

Presque tout sur les déchets nucléaires

par

Jacques Deferne



Avant propos

La radioactivité est un mot qui fait peur. On l'associe aux armes nucléaires, aux centrales nucléaires, aux déchets radioactifs des mêmes centrales, aux accidents de Tchernobyl et de Fukushima. On l'imagine comme un poison invisible qui va nous surprendre sans que nous nous en rendions compte.

Aussi l'idée m'est venue d'écrire ce petit ouvrage pour que le lecteur se fasse une idée moins angoissante de ce phénomène qui existe naturellement depuis des temps immémoriaux.

Les physiciens ont alors mis en évidence les mécanismes de la radioactivité et décrit les deux processus au cours desquels la radioactivité se manifestait :

- la décroissance radioactive naturelle de plusieurs éléments instables qui se transmutaient plus ou moins rapidement en d'autres éléments stables.*
- La fission nucléaire au cours de laquelle un atome lourd explose en deux atomes plus légers en dégageant une quantité énorme d'énergie.*

Autour de ces deux processus, on observe l'émission de diverses particules, des noyaux d'hélium, des neutrons, des électrons et un rayonnement électromagnétique (des photons) semblable à celui des rayons X mais beaucoup plus puissant. Ce sont les principales manifestations de la radioactivité.

Mais voilà, si la vitesse du processus de décroissance radioactive est immuable, les physiciens sont parvenus à provoquer à leur guise le processus de la fission. Cela a permis la mise au point des armes nucléaires mais aussi, pour un usage pacifique, des centrales nucléaires productrices d'électricité sans émission de CO₂.

Ces usages nouveaux, entrepris pour nous approvisionner en énergie, ont considérablement augmenté la production de matières radioactives, les déchets nucléaires, issues des processus de la fission. Les physiciens nous assurent que la maîtrise de ces phénomènes est assurée.

C'est la méconnaissance des faits qui crée l'angoisse. En espérant clarifier un peu vos connaissances sur ce sujet brûlant, j'ai la modeste ambition de vous apporter un peu de la sérénité nécessaire pour vous faire une opinion personnelle sur la radioactivité et sur le traitement des déchets nucléaires.

Jacques Deferne

La fission de certains atomes

Le phénomène de la fission est beaucoup plus rare que celui de la décroissance radioactive. La **fission** qui est la rupture brutale d'un noyau, donnant naissance à 2 fragment plus petits qui sont projetés avec une extrême violence loin l'un de l'autre et constituant, comme stade final, deux atomes plus petits. C'est le phénomène de la **fission spontanée**. Elle s'accompagne d'un dégagement énorme d'énergie. L'uranium 238 (^{238}U) est sujet à la fission spontanée. Mais la probabilité de fission est environ un million de fois moindre que celle de subir la décroissance radioactive. C'est donc un phénomène naturel d'une extrême rareté.



Fission d'un atome d'uranium 238.

Dans l'exemple choisi, les produits de fission sont

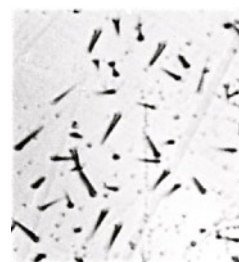
Les minéraux peuvent enregistrer la fission spontanée de ^{238}U

L'uranium est omniprésent en faible quantité dans les roches de composition granitique. On le trouve piégé dans les minéraux accessoires de ces roches, principalement dans le zircon et l'apatite. Lorsqu'un atome de ^{238}U subit la fission, les deux fragments produits s'éloignent l'un de l'autre à grande vitesse et provoquent une lésion dans le réseau cristallin du minéral hôte. Autour de cette lésion, la solubilité du minéral vis-à-vis d'un agent corrosif est plus importante que dans la région saine. On peut donc "révéler" par une attaque chimique appropriée la densité des événements de fission enregistrés dans le minéral.



Traces de fission développées sur une surface polie d'un cristal d'apatite, traitée à l'acide chlorhydrique.

Chaque trace correspond à la fission d'un seul atome de ^{238}U .



Les deux fragments expulsés lors de la fission sont des éléments courants du tableau périodique mais qui ont la désagréable propriété de renfermer un excès de neutrons qui rend leur

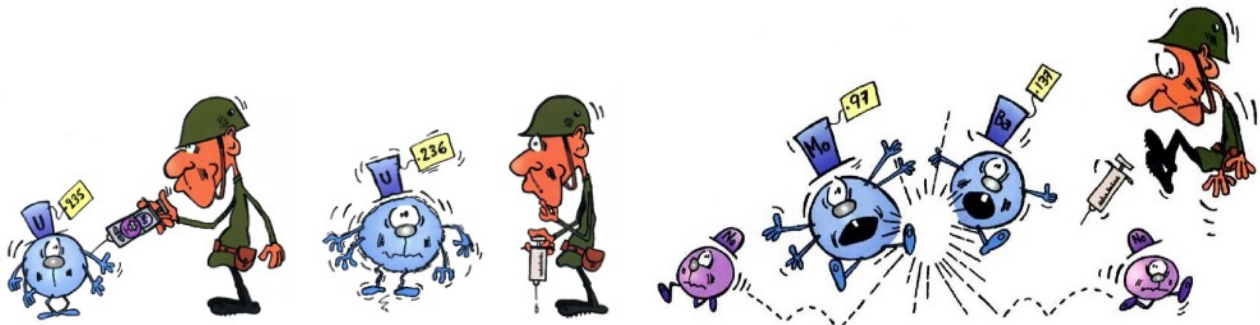
noyau instable : ils sont donc devenus radioactifs. Dans l'opération il y a encore expulsion de 2 ou 3 neutrons.

On peut provoquer la fission de certains atomes

Mais voilà, les physiciens ont découvert qu'il était possible de provoquer à volonté la fission de certains atomes. C'est la **fission induite**. Par exemple, si on envoie un neutron sur un atome d' ^{235}U cela peut provoquer sa fission.

Que se passe-t-il alors ? Après qu'on lui ait inoculé un neutron, le pauvre ^{235}U s'alourdit et se transforme en ^{236}U , un gros lourdaud de la famille Uranium qui n'arrive plus à maintenir toutes ensemble les particules de son noyau. Comme une goutte d'eau qui devient trop grosse et se divise en deux gouttelettes plus petites, le pauvre ^{236}U éclate et se fragmente en deux atomes plus petits, expulsant en même temps deux ou trois neutrons. Ces neutrons excédentaires peuvent à leur tour induire la fission d'autres atomes ^{235}U .

Mécanisme de la fission induite



On injecte un neutron à un atome ^{235}U . Alourdi d'un neutron, il se transforme en ^{236}U , un isotope très instable. Celui-ci se brise alors brutalement en 2 atomes plus légers (ici ^{97}Mo et ^{137}Ba) et libère en plus 2 neutrons.

Un amaigrissement incompréhensible

Si l'on pèse les deux atomes nouveaux plus les deux ou trois neutrons produits, on a la surprise de constater qu'on n'arrive pas tout à fait au poids que montrait notre patient ^{236}U , juste avant sa crise.



Il y a donc eu disparition d'un petit peu de matière au cours de cette fission. Et nous savons, grâce à Einstein, que cette matière s'est transformée en énergie selon la relation fameuse: $E = m \times c^2$

Ce qui signifie en clair : l'Energie $[E]$ est égale à la masse disparue $[m]$ multipliée par le carré de la vitesse de la lumière $[c^2]$

Ce processus de fission produit environ 200 millions de fois plus d'énergie par atome éclaté que celle que peut produire une molécule dans la réaction chimique la plus violente! Voilà donc un procédé bien séduisant pour se procurer de grandes quantités d'énergie !

Mais que deviennent les neutrons ?

En inoculant un neutron dans le noyau du pauvre ^{235}U , il s'est transformé en ^{236}U qui s'est brisé, qui a libéré de l'énergie et abandonné un surplus 2 ou 3 neutrons errants¹. Que vont devenir ces neutrons ? Ils sont expulsés dans la matière à grande vitesse. Comme ils sont neutres, ils ne sont pas influencés pas les orbites électroniques des atomes qu'ils pourraient rencontrer et, pour provoquer une nouvelle fission, ils doivent impérativement frapper de plein fouet un noyau d' ^{235}U .

Mais la cible est très petite et la probabilité de rencontrer un noyau d'Uranium pour le briser en deux demeure extrêmement faible. Par ailleurs, les neutrons sont eux-mêmes atteints de décroissance radioactive foudroyante qui les transforme très rapidement en un proton plus un électron².

On peut tout de même influencer la chance

Les Terriens sont astucieux et savent modifier cette probabilité de fission de ^{235}U par un neutron en combinant deux actions :

1. En augmentant la concentration des atomes d' ^{235}U .

Dans l'uranium naturel extrait des mines, il n'y a que 0.7% d' ^{235}U contre 99.3 % d' ^{238}U . On procède alors à l'enrichissement en ^{235}U dans de coûteuses usines, ce qui augmente le nombre de cibles par unité de volume. Pour les usages courants, on l'enrichit généralement aux alentours de 3%. On peut augmenter cet enrichissement autant qu'on le désire. Mais on ne le fait effectivement qu'à la demande des militaires, qui en ont besoin pour des usages bien particuliers.

2. En ralentissant les neutrons

Les neutrons produits dans une réaction de fission sont trop rapides pour espérer pouvoir accrocher au passage un autre ^{235}U . Aussi va-t-on, à l'aide d'un modérateur, les ralentir pour les rendre plus "virulents". On place sur leur passage des atomes légers, Messieurs Hydrogène, Béryllium ou Carbone, par exemple. Les chocs successifs avec ces atomes légers vont augmenter la vitesse de ces derniers et ralentir les neutrons.

En combinant ces deux conditions, on augmente l'efficacité des neutrons errants. Il devient alors possible de réaliser et d'entretenir une réaction en chaîne et, si on sait la contrôler, on peut du même coup construire une centrale nucléaire!

¹ appelés neutrons prompts par les physiciens

² il faut encore mentionner l'émission d'un neutrino, cette particule quasi indétectable qui emporte une partie de l'énergie dégagée.

Comment fonctionne une centrale nucléaire ?

Les centrales nucléaires peuvent différer les unes des autres par les caractéristiques du combustible, par la nature du milieu ralentisseur de neutrons, et par le système d'échangeur de chaleur entre le réacteur et la turbine. Mais le principe du fonctionnement est toujours à peu près le même.

Le combustible est constitué de barres d'uranium enrichi à environ 3 % d' ^{235}U . Ces barres sont plongées dans de l'eau qui ralentit (grâce à M. Hydrogène) les neutrons émis par la fission d'atomes d' ^{236}U , leur permettant à leur tour de provoquer la fission d'autres atomes.

Ces réactions de fission dégagent une chaleur énorme qui permet de produire la vapeur nécessaire au fonctionnement d'une turbine, qui entraîne à son tour un générateur électrique.

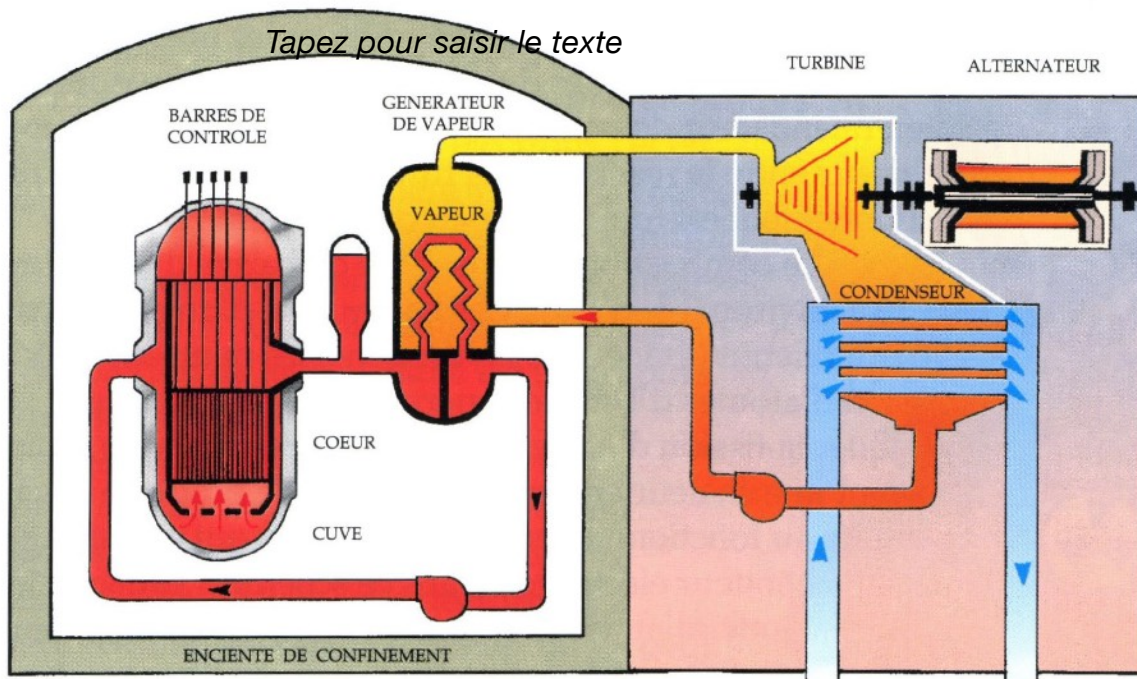


Schéma simplifié d'une centrale nucléaire.

Dans ce schéma, l'eau joue le rôle double de modérateur de neutrons et de liquide caloporteur qui permet le transfert de l'énergie vers la turbine.

Pour arrêter la réaction, on laisse tomber dans le réacteur des barres de bore ou de cadmium qui ont la propriété d'absorber les neutrons et, par conséquent, d'interrompre la réaction.

On peut aussi construire aussi une bombe atomique

Les neutrons se déplacent à grande vitesse et, par le fait qu'ils n'ont aucune charge électrique, ils passent à travers les nuages électroniques des atomes sans les perturber. Il faut vraiment qu'ils heurtent le noyau d'un atome d'Uranium pour s'y incorporer. Or les noyaux étant des millions de fois plus petits que les atomes eux-mêmes, les neutrons peuvent traverser une certaine masse d'Uranium sans rencontrer un noyau et fuir hors de la matière. Pour augmenter la probabilité de collision, il faut augmenter la concentration de l'uranium naturel en ^{235}U ou ralentir les neutrons, ou encore combiner ces deux actions.

Ainsi donc, si on réussit à rassembler une masse suffisamment importante d' ^{235}U débarrassé de son cousin ^{238}U (enrichissement à 100 %), on peut provoquer une réaction en chaîne. Cela signifie que, dès qu'il y a fission spontanée d'un seul atome, les neutrons produits vont à leur tour provoquer la fission d'autres atomes voisins, qui libèrent à leur tour de nouveaux neutrons qui vont provoquer d'autres fissions. Le nombre des événements de fission se multiplie alors avec une vitesse prodigieuse, dégageant une énergie colossale dans un laps de temps très court : c'est une explosion nucléaire !

Heureusement pour nous, ces conditions ne sont jamais remplies dans les centrales nucléaires et toute explosion nucléaire y est impossible !

*La masse minimum nécessaire pour qu'il y ait réaction en chaîne s'appelle la **masse critique**. Cette masse est de l'ordre d'une vingtaine de kg pour l' ^{235}U . Nous avons donc en main tous les éléments pour construire une bombe atomique et le schéma ci-dessous vous en donne la recette !*



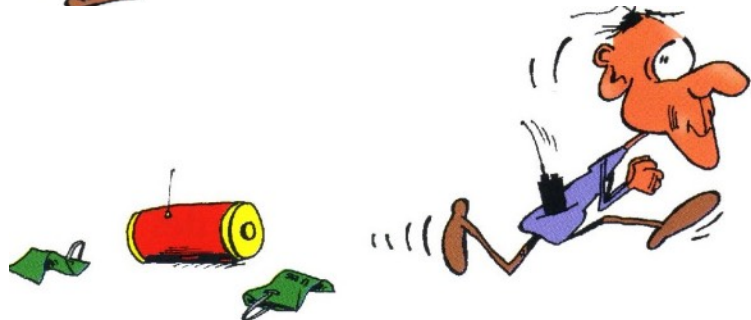
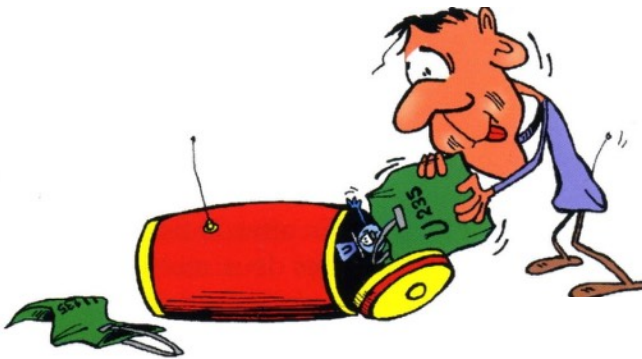
Essai nucléaire américain surs l'atoll de Bikini en juillet 1946.

Recette pour construire une bombe atomique :

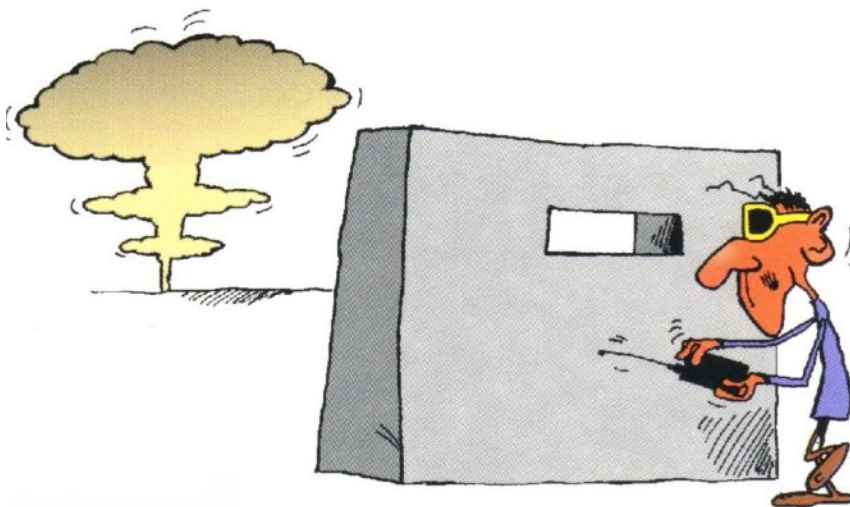
1. Procurez-vous de l' ^{235}U en quantité légèrement supérieure à la masse critique, tout en prenant la précaution de maintenir cet uranium en deux paquets séparés.



2. Disposez les deux moitiés de la masse d' ^{235}U aux deux extrémités intérieures d'un solide tube court et prévoyez un système télécommandé qui rapproche brutalement les deux moitiés d' ^{235}U l'une contre l'autre, au moyen



3. Eloignez-vous à une distance raison-



4. Actionnez !

Apparition des déchets nucléaires

Si l'homme utilise à son profit la fission nucléaire, il produit subsidiairement beaucoup d'atomes radioactifs absents de l'environnement jusqu'ici. Comment ces atomes nouveaux apparaissent-ils ?

Si nous reprenons le cours de la maladie du pauvre ^{235}U , nous avons vu qu'après avoir absorbé un neutron et s'être transformé en ^{236}U , il se scindait en deux autres atomes plus légers. Quels sont donc ces nouveaux atomes ?

Les expériences montrent que chaque atome d' ^{236}U peut se scinder de manière différente en donnant des paires de fragments de fission dont les poids atomiques sont compris généralement entre 72 et 166. Ces résidus sont composés d'une bonne trentaine d'éléments bien connus des services de l'Etat-civil du monde des atomes, mais qui ont tous la désagréable propriété de comporter une trop forte proportion de neutrons par rapport au nombre habituel que comporte leur famille. Ce sont donc des isotopes lourds de familles d'atomes bien connus. Ils n'existent généralement pas dans la nature et sont des isotopes issus de la fission induite des atomes. Ils sont tous instables et atteints de décroissance radioactive. Heureusement la plupart d'entre eux retrouvent assez rapidement une forme stable car leur demi-vie est très courte.

Les neutrons peuvent aussi se réfugier dans des noyaux d'uranium et constituer des éléments lourds encore inconnus jusqu'alors. Ce sont les éléments dits transuraniens tels le neptunium, le plutonium, l'américium et le curium.

Ce sont tous ces éléments instables qui constituent les déchets nucléaires indésirables ! Les neutrons excédentaires vont plus ou moins rapidement se transformer en protons en expulsant des particules β (des électrons) et en dégageant un fort rayonnement γ et de la chaleur.

Certains produits de fission atteindront leur état stable en quelques minutes, quelques heures ou quelques jours. Ils sont hautement radioactifs mais l'évolution de leur maladie est très rapide.

D'autres mettront des années ou des millénaires pour voir enfin leur activité diminuer de manière sensible. Ils sont peu radioactifs, mais ils le demeureront encore longtemps !

Par ailleurs cette décroissance radioactive dont, je vous le rappelle, on ne peut pas modifier la vitesse d'évolution, dégage beaucoup de chaleur qu'il faut évacuer de la centrale pendant longtemps encore après l'arrêt de la réaction de fission. C'est la raison pour laquelle on stocke le combustible usagé pendant plusieurs mois, voire même plusieurs années dans une piscine avant de le retraiter. On verra plus loin comment stocker ces déchets nucléaires.



Les déchets nucléaires sont non seulement radioactifs, mais ils dégagent aussi passablement de

Comment ces atomes nouveaux apparaissent-ils ?

Si nous reprenons le cours de la maladie du pauvre ^{235}U , nous avons vu qu'après avoir absorbé un neutron et s'être transformé en ^{236}U , il se scindait en deux autres atomes plus légers. Quels sont donc ces nouveaux atomes ?

Les expériences montrent que chaque atome d' ^{236}U peut se scinder de manière différente en donnant des paires de fragments de fission dont les poids atomiques sont compris généralement entre 72 et 166. Ces résidus sont composés d'une bonne trentaine d'éléments bien connus des services de l'Etat-civil du monde des atomes, mais qui ont tous la désagréable propriété de comporter une trop forte proportion de neutrons par rapport au nombre habituel que comporte leur famille. Ce sont donc des isotopes lourds de familles d'atomes bien connues. Ils n'existent généralement pas dans la nature et sont des isotopes issus de la fission induite des atomes. Ils sont tous instables et atteints de décroissance radioactive.

Les neutrons peuvent aussi se réfugier dans des noyaux d'uranium qui n'ont pas subi la fission et constituer des éléments lourds encore inconnus jusqu'alors. Ce sont les éléments dits transuraniens tels le Neptunium, le Plutonium, l'Américium et le Curium.

Ce sont tous ces éléments instables qui constituent les déchets nucléaires indésirables ! Les neutrons excédentaires vont plus ou moins rapidement se transformer en protons en expulsant des particules β (des électrons) et en dégageant un fort rayonnement et beaucoup la chaleur.

Certains produits de fission atteindront leur état stable en quelques minutes, quelques heures ou quelques jours. Ils sont hautement radioactifs mais l'évolution de leur maladie est très rapide.

D'autres mettront des années ou des millénaires pour voir enfin leur activité diminuer de manière sensible. Ils sont peu radioactifs, mais ils le demeureront encore longtemps !

Les éléments fortement radioactifs, dits à courte période, évoluent rapidement vers des formes stables inoffensives.

Les éléments faiblement radioactifs, dits à longue période, n'évoluent que très lentement vers des formes stables. Ils sont faiblement radioactifs mais le demeureront encore longtemps !

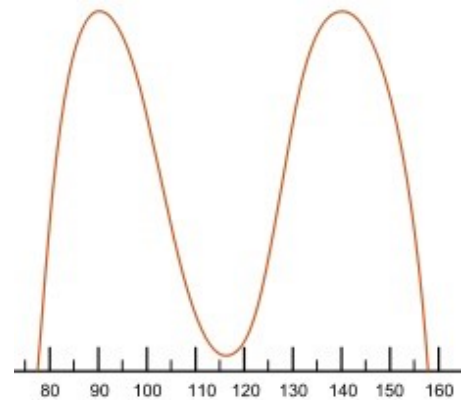
Une centrale nucléaire d'environ 1000 MW produit annuellement environ 1200 kg de déchets problématiques qu'il faut impérieusement traiter pour les rendre le plus inoffensifs possibles. Ces déchets sont disséminés dans les 23 tonnes que constituent les barres de combustible usagées

A titre de comparaison, une centrale à charbon de même puissance consomme journalièrement 9000 tonnes de charbon, produisant 1300 tonnes de cendres et environ 28'000 tonnes de CO_2 qui sont rejetées dans l'atmosphère.

Mode de formation des déchets nucléaire

La transformation du combustible nucléaire à l'intérieur d'un réacteur induit la formation de trois catégories de sous-produits radioactifs. C'est ce qu'on appelle les **déchets nucléaires**.

1. **Les produits de fission** sont les éléments engendrés principalement par la fission de l'uranium et, dans une moindre mesure, par celle du plutonium qui se forme au cœur des réacteurs dans le combustible par capture de neutrons. Au cours de la fission un atome d' ^{235}U se divise en deux atomes d'éléments communs du tableau périodique : statistiquement on trouve un petit atome dont le poids atomique est compris entre 90 et 100 et un gros atome dont le poids atomique est compris entre 133 et 144. Ce sont tous des isotopes radioactifs possédant un excès de neutrons. Ils sont extrêmement radioactifs mais leur période est généralement très courte et leur radioactivité diminue rapidement.



Courbe de la probabilité de formation des éléments de fission de l' ^{235}U .

2. **Les actinides**³ sont des éléments très lourds, inexistant dans la nature, situés sur le tableau périodique au delà de l'uranium, et qui sont produits par capture de neutrons par l'uranium sans qu'il y ait fission. Le principal d'entre eux est le plutonium dont la quantité produite est de plus de 9 kg par tonne de combustible usagé. La quantité des autres actinides dits "mineurs" est d'environ 600 grammes par tonne de combustible. À part le plutonium, ces actinides sont principalement le neptunium, l'américium et le curium. Les autres actinides mineurs, le berkélium, le californium, l'einsteinium, le fermium, le mendelevium, le nobélium et le lawrencium n'ont qu'une existence anecdotique extrêmement éphémère.

3. **Les produits d'activation** issus de l'irradiation par les neutrons des matériaux qui entourent le cœur du réacteur (activation neutronique). Par exemple, le cobalt ^{59}Co se transforme en ^{60}Co . Ces produits ont presque tous une demi-vie assez courte.

³ L'uranium et le plutonium sont appelés actinides majeurs. Le neptunium, l'américium et le curium sont désignés sous le terme d'actinides mineurs.

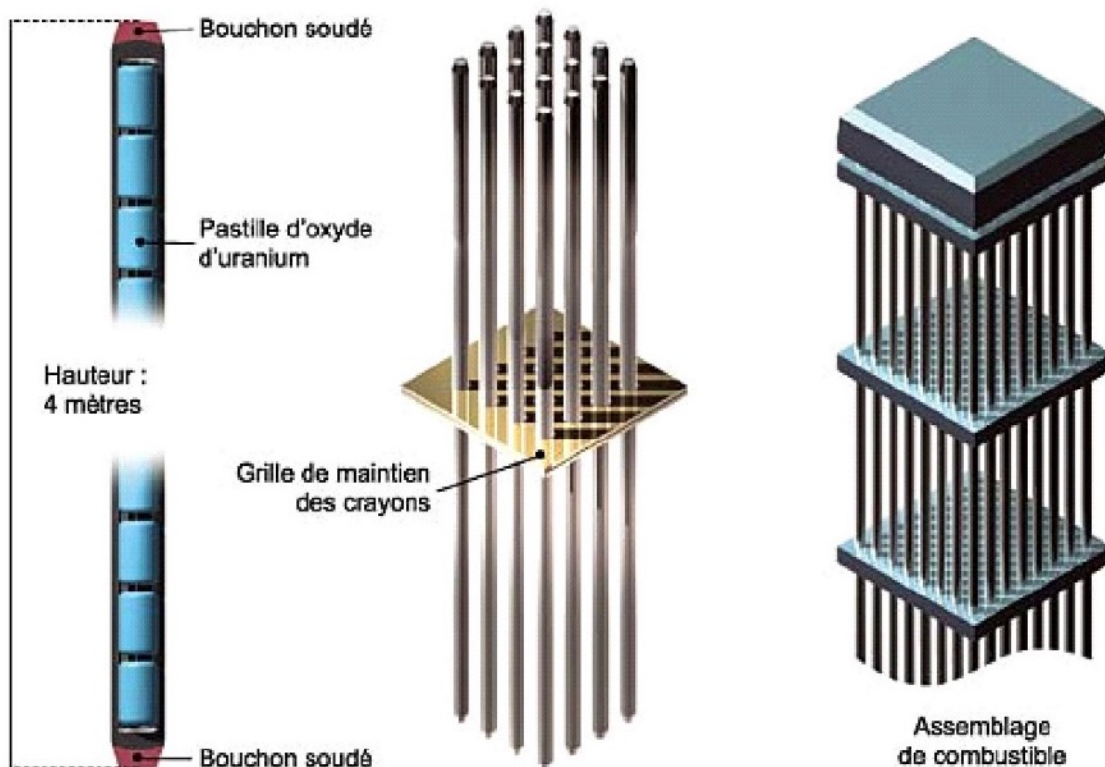
Transformation du combustible nucléaire

Au cœur d'une centrale nucléaire, le combustible est constitué de petites pastilles de poudre d'oxyde d'uranium comprimée et durcie appelées UOX (oxyde d'uranium) dans lesquelles la proportion d' ^{235}U est d'environ 3.5%. Dans certains réacteurs on utilise des pastilles contenant un peu de plutonium appelées MOX (oxydes mixtes). Ces pastilles sont empilées dans des tubes de zirconium de 1 cm de diamètre et d'environ 4 mètres de hauteur, constituant des "crayons de combustible". Un assemblage d'environ 200 de ces crayons constitue une barre de combustible qui va alimenter la réaction en chaîne pendant quelques années.

Assemblage des "crayons de combustible"

L'uranium est un élément très faiblement radioactif et les barres de combustibles peuvent être manipulées sans danger à mains nues. La fission ne débute que lorsque le combustible est plongé dans l'eau au cœur du réacteur. Rappelons que l'eau joue ici le rôle de ralentisseur de neutrons.

Après usage ces assemblages sont extrêmement radioactifs et dégagent énormément de chaleur. Ils ne pourront être manipulés qu'à distance et avec beaucoup de précaution.



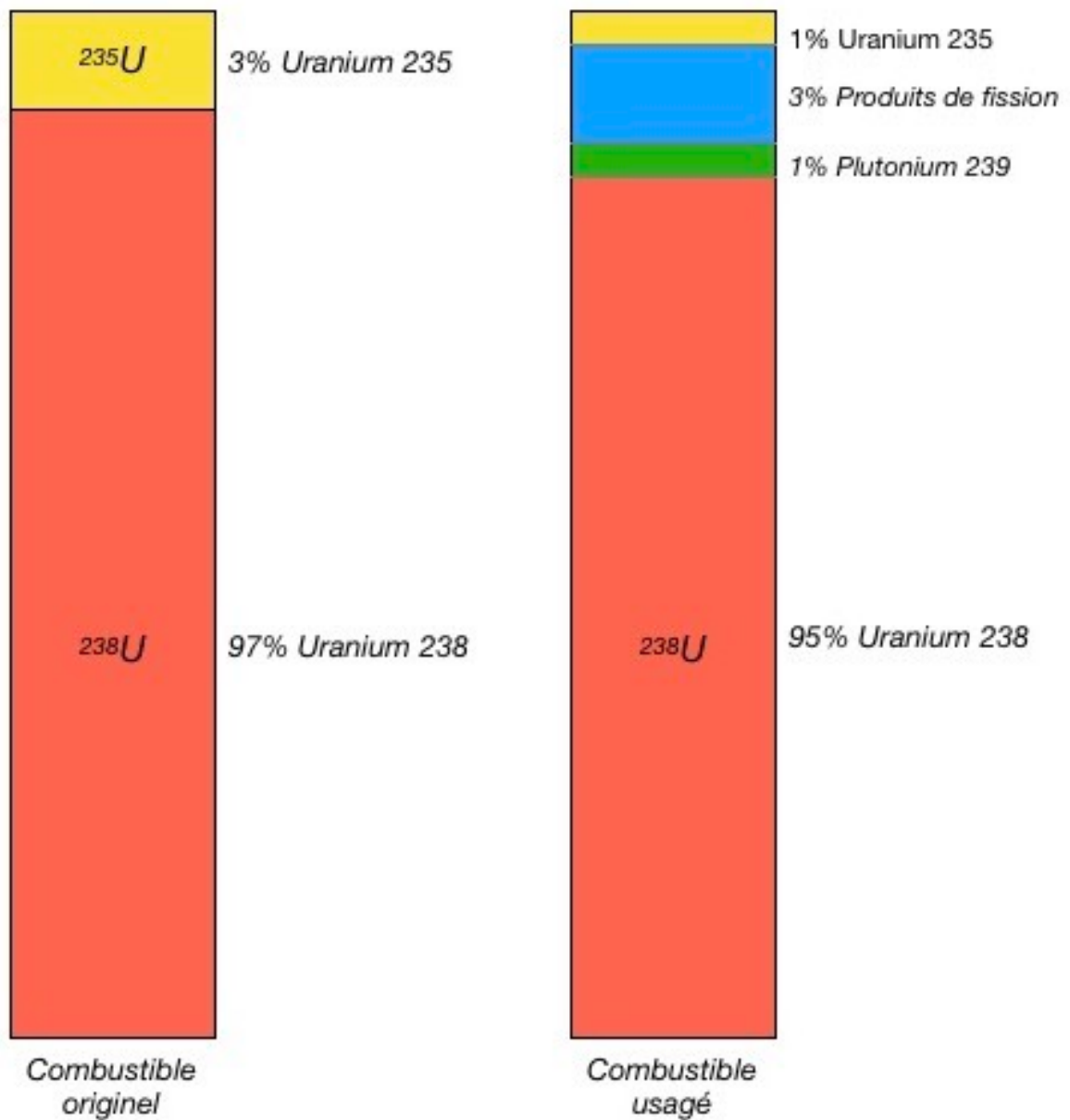
Assemblage du combustible destiné à une centrale nucléaire (CEA)

Le combustible usagé

Le combustible nucléaire comporte au départ un mélange de 96.5 % d' ^{238}U et de 3.5 % d' ^{235}U . La fission d' ^{235}U entraîne la production de plutonium et d'actinides mineurs⁴. Le changement de composition du combustible en diminue la productivité et après quelques années de fonctionnement il doit être changé. On retire les barres de combustibles usagées avec précautions car leur radioactivité est intense à cause des produits de fission qui sont hautement radioactifs. Heureusement, ces produits ont des périodes très courtes et leur radioactivité diminuera rapidement.

Les barres de combustibles restent environ 3 ans à l'intérieur du réacteur. Les réactions de fission modifient la composition originelle et il faut les retirer pour les remplacer par du combustible nouveau.

Evolution de la composition des barres de combustible
au cours de leur fonctionnement (Wikipédia)



⁴ Neptunium, Américium et Curium

Les produits de fission sont intimement mélangés au combustible usagé et devront être extraits par voie chimique après que la radioactivité et le dégagement de chaleur qui l'accompagne aient considérablement diminué

Dans la piscine

En attendant que la radioactivité des produits de fission disséminés dans les barres de combustible usagées diminue notablement, elles sont entreposées dans une piscine et sont maintenues à distance les unes des autres par des râteliers prévus à cet effet.

L'eau qui pourrait réactiver le phénomène de fission est chargée en acide borique, H_3BO_3 dont les atomes de bore ont la propriété d'absorber les neutrons et d'empêcher la reprise de la fission.

Un système d'échangeur de chaleur est installé afin que la température de l'eau ne dépasse pas une cinquantaine de degrés.

Par ailleurs il faut ventiler soigneusement les locaux qui accueillent la piscine afin d'éviter l'accumulation d'hydrogène et d'oxygène dégagée par dissociation de l'eau sous l'effet des rayons ionisants.

Ces barres resteront entre 5 et 10 ans dans la piscine, le temps nécessaire pour que la radioactivité des produits de fission ait diminué notablement.

Ensuite ils seront dirigés vers une usine de retraitement dont le but est de séparer les différents éléments présents dans le combustible usagé.

*Piscine d'entreposage des barres de combustibles
Piscine de désactivation d'une centrale américaine.
On aperçoit un élément combustible suspendu au
mât de manœuvre, positionné manuellement au-des-
sus des alvéoles de stockage. L'eau de la piscine fait
écran d'atténuation de la radioactivité émise par les
éléments combustibles. (Wikipédia)*



Les principaux déchets

La plupart des réacteurs ont une puissance d'environ 1'000 MW. Pour produire cette énergie, le réacteur a besoin de 23 tonnes de combustible soit environ 22 tonnes d' ^{238}U et 900 kg d' ^{235}U .

La quantité de déchets nucléaires produits chaque année par un réacteur est résumé dans les tableaux ci-après :

Produits de fission

- **Produits de fission à vie courte** : on en retrouve près de 700 de kg. Plus de 90% de ces produits ont une durée de vie extrêmement courte et se transforment rapidement en éléments stables. On constate qu'au bout de dix ans d'entreposage, la plupart d'entre eux ont atteint leur forme stable.
- Parmi ces isotopes, signalons particulièrement l'iode 131 (^{131}I) qui a une très courte période de 8 jours mais qui, uniquement en cas d'accident majeur, peut être absorbé par la glande thyroïde des populations exposées.
- **Produits de fission à vie moyenne et longue** : parmi le 10% restant dont les durées de vies sont supérieures à 30 ans, les produits qui peuvent poser un problème sont : le strontium 90 (^{90}Sr), et le césium 137 (^{137}Cs) qui ont des périodes d'environ 30 ans. Le zirconium 93 (^{93}Zr), le technétium 99 (^{99}Tc), le palladium 107 (^{107}Pd), l'iode 129 (^{129}I) et le césium 135 (^{135}Cs) ont des périodes beaucoup plus longues.

Produits de fission notablement encombrants

Produits de fission à vies moyennes			Produits de fission à vie longue		
	Poids*	Demi-vie		Poids*	Demi-vie
strontium 90 (^{90}Sr)	24 kg	28 ans	zirconium 93 (^{93}Zr)	16 kg	1.53 Ma
Césium 137 (^{137}Cs)	8.5 kg	30 ans	technétium 99 (^{99}Tc)	19 kg	0.21 Ma
			palladium 107 (^{107}Pd)	4.6 kg	6.5 Ma
			iode 129 (^{129}I)	4 kg	15.7 Ma
			césium 135 (^{135}Cs)	8 kg	2.3 Ma
* quantité produite chaque année par un réacteur de 1'000 MW.					

- Le **césium 137** pose un problème : il n'existe pas dans la nature. Il provient uniquement des activités nucléaires civiles et militaires. Proche du potassium, il est métabolisé par les plantes et pourrait arriver par ce biais jusque dans notre assiette. Toutefois il n'est libéré dans l'atmosphère que par des explosions nucléaires ou par un accident majeur d'une centrale nucléaire.
- Le **strontium 90** n'est disséminé que par une explosion nucléaire ou un accident majeur d'un réacteur. A la suite d'un accident, il peut se disséminer sur les herbages être ingéré par les bovins et se retrouver ensuite dans les produits laitiers.

L'activité des produits de fission à vie longue est moins problématique à cause de leur très longue période. Ils ne présentent qu'une faible radioactivité.

Les actinides

Les actinides sont produits par l'absorption de neutrons par l'uranium lui-même sans qu'il y ait fission. Ce sont des éléments artificiels qui n'existent pas dans la nature et qui sont situés au-delà de l'uranium sur le tableau périodique de M. Mendeleïev. Ils constituent divers isotopes de l'uranium ainsi que des éléments artificiels, essentiellement le plutonium, le neptunium, l'américium et le curium.

Le plutonium est produit en abondance au cœur des réacteurs nucléaires. Parmi ses divers isotopes, c'est le plutonium 239 (^{239}Pu) qui suscite le plus d'intérêt.

Considéré comme déchets par les uns, il constitue pour d'autres des sources intéressantes de combustible nucléaire pour certains types de réacteurs. C'est évidemment un des constituants principaux des armes nucléaires.

Les stocks actuels comprennent environ 1'000 tonnes de Plutonium. C'est un élément hautement stratégique et les quantités produites sont sévèrement surveillées.

L'Américium 241 (^{241}Am), a une demi-vie de 142 ans. Il émet en abondance des rayons α . On utilise cette propriété dans les détecteurs de fumées : une pastille d'Américium entretient un léger courant électrique grâce à l'émission de ses particules α qui ionisent l'air. Les particules de fumées perturbent ce courant et donnent l'alarme.

Isotopes de l'uranium et du plutonium générés par an

Uranium:			Plutonium:		
isotope	quantité	demi-vie	isotope	quantité	demi-vie
^{234}U ^{236}U	4 kg 102 kg	0.24 Ma 23 Ma	^{239}Pu ^{240}Pu ^{241}Pu ^{242}Pu	132 kg 52 kg 28 kg 11 kg	224'000 ans 6'500 ans 14.3 ans 0.37 Ma

Le curium 244 (^{244}Cm) dégage un rayonnement γ très intense. On utilise ce rayonnement comme source excitatrice pour les spectromètres utilisés dans l'exploration spatiale.

Le curium 242 (^{242}Cm) a une très courte période et dégage beaucoup de chaleur. On l'utilise comme source de chaleur des générateurs thermoélectriques embarqués dans les sondes spatiales.

Quantité d'actinides générés par un réacteur en un an

Neptunium			Américium			Curium		
isotope	quantité	demi-vie	isotope	quantité	demi-vie	isotope	quantité	demi-vie
^{237}Np	10 kg	2.15 Ma	^{241}Am ^{243}Am	5 kg 2.5 kg	432 ans 7'382 ans	^{244}Cm	564 gr	18 ans

Les produits d'activation sont des éléments extérieurs au cœur du réacteur, rendus radioactifs par absorption de neutrons. C'est essentiellement le fer à béton qui renferme un peu de cobalt et de nickel. Il faudra en tenir compte lors du démantèlement d'une centrale.

Principaux éléments produits par activation

Élément originel	Isotope radioactif	Demi-vie
Cobalt 59 (^{59}Co) →	Cobalt 60 (^{60}Co)	5,7 ans
Fer 54 (^{54}Fe) →	Fer 55 (^{55}Fe)	2.7 ans
Nickel 62 (^{62}Ni) →	Ni 63 (^{63}Ni)	100 ans

Rappelons encore que les éléments à courtes périodes sont extrêmement radioactifs mais ils ne le resteront pas très longtemps. Les éléments à longues périodes sont faiblement radioactifs mais ils le demeureront encore très longtemps.

Usage de quelques isotopes radioactifs

Depuis la découverte de la radioactivité et l'utilisation de la fission induite on a découvert de nouveaux isotopes d'éléments connus ou d'éléments nouveaux issus de l'activité nucléaire industrielle. On a utilisé ces nouveaux matériaux pour des applications variées et nombreuses.

Les rayons γ émis par certains isotopes sont beaucoup plus pénétrants que les rayons X délivrés par les générateurs classiques. On peut donc les utiliser comme source pour radiographies de matériaux industriels habituellement opaques aux rayons X ordinaires.

En médecine, on utilise de plus en plus l'imagerie nucléaire qui consiste à injecter un isotope faiblement radioactif d'un élément qui participe à certains métabolismes. Une gamma caméra permet de localiser et de suivre l'évolution de l'isotope. L'imagerie nucléaire renseigne sur une fonction du corps alors qu'une radiographie classique ne renseigne que sur la structure d'un organe.

Les isotopes utilisés en médecine nucléaire sont nombreux et variés. Certains proviennent des produits de fission des réacteurs nucléaires, d'autres sont produits dans des accélérateurs de particules. Ainsi, au CERN, le programme ISOLDE fournit de nombreux isotopes spécifiques pour les hôpitaux.

En médecine, **l'iode 131** (^{131}I) sert à l'étude du fonctionnement de la thyroïde. A très faible dose, il est utilisé comme traceur pour des diagnostics en médecine nucléaire. Quelques atomes radioactifs administrés par voie sanguine permettent de suivre le cheminement de l'iode dans la thyroïde. À plus forte dose, l'iode 131 est aussi utilisé pour les radiothérapies des cancers de la thyroïde.

Le **cobalt 60** (^{60}Co) a longtemps été utilisé en médecine pour la radiothérapie. On utilise sa propriété d'émettre un rayonnement γ très intense pour stériliser les denrées alimentaires et pour radiographier des pièces métalliques opaques aux rayons X ordinaires.

Le **technétium 99** est un élément indésirable dont on doit se débarrasser. Sa période est de 215'000 ans. Mais il existe un isomère⁵ du technétium 99 qui subsiste plusieurs heures dans un état d'excitation avant de se transformer en l'état normal de technétium 99 en émettant un photon gamma unique. Cette propriété est largement utilisée en ima-

⁵ on appelle isomère un noyau qui se maintient anormalement longtemps en état d'excitation

gerie médicale. A ce titre, le technétium est l'isotope le plus utilisé au monde en imagerie, la scintigraphie.

Que faire des déchets nucléaire ?

Tout comme pour les déchets ménagers, il faut séparer les éléments valorisables de ceux dont on ne sait que faire. L'intérêt est de récupérer en premier lieu l'uranium et le plutonium qui pourront servir à élaborer de nouveaux combustibles. On récupère aussi certains actinides tels l'américium et le curium. Ensuite, il faudra se débarrasser de ceux dont on n'a pas besoin.

Transport des déchets

Après entreposage de quelques années au moins en piscine dans l'environnement immédiat de la centrale, lorsque la radioactivité due aux produits de fission a suffisamment diminué, on peut envoyer les déchets dans une usine de retraitement

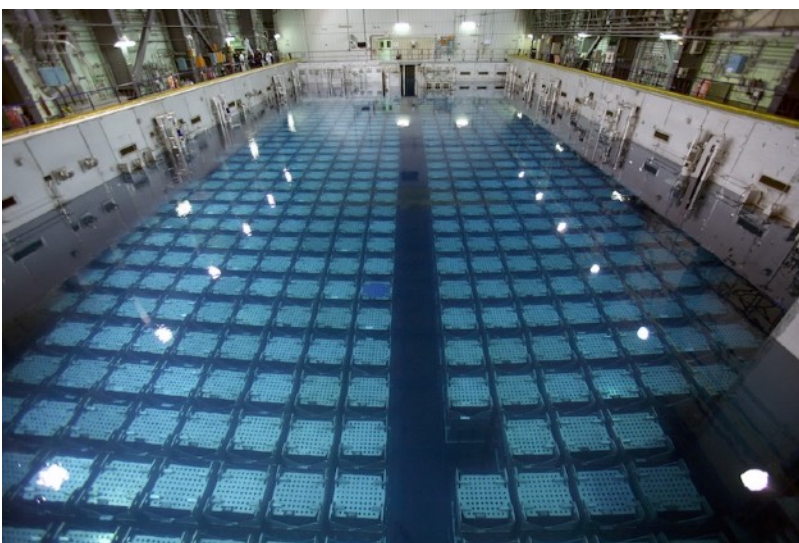
En France, c'est l'usine de la Hague qui se charge de cette opération. Le transport s'effectue le plus souvent par voie ferroviaire. Le combustible est enfermé dans des containers étanches aux divers rayonnements ionisants et qui permettent d'évacuer la chaleur encore produite par l'activité résiduelle des éléments transportés.



Containers utilisés pour le transport des déchets nu-

Traitement

A son arrivée à l'usine, le combustible va séjourner à nouveau dans une piscine pen-



Une des piscines de la Hague, où le combustible usagé est stocké plusieurs années avant d'être retraité. © Denis Delbecq

dant une durée de 3 à 5 ans afin d'en diminuer encore la radioactivité résiduelle.

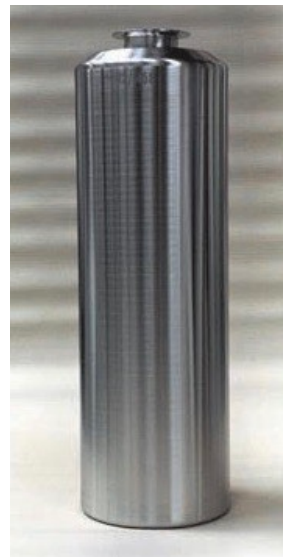
Le traitement vise ensuite à séparer l'uranium et le plutonium indépendamment l'un de l'autre, puis les actinides mineurs et les produits de fission indésirables. Les opérations

ont lieu au moyen de robots dans un espace étanche protégé par des murs de béton d'un mètre d'épaisseur. Des fenêtres de verre de plus d'un mètre d'épaisseur permettent de diriger les opérations.

Les crayons de combustibles sont alors cisailés en petits éléments et le combustible libéré est dissout dans de l'acide nitrique concentré bouillant. L'uranium et le plutonium sont transformés en nitrates et, finalement, dans un litre de solution on trouve 200g d'uranium, 2.5 g de plutonium et 6 à 7 g de produits de fission. Une série d'opérations chimiques permet alors de séparer l'uranium du plutonium.

La solution restante renferme encore le solde des produits de fission et des actinides mineurs. Elle représente encore 99.5 % de la radioactivité résiduelle. Stockée encore pendant plusieurs mois dans des cuves en acier, cette solution est brassée et ventilée pour permettre la diminution de la chaleur engendrée par la radioactivité.

Après quelques mois, on calcine ces déchets et on les incorpore dans un verre conçu spécialement à cet effet qu'on coule dans des containers cylindriques en acier inoxydables. Ces containers sont renvoyés ensuite aux propriétaires des centrales pour lesquelles ces opérations ont eu lieu. Chaque container renferme 400 kg de verre dont 11 kg de déchets radioactifs.



Que faire des déchets indésirables

Il faut distinguer d'une part l'**entreposage** des déchets qui est une solution temporaire en attendant que ceux-ci aient suffisamment refroidi et que leur radioactivité diminué d'une manière significative, du **stockage** qui aura comme vocation ultime d'être définitif. L'entreposage dure quelques dizaines d'années dans des locaux sécurisés. Cette attente permet aux déchets à relativement courte période de voir leur radioactivité et leur production de chaleur diminuer notablement.



Conteneurs de déchets de haute et moyenne activité

Caractéristiques des conteneurs:

Hauteur: 6.5 mètres

Poids, plein: 135 tonnes

Poids, vide: 118 tonnes

En Suisse, les exploitants des centrales nucléaires ont construit un dépôt de stockage



Fûts de 200 litres pour déchets de faible et moyenne activité.



Les fûts sont stockés dans des sarcophages en béton recouverts d'une dalle.

intermédiaire à Würenlingen sous le nom de Zwiilag⁶. Ce centre assure le traitement des déchets non seulement des centrales nucléaires mais aussi de ceux issus de l'usage médical et de l'industrie. Elle organise leur traitement, leur conditionnement et leur stockage en attendant un enfouissement définitif en couches géologiques profondes.

Les éléments de combustible usagé des centrales nucléaires sont en premier lieu entreposés pendant quelques années dans les piscines de refroidissement dans l'enceinte

⁶ un acronyme issu de "Swischenlager" signifiant dépôt intermédiaire.

même des centrales. Lorsque la radioactivité et le dégagement de chaleur ont notablement diminué, ils sont transportés au Centre de stockage intermédiaire de Zwiilag.



Centre d'entreposage Zwiilag près de Würenlingen (Ar-

Les déchets de haute activité sont enfermés dans des conteneurs d'acier hermétiquement scellés et stockés dans un hall d'entreposage. La chaleur dégagée par un conteneur correspond à une puissance d'environ 40 kW. Elle est évacuée par circulation naturelle de l'air. Au bout de 10 ans, la puissance thermique n'est plus que de 25 kW.

Les déchets faiblement radioactifs sont vitrifiés dans un four à plasma, coulés dans des fûts d'acier qui seront ensuite placés dans des sarcophages en béton.

Enfouissement ultime des déchets radioactifs

Les scientifiques sont quasiment unanimes à reconnaître que, pour les déchets fortement et moyennement radioactifs à vie longue, seuls les dépôts en couches géologiques profondes implantés dans des roches stables peuvent garantir un confinement sûr et à long terme.

Le stockage définitif consiste à déposer les déchets dans des ouvrages souterrains profonds creusés dans des roches imperméables. Le but est de soustraire ces déchets de l'environnement de la biosphère durant la période nécessaire à la décroissance de leur radioactivité. Il faut donc que les roches présentent des propriétés qui limitent la migration des éléments radioactifs hors du site de stockage. En Suisse, ce sont les argiles dites à Opalinus, qui présentent la meilleure option.

Recherches en cours

En France, trois sites ont été considérés comme favorables. Le site de Bure, dans la Meuse, le site de Marcoule dans le Gard et le site de la Chapelle-Bâton, dans la Vienne.

Mais c'est le site de Bure qui apparaît comme le plus favorable et les travaux préliminaires de recherche y sont aujourd'hui activement menés. Un puits a permis d'atteindre une couche d'argile située à cinq cents mètres de la surface. Il s'agit d'une couche d'argilite (mélange d'argile et de quartz) d'une centaine de mètres d'épaisseur, quasi-

ment horizontales. Ces dépôts argileux ont été déposés il y a environ 150 millions d'années, au cours du Callovien-Oxfordien. Ils n'ont pas évolué depuis cette époque et ne présentent pas de failles. Ce sont les équivalents des argiles à Opalinus du Jura.

Ces recherches visent à mieux connaître les caractéristiques de ces couches, en particulier leur compacité et leur régularité, à étudier la circulation de l'eau dans les couches situées au-dessus et au-dessous des argilites, ainsi que leur capacité à confiner les déchets et à ralentir au maximum leur éventuelle migration.

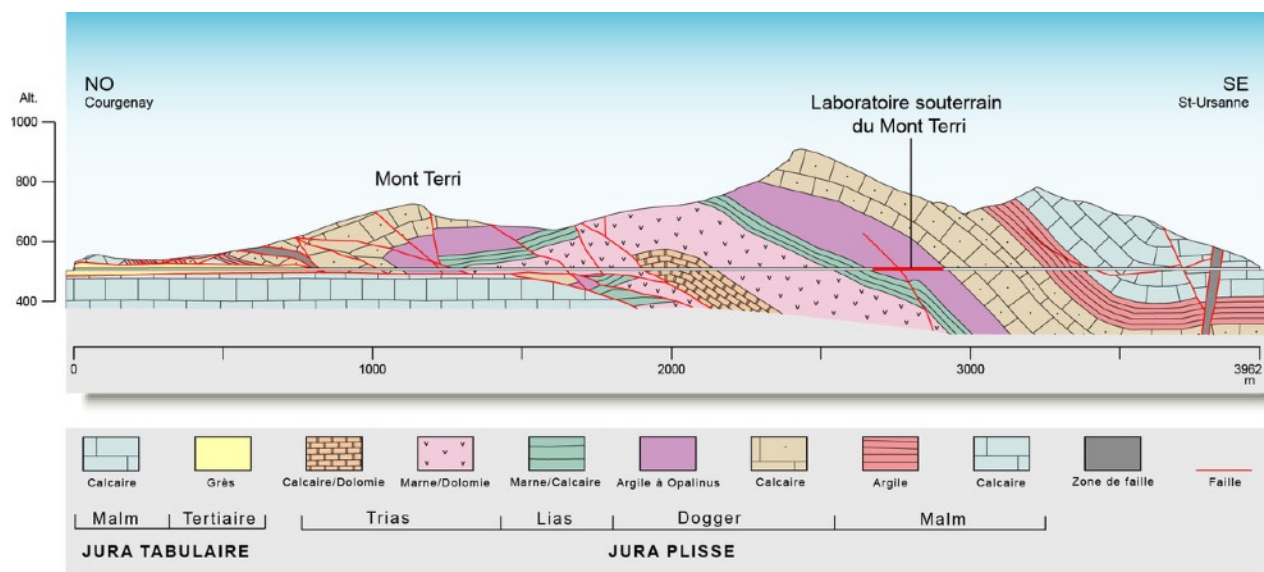
En Suisse, c'est la société NAGRA⁷, fondée par la Confédération Suisse et les propriétaires des centrales nucléaires, qui est chargée de rechercher des sites favorables à l'enfouissement des déchets nucléaires.

Pour l'enfouissement définitif des déchets radioactifs il faut trouver des roches situées au moins à 500 mètres de profondeur et au sein de couches parfaitement imperméables de l'argile par exemple. En Suisse ce sont les "argiles à Opalinus" qui semblent répondre à toutes les qualités nécessaires pour constituer un site qui pourrait accueillir nos déchets radioactifs

Les argiles à Opalinus

Il s'agit de roches argileuses. On y trouve de nombreux fossiles parmi lesquels une ammonite dont la coquille opalescente est à l'origine de l'appellation Opalinus.

Ce sont des sédiments argileux extrêmement fins qui se sont déposés il y a 180 millions d'années dans l'océan qui existait durant l'ère secondaire entre l'Europe et l'Afrique bien avant le début du plissement alpin. Au cours du plissement alpin, durant l'ère tertiaire, ces sédiments ont été projetés par dessus les anciens socles rigides de roches métamorphiques beaucoup plus anciennes et ont constitué ce que les géologues nomment la couverture sédimentaire des Alpes. Le Jura est constitué de cette couverture sédimentaire. Les Argiles à Opalinus sont datées du Dogger, une époque située dans le Jurassique moyen.



⁷ acronyme de "Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle"

C'est au Mont Terri, dans le canton du Jura, qu'un laboratoire souterrain a été installé dans le but d'étudier toutes les propriétés que présentent ces argiles à opalinus. Parmi ces propriétés, mentionnons sa très faible perméabilité, son pouvoir d'auto-colmatage des failles et fissures par gonflement de l'argile. Les minéraux argileux sont constitués de strates ultra fines qui sont chargées négativement et qui ont alors la propriété de capturer et fixer les ions positifs qui caractérisent les métaux. C'est une sécurité intéressante qui permet d'arrêter une migration éventuelle de ions radioactifs.

C'est l'Office fédéral de topographie suisse qui exploite et dirige les travaux de recherche. Une dizaine de pays participent à ces recherches dont l'Allemagne, la Belgique, l'Espagne, la France, le Canada et le Japon.

De nombreuses expériences sont menées pour tester les capacités de ces roches à protéger les fûts de déchets. Ces recherches permettront de décider si ces argiles sont aptes à conserver les déchets nucléaires pour au moins 200'000 ans.

La solution d'enfouissement est parfaitement sûre. Le seul obstacle est la peur des habitants qui vivent non loin des lieux d'enfouissement !

Et l'énergie solaire ?

Tout comme Monsieur Jourdain faisait de la prose sans le savoir, nous utilisons depuis longtemps l'énergie solaire sans nous en rendre compte !

L'énergie hydroélectrique est de l'énergie solaire, car les précipitations qui alimentent les bassins d'accumulation et les fleuves proviennent des nuages, eux-mêmes produits par l'évaporation des eaux superficielles des océans sous l'effet du rayonnement solaire.

Les éoliennes, versions modernes des antiques moulins à vent, utilisent les courants aériens engendrés par l'action du soleil.

Toutes les formes de vie, en particulier la croissance des arbres et des forêts, doivent leur existence à l'énergie solaire. Le charbon et le pétrole sont les témoins dégradés des déchets de la vie. Leur consommation aujourd'hui ne fait que restituer l'énergie solaire empruntée à l'environnement, il y a des dizaines ou des centaines de millions d'années.

Le charbon et le pétrole sont des formes fossiles d'énergie solaire. Les régimes des vents et des précipitations sont des formes presque instantanées (à l'échelle géologique) de cette même énergie.

Le Soleil tire son énergie d'une gigantesque réaction nucléaire !

Mais n'oublions pas que l'énergie solaire est produite par une gigantesque réaction nucléaire basée, non sur les phénomènes de fission, mais par la fusion de l'hydrogène en hélium.

*En effet, si les atomes très lourds peuvent fissionner en des paires d'atomes plus légers pour rééquilibrer leur noyau, il existe un autre type de réarrangement des noyaux atomiques, la **fusion nucléaire** qui est une réaction inverse.*

La fusion nucléaire

Certains atomes très légers, l'hydrogène en particulier, peuvent s'associer deux à deux pour se transformer en hélium. C'est le phénomène qui voit plusieurs noyaux atomiques légers s'unir pour en former un seul plus lourd.

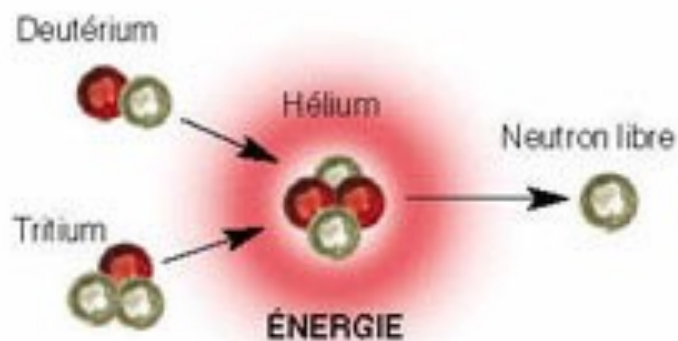
On a souvent utilisé l'image de la goutte d'eau trop grosse qui se brise en deux gouttes plus petites pour symboliser le phénomène de la fission. Dans la fusion, c'est comme si deux petites gouttes s'associaient pour en former une plus grosse.



Au centre du Soleil la pression est énorme et la température atteint 15 millions de degrés. Au cours de réactions complexes, les noyaux de 4 atomes d'hydrogène fusionnent pour former un noyau stable d'hélium. L'énergie dissipée par cette réaction est énorme et sert à maintenir en équilibre la masse solaire qui aurait tendance à s'effondrer sur elle-même mais qui est contrebalancée par la force d'expansion de la réaction de fusion nucléaire.

Les physiciens cherchent aujourd'hui à maîtriser la fusion de divers isotopes de l'hydrogène en vue de produire l'énergie colossale qui ne laisserait pas de déchets radioactifs indésirables. Mais il faudra attendre encore longtemps pour passer du rêve à la réalité !

Principe de la fusion nucléaire



Yuvanoë/CEA

La fusion de l'hydrogène en hélium est un phénomène complexe qui fait intervenir 2 isotopes de l'hydrogène, le Deutérium et le Tritium qui renferment respectivement 1 et 2 neutrons. Il faut une énergie colossale pour rapprocher ces 2 isotopes. Au centre du Soleil, la température de 15 millions de degrés permet d'amorcer cette réaction !