restera à résoudre la question des actinides mineurs, éléments radiotoxiques aujourd'hui confinés dans le verre avec les produits de fission et principaux responsables de la très longue durée d'activité des déchets ultimes. La loi 2006-739 du 28 juin 2006 a chargé le CEA de *« coordonner les recherches sur la séparation et la* **transmutation**• *des éléments radioactifs à vie longue »*. Or les RNR, précisément, peuvent consommer ces éléments. À condition toutefois de maîtriser, d'une part, leur extraction des combustibles usés pour les réinjecter dans le cycle, et, d'autre part, leur transmutation dans le cœur des RNR. Les équipes de Marcoule y travaillent depuis une vingtaine d'années. Il a d'abord fallu trouver une molécule résistante aux radiations, capable d'extraire spécifiquement ces éléments de la solution acide dans laquelle a été dissous le combustible usé. *« Nous avons défini des molécules et les avons testées au laboratoire sur 15 kg de combustible réel. On a pu ainsi démontrer qu'on savait récupérer plus de 99 % des actinides mineurs »* affirme Christophe Poinssot. La transmutation, elle, ne peut se tester que dans le cœur d'un RNR en fonctionnement. Depuis l'arrêt de Phénix en 2009, les chercheurs ne disposent plus de moyens expérimentaux en France. *« Pour avancer sur ce point, il faut s'appuyer sur la coopération internationale jusqu'aux nouvelles possibilités de démonstration prévues dans la conception du projet Astrid »* (*voir pages 8 à 10*) indique Bernard Boullis. ●

• **Transmutation :** transformation d'un atome en un autre atome par réaction nucléaire. En l'occurrence, il s'agirait de fissionner les actinides mineurs pour obtenir des éléments toujours radioactifs mais à durée de vie moins longue.

Notes :

1. *Le CEA-DEN étudie notamment une filière au sodium pour les réacteurs rapides de 4e génération. Un projet de démonstrateur, Astrid, est aujourd'hui en phase d'avant-projet sommaire. Le CEA-DEN en est le maître d'ouvrage.*

2. *En réalité, les deux types de réacteurs pourront coexister longtemps dans le parc.*