



Les centrales nucléaires

UNE FORMIDABLE SOURCE D'ÉNERGIE



Contrairement à une idée reçue, les **centrales nucléaires** (ici celle de Flamanville, dans la Manche) sont les seules centrales énergétiques à ne pas produire de pollution directe et, en dépit des dispositifs de sécurité importants qu'elles nécessitent, ce sont les plus rentables.

Si la gestion des déchets pose encore des problèmes et suscite des réactions justifiées, de même que le danger potentiel des installations, le nucléaire reste donc une alternative à la production thermique (qui rejette des gaz à effet de serre et provoque des pluies acides), aux éoliennes (dont le rendement est aléatoire) ou à l'utilisation des cours d'eau (qui peut impliquer de noyer des vallées entières).

Au sommet de Kyoto sur le réchauffement de l'atmosphère qui s'est tenu en 1997 il a été établi que plus de 40 % des rejets de CO₂ dans l'atmosphère provenaient des centrales électriques thermiques, qui brûlent du charbon ou des hydrocarbures.

Aujourd'hui, en France 77 % de l'électricité sont produits grâce au nucléaire, dont le coût est inférieur à celui de toute autre forme de production électrique. Cette compétitivité fait d'EDF le premier exportateur européen d'électricité.

LE COMBUSTIBLE D'UNE CENTRALE

Les centrales thermiques fonctionnent surtout grâce à des combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon) ; les centrales nucléaires, quant à elles, mettent à profit une autre source d'énergie : celle qui touche à la cohésion des composants du noyau de l'atome. Leur combustible est l'uranium 235.

FISSION ET FUSION

La matière est constituée d'atomes, eux-mêmes composés d'électrons gravitant autour d'un noyau fait de neutrons et de protons. L'énergie des forces de cohésion qui lient les constituants du noyau peut être libérée de deux manières différentes : par fission (un noyau lourd se scinde en constituants plus petits) ou par fusion (deux noyaux se fondent en un seul ; en général, un gros noyau en absorbe un plus petit, voire un neutron isolé).

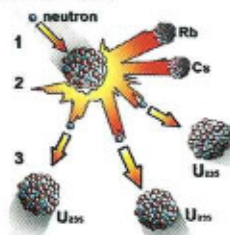
Dans les deux cas, la masse totale des produits obtenus est légèrement inférieure à la masse de départ. La différence est convertie en énergie selon l'équation : $E = mc^2$. Le facteur c^2 , carré de la vitesse de la lumière dans le vide (environ 300 000 km/s), est énorme. Aussi la minuscule différence de masse en jeu est-elle suffisante pour libérer des énergies terrifiantes : la première centrale nucléaire utilisait moins de 8 kg d'uranium par mois pour produire 60 000 kW d'électricité ; une centrale thermique de même capacité utiliserait 20 000 tonnes de charbon...

Les réacteurs nucléaires effectuent la fission de l'uranium 235. L'utilisation de la fusion à des fins civiles n'est pas encore maîtrisée.

FISSION ET RÉACTION EN CHAÎNE

La fission est la division du noyau d'un atome. On la réalise en bombardant les atomes avec des neutrons. Lorsqu'un neutron, projeté à grande vitesse, vient frapper un noyau, il le brise et libère de l'énergie.

Dans un réacteur nucléaire, on provoque la fission de l'uranium 235. Après collision avec un neutron (1), il éclate en 2 nouveaux atomes (1 atome de rubidium, Rb, et 1 atome de césium, Cs), libère l'énergie qui liait les particules maintenant séparées (2), et projette 3 neutrons à grande vitesse qui vont à leur tour frapper chacun un nouveau noyau d'uranium 235 (3). Chaque nouveau noyau frappé reproduit le même processus, et libère 3 nouveaux neutrons. La réaction s'amplifie donc à chaque nouvelle collision.



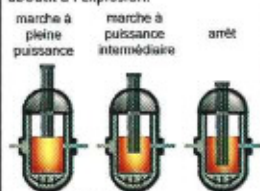
On parle de réaction en chaîne.

Si elle n'est pas freinée, elle aboutit à l'explosion nucléaire.

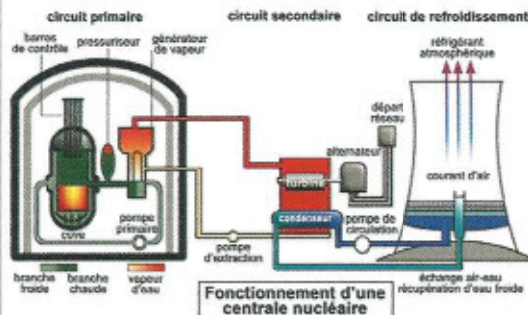
On peut, en théorie provoquer la fission de tous les atomes, mais plus leur structure est stable, plus l'énergie que doivent fournir les neutrons en les bombardant est importante. On utilise l'uranium 235 parce que sa structure, particulièrement instable, permet d'initier la réaction en chaîne sans avoir besoin de flux de neutrons à très grande vitesse, et donc sans avoir besoin d'un accélérateur de particules.

LE FONCTIONNEMENT D'UNE CENTRALE

La principale difficulté du nucléaire civil est de gérer la réaction en chaîne. Si elle n'est pas ralentie, c'est-à-dire si une partie des neutrons produits par la fission n'est pas détournée, elle s'emballerait et aboutit à l'explosion.



On la règle à l'aide de **barres de contrôle** en bore ou en cadmium qui ont pour propriété d'absorber les



neutrons. Leur immersion plus ou moins partielle depuis le couvercle de la cuve du réacteur permet de maîtriser la réaction en chaîne. Leur immersion totale dans le cœur de la cuve à plus de 300 °C. On maintient le tout sous forte pression, de sorte que l'eau ne se mette pas à bouillir et ne se transforme pas en vapeur. Cette eau circule dans un premier circuit fermé, le circuit primaire.

CIRCUITS ET PRODUCTION ÉLECTRIQUE

Qu'elles soient hydrauliques, thermiques, éoliennes, solaires ou nucléaires, toutes les centrales de production électrique fonctionnent sur le même principe : il s'agit de mettre en mouvement des turbines couplées à un alternateur.

Dans une centrale nucléaire, la turbine est mise en mouvement par la pression d'un couple de circuits d'eau chauffés au contact du réacteur. Elle tourne à 1 500 tours par minute. L'alternateur qu'elle entraîne convertit l'énergie mécanique en courant électrique par induction. On distingue 3 circuits distincts dans la production et le traitement de l'énergie fournie par le réacteur.

Le circuit primaire

L'uranium enrichi, c'est-à-dire dont la proportion en uranium 235 a été augmentée, est conditionné sous forme de pastilles. Ces pastilles sont

réunies dans des gaines métalliques étanches, puis plongées dans une cuve remplie d'eau. Cet ensemble forme le cœur du réacteur, et c'est là que se réalise la réaction en chaîne. L'énergie qu'elle dégage porte l'eau de la cuve à plus de 300 °C. On maintient le tout sous forte pression, de sorte que l'eau ne se mette pas à bouillir et ne se transforme pas en vapeur. Cette eau circule dans un premier circuit fermé, le circuit primaire.

Le circuit secondaire

Pour éviter toute contamination radioactive, le circuit primaire alimente un générateur de vapeur (constitué de plusieurs milliers de tubes en forme de U) qui baigne dans l'eau du circuit secondaire qu'il porte à ébullition. C'est la pression de la vapeur ainsi engendrée qui entraîne la turbine couplée au réacteur. On associe généralement 3 ou 4 générateurs de vapeur à chaque réacteur.

L'ensemble est enfermé dans la même enceinte : le « bâtiment réacteur ». Ce bâtiment est un cylindre de béton étanche de 50 m de diamètre et de 75 m de haut coiffé d'un dôme.

La turbine et le reste des machines sont situés dans un bâtiment légèrement excentré appelé « salle des machines ».

Le nucléaire en France

59 réacteurs nucléaires classiques
3 surgénérateurs (dont un expérimental et un autre en voie de démantèlement).

Part du nucléaire dans la production électrique française

1974 : 8 %
2003 : près de 80 %

Durée de vie des déchets radioactifs

déchets à radioactivité faible : 2 à 30 ans (90 % de la production)

déchets à radioactivité moyenne : 30 à 300 ans (9,5 % de la production)

déchets à radioactivité forte : plus de 300 ans (0,5 % de la production)

Centrales nucléaires



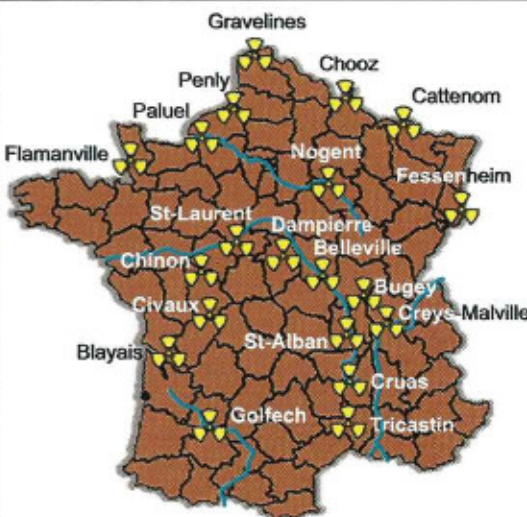
90 %

Hôpitaux et centres de recherche



10 %

Origine des déchets radioactifs



Implantation des centrales nucléaires en France

LES PLUS GROS PRODUCTEURS D'ÉLECTRICITÉ NUCLÉAIRE

En 2000 ; source : CEA

	nombre de réacteurs	puissance installée (en GW)	prév. 2020 (en GW)
États-Unis	104	98,1	68,6
France	59	63,2	56,0
Japon	53	43,5	67,8
Allemagne	20	22,3	0
Russie	29	19,8	23,6
Canada	21	14,9	10,3
Corée du Sud	16	12,9	25,6
Royaume-Uni	35	12,9	9,6
Ukraine	14	12,1	11,7
Suède	11	9,5	4,2

Deuxième producteur mondial, la France est le premier exportateur européen d'électricité grâce à son parti pris du tout-nucléaire. L'Allemagne, au contraire, a stoppé la construction de nouvelles centrales en 2000 et prévoit l'arrêt de toute activité nucléaire à l'horizon 2020.

Le circuit de refroidissement

Toujours pour éviter une éventuelle contamination radioactive au cas où, malgré toutes les précautions prises, l'eau du circuit secondaire serait entrée en contact avec celle du circuit primaire, le circuit secondaire est lui aussi hermétique. Sa vapeur, une fois utilisée par les turbines, n'est pas rejetée dans l'atmosphère, mais refroidie et renvoyée dans le générateur de vapeur.

Le circuit de refroidissement, indépendamment des deux autres, fonctionne à partir d'une source d'eau froide extérieure – une rivière, un fleuve, la mer. L'eau froide est pompée et baigne un condenseur au sein duquel circule la vapeur sortant des turbines. La vapeur se condense avant de retourner vers le générateur de vapeur, et l'eau extérieure, légèrement chauffée, est rejetée.

Si la source d'eau froide a un débit limité ou si l'on souhaite éviter d'en perturber l'équilibre écologique, on refroidit préalablement l'eau utilisée avant de la rejeter. Ce refroidissement se fait dans des tours de refroidissement ou



« aéroréfrigérantes ». Une partie s'évapore et forme les **panaches blancs** caractéristiques des centrales nucléaires.

SUPERPHÉNIX ET LES SURGÉNÉRATEURS

PRINCIPE DU SURGÉNÉRATEUR

Un surgénérateur est un type particulier de réacteur qui consomme de la matière fissile, mais qui, au terme de la réaction, a produit plus de combustible qu'il n'en a consommé.

Dans un réacteur classique, la fission nucléaire produit des neutrons à grande vitesse qu'il faut contenir en partie pour éviter que la réaction en chaîne ne s'emballe et n'aboutisse à l'explosion. On utilise pour cela des barres de cadmium ou de bore qui les absorbent, tout en restant inertes.



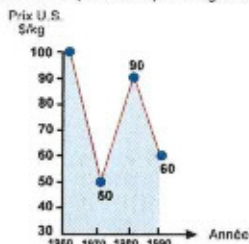
Dans un **surgénérateur**, on a remplacé le cadmium ou le bore par de l'uranium 238, c'est-à-dire la partie du minerai d'uranium inutilisable dans les centrales classiques. Lorsqu'il absorbe un neutron, l'uranium 238 devient du plutonium 239 qui, lui, n'est pas inerte et sert de combustible au surgénérateur.

Le surgénérateur est donc un réacteur à plutonium qui régénère son propre carburant à partir d'uranium 238, un déchet de l'industrie nucléaire classique. La fission du plutonium produit 3 neutrons. 1 sert à la fission

d'un nouvel atome de plutonium pour entretenir la réaction en chaîne, les 2 autres servent à transformer 2 atomes d'uranium 238 en plutonium. La fission initiale d'un atome de plutonium aboutit donc à la formation de deux nouveaux atomes de ce même plutonium. À plein régime, le surgénérateur produit donc plus de combustible qu'il n'en consomme. De cette propriété vient son nom.

INCONVÉNIENTS DES SURGÉNÉRATEURS

Les surgénérateurs ont été développés dans les années 1950-1960, à une époque où l'on pensait les ressources en uranium très limitées, et la croissance des besoins en électricité très importante. Mais la consommation d'énergie en 2000 représente en fin de compte moins de 10 % des projections d'alors, et il s'est par ailleurs avéré depuis que l'uranium est beaucoup moins rare qu'on avait pu l'imaginer.



PRIX CONTRACTUEL DU MINÉRAI D'URANIUM EN DOLLARS (1995)
(tous les chiffres sont annuels)

En dépit de son **coût** et des précautions que sa manipulation implique, il est aujourd'hui le combustible le plus rentable du marché, compte tenu de son rendement énergétique. Les gains en termes de productivité et d'indépendance énergétique qui justifiaient les surgénérateurs ont donc peu à peu été éclipsés par les risques écologiques et militaires énormes qu'ils représentent.

Risques techniques et écologiques

Pour que la fusion de l'uranium 238 en plutonium puisse avoir lieu, il ne faut absolument pas que les neutrons émis lors de la fission du plutonium initial soient ralentis. Cela implique des conditions extrêmes qui rendent le réacteur particulièrement instable et difficile à maîtriser.

Par ailleurs, le fluide destiné à colporter l'énergie qui se dégage du cœur du réacteur est porté à des températures telles qu'on ne peut se contenter d'utiliser de l'eau, même sous pression, d'autant qu'augmenter la pression autour du réacteur accroît son instabilité. Il faut un liquide capable de supporter de très hautes températures sans monter en pression, tout en étant bon refroidisseur.

Seul le sodium liquide réunit toutes ces conditions, mais il pose des problèmes graves de sécurité, qui n'affectent pas les centrales classiques à eau : il s'enflamme au contact de l'air et explose au contact de l'eau. Très corrosif, il attaque les canalisations, et, étant donné le danger potentiel d'incendie, la moindre fuite implique l'arrêt total du réacteur.

Le plutonium, plus radioactif et plus instable que l'uranium, demande des précautions qui rendent son utilisation beaucoup plus coûteuse.

Risques militaires

Enfin, la prolifération du plutonium sur le marché civil augmente les risques de détournement illicite à des fins militaires. Il faut 40 kg de plutonium pour faire fonctionner un surgénérateur, alors qu'une poignée suffit pour une bombe équivalente à celle qui a explosé à Nagasaki. La technologie requise pour une bombe nucléaire rudimentaire est à la portée de nombreux groupes, et seul le contrôle sévère du commerce des matériaux fissiles a permis jusqu'ici d'éviter la prolifération d'armes nucléaires clandestines. La circulation massive de plutonium qu'implique le développement des surgénérateurs mettrait en péril cet équilibre.

Toutes ces raisons font qu'en dépit d'avantages théoriques considérables, la filière des surgénérateurs est peu à peu abandonnée.

LE MINÉRAI : ENRICHISSEMENT ET TRANSFORMATION

EXTRACTION



Relativement répandu, le minerai d'uranium provient de gisements situés principalement au Canada, aux États-Unis, au Gabon, au Niger, en Afrique du Sud, en Namibie (ici la **mine de Rossing**), en Australie, en Russie, au Kazakhstan et en Ouzbékistan. C'est la Cogema, filiale du Commissariat à l'énergie atomique, qui assure la majeure partie des opérations d'extraction et d'approvisionnement.

La teneur en uranium du minerai est faible : de l'ordre de 1 à 3 kg par tonne.



Il est concassé, broyé, puis dissous dans l'acide sulfurique. On traite la solution obtenue pour en tirer un concentré sous forme de poudre jaune appelée « **yellow cake** », qui contient 70 à 75 % d'uranium. L'uranium est ensuite commercialisé sous cette forme. Mille tonnes de minerai donnent 1,5 à 10 tonnes de yellow cake. Pour être utilisable, le yellow cake doit être purifié par divers traitements chimiques délicats au fluor ; on obtient de l'uranium suffisamment pur pour procéder à son enrichissement en isotope 235.

ENRICHISSEMENT

L'uranium naturel est constitué d'un mélange de plusieurs isotopes (variétés chimiques) d'un même élément (chimique) dans les proportions suivantes : 99,294 % d'uranium 238, 0,7 % d'uranium 235, 0,006 % d'uranium 234. Seul l'uranium 235 entre en jeu dans la fission exploitée dans les centrales nucléaires. Il faut donc encore traiter l'uranium purifié par diffusion gazeuse, afin d'amener la concentration en uranium 235 à une valeur de 3 à 4 %.

FABRICATION DU COMBUSTIBLE

L'uranium enrichi est ensuite transformé en oxyde d'uranium, une poudre noire, puis compressé en pastilles d'une dizaine de grammes. Les pastilles sont ensuite « frittées », c'est-à-dire cuites à très haute température, avant d'être placées dans des tubes en zirconium de 4 à 4,5 mètres (appelés « crayons »). Les crayons (de 150 à plus de 260 selon la puissance) sont ensuite assemblés et introduits dans le réacteur.

LES DÉCHETS

ÉVACUATION



Les crayons dont le combustible est épuisé sont déchargés. Cette opération se déroule sous 10 mètres d'eau pour faire écran aux particules perforantes qui peuvent être émises au cours de la manipulation. Ils passent un an dans une piscine de désactivation, temps nécessaire à la chute de leur radioactivité, puis on les stocke dans des conteneurs blindés et ignifugés appelés « **châteaux** ». Les châteaux sont ensuite acheminés par rail jusqu'aux centres de retraitement.

RETRAITEMENT ET STOCKAGE



Les opérations de retraitement sont effectuées à **l'usine de la Hague**, en

France, et de Sellafield, au Royaume-Uni. Après un nouveau temps de stockage sous eau de deux ans pour perdre encore de leur radioactivité, les pastilles d'uranium sont retraitées de manière à en isoler l'uranium et le plutonium encore utilisables des autres produits radioactifs qui seront simplement entreposés jusqu'à la perte de toute leur radioactivité.



L'essentiel des opérations de traitement de ces produits destinés au **stockage** consiste à en réduire le volume tout en assurant leur non-dissémination. Une fois isolés, ils sont dans un premier temps stockés sous forme liquide dans des cuves réfrigérées pour une durée de 5 ans. Ils sont ensuite incorporés dans du verre en fusion et entreposés sous cette forme dans des sites géologiques profonds où ils ne risquent pas de contaminer le milieu.

Après compactage, le volume total de déchets produit par un an d'activité d'une centrale nucléaire moyenne est d'environ 2 m³. Ainsi, en 20 ans, les déchets produits par l'ensemble des centrales nucléaires françaises représentent le volume d'une piscine moyenne.

LA CATASTROPHE DE TCHERNOBYL

Le 26 avril 1986, à 1 h 23, les ingénieurs de la centrale nucléaire de Tchernobyl, en Ukraine, procèdent à des essais dans des conditions instables sur le réacteur n°4. Le contrôle leur échappe et la réaction s'emballa, provoquant l'ébullition de l'eau du circuit de refroidissement et une brusque augmentation de puissance.

L'insertion des barres de contrôle ne suffit pas à faire chuter la pression et une première explosion souffle la dalle supérieure du réacteur – qui pèse pourtant 2 000 tonnes. La chute de pression dans les tubes de force provoque une ébullition générale et une nouvelle augmentation de puissance qui entraîne une seconde explosion. Cinq tonnes de combustible radioactif sont projetées dans l'atmosphère. Le cœur du réacteur principal est béant ; il continuera de brûler pendant 10 jours. Vingt-huit des sauveteurs qui sont intervenus, gravement irradiés, meurent dans les jours qui suivent.

Dans un premier temps les dirigeants soviétiques nient la catastrophe. Pourtant, dès le lendemain, l'évacuation des villes de Tchernobyl et Pripiat commence ; au total, 130 000 personnes sont mises à l'abri. On constate aujourd'hui, en Ukraine, Russie et Biélorussie, un nombre alarmant de cancers de la thyroïde dus à l'iode radioactif craché par le réacteur. Quant aux autorités de l'époque, elles s'en tenaient, fin 1986, au bilan de 31 morts et 277 blessés...



Un **sarcophage** de béton et d'acier fut coulé en 1986 pour confiner le réacteur. La piscine dans laquelle baignait le réacteur a été drainée par un tunnel de 160 mètres, à 6 mètres sous le sol, et le vide ainsi créé rempli de béton. Pour stopper toute infiltration d'eau contaminée dans la nappe phréatique – on estime à un million de litres la quantité d'eau radioactive encore présente dans l'enceinte de la centrale nucléaire – le sol a été gelé par injection d'azote liquide.

Dès octobre 1986, le réacteur n°1 reprenait son service normal, suivi, quelques mois plus tard, par les réacteurs 2 et 3. Après le passage du nuage radioactif qui a traversé l'Ukraine, la Biélorussie, la Finlande, la Scandinavie, la Pologne, l'Allemagne, la France et l'Italie, un certain nombre de produits alimentaires ont été interdits à la consommation par mesure de précaution.

Cet accident très grave a fortement marqué l'opinion publique européenne. Ainsi, l'Autriche a décidé de se passer du nucléaire, et l'Allemagne devrait démanteler toutes ses centrales à l'horizon 2020.