



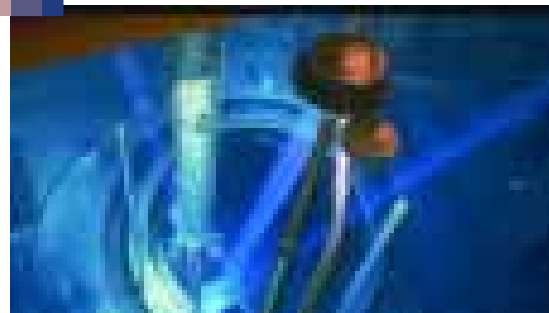
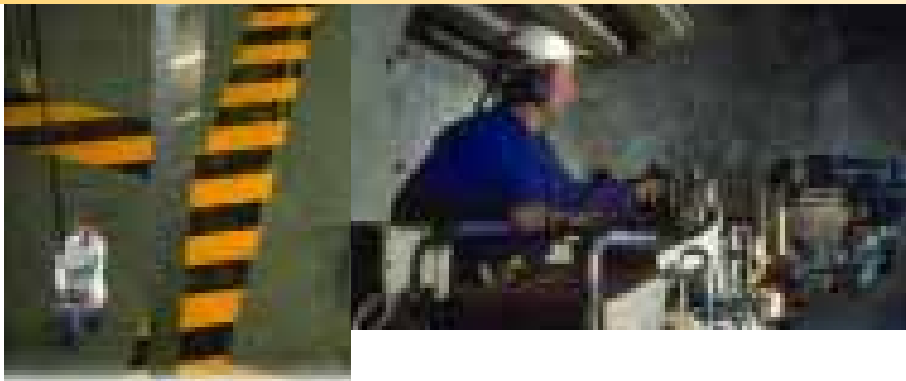
**Le cycle  
de l'énergie nucléaire**



**Le combustible nucléaire**



La prospection minière ..... 10  
L'extraction minière ..... 12  
Le traitement  
des minerais d'uranium ..... 14  
La conversion  
de l'uranium ..... 16  
L'enrichissement  
de l'uranium ..... 18  
La fabrication  
du combustible ..... 20



La conception  
des réacteurs ..... 26  
L'utilisation du combustible  
dans le cœur du réacteur ... 30  
La fabrication  
des équipements ..... 32  
Les services nucléaires ..... 36

**Le traitement et le recyclage du combustible utilisé**



Le traitement  
du combustible utilisé ..... 42  
Le recyclage  
du combustible utilisé ..... 46  
Le conditionnement  
des déchets ..... 48



**Assainissement et démantèlement**



# L'énergie nucléaire dans le monde

Près de 360 000 mégawatts installés

50 ans après la mise en services du premier réacteur, le nucléaire se place au quatrième rang des sources d'énergie primaire, après le pétrole, le charbon et le gaz. En 2002, on comptait 441 réacteurs en fonctionnement dans le monde. Les Etats-Unis totalisaient à eux seuls 104 réacteurs pour un total de 100 000 MWe, soit environ un quart de la capacité mondiale. L'électricité d'origine nucléaire représente 78 % de la production d'électricité en France, 57 % en Belgique, 46 % en Suède, 40 % en Suisse, 39 % en Corée du Sud, 34 % au Japon, 30 % en Allemagne, 30 % en Finlande, 26 % en Espagne, 22 % en Grande-Bretagne, 20 % aux Etats-Unis, 16 % en Russie... 32 réacteurs sont en construction dans le monde, dont 21 en Asie.

(Source : Nuclear Power statistics for 2002, Agence Internationale de l'Energie Atomique)

1



## Sécurité d'approvisionnement et compétitivité

Aujourd'hui, environ 75 % de l'énergie est produite en utilisant des combustibles fossiles. Au rythme actuel de consommation, il reste pour environ 40 ans de pétrole, 56 ans de gaz naturel et 197 ans de charbon\*. Il faut souligner aussi que 80 % des routes pétrolières connues sont au Moyen-Orient et 50 % des futures routes du gaz traversent des régions politiquement peu stables. Autant de facteurs qui plaident en faveur d'une plus grande pluralité énergétique, dans laquelle l'énergie nucléaire a toute sa place. En effet, les gisements d'uranium exploités dans différentes régions du monde et les stocks existants garantissent une sécurité d'approvisionnement à long terme.

Le recours à l'énergie nucléaire permet également d'éviter d'éventuelles importations de combustibles fossiles si le pays n'en dispose pas sur son sol, ce qui représente de réelles économies. D'autre part, il permet d'obtenir un coût de l'énergie compétitif, même dans des conditions de marché dérégulé, et face à des prix parfois bas des énergies fossiles. Il permet surtout de garantir des prix stables sur le long terme, indépendant des variations erratiques des cours du pétrole (du fait du faible poids que représente la matière première

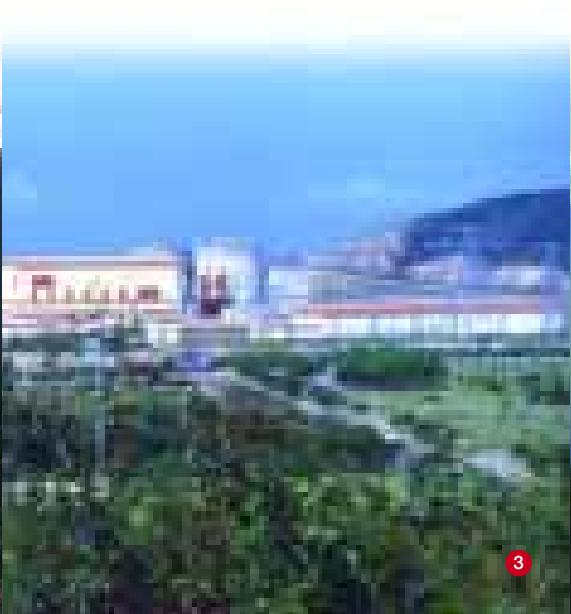
énergétique dans le coût du kWh d'origine nucléaire). Enfin, la compétitivité du nucléaire sera inévitablement renforcée quand seront mises en place les modalités ("taxe carbone", séquestration ou autres) d'internalisation dans leurs coûts des impacts environnementaux de l'utilisation des combustibles fossiles.

## COMPRENDRE

### Unités

En physique, l'énergie s'exprime en joules (J) et en électricité, on utilise le kilowattheure (kWh). Lorsqu'on évoque la consommation énergétique d'un pays, on parle de tonne équivalent pétrole (tep). Par exemple, 1 tonne de charbon = 0,667 tep et 1 Mégawattheure (MWh) = 0,077 tep. Le MWh nucléaire vaut 0,26 tep, c'est-à-dire la quantité de pétrole qu'il aurait fallu brûler pour le produire dans une centrale thermique.

\*Source : *Énergie dans le monde, bilan et perspectives* – Les Éditions de Physique

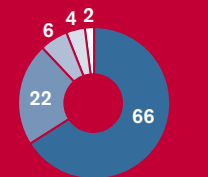


## SAVOIR PLUS

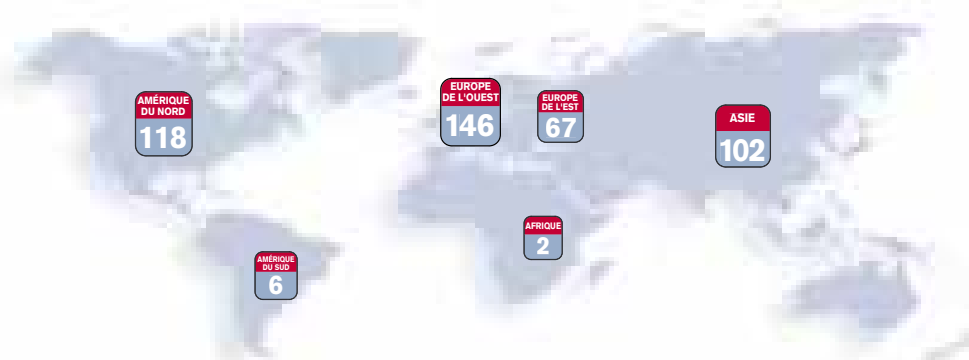
Au cours de notre siècle, la population mondiale atteindra vraisemblablement 10 milliards d'individus et la demande d'électricité devrait croître de plus de 80 % entre 2000 et 2020. Pour satisfaire ces besoins gigantesques, nous n'aurons pas trop de toutes les sources d'énergie.

- 1 Centrale nucléaire de Saint-Laurent-des-Eaux (France).
- 2 Ville de Tokyo (Japon).
- 3 Centrale nucléaire de Daya Bay (Chine).
- 4 Pollution sur la ville de Mexico.

### Répartition en % selon le type de réacteur (puissance installée)



- REP (y compris VVER)  
RÉACTEURS À EAU PRESSURISÉE
- REB  
RÉACTEURS À EAU BOUILLANTE
- CANDU-AGR  
RÉACTEURS À EAU LOURDE  
OU REFROIDIS AU GAZ
- RBMK  
RÉACTEURS À EAU ET GRAPHITE
- AUTRES RÉACTEURS



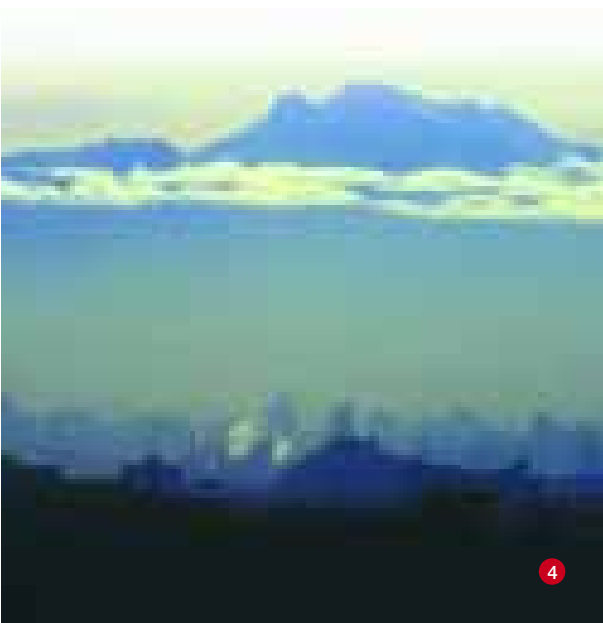
Nombre de réacteurs par zone géographique Source | AIEA - 2002

## 441 réacteurs en service dans le monde

Les réacteurs sous pression (REP) sont, de très loin, les plus utilisés dans le monde puisqu'ils représentent environ 66 % du parc

actuel, devant les réacteurs à eau bouillante (REB). Les filières à eau lourde (CANDU) ou refroidies au gaz (AGR) regroupent 6 % des

réacteurs en service. Les réacteurs RBMK conçus à l'époque soviétique représentent 4 % du parc mondial.



## COMPRENDRE

### L'effet de serre

L'effet de serre s'explique par la rétention, dans l'atmosphère, d'une partie de l'énergie que le Soleil envoie à la Terre. C'est un phénomène naturel dû essentiellement à la présence de vapeur d'eau dans l'air. Sans lui, la température moyenne à la surface de la planète serait de  $-18^{\circ}\text{C}$  au lieu des  $15^{\circ}\text{C}$  actuels ! Une différence de  $33^{\circ}\text{C}$  qui permet à la vie de se maintenir sur Terre. Toutefois, l'activité humaine est à l'origine de l'émission croissante de gaz qui restent longtemps dans l'atmosphère. Ce phénomène accentue l'effet de serre naturel et provoque un réchauffement puisqu'au cours du siècle dernier, la température moyenne s'est élevée de  $0,6^{\circ}\text{C}$ . Les principaux gaz à effet de serre sont le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), le méthane, le protoxyde d'azote et les gaz fluorés.



### Lutte contre l'effet de serre

À l'origine du réchauffement général de l'atmosphère, le problème de l'effet de serre est planétaire. L'augmentation de ce phénomène, à l'origine naturelle, est essentiellement due aux activités humaines. Quelles solutions pour enrayer ce problème ? Réduire nos émissions de gaz à effet de serre en encourageant les économies d'énergie et en privilégiant le recours à des sources non-émettrices : les énergies renouvelables et l'énergie nucléaire. En France, par exemple, le programme électronucléaire permet

à notre pays d'enregistrer un taux d'émission de gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) par habitant 10 fois moins important qu'en Allemagne où le nucléaire représente 30 % de la production d'électricité et 13 fois moins qu'au Danemark où le nucléaire est absent. À l'échelle mondiale, l'énergie nucléaire permet d'éviter l'émission de 2,3 milliards de tonnes de gaz carbonique\*.

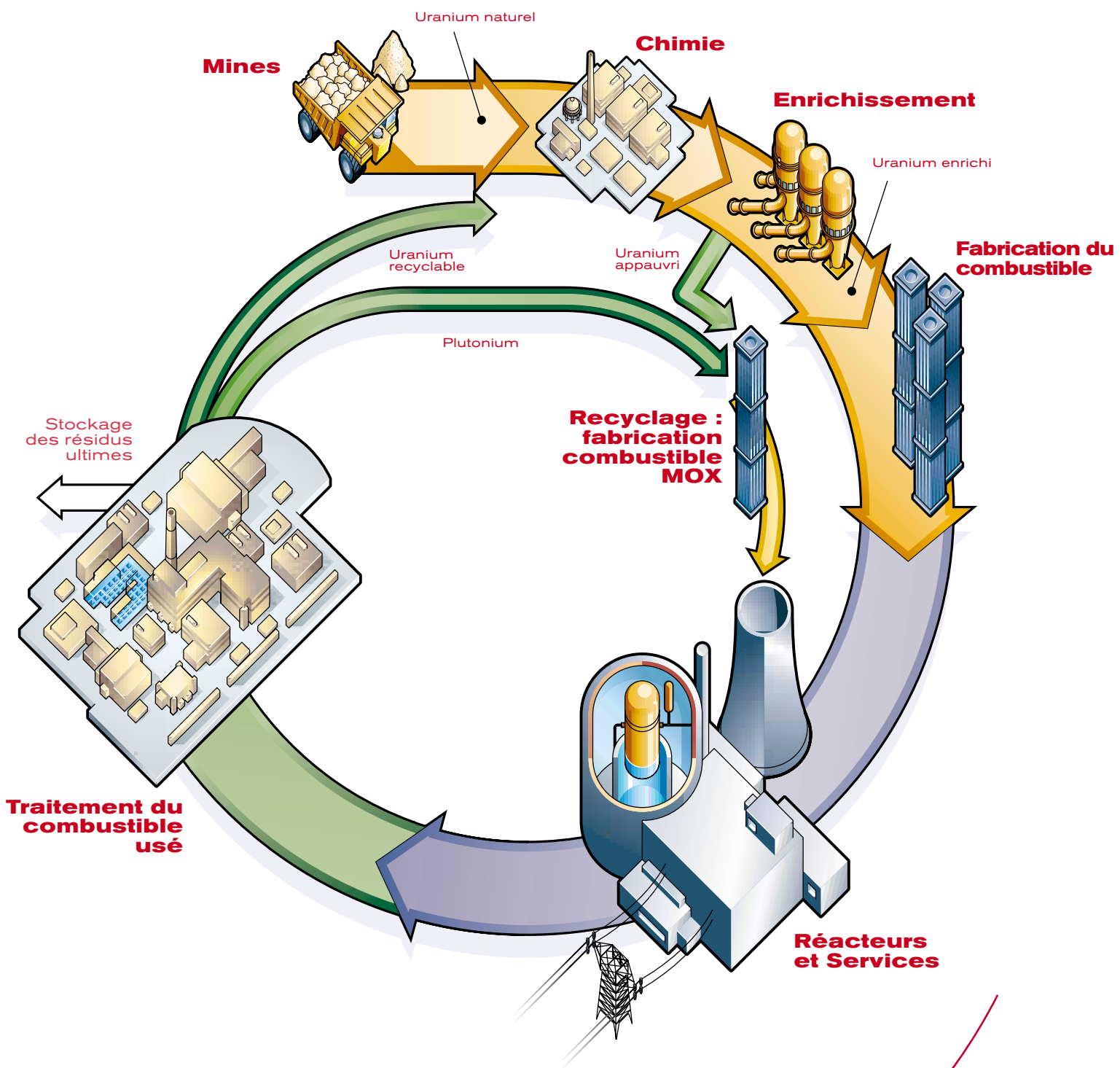
*\*En supposant que le nucléaire soit remplacé uniquement par des centrales à charbon.*

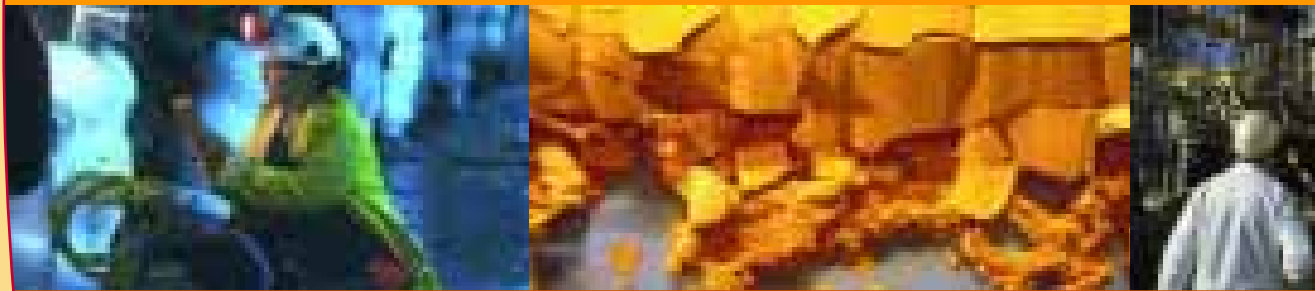
# Le cycle de l'énergie nucléaire



**Expert mondial dans les métiers de l'énergie, AREVA propose à ses clients des solutions technologiques pour produire l'énergie nucléaire.**

**Parce que le nucléaire constitue aujourd'hui une réponse efficace aux enjeux majeurs pour la planète posés par la production de gaz à effet de serre, AREVA a construit dans la durée une offre d'énergie propre, efficace et respectueuse des intérêts des générations futures.**



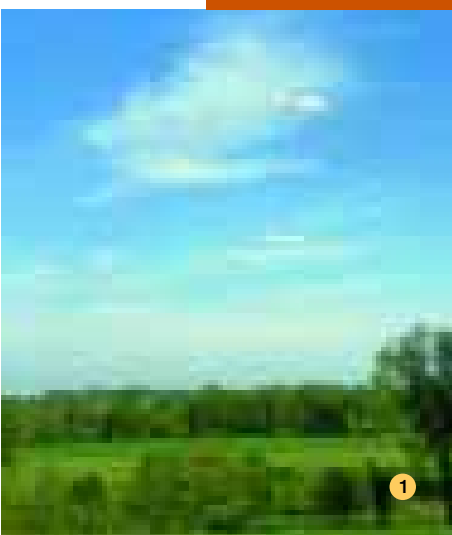


## **Le combustible nucléaire**

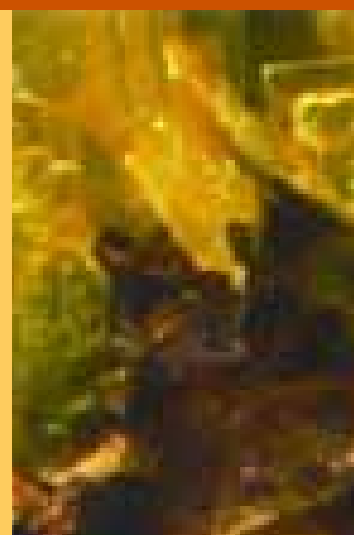


# La prospection minière

## Sur les cinq continents, rechercher l'uranium



A l'état pur, l'uranium est un métal gris et dur, très dense. On ne le trouve jamais sous sa forme native (c'est-à-dire sous forme de métal) mais sous forme de minerai. Cet élément est relativement répandu dans l'écorce terrestre, à raison de 3 grammes par tonne en moyenne. Cependant, seules des concentrations importantes peuvent justifier son exploitation. Le travail des prospecteurs permet de découvrir de nouvelles réserves dans différentes régions du monde et garantit ainsi l'approvisionnement en uranium à long terme.



Sur Terre, l'uranium est un élément métallique 1 000 fois plus abondant que l'or. Il est présent dans tous les types de terrains, notamment dans les massifs granitiques.

### Techniques classiques de prospection et mesures de radioactivité

La prospection utilise les différentes méthodes habituellement appliquées à la recherche de gisements métallifères : études géologiques et géophysiques, chimie des sols et des eaux, sondages... Elle s'appuie aussi sur la détection de la radioactivité des minerais uranifères, en particulier sur la mesure des rayonnements gamma à l'aide de compteurs de type Geiger-Muller ou de scintillomètres. Classiquement, la prospection part d'un vaste territoire, sélectionné sur des considérations géologiques, pour se concentrer progressivement sur les zones présentant des "anomalies" ou indices significatifs de minéralisations exploitables. Dans un premier temps, les prospecteurs utilisent l'avion ou l'hélicoptère. Lorsque des indices encourageants sont localisés,

des équipes de terrain effectuent des prélèvements par excavation ou par forage et des études de plus en plus fines sur des surfaces de plus en plus réduites. Les minéralisations ainsi repérées seront mises en exploitation si la rentabilité économique du gisement le justifie.

### Au Canada, des gisements parmi les plus riches du monde

Les travaux de prospection menés dans de nombreux pays ont permis la découverte de gisements assurant une excellente sécurité d'approvisionnement à long terme :

→ au Canada, dans la province de la Saskatchewan, les gisements de McClean Lake, Midwest, Cigar Lake et McArthur River, découverts entre 1981 et 1988, font partie des gisements offrant les plus fortes teneurs d'uranium au monde : de 20 à 200 kg d'uranium par tonne de minerai, soit une richesse 10 à 100 fois supérieure à celle des gisements exploités précédemment.



### SAVOIR PLUS

#### **“Uranium”, en l’honneur de la planète Uranus**

Découvert en 1789 par Klaproth, cet élément fut baptisé ainsi en l’honneur de la planète Uranus, qui venait d’être découverte par l’astronome Herschel à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle.



Ces très fortes teneurs sont associées à des tonnages eux aussi parmi les plus importants dans le monde (180 000 tonnes d’uranium exploitables pour le seul gisement de McArthur River). Alliées à des conditions géologiques difficiles, elles imposent de véritables défis technologiques pour la mise en valeur de ces gisements ;

→ au Niger, au Kazakhstan, en Australie..., des travaux de prospection sont menés et plusieurs gisements sont en exploitation ou en cours de développement.

- 1 *Prospection hélicoptée.*
- 2 *Minerai d’uranium.*
- 3 *Sondage de prospection.*
- 4 *Camp de prospection au Kazakhstan.*

# L'extraction minière

## Mettre en œuvre des techniques minières adaptées à chaque gisement



**AREVA produit annuellement 7 200 tonnes de concentré d'uranium. Les exploitations à ciel ouvert ou souterraines mettent en œuvre toutes les techniques minières classiques. Des méthodes d'extraction spécifiques ont été mises au point au Canada, où des gisements à forte teneur en uranium sont exploités.**



### Exploitations à ciel ouvert ou souterraines

L'exploitation de la plupart des gisements d'uranium s'effectue selon les méthodes classiques utilisées dans les mines métallifères. Lorsque les corps minéralisés sont proches de la surface, ils sont exploités par mine à ciel ouvert. Dans les autres cas, la mine est souterraine, avec accès par puit et descenderie. L'abattage du minerai relève des techniques minières classiques. L'exposition des mineurs à la radioactivité est liée aux rayonnements gamma, à l'inhalation du gaz radon qui se dégage des roches et de poussières fines de minerai. La conception et la surveillance des chantiers tend à minimiser ces risques, par notamment, une ventilation importante des lieux de travail. De plus, le port de dosimètres individuels permet de s'assurer du respect des normes réglementaires pour chacun. Les personnels font également l'objet d'une surveillance médicale renforcée.

### Techniques exceptionnelles pour gisements exceptionnels

La teneur de certains gisements canadiens (jusqu'à 200 kg d'uranium par tonne de minerai, contre moins de 10 kg ailleurs) nécessite la mise en œuvre de techniques spécifiques, sans entrée du personnel dans le gisement. Pour l'exploitation du gisement de Cigar Lake, au Canada, une méthode originale d'abattage hydraulique a été développée. En raison de la mauvaise tenue des terrains, le sol est congelé grâce à un liquide réfrigérant qui circule dans des tuyauteries enterrées. Un jet d'eau à haute pression désagrège la roche, ainsi congelée, puis le minerai mélangé à de l'eau est collecté et pompé hors de la zone de production. L'extraction s'effectue donc de façon entièrement automatisée, sans qu'aucun mineur ne soit en contact direct avec le minerai extrêmement riche.



2



3



4

La lixiviation in situ est une autre technique d'exploitation par sondages qui évite également, cette fois pour des raisons économiques, la présence de mineurs sur le lieu même de l'abattage. Elle est adaptée à la valorisation de gisements, situés dans des milieux géologiques qui s'y prêtent, et à faible teneur en uranium. Elle est notamment utilisée actuellement sur l'exploitation pilote du gisement de Muyunkum au Kazakhstan. Son principe consiste à dissoudre l'uranium (lixiviation) contenu dans le minerai en place (in situ), par injection d'une solution acide ou alcaline, et à pomper vers la surface le composé ainsi obtenu. Cette technique permet d'éviter d'avoir à transporter jusqu'à la surface de grandes quantités de minerai qui ne contiendraient que peu d'uranium.

## SAVOIR PLUS

### Le réaménagement de sites miniers

Après cessation de l'exploitation d'une mine vient le temps du réaménagement du site. L'ensemble des opérations, qui vont de la mise en sécurité au remodelage et à la revégétalisation, est contrôlé par l'Administration.

Les objectifs de réaménagement des sites miniers sont d'assurer sécurité et salubrité pour le public et l'environnement à très long terme, mais également de réussir l'intégration paysagère et de permettre autant que possible l'installation de nouvelles activités sur les sites réaménagés, en partenariat avec les collectivités

territoriales et les acteurs socio-économiques locaux.

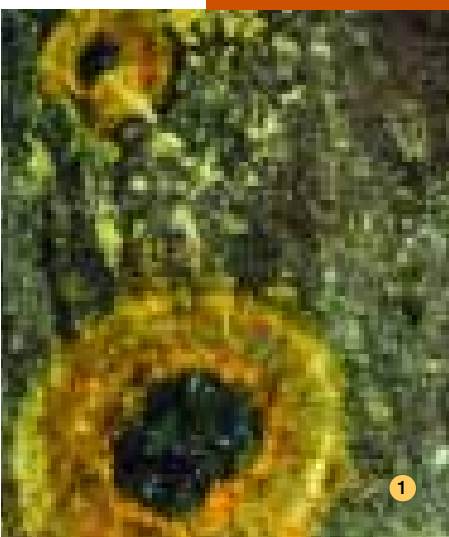
C'est ainsi que de nombreux sites miniers reviennent à des utilisations agricoles ou forestières et que certaines exploitations à ciel ouvert sont aménagées en plans d'eau.

De nombreuses mines exploitées, et maintenant fermées, ont fait l'objet de tels traitements, comme les sites miniers en Haute-Vienne ou dans le Languedoc-Roussillon. AREVA gère également les réaménagements de sites au Gabon et aux USA (Texas et Wyoming).

- 1 Mine souterraine de COMINAK, Niger.
- 2 Barrière de congélation, McArthur, Canada.
- 3 4 Mine du Tail, en exploitation et réaménagée, Vendée, France.

# Le traitement des minerais d'uranium

## Du minerai brut au "yellow cake", concentrer l'uranium



**Une fois extrait et ramené à la surface, l'uranium doit être séparé de sa gangue rocheuse et débarrassé d'un maximum d'impuretés. Afin d'éviter le transport inutile de tonnages importants sur des distances souvent longues, cette opération de concentration s'effectue à proximité immédiate des sites miniers.**



Dans les usines de concentration implantées à proximité des mines, les roches uranifères (minerais) sont concassées et finement broyées. Elles font ensuite l'objet de traitements chimiques qui peuvent varier d'une installation à l'autre en fonction des caractéristiques des minerais.

Les différents processus suivent cependant des étapes très semblables :

→ attaque du minerai par voie alcaline ou acide pour mettre l'uranium en solution ;

→ séparation de la solution uranifère et des résidus sableux ;

→ précipitation de l'uranium sous forme d'uranate (de magnésie, de soude ou d'ammonium) ou encore sous forme de peroxyde d'uranium. Après séchage, les concentrés d'uranium ont l'aspect d'une poudre généralement jaune vif, appelée "yellow cake" ("gâteau jaune"). Le yellow cake contient environ 75 % d'uranium, soit 750 kg par tonne. Le "yellow cake", qui reste le terme générique communément utilisé, est toutefois de plus en plus souvent transformé et commercialisé sous la forme d' $U_3O_8$ , dont la teneur en uranium dépasse alors 80 %.





2

## SAVOIR PLUS

### **McClellan, une usine de concentration à la mesure des gisements nord-américains**

Les minerais extraits des gisements canadiens de McClellan Lake et de Cigar Lake sont traités par l'usine de McClellan. Cette usine modulaire, qui dispose actuellement d'une licence d'exploitation de 3 000 tonnes d'uranium par an pourrait voir sa capacité doubler voire tripler, devenant l'une des plus grandes usines de concentration du monde.



## SAVOIR PLUS

### **L'impact sur l'environnement contrôlé en permanence**

Des actions sont engagées pour réduire l'impact dû aux activités des sites miniers (stations de traitement des effluents liquides, filtrage des effluents gazeux...). En 2001, plus de 200 000 analyses ont été réalisées sur l'ensemble des sites. Les résultats de ces analyses de contrôle dans l'environnement font l'objet d'une large diffusion, au moyen de lettres d'information périodiques.

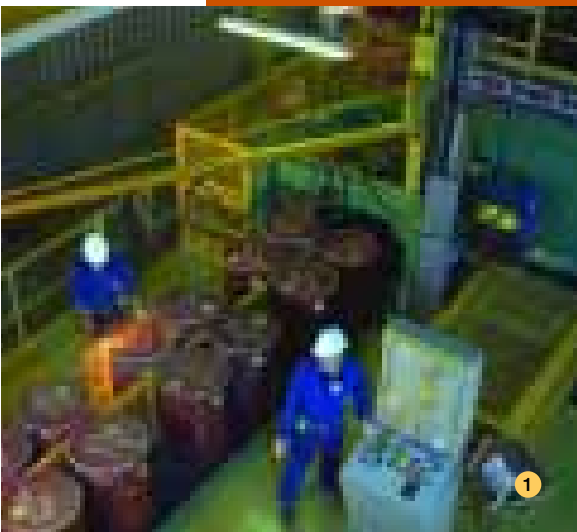
- 1 Minerai d'uranium.
- 2 Broyeur et concasseur de l'usine de traitement du minerai de McClellan au Canada.
- 3 Yellow cake.
- 4 Contrôle de l'environnement, site de McClellan au Canada.



4

# La conversion de l'uranium

Chimie de l'uranium, convertir le "yellow cake" en composés utilisables

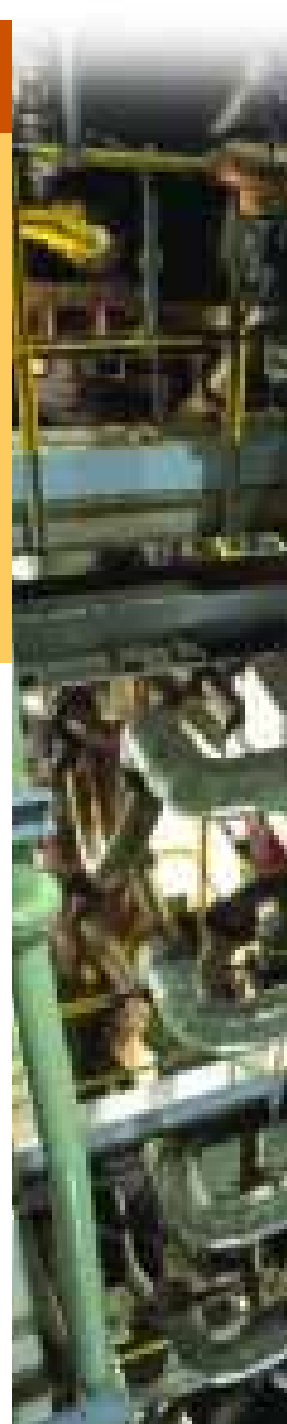


L'uranium, même concentré sous forme de "yellow cake", est inutilisable tel quel dans les réacteurs nucléaires. En effet, l' $^{235}\text{U}$ , isotope fissile indispensable à la réaction nucléaire, n'est présent que pour 0,7 % dans l'uranium naturel. Or les réacteurs les plus répandus nécessitent des teneurs en uranium 235 de 3 à 5 %. Il faut donc enrichir l'uranium naturel en isotope 235. Pour pouvoir être enrichi, le "yellow cake", une fois raffiné, doit tout d'abord être transformé en hexafluorure d'uranium ( $\text{UF}_6$ ).



## De l' $\text{UF}_4$ à l' $\text{UF}_6$

Les opérations de conversion donnent au concentré uranifère la pureté indispensable à la fabrication du combustible nucléaire. Elles s'effectuent généralement en deux temps. Le concentré minier est tout d'abord purifié et transformé en tétrafluorure d'uranium ( $\text{UF}_4$ ) sur l'établissement de COMURHEX-Malvézi, près de Narbonne. L'usine COMURHEX-Pierrelatte, située sur le site du Tricastin dans la Drôme, reçoit cet  $\text{UF}_4$  et le transforme à son tour en  $\text{UF}_6$ . Ce dernier a la propriété de pouvoir passer de l'état solide à l'état liquide ou gazeux par de faibles changements de température. Ainsi, gazeux à  $65^\circ\text{C}$ , l' $\text{UF}_6$  convient au procédé d'enrichissement par diffusion gazeuse ou centrifugation, qui constitue l'étape suivante du cycle du combustible. A Pierrelatte, COMURHEX se distingue comme l'une des rares usines au monde à effectuer ce même type d'opérations à partir de l'uranium issu du traitement des combustibles usés. Cet  $\text{UF}_6$  de retraitement sera ensuite enrichi et transformé en combustible.





2



3

## SAVOIR PLUS

### La chimie de l'uranium mais aussi du fluor

A Pierrelatte, COMURHEX est aussi premier producteur européen de fluor, produit nécessaire à la conversion. Profitant de son expérience, l'établissement

du Tricastin a mis au point des dérivés fluorés non uranifères. Ils sont utilisés dans l'industrie électronique et l'industrie automobile.



4

- 1 Station d'échantillonnage, usine de COMURHEX-Malvézi.
- 2 Réacteur à flammes, usine de COMURHEX-Pierrelatte.
- 3 Tétrfluorure d'uranium  $UF_4$ , usine de COMURHEX-Malvézi.
- 4 Cristaux d'hexafluorure d'uranium  $UF_6$ , usine de conversion COMURHEX-Pierrelatte.

# L'enrichissement de l'uranium

## Augmenter la concentration en uranium 235



L'uranium est principalement composé de deux isotopes de masses 235 et 238. L'uranium 235 est beaucoup moins abondant à l'état naturel que l'uranium 238 : il n'y en a que 0,7 %, soit 7 kg par tonne. La plupart des réacteurs nucléaires utilisent comme combustible un uranium enrichi entre 3 et 5 % en uranium 235. L'enrichissement consiste donc à augmenter la concentration en uranium 235 de façon à obtenir une matière utilisable dans les réacteurs nucléaires. Les deux procédés d'enrichissement actuellement exploités à l'échelle industrielle sont la diffusion gazeuse et la centrifugation.



### La diffusion gazeuse

Le procédé d'enrichissement par diffusion gazeuse repose sur la différence de masse entre les deux isotopes  $^{235}\text{U}$  et  $^{238}\text{U}$ . Ces deux isotopes sont combinés avec du fluor pour former de l'hexafluorure d'uranium ( $\text{UF}_6$ ). L' $\text{UF}_6$  a la propriété d'être gazeux à des températures et des pressions modérées. La molécule d' $\text{UF}_6$  la plus légère,  $^{235}\text{UF}_6$ , est la plus rapide dans un gaz en mouvement. Confinée dans un espace, elle frappera la paroi plus souvent qu'une molécule d' $\text{UF}_6$  plus lourde,  $^{238}\text{UF}_6$ . Si cette paroi est poreuse, les molécules les plus légères traverseront la paroi plus souvent que les molécules les plus lourdes et le gaz s'enrichira en  $^{235}\text{UF}_6$ . Le diffuseur est l'élément dans lequel se fait le tri entre les isotopes. Le gaz est poussé par un compresseur dans des tubes poreux appelés barrières de diffusion. Le gaz appauvri part vers les étages précédents et le gaz enrichi est relancé vers le diffuseur suivant. Le coefficient unitaire d'enrichissement étant très petit, le processus doit être reproduit 1 400 fois à l'usine d'EURODIF pour atteindre la teneur en uranium 235 demandée par les clients. L'usine s'adapte à toutes les configurations en fonction du niveau de puissance choisie et des demandes de ses clients :

de 100 kg à plusieurs tonnes, d'une teneur en uranium 235 de 1 % à 5 %. Le rejet de calories dans l'atmosphère se fait par deux tours de refroidissement. A pleine puissance, l'usine consomme près de 3 000 MWe. Sa capacité de production lui permet d'alimenter en uranium enrichi l'équivalent d'une centaine de réacteurs de 900 MWe. Elle compte parmi ses clients EDF\* et une quarantaine de compagnies d'électricité dans le monde.

### La centrifugation

Grâce à l'accord signé le 24 novembre 2003 avec le consortium nucléaire européen URENCO, AREVA accède à la technologie de la centrifugation et lance la construction d'une nouvelle usine d'enrichissement d'uranium, sur le site du Tricastin en France. Cette technologie permettra de poursuivre cette activité et de répondre aux besoins du parc nucléaire mondial en matière d'enrichissement pour les quarante ans à venir.

\*Electricité de France



3

## SAVOIR PLUS

### Les fonctions fondamentales d'une centrifugeuse

→ Un cylindre allongé tourne à très haute vitesse sous vide dans un carter étanche. Selon les générations de machines, ce cylindre ou "bol" est construit en matériaux métalliques à haute résistance mécanique ou en composite à base de fibres de carbone. Les propriétés mécaniques de ces dernières ont permis de multiplier de 5 à 10 fois les performances des machines.

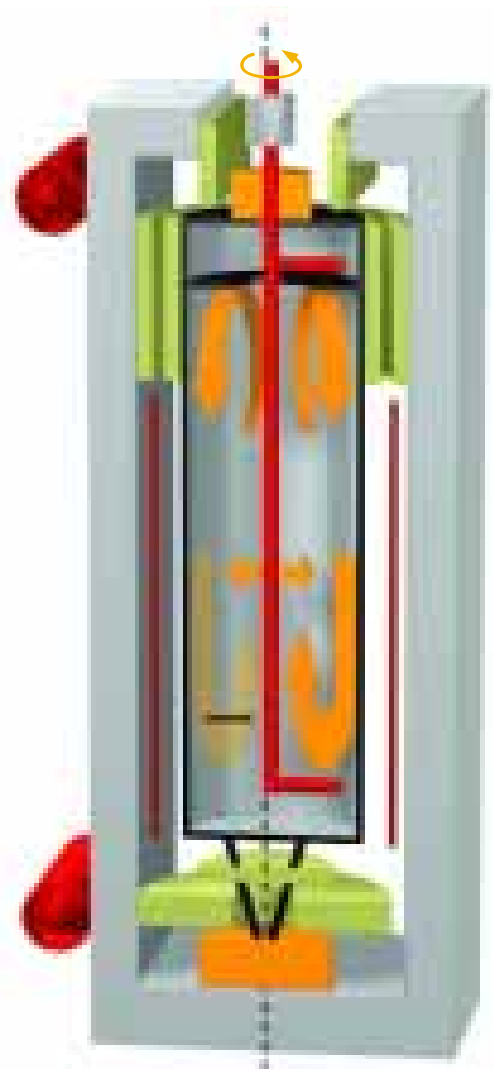
→ L'uranium est introduit sous forme d'hexafluorure d'uranium  $UF_6$  comme en diffusion gazeuse.

→ Par l'effet de la force centrifuge, les

particules les plus lourdes sont envoyées à la périphérie, créant un effet de séparation isotopique.

→ De façon à accroître l'effet isotopique, ce gaz est mis en circulation axiale par des mécanismes physiques. Le gaz enrichi en isotope léger, et situé plus au centre du bol, est transporté vers le haut de la machine tandis que le gaz enrichi en isotope lourd descend vers le bas. Les produits enrichis et appauvris sont récupérés aux deux extrémités de la machine.

### Schéma d'une centrifugeuse



1 Étuve dans le bâtiment réception-expédition-contrôle. Usine d'enrichissement Georges Besse d'EURODIF, France.

2 Allée de diffuseurs.

3 Vue extérieure de l'usine.

# La fabrication du combustible

## Un processus extrêmement rigoureux



**Le cœur d'un réacteur nucléaire à eau légère est composé de plusieurs millions de petites pastilles d'uranium enrichi conditionnées dans des assemblages combustibles. Des processus de fabrication particulièrement rigoureux permettent d'atteindre les niveaux de performance et de sûreté requis.**



### **Des "crayons" remplis de pastilles d'uranium...**

Après défluoruration, l'uranium enrichi en  $^{235}\text{U}$  se présente sous la forme d'une poudre d'oxyde prête à fournir son énergie.

Dans un premier temps, cette poudre est comprimée très fortement sous forme de petites pastilles cylindriques d'une dizaine de grammes, qui sont ensuite "frittées", c'est-à-dire cuites au four comme des céramiques industrielles.

Après avoir été rectifiées à la meule diamantée, les pastilles sont contrôlées en dimension et en densité. Elles sont ensuite introduites dans de longs tubes métalliques en alliage de zirconium remplis d'hélium et soudés hermétiquement. L'ensemble constitue un crayon d'assemblage combustible. Le choix du zirconium est lié à sa transparence aux neutrons : il ne freine pas les réactions nucléaires au sein du cœur du réacteur.

En plus de leur fonction de maintien des pastilles selon une géométrie favorable aux réactions souhaitées, les crayons constituent la première

barrière d'étanchéité. Ils doivent résister à de fortes contraintes mécaniques et thermiques, en interdisant le transfert des produits radioactifs vers l'extérieur.

Dans un réacteur à eau sous pression de 900 MWe, chaque "crayon" contient environ 300 pastilles d'uranium.

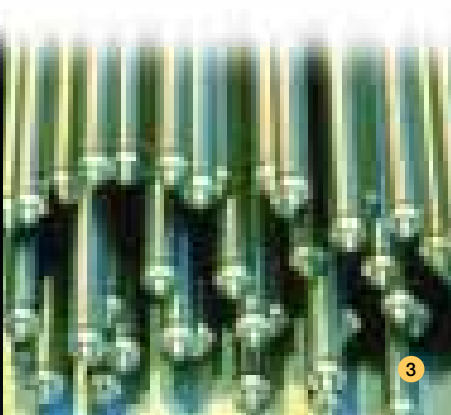
### **...groupés en "assemblages"**

Les "crayons" contenant le combustible proprement dit sont groupés en "assemblages" ou éléments combustibles du cœur du réacteur. Chaque assemblage contient 264 crayons.

Des tubes-guides sont également prévus dans chaque assemblage pour l'introduction des barres de contrôle nécessaires au pilotage du réacteur, ainsi qu'un tube central destiné à l'instrumentation. Les différentes pièces de structure assurant le maintien des crayons en faisceau sont elles aussi en matériaux peu absorbants afin de ne pas ralentir les réactions et d'économiser le combustible.



2



3

- 1 *Contrôle visuel des pastilles d'UO<sub>2</sub>.*
- 2 *Manutention d'un assemblage combustible.*
- 3 *Alliage M5™, possédant une résistance à la corrosion exceptionnelle.*
- 4 *Contrôle visuel d'un squelette d'assemblage combustible.*



## SAVOIR PLUS

### **Améliorer en permanence les performances des combustibles nucléaires**

Les travaux de recherche portent notamment sur les matériaux des tubes et sur la composition de la céramique qui constitue les pastilles de combustible. Les combustibles obtenus ont un comportement en réacteur amélioré qui leur permet d'atteindre des taux de combustion plus élevés. Ainsi, ils produisent, avec la même quantité de matière, plus d'énergie, donc plus d'électricité.



4



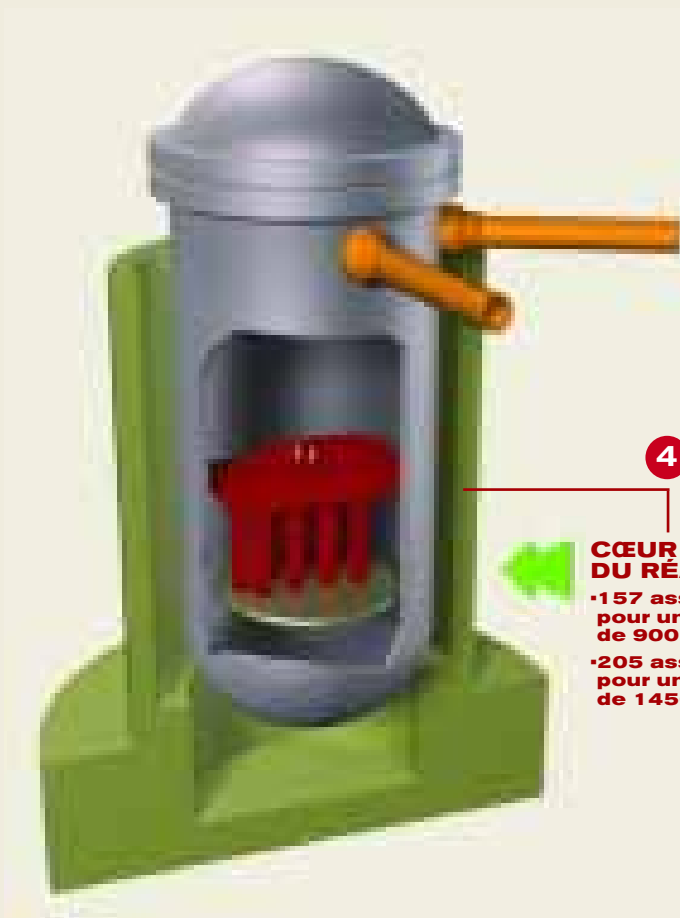
### SAVOIR PLUS

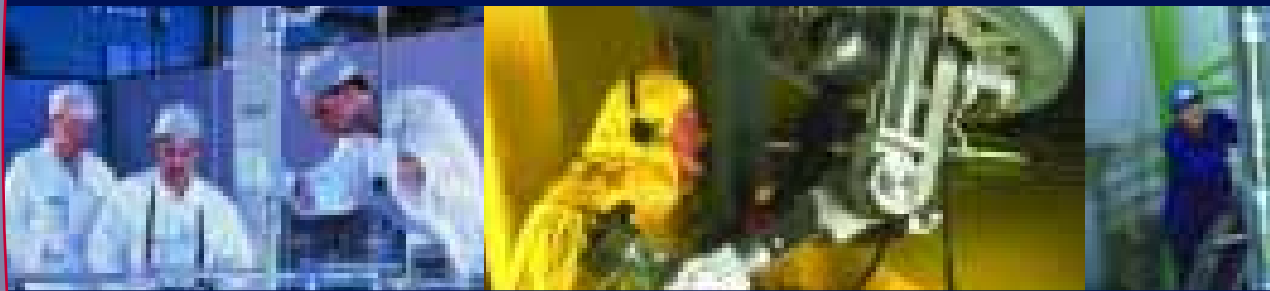
#### **La protection du personnel et de l'environnement**

Toutes les opérations du cycle du combustible impliquent la manipulation et l'utilisation de produits plus ou moins radioactifs dont il convient de se protéger. Les méthodes de protection varient suivant les caractéristiques des produits en cause et leur niveau de radioactivité. À chaque étape du processus, le principe de protection reste le même : en aucune circonstance, les produits radioactifs ne doivent délivrer au personnel et aux populations des doses de rayonnements préjudiciables à leur santé.

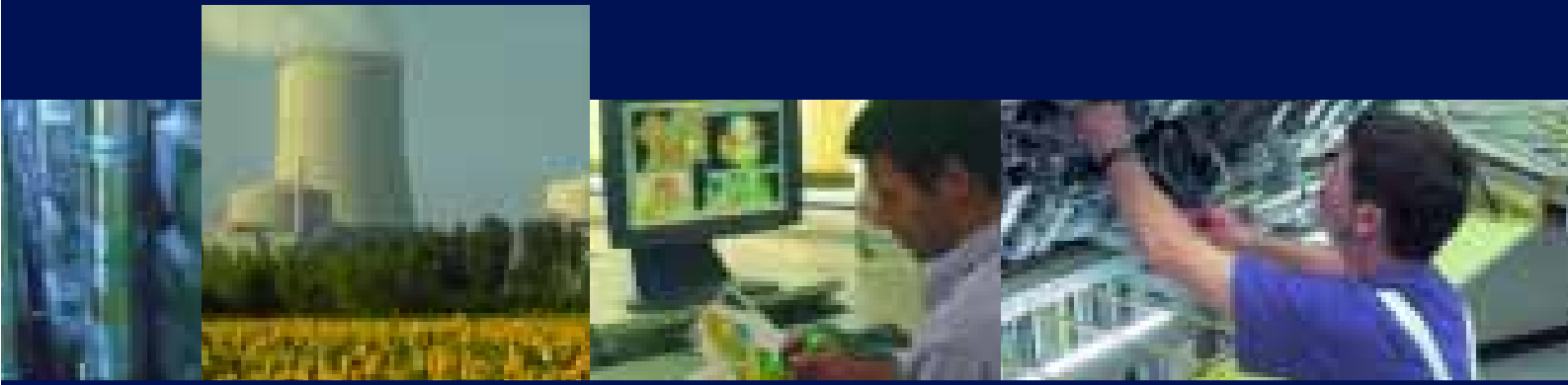
- 5 Ligne de pastillage, sortie de presse des pastilles.
- 6 Intervention en zone contrôlée, port du dosimètre.

# Schéma simplifié du cœur d'un réacteur à eau sous pression



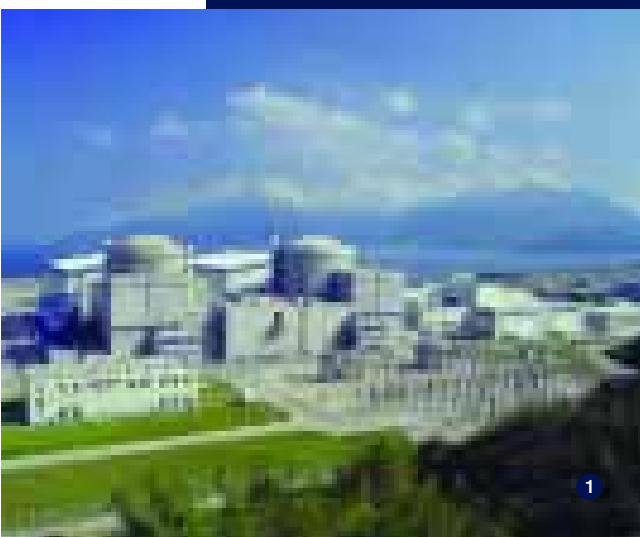


## **Les réacteurs nucléaires**



# La conception des réacteurs

## Du réacteur à la centrale nucléaire...



Le réacteur nucléaire permet de produire à volonté une réaction de fission en chaîne et d'en régler l'intensité. L'énergie considérable produite par cette réaction est utilisée dans une "chaudière nucléaire" qui transforme de l'eau en vapeur. A l'intérieur de la centrale électronucléaire, la force motrice de cette vapeur actionne un turbo-alternateur et produit de l'électricité. A la sortie du turboalternateur, la vapeur est retransformée en eau dans un "condenseur" refroidi par l'eau de mer ou de rivière ou encore par l'air frais et humide qui s'engouffre dans les tours en béton appelées "aéro-réfrigérants". Cette eau est ramenée vers le réacteur nucléaire pour être à nouveau transformée en vapeur refermant ainsi le cycle.



### Les filières à eau "ordinaire" ou "légère"

Elles sont représentées par les réacteurs à eau bouillante (REB) et par les réacteurs à eau pressurisée (REP), ces derniers étant, de loin, les plus utilisés dans le monde (66 % du parc actuel en puissance installée). Dans les deux types de réacteur, une cuve contient le cœur du réacteur avec le combustible. La réaction de fission en chaîne auto-entretenu échauffe les assemblages de combustible. De l'eau, venant du bas de la cuve, s'échauffe au contact des parois de ceux-ci.

→ dans les REB, l'eau entre en ébullition et se transforme en vapeur à l'intérieur même de la cuve. Les pompes de recirculation forcent l'eau qui n'a pas été vaporisée à retourner dans le cœur, accélérant le mouvement de la circulation naturelle. La vapeur produite est acheminée directement par des tuyauteries "vapeur" vers

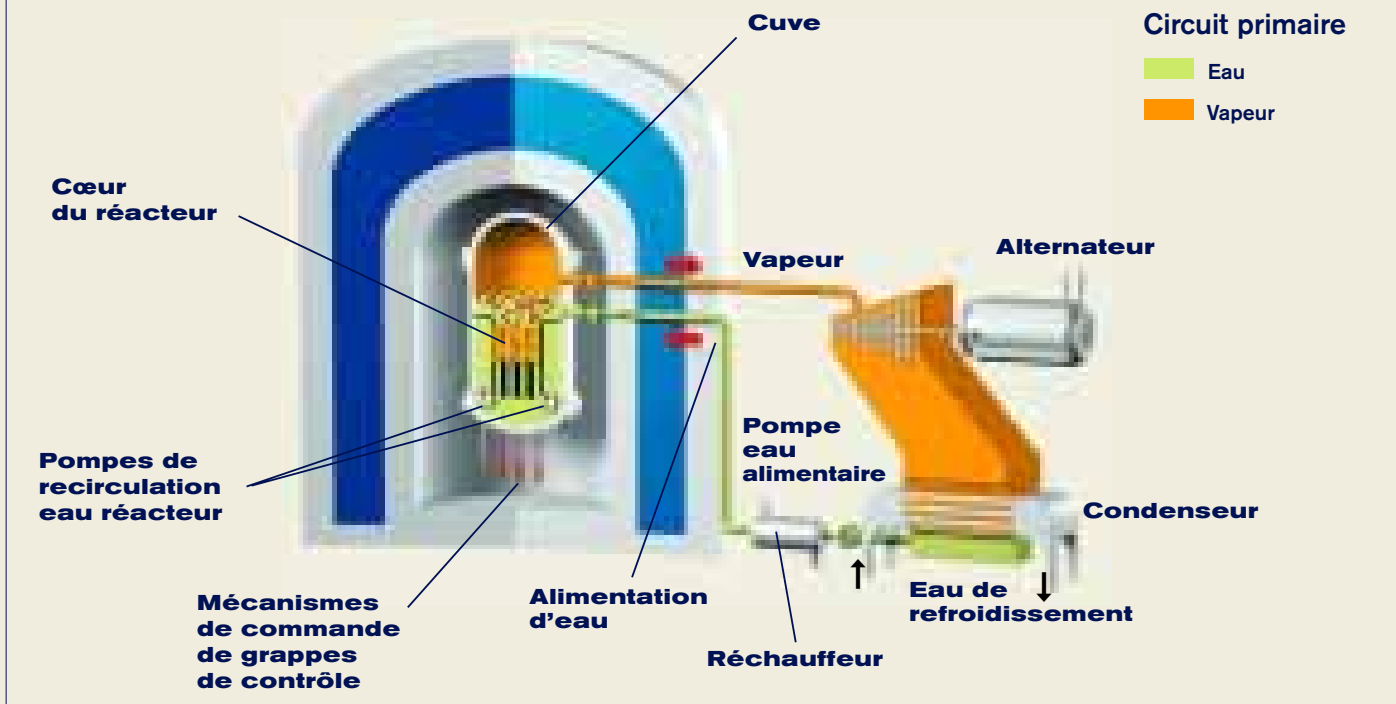
le turboalternateur. L'enceinte de confinement empêche la dissémination de produits radioactifs en cas d'endommagement du cœur.

→ dans les REP, l'eau réchauffée par les assemblages de combustible du cœur, que l'on appelle "eau primaire", est maintenue à une pression suffisamment élevée pour l'empêcher de bouillir et la garder sous forme liquide, d'où le nom de réacteur à eau pressurisée. C'est le pressuriseur qui contrôle cette pression. De plus, cette eau n'est pas envoyée directement à la turbine. Elle circule en circuit fermé grâce aux "pompes primaires" entre le cœur et un gros échangeur appelé générateur de vapeur (GV). Celui-ci permet la transmission de la chaleur de l'eau primaire vers l'"eau secondaire" qui elle, entre en ébullition, car sa pression est beaucoup plus faible. C'est la vapeur produite par l'eau secondaire qui est acheminée vers le turboalternateur.

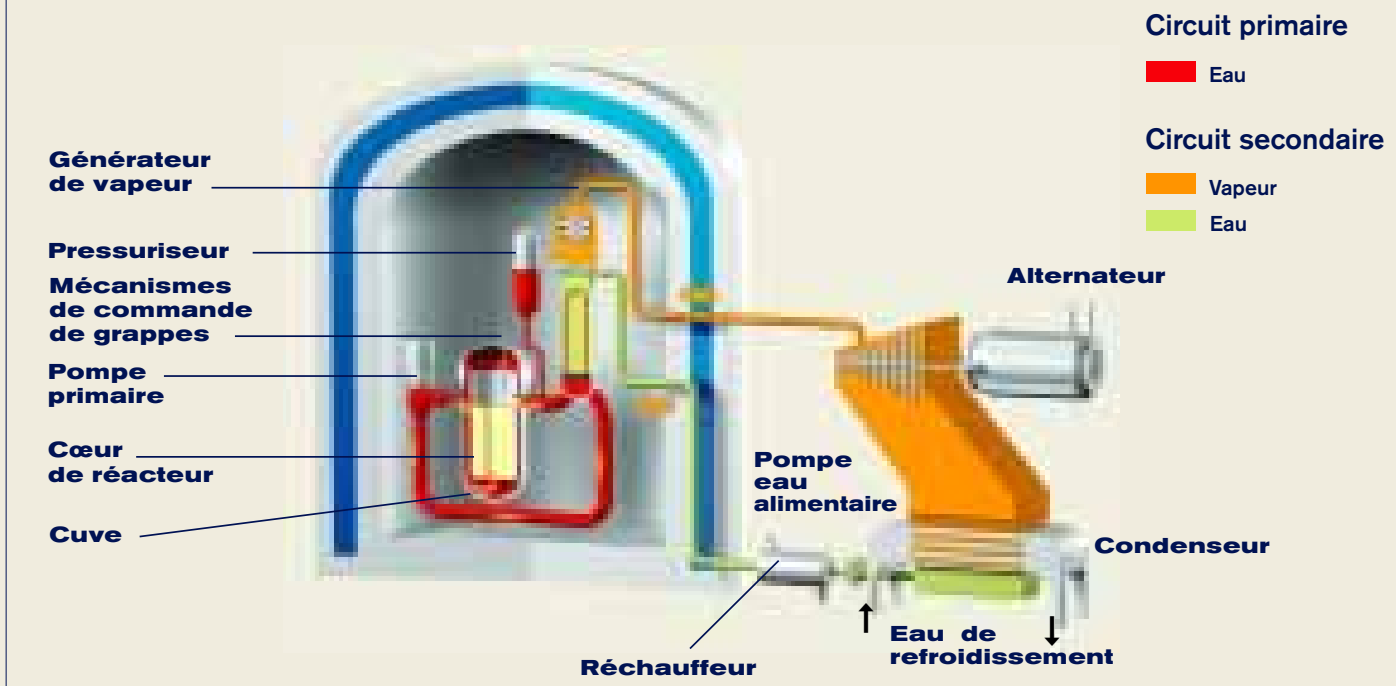
1 Centrale nucléaire de Ling Ao en Chine.

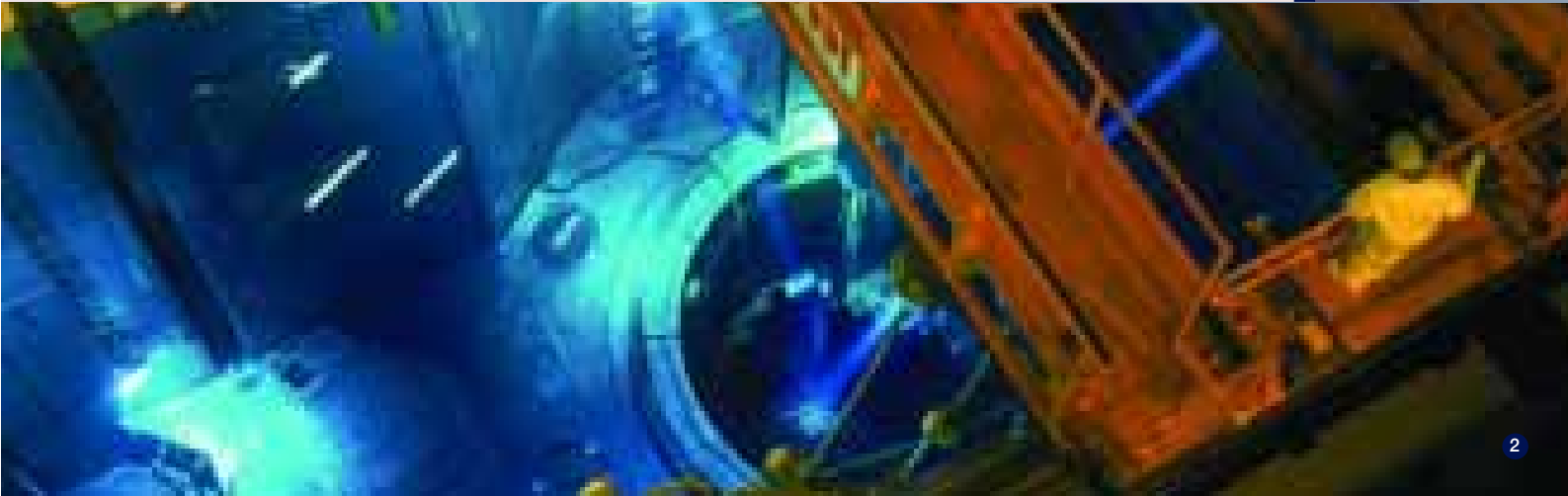


## Principe des Réacteurs à Eau Bouillante (REB)



## Principe des Réacteurs à Eau Pressurisée (REP)





### Fission et réaction en chaîne : les mécanismes fondamentaux de l'énergie nucléaire

La fission et la réaction en chaîne sont deux phénomènes provoqués et valorisés dans le cœur des centrales nucléaires. Ils y produisent de l'énergie sous forme de chaleur.

#### Les atomes

Toute matière est formée d'atomes. Tous les atomes sont structurés de la même façon : l'essentiel de la masse est concentré dans le noyau central formé de neutrons et de protons, l'essentiel du volume est occupé par les électrons qui gravitent autour de ce noyau. Les protons et les électrons sont porteurs de charges électriques. Chaque proton est porteur d'une charge positive, chaque électron d'une charge négative. Les neutrons ne sont pas électriquement chargés. Dans chaque atome, il y a autant de protons que d'électrons, ainsi, l'atome est électriquement neutre. Un élément chimique peut présenter des variations quant au nombre de neutrons qui composent le noyau de ses atomes. On dit alors qu'il existe plusieurs isotopes de cet élément.

#### Les propriétés remarquables de l'uranium 235

L'atome d'uranium 235 est peu abondant dans l'uranium naturel, mais il est le seul isotope naturel qui possède une très grande réactivité aux neutrons. Sous l'impact d'un neutron, l'atome se divise en deux atomes plus petits, en expulsant des neutrons et en libérant de l'énergie : c'est le phénomène de fission.

#### La fission est une réaction qui produit une grande quantité d'énergie

Chacun des neutrons expulsés lors de la fission d'un atome d'uranium 235 peut percuter un autre atome d'uranium 235, donc provoquer sa fission avec un nouveau dégagement d'énergie et l'expulsion de neutrons qui vont à leur tour... : c'est la "réaction en chaîne". Cette réaction se transmet à très grande vitesse d'un atome à l'autre et permet ainsi d'obtenir une énergie additionnée considérable.

- 2 *Chargement du réacteur 1 à Civaux en France.*
- 3 *Mécanismes de commande de grappes de contrôle.*
- 4 *Ingénierie de l'EPR.*

### L'EPR (European Pressurized water Reactor)

L'EPR est un réacteur de la filière REP. Il utilise comme combustible de l'oxyde d'uranium modérément enrichi jusqu'à 5 % en  $^{235}\text{U}$  ou de l'oxyde mixte d'uranium (MOX). Sa puissance électrique nette est dans la gamme des 1 600 MWe.

Il apporte :

- des gains importants en performance (disponibilité supérieure à 90 %, charges d'exploitation réduites) qui se traduisent par une compétitivité accrue permettant de produire de l'électricité à un coût inférieur de 20 % à celui de l'électricité issue du gaz,
- des avancées significatives en sûreté : déjà infime avec les REP, la probabilité de fusion du cœur est encore réduite d'un facteur 10 avec l'EPR. De plus, si malgré tout, un tel événement survenait, il n'aurait pas de conséquences significatives à l'extérieur de la centrale en raison de l'extrême résistance de l'enceinte de confinement qui renferme le réacteur,
- des réponses aux préoccupations de développement durable : par conception, l'EPR produit plus d'électricité à partir d'une quantité donnée de combustible. L'uranium est économisé (-15 %) et la production de quantités de déchets réduite (-15 %).

### Les réacteurs à neutrons rapides

Dans ces réacteurs, les neutrons n'ont pas besoin d'être ralentis, d'où leur nom. Le fluide caloporteur est soit un métal liquide (souvent le sodium) soit un gaz inerte (l'hélium). Leur combustible contient du plutonium, élément artificiel qui, comme l'uranium 235, a la propriété d'être fissile. Le cœur des réacteurs à neutrons rapides contient également de l'uranium 238 qui, bien que n'étant pas fissile et ne participant donc pas à la réaction en chaîne, présente la propriété de se transformer en plutonium en absorbant un neutron. Aussi,



## COMPRENDRE

### Le contrôle de la réaction nucléaire

Pour régler l'intensité d'une réaction de fission en chaîne auto-entretenue, on joue sur le nombre de neutrons disponibles. Pour cela, on introduit de façon contrôlée dans le cœur du réacteur des barres constituées de matériaux absorbant les neutrons. Pour étouffer complètement la réaction, on introduit entièrement les barres ce qui peut être fait très rapidement en cas d'arrêt d'urgence.

lorsqu'ils fonctionnent en mode surgénérateur, ces réacteurs produisent plus de plutonium qu'ils n'en consomment multipliant ainsi considérablement la récupération du contenu énergétique des ressources d'uranium. Lorsqu'ils fonctionnent en mode sous-générateur, ces réacteurs sont particulièrement bien adaptés à l'incinération des déchets radioactifs.

### La filière à eau lourde\*

Cette filière, qui utilise l'eau lourde comme modérateur, a été surtout développée au Canada avec les réacteurs de type CANDU. L'intérêt de l'eau lourde est qu'elle absorbe moins les neutrons que l'eau ordinaire ce qui permet d'utiliser l'uranium naturel comme combustible et se passer ainsi de l'enrichissement. Les autres propriétés physiques de l'eau lourde étant voisines de celles de l'eau ordinaire, on peut également l'utiliser comme caloporteur.

\*D<sub>2</sub>O, combinaison d'oxygène et de deutérium (atome d'hydrogène lourd) par opposition à l'eau ordinaire, H<sub>2</sub>O, souvent appelée "eau légère".

## COMPRENDRE

La zone du réacteur nucléaire qui contient le combustible, source de chaleur, s'appelle le "cœur". Un certain nombre de dispositions sont mises en œuvre pour réussir la réaction de fission en chaîne auto-entretenue dans le cœur du réacteur.

### Modérateur et caloporteur

Les neutrons sont libérés par la fission des atomes d'uranium 235 à une vitesse très élevée. Or, leur interaction avec de nouveaux atomes d'uranium 235 pour produire de nouvelles fissions est beaucoup plus facile s'ils sont lents. D'où la pratique qui consiste à ralentir les neutrons (on dit à les "modérer") pour favoriser la réaction en chaîne. Dans les réacteurs à eau bouillante (REB) et les réacteurs à eau pressurisée (REP), qui constituent la majorité de la puissance électronucléaire installée dans le monde, le modérateur n'est autre que l'eau dans laquelle baigne le cœur. En effet, de la même façon qu'une boule de billard est fortement ralentie par le choc contre une boule de la même masse qu'elle (alors qu'elle rebondit contre un mur ou contre une grosse boule), pour ralentir les neutrons, dont la masse est faible, il faut qu'ils rencontrent des atomes légers. Les atomes d'hydrogène contenus dans l'eau font donc parfaitement l'affaire. Dans ces types de réacteurs, la même eau sert donc de modérateur et de "caloporteur" (qui "porte" la chaleur du cœur du réacteur vers le turboalternateur).

Dans les réacteurs dont le fluide caloporteur est l'hélium, on utilise du graphite comme modérateur car les atomes de carbone sont suffisamment légers pour remplir ce rôle. Dans les réacteurs à neutrons rapides, il n'y pas de modérateur et le fluide caloporteur, peut être soit un métal liquide (sodium, ...) ou un gaz (hélium).

# L'utilisation du combustible dans le cœur

## Produire de la chaleur puis de l'électricité



Les assemblages combustibles, disposés selon une géométrie précise, forment le cœur du réacteur. Pour un réacteur à eau légère de 900 MWe, le cœur comprend ainsi 72,7 tonnes d'uranium enrichi. Ce combustible se transforme progressivement. Il "s'use" et doit être régulièrement remplacé.



### Une transformation progressive du combustible

Chaque assemblage combustible peut séjourner jusqu'à cinq ans dans le cœur du réacteur. Durant cette période, la fission de l'uranium fournit la chaleur nécessaire à la production d'électricité.

Mais le combustible subit aussi des transformations qui le rendent progressivement moins performant :

→ la teneur en uranium 235 diminue à la suite des phénomènes de fission ;

→ du plutonium, issu de la capture des neutrons par les atomes d'uranium 238, se forme et participe par fission à la production de l'énergie de la même manière que l'uranium 235 ;

→ la fission de l'uranium 235 et la fission du plutonium donnent des produits de fission. La capture des neutrons donne aussi d'autres actinides, dits actinides mineurs : neptunium, américium, curium... Ce sont eux qui constituent les déchets ultimes de la réaction, car, contrairement aux autres produits, ils ne sont pas recyclables. Ils présentent aussi l'inconvénient de rendre le combustible moins réactif, c'est pourquoi on les appelle "isotopes poisons".

Lorsqu'il est trop usé pour entretenir la réaction nucléaire et pour produire de l'énergie de manière performante, le combustible doit être retiré du cœur du réacteur et remplacé par du combustible neuf. Le combustible utilisé contient encore une forte proportion de matières énergétiques recyclables.

La radioactivité du combustible usé est supérieure à celle du combustible neuf, ce qui impose des précautions particulières pour toute manipulation. Avant de procéder à la récupération des différentes matières contenues dans le combustible usé, les assemblages retirés du cœur séjournent dans les piscines attenantes au réacteur, où ils se "désactivent". L'eau constitue une barrière efficace contre les rayonnements, elle permet aussi de refroidir les assemblages qui, pendant quelques temps, continuent de produire de la chaleur. Ce n'est qu'à l'issue de cet entreposage provisoire, lorsque leur activité a déjà fortement diminué, que les assemblages usés sont transportés jusqu'à l'usine de traitement de La Hague.

1 Assemblages combustibles dans le cœur du réacteur.

2 Emballage de transport de combustibles usés.



# du réacteur



## SAVOIR PLUS

### Transport des combustibles usés : l'exigence de sûreté

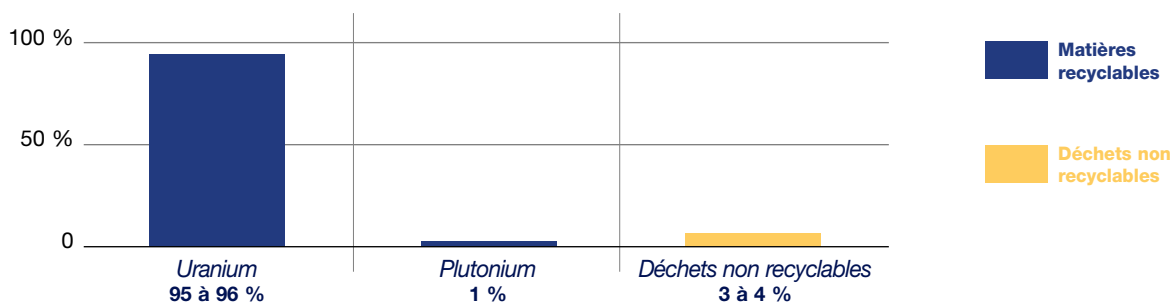
La radioactivité des matières nucléaires impose des normes de conditionnement et de transport rigoureusement définies entre les différentes étapes du cycle du combustible. Pour transporter les combustibles usés des centrales jusqu'aux usines de traitement, on utilise des emballages robustes de près de 100 tonnes appelés "châteaux". Ces châteaux sont conçus dans un souci de sûreté et de sécurité absolue, pour le transport des matières radioactives par route, par rail ou par mer. Chaque année, près de cinq nouveaux concepts sont développés et 3 000 transports multinationaux sont réalisés.

## SAVOIR PLUS

### Environnement : respecter et anticiper la réglementation

Dès sa conception, toute installation du cycle du combustible nucléaire tient compte de l'impératif sécurité et du principe "ALARA" ("As Low As Reasonably Achievable" ou "aussi bas que raisonnablement possible"), aussi bien en ce qui concerne les doses de radioactivité délivrées, qui sont inférieures aux limites de sécurité imposées, qu'en ce qui concerne la nature et la quantité des effluents : volume des rejets liquides et gazeux, traitement des effluents, règles d'exploitation...

## Composition d'un assemblage combustible usé



Alors que le combustible neuf contient de l'ordre de 3 % d' $^{235}\text{U}$  et 97 % d' $^{238}\text{U}$ , le même combustible après séjour dans le cœur du réacteur contient encore 1 % d' $^{235}\text{U}$ , 95 % d' $^{238}\text{U}$ , 1 % de plutonium et environ 3 % de déchets non recyclables (produits de fission et actinides mineurs). Ainsi, le combustible "usé" compte près de 97 % de matières récupérables et valorisables grâce aux opérations de traitement et de recyclage.

# La fabrication des équipements

## Équiper les centrales nucléaires



AREVA propose à l'industrie l'éventail de capacités de fabrication le plus complet pour l'équipement de centrales nucléaires et leurs composants. Ses équipes conçoivent et fabriquent les composants de plus de 90 réacteurs dans le monde. Des capacités et des compétences technologiques qui s'enrichissent *de facto* par l'expérience acquise au travers de plus de 1 500 réacteurs-années en exploitation de centrales nucléaires.



### **Numéro 1 mondial des composants nucléaires**

Deux principales entités fabriquent des composants nucléaires. L'usine de Chalon/St-Marcel, en Bourgogne du sud, totalement dédiée au nucléaire, assure la fabrication des composants lourds de l'îlot nucléaire. L'usine de Jeumont dans le Nord de la France, conçoit et fabrique les composants mécaniques mobiles de l'îlot : groupes motopompes primaires et mécanismes de commande de grappes ainsi que les pièces de rechange associées comme des moteurs, arbres, joints d'étanchéité et systèmes hydrauliques de pompes primaires. St-Marcel et Jeumont fournissent ces composants aux centrales nucléaires en France et à l'export : Afrique du Sud, Belgique, Corée, États-Unis, Grande-Bretagne, République populaire de Chine, Suède, Suisse. Les deux sites industriels sont dotés de moyens exceptionnels et sont reconnus pour leurs références uniques et un niveau de qualité absolu. Leurs certifications témoignent de la conformité aux exigences d'Assurance Qualité : ASME, ISO 9001, RCC-M, réglementation française des réacteurs nucléaires à eau pressurisée.

### **Au cœur de la chaîne de réalisation des chaudières nucléaires : l'usine de Chalon/St-Marcel**

Cette entité fabrique des cuves, des couvercles et des internes de cuve, des générateurs de vapeur, des pressuriseurs et des composants connexes destinés aux producteurs d'électricité en France et à l'international, dans le strict respect des exigences et réglementations en vigueur. L'usine intervient dans la conception des équipements nucléaires à plusieurs niveaux. En amont, elle adapte les données de dimensionnement issues de l'ingénierie aux contraintes liées à la production et au contrôle qualité. En aval, elle réalise des dossiers d'analyse du comportement.

### **Une capacité de production sans équivalent en Europe**

Depuis sa création en 1975, près de 500 composants lourds ont été fabriqués à l'usine de Chalon/St-Marcel pour des centrales dans le monde entier. La capacité annuelle de production de l'usine est de plus de deux centrales à 4 boucles (PWR) soit 2 cuves, 8 générateurs de



2

vapeur, 2 pressuriseurs, des composants connexes type accumulateurs, échangeurs auxiliaires, internes, supportages... et par exemple pour les composants de remplacement, 18 à 20 générateurs de vapeur.

### **Des moyens exceptionnels**

Sur un site de 35 ha, l'usine compte 35 800 m<sup>2</sup> d'ateliers couverts. Elle est située à proximité d'une darse ouvrant sur la Saône, ce qui facilite le transport des composants par voie fluviale jusqu'à la Mer Méditerranée et elle bénéficie d'un emplacement stratégique au sein des réseaux ferrés et routiers européens. L'encadrement, ingénieurs et techniciens de haut niveau représentent plus de 50 % de son effectif. Elle bénéficie d'un support scientifique de premier plan grâce au département Calculs qui offre des moyens et compétences en calculs en matière d'éléments finis, études de fatigue, mécanique de la rupture, et au Centre technique qui développe des techniques de soudage et de contrôles non destructifs.



3

- 1 *Barge chargée d'une cuve, d'un couvercle de cuve, d'un générateur de vapeur et d'un pressuriseur 900 MWe destinés à la centrale nucléaire de Ling Ao 1 en Chine.*
- 2 *Vue aérienne de l'usine de Chalons/Saint-Marcel en France.*
- 3 *Halle d'assemblage des composants lourds.*

## La fabrication des équipements



4



### **Une technologie maîtrisée et une expérience éprouvée : l'usine de Jeumont**

Depuis plus d'un siècle, les équipes de l'usine conçoivent, fabriquent et interviennent dans la maintenance d'équipements électriques et de composants mécaniques destinés à la production d'énergie thermique. Sur un site unique sont concentrées les activités de conception, production, essais et maintenance des groupes motopompes primaires et des mécanismes de commande de grappe. Les équipes interviennent aujourd'hui sur plus de 110 réacteurs.

### **Concevoir et réaliser des produits performants**

L'usine est le seul constructeur de groupes motopompes primaires complets (GMPP). Elle en a fabriqué plus de 220 GMPP à ce jour. Ceux-ci assurent la circulation du fluide primaire entre le réacteur et le générateur de vapeur dans chacune des 3 boucles (900-1 000 MWe) ou des 4 boucles

(1 300 et 1 450 MWe). Ils contribuent de manière importante à la disponibilité des centrales nucléaires et à leur sûreté. Pour répondre à l'augmentation de la taille des centrales, à la nécessité d'inertie élevée, l'usine a conçu des GMPP à joints d'arbre à fuite contrôlée qui équipent aujourd'hui les réacteurs 900 MWe, 1 300 MWe et 1 450 MWe. Ses équipes apportent leur expertise dans le domaine des pompes, en particulier pour les études de nouvelles générations de réacteurs.

### **Améliorer constamment la fabrication des pièces de rechange**

Utilisant pleinement son retour d'expérience en tant qu'OEM (Original Equipment Manufacturer) et en tant que prestataire de services dans le suivi et la maintenance des GMPP et MCG (mécanismes de commande de grappes), l'usine s'est spécialisée dans la fourniture de pièces de rechange. Celles-ci intègrent des améliorations constantes au niveau de la conception et de la fabrication.



5



6

## SAVOIR PLUS

### Des moyens d'essais imposants pour assurer sûreté et fiabilité des équipements.

L'usine de Jeumont dispose de 2 boucles d'essais pour tester les GMPP, 3 bancs d'essais pour les joints d'arbres, 2 boucles d'essais à froid et une boucle d'essais à chaud pour les MCG.

## SAVOIR PLUS

### Les mécanismes de commande de grappes (MCG) : la fiabilité garantie pour les installations.

Un MCG est un vérin électromagnétique rigoureusement étanche. Implanté sur la partie supérieure du couvercle du réacteur, il assure 3 fonctions essentielles :

- l'insertion ou l'extraction des barres de contrôle du cœur du réacteur,
- le maintien de la barre de contrôle dans la position requise,

→ la chute des barres de contrôle par gravité dans le cœur du réacteur en cas d'arrêt d'urgence.

L'usine de Jeumont fournit les MCG de type L106, L106A, L106RL... et fournira également les mécanismes de commande de grappe des nouvelles générations de réacteurs.

## Quelques chiffres...

- Une cuve + un couvercle 1 450 MWe : 432 tonnes et 14 m de hauteur.
- Un générateur de vapeur 1300 MWe : 460 tonnes et 22 m de hauteur.
- Un pressuriseur 1 300 MWe : 117 tonnes et 13,50 m de hauteur.
- 129 km de tubes sur un seul générateur de vapeur de 1 450 MWe.
- Un groupe motopompe primaire : 110 tonnes et 8 m de hauteur. 220 GMPP fabriqués à ce jour et plus de 400 révisés.
- Un mécanisme de commande de grappes : 180 pièces et 6,5 m de hauteur. 4500 MCG fabriqués à ce jour et 5000 inspectés.

4 Halle d'usinage des corps de pompes primaires.

5 Mécanismes de commande de grappes.

6 Usinage pièces de joints sur tour numérique.

# Les services nucléaires

## L'inspection et la maintenance des centrales nucléaires



Après leur mise en service et pendant toute leur durée de vie, les centrales nucléaires font l'objet d'opérations d'inspection et de maintenance destinées à maintenir en permanence leur haut niveau de sûreté et leurs performances techniques. Ces opérations sont effectuées lors des arrêts de la centrale nucléaire pour le rechargement en combustible soit tous les 12, 18 ou 24 mois selon les cas.



Plus de 3 000 personnes basées en France, en Allemagne et aux États-Unis travaillent au service des exploitants de centrales nucléaires. Ils disposent de la gamme de compétences la plus large au monde dans le domaine des services aux réacteurs de types PWR, BWR et VVER et interviennent régulièrement dans 30 pays.

Leurs prestations comportent des opérations d'inspection, d'entretien courant et de maintenance ainsi que des opérations de réparation, de remplacement de composants ou de mise à niveau technologique de certaines installations. Ces opérations sont effectuées conformément aux règles, codes et normes édictées par les autorités de sûreté des différents pays et par les exploitants.

### Les inspections et les contrôles non-destructifs

Ces inspections réglementaires concernent tous les équipements de la chaudière nucléaire et ont pour objectif de vérifier la non apparition de défauts dans les matériaux et structures de ces équipements. Elles répondent à des exigences définies par les autorités de sûreté et par les exploitants. Elles sont réalisées lors des arrêts de la centrale selon des périodicités préalablement définies par la réglementation. Elles font largement appel à la robotique. Toute une gamme de méthodes de contrôles non-destructifs nécessaires à ces inspections sont mises à disposition : contrôles par ultrasons, contrôles par courants de Foucault, contrôles radiographiques, examens visuels et télévisuels, ressuage, test d'étanchéité, etc.



## La mesure nucléaire : une large palette de services

Cette activité assure la conception et la fabrication des instruments et des systèmes clés en main de mesure des rayonnements radioactifs. Elle développe une large palette de services : matériel de radioprotection, outils de mesure de laboratoire ou d'équipements industriels. Elle opère principalement sur trois marchés :

- la recherche fondamentale en physique nucléaire,
- les laboratoires d'analyse (qui mesurent la radioactivité pour la protection de l'environnement, la santé...),
- l'industrie nucléaire.

- 1 "ARTUR", robot de maintenance utilisé lors du remplacement de tuyauterie en environnement hostile.
- 2 Mise en place du robot de maintenance "ARAMIS" pour intervention sur générateur de vapeur.
- 3 Réalisation d'appareils de radioprotection.

## Les services nucléaires



4



5



### **Les opérations d'entretien, de réparation et de rénovation**

Lors des arrêts de la centrale, différents types d'opérations d'entretien sont effectuées. Il s'agit, d'une part, des opérations courantes réalisées à chaque arrêt et, d'autre part, des opérations plus rares et réalisées exceptionnellement au cours de la vie de l'installation, telles que les réparations ou les remplacements de composants.

#### **Les activités de maintenance réalisées à chaque arrêt**

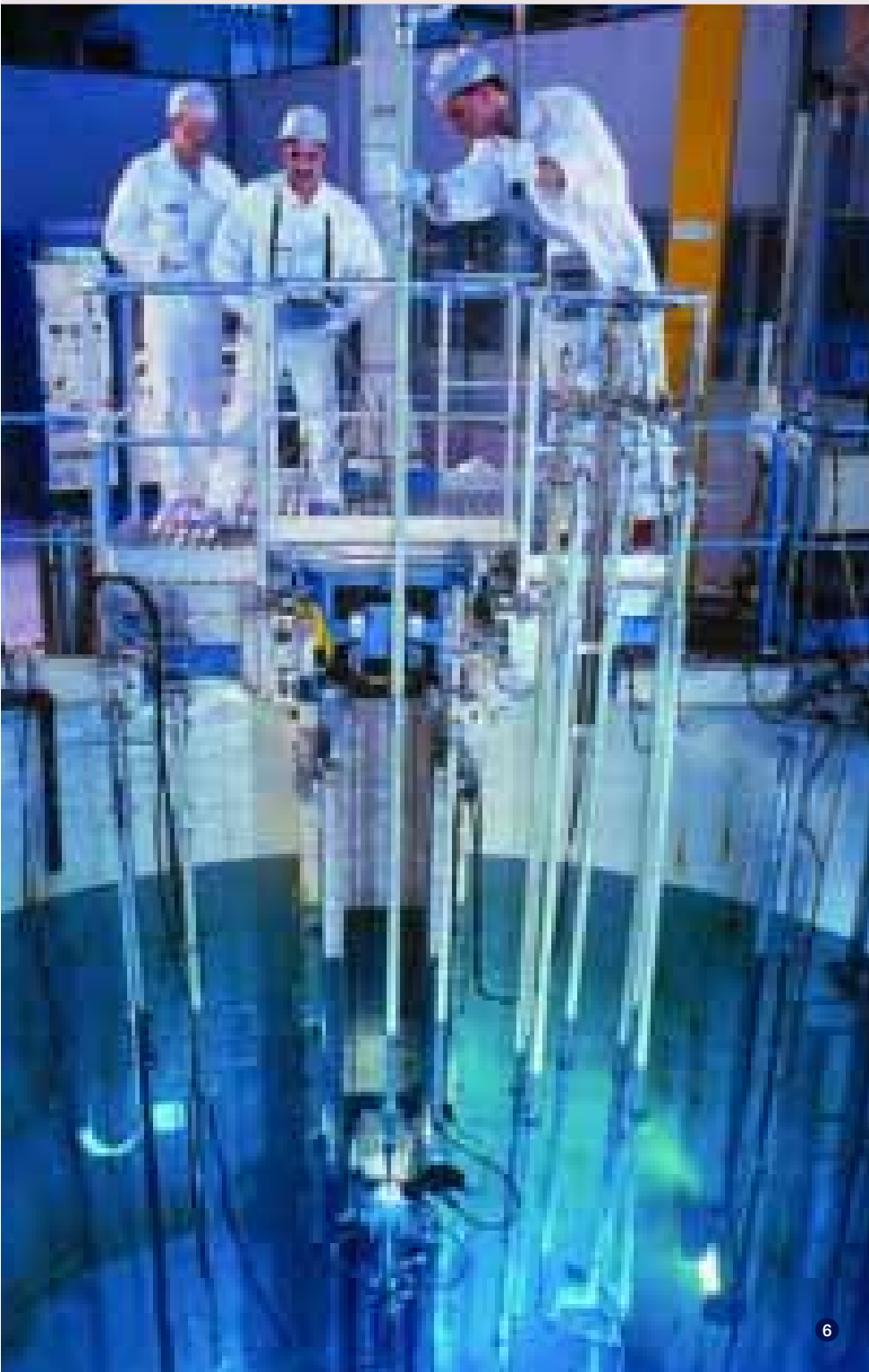
Elles concernent les opérations courantes liées à la préparation de la cuve du réacteur pour effectuer le rechargement en combustible, les diagnostics de l'état du matériel destinés à prévenir les éventuelles défaillances et les vérifications du bon fonctionnement des équipements mécaniques comme les robinets, vannes, pompes ou les équipements électriques et le système de commande du réacteur.

### **Les activités de réparation ou de remplacement de composants**

Pour garantir un fonctionnement sûr et performant de la centrale tout au long de son existence, des composants de la chaudière nucléaire peuvent être réparés ou remplacés. Il s'agit essentiellement d'opérations sur les gros composants qui requièrent les connaissances et les savoir-faire du constructeur de centrales nucléaires.

#### **Les activités de rénovation**

Compte tenu de la durée de vie des centrales nucléaires, de l'évolution des exigences de sûreté et des technologies, il est nécessaire d'effectuer périodiquement des opérations de remise à niveau afin de disposer d'une technologie toujours d'actualité, d'améliorer encore le niveau de sûreté et d'éviter l'obsolescence des matériels. Ces activités concernent aussi bien les matériels mécaniques que les systèmes électriques et de commande du réacteur.



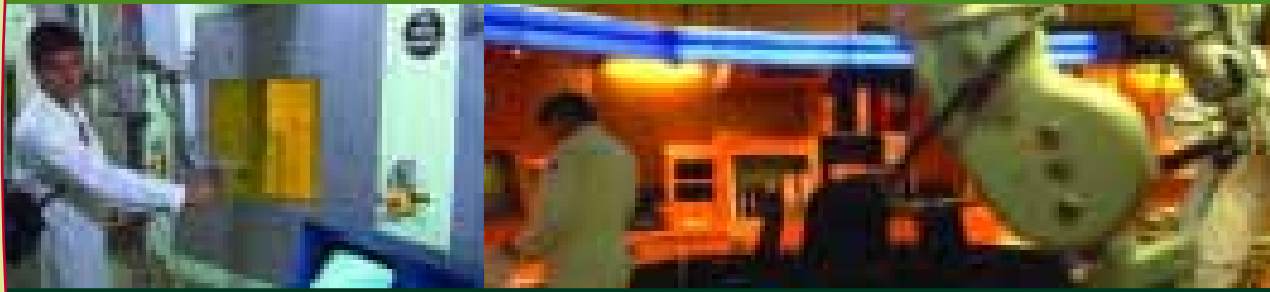
- 4 Remplacement d'un générateur de vapeur à la centrale de Gravelines en France.
- 5 Amélioration du contrôle commande, mise en place du système TELEPERM XS à la centrale nucléaire de Beznau en Suisse.
- 6 Entraînement des équipes au CETIC (Chalon-sur-Saône, France) pour la réparation d'assemblages combustibles.

## SAVOIR PLUS

### **Des opérateurs formés en permanences, des procédés qualifiés**

Les opérations sont effectuées à l'intérieur du bâtiment réacteur selon des procédures très strictes en matière de formation des opérateurs, de qualification des procédés mis en œuvre et de respect des règles de radioprotection. Tous les opérateurs des services destinés à réaliser ces opérations et tous les procédés utilisés sont qualifiés sous le contrôle des autorités de sûreté et des exploitants. Les méthodes utilisées sont validées dans des centres spécialisés sur des maquettes à l'échelle 1 des composants des centrales nucléaires afin de recréer l'environnement de travail réel. Ces tests permettent en outre d'assurer la formation des opérateurs et vérifier le bon déroulement des opérations préalablement à l'intervention en centrale.

6



## **Le traitement et le recyclage**



**du combustible utilisé**

# Le traitement du combustible usé

Uranium, plutonium, produits de fission :  
séparer, recycler, conditionner les composants du combustible usé.



**Le traitement des combustibles usés respecte le principe de base de la gestion des déchets, qui consiste à récupérer les matières valorisables et conditionner les déchets ultimes. Le traitement permet de gérer avec efficacité la fin du cycle du combustible nucléaire. Choisie par la France et les pays pour lesquels l'utilisation optimale de l'énergie nucléaire est une priorité, cette solution est en parfait accord avec les principes du développement durable dont l'objectif est de concilier à la fois : développement économique, équilibre social, respect et protection de l'environnement.**



Le traitement offre un triple intérêt :

→ il permet de recycler les matières énergétiques - uranium, plutonium - encore contenues dans le combustible usé, dont 96 % sont valorisables sous forme de MOX.

→ il facilite l'entreposage (provisoire) ou le stockage (définitif) des déchets non valorisables qui sont isolés afin de réduire leur volume, et conditionnés grâce à des techniques adaptées.

→ il permet de réduire par 10 la toxicité à long terme des déchets ultimes et par 5 leur volume. Ces derniers sont conditionnés comme des produits industriels suivant des spécifications techniques précises et approuvées internationalement.

## **Le traitement à l'usine de La Hague**

L'usine de traitement de La Hague a été mise en service en 1966. Elle a depuis été constamment modernisée pour répondre aux exigences de

ses clients, tout en satisfaisant à des critères très stricts de protection de l'environnement.

Ainsi, l'atelier de compactage des coques (ACC), résultat d'un important programme de recherche & développement, a été mis en production en 2002. Les coques, embouts et déchets technologiques sont aujourd'hui compactés et conditionnés en colis standards.

Les bénéfices sont de trois ordres :

→ diminution par 5 du volume des déchets traités,

→ optimisation de la manutention, du transport et de l'entreposage,

→ accroissement de la rentabilité des opérations. Aujourd'hui, l'usine de traitement de La Hague se consacre essentiellement au traitement des combustibles des réacteurs à eau légère. L'établissement assure un service industriel pour le compte de plus de 20 compagnies d'électricité européennes, dont EDF\*, et japonaises.

\*Electricité de France



## L'ingénierie nucléaire

A l'origine, cette activité consistait à concevoir, construire et démarrer les installations de fin de cycle.

Elle a ensuite développé son savoir-faire, apportant aux opérateurs mondiaux les services nécessaires à l'étude et à la réalisations de nouvelles installations nucléaires, ainsi qu'à l'optimisation d'installations existantes.

Le métier d'ingénierie se décline en quatre axes :

- Ingénierie de procédés : industrialisation des procédés mis au point par les centres de recherche et développement des procédés existants pour les adapter à des paramètres spécifiques.
- Ingénierie de réalisation : conception, réalisation et mise en service des installations industrielles.
- Ingénierie de services : assistance aux exploitants dans les évolutions des installations en fonctionnement.
- Ingénierie d'assainissement et de démantèlement : accompagnement des opérateurs, de la mise à l'arrêt définitif de l'installation à la restauration du site, en passant par les opérations d'assainissement et de démantèlement.



### COMPRENDRE

#### Le plutonium est créé au cœur des centrales.

Le plutonium est d'origine artificielle. Il se forme par réaction nucléaire à partir de l'uranium utilisé comme combustible dans les réacteurs. Au cours de cette réaction, l'uranium 238 capture un neutron et se transforme en uranium 239. A son tour, l'uranium 239 transmute en neptunium 239. Ensuite, tous les deux jours, la moitié du neptunium 239 se transforme en plutonium 239.

- 1 *Atelier de déchargement à sec de combustible. Usine de traitement des combustibles usés de La Hague, France.*
- 2 *Vue aérienne de l'usine de traitement des combustibles usés de La Hague, France.*
- 3 *Atelier de conversion et conditionnement du plutonium. Usine de traitement des combustibles usés de La Hague, France.*

## Le traitement du combustible usé



- 1 *Piscine d'entreposage des combustibles usés. Usine de traitement des combustibles usés de La Hague, France.*
- 2 *Opérateurs utilisant des télémanipulateurs. Usine de traitement des combustibles usés de La Hague, France.*
- 3 *Retour de résidus vitrifiés au Japon.*
- 4 *Transport d'emballages de combustibles usés.*

### **A chaque produit isolé sa destination**

Après avoir séjourné dans les piscines des réacteurs des centrales nucléaires, les combustibles usés poursuivent leur désactivation en piscine pendant 5 à 8 ans à l'usine de La Hague. Passé cette période, les assemblages sont sortis de l'eau et cisailés en tronçons de quelques centimètres, ce qui permet d'en extraire le matériau nucléaire par dissolution dans l'acide.

Grâce à des solvants, les produits de fission, le plutonium et l'uranium sont séparés. L'uranium est concentré sous forme de nitrate liquide puis expédié soit vers l'usine COMURHEX-Pierrelatte en vue d'une reconversion en  $UF_6$ , soit vers l'usine TU5, également située à Pierrelatte, en vue de sa transformation en oxyde pour un recyclage ultérieur. Le plutonium est conditionné sous forme d'oxyde en boîtes étanches.

Il peut ainsi être recyclé et intégré dans la fabrication de nouveaux éléments combustibles (MOX : combustible à oxyde mixte uranium-plutonium). Quant aux déchets, ils font l'objet de conditionnements spécifiques, en colis standards approuvés internationalement par les autorités de sûreté, en fonction de leur nature et de leur radioactivité.

### **Retour des produits issus du traitement à leurs propriétaires**

Les sociétés clientes qui envoient leurs combustibles usés pour traitement à l'usine de La Hague en restent propriétaires. Les contrats de traitement prévoient que les parties non-réutilisables du combustible traité soient conditionnées sous forme de résidus ultimes et retournées à leurs propriétaires. Cette opération s'effectue à l'aide de moyens de transport spécifiques terrestres ou maritimes.



## SAVOIR PLUS

### Télemanipulation et robotique

Les opérations effectuées à l'usine de La Hague peuvent se décomposer en trois étapes : la réception et l'entreposage des combustibles avant traitement, le traitement proprement dit et le conditionnement des déchets. Compte tenu de la forte radioactivité des combustibles usés, les contraintes de sécurité et de protection du personnel et de l'environnement sont très sévères. Toutes les manipulations, toutes les opérations mécaniques ou chimiques sont effectuées à distance, par télémanipulation ou robots de conduite.



### Transport et entreposage des matières radioactives : l'exigence de sûreté

Cette activité assure la conception et la réalisation d'emballages spéciaux, le transport des matières nucléaires et leur entreposage. AREVA développe des solutions sur mesure pour des clients internationaux, dans un souci permanent de sécurité des personnes, de sûreté des transports et de protection de l'environnement.

# Le recyclage du combustible usé

Valoriser les matières énergétiques récupérées par le traitement



Le traitement permet de récupérer le plutonium, qui possède la propriété d'être fissile. Son utilisation pour la fabrication de combustible MOX valorise son important potentiel énergétique. Lors des opérations de traitement, on récupère également de l'uranium qui contient encore environ 1 % de  $^{235}\text{U}$  dont une partie est recyclée. Le reste est entreposé sous une forme stable. Il pourra être à nouveau enrichi lorsque les conditions du marché le justifieront.



Un gramme de plutonium 239 peut générer autant d'électricité que plus d'une tonne de pétrole. Fissile, ce produit peut jouer dans un combustible MOX (mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium) le rôle que tient le  $^{235}\text{U}$  dans un combustible "neuf". C'est pourquoi, le plutonium récupéré dans les combustibles usés entre dans la composition des combustibles MOX. Le recyclage du plutonium dans les combustibles MOX permet :

- de diminuer la quantité et la toxicité des déchets : le plutonium, composant important de la radiotoxicité du combustible, est consommé au lieu d'être stocké,
- d'économiser les ressources naturelles : gaz naturel, uranium.

## **Le MOX, un combustible dont le plutonium est le matériau fissile**

En France, le combustible MOX est fabriqué dans l'usine de MELOX. Située dans le département du Gard, elle occupe la place de leader mondial pour la production de combustible MOX. Le MOX contient de 5 à 11 % d'oxyde de pluto-

niun mélangé à l'oxyde d'uranium appauvri ( $\text{UO}_2$ ) en provenance de l'usine TU2 à Pierrelatte. Les techniques de fabrication utilisées sont similaires à celles mises en œuvre pour la production du combustible nucléaire conventionnel. Comme pour le combustible à base d'uranium enrichi, le combustible MOX est formé de pastilles introduites dans des "crayons" pour constituer les assemblages combustibles. Seulement, les diverses opérations doivent tenir compte de contraintes de sûreté et de sécurité spécifiques. Comparable au combustible à l'uranium enrichi en terme de comportement en réacteur, le MOX est utilisé commercialement depuis de nombreuses années en Europe dans les réacteurs à eau légère : 1982 en Allemagne, 1985 en Suisse, ou 1987 en France. 35 réacteurs européens fonctionnent aujourd'hui avec du combustible MOX. En France, EDF\* utilise du combustible MOX dans 20 réacteurs sur les 28 techniquement adaptés pour recevoir ce type de combustible. Au Japon, les électriciens ont prévu de charger 16 à 18 de leurs réacteurs avec ce combustible. Dans le cas français, les assemblages MOX constituent 30 % du cœur du réacteur, les 70 % restants étant

\*Electricité de France



des assemblages contenant de l'uranium enrichi. Les technologies mises en œuvre par AREVA dans la fabrication du MOX peuvent aussi être utilisées pour concourir à un objectif de désarmement. Ainsi, dans le cadre des accords internationaux de désarmement, les États-Unis et la Russie ont tous deux pris la décision de recycler une partie (68 tonnes) de leur plutonium militaire déclaré en excès sous forme de combustible MOX.

- 1 Hall de fabrication des assemblages combustibles MOX. Contrôle final de l'assemblage. MELOX, France.
- 2 Presse à pastille MOX.
- 3 Assemblage combustible MOX.

# Le conditionnement des déchets

Des colis de déchets standardisés, pour des périodes et des niveaux d'activité différents



Les étapes du cycle du combustible génèrent des déchets radioactifs de faible, moyenne et haute activité, dont la durée de vie est variable. Le traitement du combustible nucléaire usé, qui sépare les différents composants, simplifie la mise en œuvre de conditionnements et de solutions de stockage adaptés à chaque cas.



Les déchets isolés lors des opérations de traitement sont conditionnés sur le site même de l'usine de La Hague, "en ligne", c'est-à-dire au fur et à mesure de leur séparation. Les produits de fission et les actinides mineurs ainsi que les éléments de structure des assemblages sont conditionnés dans des colis standard de déchets.

## La vitrification

Des produits de fission (strontium, césium) et des actinides mineurs (neptunium, américium...) se forment pendant le séjour du combustible dans le réacteur. Une fois isolés, ils concentrent dans un faible volume la quasi-totalité de la radioactivité du combustible usé. Ces produits non recyclables constituent des déchets ultimes. Ils sont incorporés dans du verre, qui est ensuite coulé dans des conteneurs étanches en acier inoxydable. Les conteneurs sont alors placés dans des puits ventilés avant d'être retournés à leurs propriétaires, les compagnies d'électricité. La vitrification permet d'immobiliser les produits de fission de façon durable, car le verre est insoluble dans l'eau et reste inerte au contact des agents physico-chimiques naturels.

## Le compactage

Les matériaux de structure du combustible, également non recyclables, sont classés déchets de moyenne activité. Appelés coques et embouts, ces déchets sont compactés sous forme de galettes et placés dans des conteneurs de même type que ceux utilisés dans les ateliers de vitrification. Cette standardisation facilite les opérations de manutention, de transport et de stockage.

## Le stockage

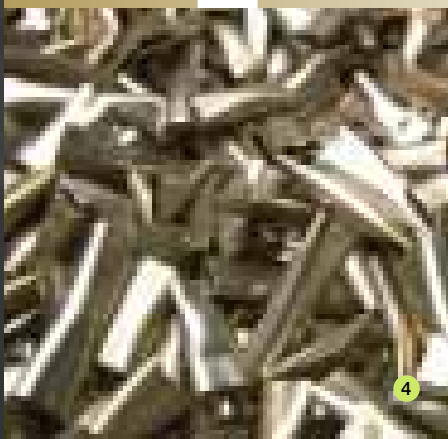
Le conditionnement des déchets a été conçu de façon à offrir de très hautes performances pour leur futur stockage. La durée de vie d'un conteneur de verre, par exemple, est comprise entre 100 000 et 10 000 000 d'années. Grâce à ces caractéristiques exceptionnelles et à la réduction de volume, l'entreposage des déchets est facilité et peut, si nécessaire, s'envisager pendant plusieurs siècles en recourant aux technologies déjà élaborées.



## SAVOIR PLUS

### Réduire le volume et la toxicité des déchets ultimes

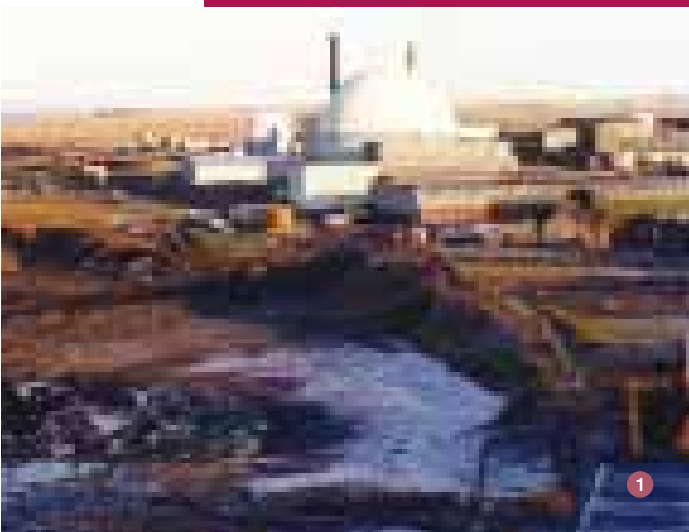
Depuis le début des opérations de traitement en 1966, le volume des effluents et des déchets issus du traitement du combustible usé a été constamment réduit. Aujourd'hui, le traitement d'une tonne de combustible usé génère moins de 0,5 m<sup>3</sup> de déchets de haute ou moyenne activité. Sans les opérations de traitement et de recyclage, le combustible usé est considéré comme un déchet et stocké en l'état, ce qui représente un volume de déchets de haute activité à stocker d'environ 2 m<sup>3</sup>. La toxicité des déchets ultimes est divisée par 10 avec le traitement. De nouveaux progrès sont attendus dans les prochaines années.



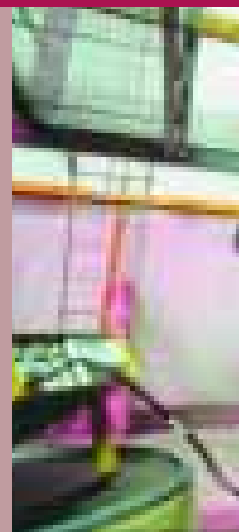
- 1 Colis standards de verres et déchets compactés.
- 2 Coulée de verre dans un atelier de vitrification.
- 3 Presse de compactage.
- 4 Coques cisailées avant compactage.

# Assainissement et démantèlement

L'alliance unique d'exploitants nucléaires et de spécialistes du démantèlement



Quelle que soit leur nature, les installations industrielles arrivent un jour ou l'autre en fin de vie. Rendues obsolètes par l'évolution des technologies, elles sont arrêtées pour laisser place à d'autres modes de production. Les propriétaires de ces installations en restent responsables et se doivent de prendre en charge leur devenir. L'enjeu est d'éliminer les pollutions résiduelles générées pendant l'activité passée pour, à terme, permettre une réutilisation du site.



Les sociétés du groupe sont impliquées depuis plus de vingt ans dans des opérations de démantèlement, au sein de leurs propres installations du cycle du combustible ainsi que sur divers sites en France et à l'international. En alliant l'expérience d'exploitant nucléaire et le savoir-faire des sociétés spécialisées dans les différents métiers du démantèlement, AREVA met à la disposition des opérateurs nucléaires une expertise unique au monde pour les accompagner dans leurs projets de démantèlement et d'assainissement. Cette complémentarité permet d'intervenir efficacement sur l'ensemble des projets, depuis la définition de scénarios, les études de sûreté et l'obtention des autorisations réglementaires, jusqu'à la réalisation des travaux et la gestion des déchets.

A ce jour, plus d'une trentaine de démantèlements d'installations nucléaires ont été menés. AREVA propose son savoir-faire en matière

de démantèlement dans le monde entier : Hanford (USA), Dounreay (Grande-Bretagne), Tchernobyl (Ukraine), Brennilis (France) ainsi que le SNLE Le Redoutable.

- 1 Démantèlement du réacteur rapide au sodium, Dounreay (Grande-Bretagne).
- 2 Opérations de mise à l'arrêt définitif sur le site de Marcoule, France.
- 3 Site de Hanford (USA).



### Les installations de Marcoule

L'usine UP1 de Marcoule a été la première usine de traitement des combustibles usés. Son démantèlement a débuté en 1998. L'objectif est de transformer les installations en locaux à usage conventionnel ou en ICPE (Installation Classée pour la Protection de l'Environnement). Si les techniques mises en œuvre sont déjà connues pour la plupart, leur application à l'échelle d'un site industriel représente un enjeu important. Du fait même de son envergure, le démantèlement de l'usine de Marcoule constitue une première mondiale. Le démantèlement comporte trois programmes :

#### Mise à l'Arrêt Définitif (MAD)

Le but est d'évacuer les matières nucléaires puis d'effectuer un assainissement des installations.

#### Surveillance et Démantèlement (DEM)

Le démantèlement consiste à démonter et déconstruire les équipements les plus contaminés en adaptant les systèmes de confinement à l'activité résiduelle.

#### Reprise et Conditionnement des Déchets (RCD)

Ce programme consiste à trier et recon-ditionner divers déchets pour lesquels il n'existait pas auparavant de solution technique ou de filière d'évacuation, de manière à les mettre en conformité avec des exigences de sûreté à long terme.



## SAVOIR PLUS

### Le site de Hanford (USA)

Le groupe AREVA intervient sur plusieurs aspects de l'assainissement de ce grand site militaire : assainissement de cellules et de piscines, caractérisation et stabilisation de déchets radioactifs, fourniture de systèmes de traitement d'effluents liquides.

## COMPRENDRE

### Comment s'organise l'assainissement d'un site industriel nucléaire ?

#### Les autorisations réglementaires

→ Avant le début des travaux, le démantèlement projeté doit être défini avec précision. Le planning général des opérations est établi sous la responsabilité de l'exploitant nucléaire, de même que la description des mesures de sûreté retenues. Ces éléments sont soumis aux autorités de sûreté. Chaque étape fait l'objet d'un décret d'autorisation spécifique.

#### L'arrêt définitif des installations

→ Cette phase consiste à évacuer les matières nucléaires puis à effectuer un assainissement des installations jusqu'à un état radiologique permettant d'effectuer le démantèlement dans les meilleures conditions. Les opérations de mise à l'arrêt définitif permettent aussi d'alléger les mesures de surveillance des installations jusqu'au démarrage des travaux de démantèlement.

#### Le démantèlement proprement dit

→ Dans cette phase, les équipements de production sont démontés et les locaux décontaminés. Généralement, les ateliers dits "supports" (traitement des effluents et conditionnement des déchets) ne sont pas arrêtés, puisqu'ils continueront à être utilisés pendant toute la période des travaux.

#### L'assainissement du site

→ Lorsque l'opération ne se limite pas à quelques installations mais concerne un site industriel dans sa globalité, il peut être nécessaire de procéder à l'assainissement de diverses zones du site, notamment celles ayant été utilisées pour entreposer des matières ou déchets pendant la période d'exploitation.



# Lexique

## Actinide

(voir aussi "Transuraniens")

Élément chimique dont le noyau contient plus de 88 protons. Ce sont dans l'ordre, l'actinium, le thorium, le protactinium, l'uranium et les transuraniens. On appelle souvent actinides mineurs le neptunium, l'américium et le curium.

## AIEA

Agence Internationale de l'Energie Atomique.

Organisation internationale sous contrôle de l'ONU, son rôle est de favoriser l'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire et de contrôler que les matières nucléaires détenues par les utilisateurs ne sont pas détournées pour des usages militaires.

## Cœur

Région d'un réacteur nucléaire à fission comprenant le combustible nucléaire et agencée pour être le siège d'une réaction de fission en chaîne.

## Coques

Morceaux de tubes d'une longueur de 3 cm environ issus du cisailage en usine de traitement des gaines métalliques (les crayons) ayant contenu le combustible des centrales nucléaires.

## Descenderie

Galerie inclinée, partant de la surface, qui donne accès aux infrastructures et aux galeries d'exploitation souterraines. Elle est empruntée par les véhicules de transport du personnel et les engins miniers.

## Isotope

Éléments dont les atomes possèdent le même nombre d'électrons et de protons, mais un nombre différent de neutrons. Il existe, par exemple, trois isotopes d'uranium :  $^{234}\text{U}$  (92 protons, 92 électrons, 142 neutrons),  $^{235}\text{U}$  (92 protons, 92 électrons, 143 neutrons),  $^{238}\text{U}$  (92 protons, 92 électrons, 146 neutrons). Un élément chimique donné peut donc comprendre plusieurs isotopes différents par leur nombre de neutrons. Tous les isotopes d'un même élément ont les mêmes propriétés chimiques, mais des propriétés physiques différentes (masse en particulier).

## Plutonium

Élément de numéro atomique 94 et de symbole Pu. Le plutonium 239, isotope fissile, est produit dans les réacteurs nucléaires à partir d'uranium 238.

## Radioactivité

Émission, par un élément chimique, d'un flux d'ondes électromagnétiques et/ou de particules, ayant pour origine une modification dans l'arrangement de son noyau ; l'émission peut être spontanée (radioactivité naturelle de certains atomes instables) ou induite (radioactivité artificielle).

## Transuraniens

(voir aussi "Actinides")

Éléments chimiques dont le noyau contient plus de protons que celui de l'uranium. Les premiers transuraniens sont, dans l'ordre croissant, le neptunium, le plutonium, l'américium et le curium.

## Uranium

Élément chimique de numéro atomique 92 et de symbole U, possédant trois isotopes naturels :  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  et  $^{238}\text{U}$ .  $^{235}\text{U}$  est le seul nucléide fissile naturel, une qualité qui explique son utilisation comme source d'énergie.

**CRÉDITS PHOTOS :** P. Bauduin • A. Bianci • Y. Geoffray • E. Joly • R. Leenhardt • G. Liesse • C. Pauquet • J.-L. Peyromaure • R. Quatrain • J.-C. Rey Robert • Studio AVE • Studio Pons • F. Watbled • W. Wright • P. Berenger • Black Box Images • CAMECO • J.-C. Carisey • E. Cervo • Dark Horse Studio • J.-C. Grelier • G. Hallary • S. Jezequel • P. Lefevre • P. Lessage • F. Pitchal • J. Roux • J.-M. Taillat • EDF/J.-C. Raoul • MAGNUM/ H. Gruyaert • DR • Illustrations 3 D : Rimbault Philippe • © Etchart Julio / Still Pictures / BIOS.

➤ Fort d'une présence industrielle dans plus de 40 pays, AREVA est un expert mondial dans les métiers de l'énergie. Le groupe propose à ses clients des solutions technologiques pour produire l'énergie nucléaire et acheminer l'électricité. Il développe également des systèmes d'interconnexion, principalement pour les secteurs des télécommunications, de l'informatique et de l'automobile.

Les 75 000 collaborateurs d'AREVA s'engagent ainsi au cœur des grands enjeux du XXI<sup>ème</sup> siècle : accès à l'énergie pour le plus grand nombre, préservation de la planète, responsabilité vis-à-vis des générations futures.

[www.aveva.com](http://www.aveva.com)