

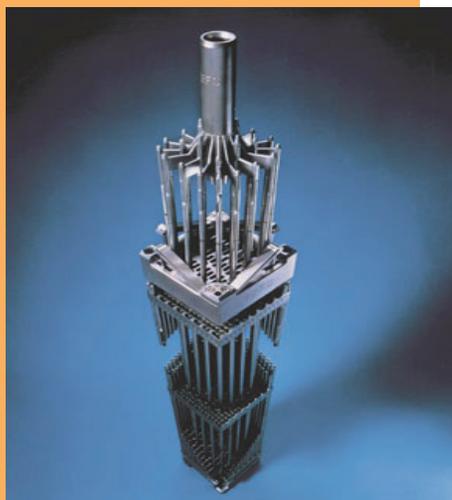


Énergie nucléaire

Un réacteur nucléaire comment ça marche ?

Combustible

Notons que le plutonium ^{239}Pu et l'uranium ^{235}U sont aussi deux noyaux fissiles utilisables – et même utilisé dans le cas du plutonium – pour produire de l'énergie, mais il est nécessaire de les fabriquer : ils sont artificiels. Certains REP fonctionnent avec un combustible composé de 30% de MOX (mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium) et 70% d'uranium enrichi.



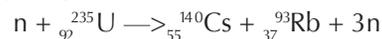
Modèle d'un assemblage combustible de REP montrant en haut la tête de la grappe de contrôle et au milieu, parmi les crayons combustibles (ici en partie coupés ou absents), les tubes guides des barres de contrôle.

Grâce aux progrès réalisés en physique nucléaire et en physique des particules nous savons que la matière est un immense réservoir d'énergie. Les centrales nucléaires exploitent cette découverte en produisant de l'électricité par la fission de noyaux atomiques lourds. Les réacteurs nucléaires actuels utilisent de l'uranium dont la fission est provoquée par des neutrons dits thermiques, c'est-à-dire ayant une énergie de l'ordre de 0,1 eV. Nous ne parlerons ici que des Réacteurs à Eau sous Pression (REP), utilisés majoritairement en France.

Le réacteur

En schématisant à l'extrême, le cœur d'un réacteur, c'est-à-dire la partie où a lieu la fission, comporte trois organes essentiels : le **combustible**, le modérateur et le fluide caloporteur.

◆ Le combustible est composé de matière fissile ; le seul noyau fissile qui existe à l'état naturel est l'uranium 235 (^{235}U) : il est présent à hauteur de 0,7% dans le minerai d'uranium. Le contrôle de la fission est un point clé dans le fonctionnement des réacteurs. Considérons par exemple la fission d'un noyau d' ^{235}U :



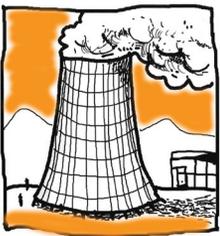
Elle est causée par un neutron qui interagit avec le noyau d'uranium. La probabilité que cette réaction se produise dépend de l'énergie du neutron ; elle est maximale pour des neutrons de faible énergie. Deux noyaux de masses voisines (les fragments de fission) sont produits ainsi que 2 à 3 neutrons dont l'énergie est voisine de 2 MeV.

◆ Le modérateur (l'eau dans le cas des REP) ralentit les neutrons produits dans la réaction précédente afin qu'ils puissent plus facilement interagir avec d'autres noyaux d'uranium et induire de nouvelles réactions de fission. La fission d'un noyau d'uranium produit environ une énergie de 200 MeV dont 85 % correspond au mouvement des fragments de fission. Ces derniers sont rapidement arrêtés par la matière environnante et y génèrent de la chaleur. Le reste de l'énergie provient principalement de la désintégration radioactive des fragments de fission et de différentes réactions de capture de neutrons.

◆ Le fluide caloporteur a pour but d'extraire la chaleur produite par la fission. Dans les REP, l'eau joue à la fois le rôle de modérateur et de caloporteur.

La réaction en chaîne

Sur les trois neutrons émis dans la réaction de fission utilisée comme exemple ci-dessus, il est possible qu'au moins l'un d'entre eux provoque une nouvelle fission suscitant ainsi une réaction en chaîne qui s'auto-entretient. Les autres neutrons sont perdus, soit par capture stérile par



Un réacteur nucléaire comment ça marche ?

un noyau (c'est-à-dire sans induire de fission), soit par fuite à l'extérieur du volume du cœur. Cette réaction en chaîne est caractérisée par la valeur du coefficient de multiplication k qui donne le nombre moyen de fissions induites par une réaction de fission. Partant initialement de N_0 fissions, on aura successivement :

$$N_0 \xrightarrow{t=0} kN_0 \xrightarrow{1^{\text{e}} \text{ géné}} k^2N_0 \xrightarrow{2^{\text{e}} \text{ géné}} k^3N_0 \xrightarrow{3^{\text{e}} \text{ géné}} \dots$$

où le temps inter-génération est voisin de 50 μs . On voit donc que :

- ◆ Si $k > 1$, la réaction en chaîne diverge très vite ; on dit que le système est sur-critique. C'est ce qui est recherché pour les bombes nucléaires.
- ◆ Si $k < 1$, la réaction s'arrête rapidement sans apport extérieur de neutrons, et on dit que le système est sous-critique.
- ◆ Si $k = 1$, chaque fission induit en moyenne une fission nouvelle ; on dit que le système est critique. C'est le mode de fonctionnement des réacteurs actuels.

Dans un réacteur critique, il est essentiel de maintenir exactement la valeur du coefficient de multiplication à la valeur $k=1$ de façon à stabiliser la réaction en chaîne. Un décalage minime de k par rapport à l'unité pourrait conduire à un emballement ! Compte tenu de ce que nous avons dit sur la durée – 50 microsecondes – séparant deux générations de neutrons, même si k est légèrement supérieur à l'unité, par exemple $k=1,001$, la puissance émise serait multipliée par 100 en 20 centièmes de seconde.

Y a-t-il un pilote dans le réacteur ?

Il est donc indispensable de contrôler la réactivité du réacteur pour en assurer la sûreté et ajuster son niveau de puissance. Ceci est rendu possible grâce à des «grappes de contrôle» composées d'éléments absorbant les neutrons (carbure de bore, alliage d'argent, indium et cadmium).

Ce pilotage par les grappes de contrôle exploite une propriété particulière des neutrons produits. Lors de la fission, une petite partie des neutrons (0,7 % pour ^{235}U) est émise de façon retardée (jusqu'à plusieurs dizaines de secondes). Ils sont produits lors de la désexcitation de certains fragments de fission. Cette fraction, bien que faible, allonge considérablement le temps inter-génération qui passe à 0,1 s pour la fission de ^{235}U , autorisant le pilotage du réacteur par les grappes de contrôle. La présence de ces neutrons retardés est une contrainte forte sur le choix du combustible.

Le pilote automatique du réacteur

Bien que le contrôle actif soit indispensable pour gérer les arrêts et les démarrages d'un réacteur ainsi que les changements de la puissance fournie, une auto-régulation de la réaction en chaîne est également indispensable. Des mécanismes existent qui auront tendance à faire chuter la puissance émise



Pastilles d'oxyde d'uranium. L'uranium enrichi, transformé en oxyde d'uranium, est compacté en pastilles cuites au four. Cylindre d'environ 8 mm de diamètre pesant de 7 à 8 grammes, une pastille produit à elle seule autant d'énergie qu'une tonne de charbon.



Un réacteur nucléaire comment ça marche



Crayons de combustible.

Le terme « **poison consommable** » signifie que ce poison disparaît progressivement à la suite de captures neutroniques.

La **puissance** d'un réacteur est généralement exprimée en mégawatt électrique (MWe) ; cela résulte de la conversion de chaleur en électricité avec un rendement de l'ordre de 33%.

Encadré 1 : Transformation du cœur du réacteur.

On indique, dans le tableau suivant comment se transforme une partie du cœur d'un réacteur contenant, au départ, environ une tonne de matériau fissile (^{235}U).

	Masse initiale (kg)	Masse après 3 ans (kg)
^{238}U	26 330	25 660
^{235}U	950	280
^{236}U	0	110
^{239}Pu	0	260
Américium – Curium	0	20
Produits de fission	0	950

Environ 60% de ^{235}U est fissionné ; le ^{239}Pu formé par la capture d'un neutron par ^{238}U suivie par une désintégration γ , assure 40% des fissions restantes.

dès que celle-ci augmente. Ces contre-réactions ont des origines diverses mais sont toujours reliées à une variation de température. Ces mécanismes complexes peuvent se résumer ainsi :

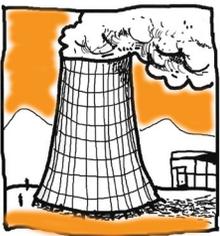
- ◆ **L'effet Doppler.** Une augmentation locale de la température du combustible, constitué principalement d' ^{238}U non fissile, provoque une augmentation de la capture des neutrons par cet élément, ce qui diminue le nombre de neutrons disponibles pour les réactions de fission. L'énergie libérée et donc la température diminuent.
- ◆ **L'effet de spectre.** Une augmentation de température entraîne la dilatation de l'eau qui devient moins performante pour ralentir les neutrons qui ont alors une probabilité plus faible d'induire de nouvelles fissions. La dilatation de l'eau induit aussi une baisse de la concentration en bore qu'elle contient (le bore capture très efficacement les neutrons) ce qui diminue la capture des neutrons et a donc l'effet inverse du précédent en réactivant la réaction de fission.
- ◆ **Le coefficient de vide.** La perte du fluide caloporteur, à la suite d'une fuite ou d'un autre accident, doit provoquer une chute de la réactivité du cœur pour que la température du combustible n'augmente pas (fusion du cœur). Dans le cas d'un REP, c'est bien le cas puisque le fluide caloporteur est aussi le modérateur : les neutrons ne sont plus modérés et, comme la probabilité d'induire de nouvelles fissions diminue fortement quand l'énergie des neutrons augmente, k diminue.

Dans tous les cas, les mécanismes d'autorégulation doivent conduire à une baisse de k lorsque la température augmente, et inversement, de sorte que le système soit stable.

Pour entretenir la réaction en chaîne, une certaine quantité de noyaux fissiles est nécessaire ; or, au fur et à mesure du fonctionnement du réacteur, ces derniers sont remplacés par les fragments de fission qui sont généralement très « neutrophages ». Il est donc nécessaire de disposer, au démarrage, d'une réserve de réactivité pour contrebalancer l'usure du combustible. Afin de garder une valeur constante pour k , on ajoute des **poisons consommables** (par exemple de l'acide borique dans l'eau des REP).

Qu'y a-t-il à l'intérieur d'un REP ?

Les REP utilisés en France ont une **puissance** électrique variant de 900 à 1450 MWe (c'est-à-dire qu'un REP fournit l'électricité domestique pour près de 2 millions de personnes). Il faut fissionner environ une tonne de matière



Un réacteur nucléaire comment ça marche ?

fissile pour produire 1000 MWe pendant un an. Le combustible est généralement de l'oxyde d'uranium enrichi, pour lequel la proportion des différents isotopes a été modifiée afin d'augmenter la proportion du matériau fissile (96,5% d' ^{238}U et 3,5% d' ^{235}U). Un réacteur contient environ 90 tonnes de combustible qui est renouvelé par tiers chaque année. Dans l'encadré 1, nous donnons l'évolution, sur trois ans, d'un tiers du cœur.

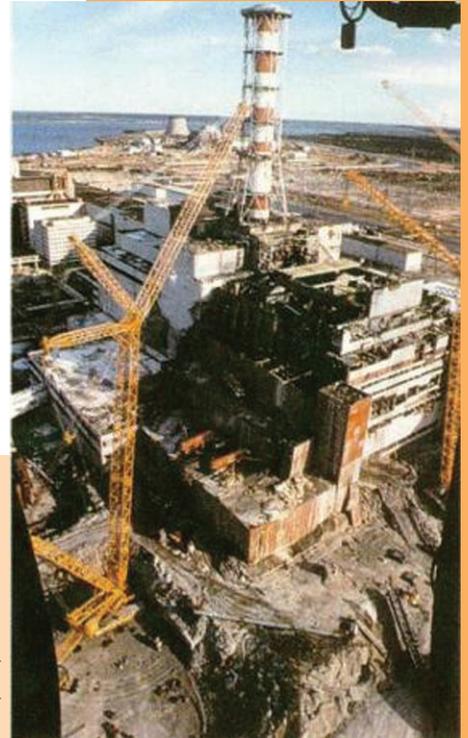
À l'état naturel, la teneur en ^{235}U est de 0,7% ; on doit donc enrichir le minerai pour atteindre la proportion de 3,5%, laissant un uranium, dit appauvri, contenant 0,2% d' ^{235}U . Il faut 7 tonnes d'uranium naturel pour produire 1 tonne d'uranium enrichi et donc 200 tonnes d'uranium naturel sont nécessaires pour produire 1000 MWe pendant un an.

L'accident de Tchernobyl (26 avril 1986)

Le réacteur de Tchernobyl de type RBMK, est très différent des REP utilisés en France où l'eau joue à la fois le rôle de caloporteur et de modérateur des neutrons. Dans un RBMK, le modérateur est du graphite et le caloporteur de l'eau. Cette eau, circulant dans des tubes, est chauffée par le combustible jusqu'à être transformée en vapeur afin d'entraîner directement les turbines. La caractéristique principale de ce type de réacteur est d'avoir un coefficient de vide positif. Une augmentation de la puissance ou une diminution de flux de l'eau provoque une augmentation du taux de vapeur dans le fluide circulant au voisinage du combustible. Le fluide étant moins dense, l'absorption des neutrons y est diminuée et ceci a pour effet d'augmenter le nombre de fissions et donc la température. Ce dernier effet (effet de spectre) entraîne une réduction de la probabilité de fission. Ces deux effets sont donc antagonistes. Cependant, selon la puissance du réacteur, l'un peut l'emporter sur l'autre. À faible puissance, l'effet du coefficient de vide devient prépondérant rendant le réacteur instable : c'est la raison principale du déroulement de l'accident. Celui-ci est cependant le fruit d'un enchaînement d'erreurs.

Notons que cet accident est survenu lors d'un test de sûreté qui consistait à voir si le réacteur restait sûr lorsqu'il était coupé du réseau électrique. Pour faire ce test, la puissance du réacteur devait être de l'ordre du tiers de la puissance nominale. Mais à la suite d'une erreur opérationnelle, elle a été ajustée à une valeur très faible pour laquelle le réacteur était instable. Afin de revenir dans une zone de puissance stable, les opérateurs ont retiré la plupart des barres de contrôle (il en restait alors cinq fois moins que le minimum requis) en déconnectant le système de régulation automatique. Parallèlement, les conditions thermodynamiques de l'eau ont été modifiées en mettant en service les huit pompes de circulation à fort débit, en vue de refroidir le cœur pendant l'essai ; la marge de refroidissement devenait très faible et dès lors, toute augmentation de température ou toute diminution de débit entraînait l'ébullition en masse de l'eau située à l'entrée basse du réacteur, augmentant encore la réactivité. L'essai prévu a été engagé par la fermeture de la vanne d'admission de la vapeur à la turbine ; le ralentissement du turboalternateur a entraîné celui des pompes de circulation.

L'accident a été alors déclenché par l'opérateur quand il a appuyé sur le bouton d'arrêt d'urgence : l'insertion des barres, dont la chute était lente (20 secondes!) a entraîné une augmentation de la réactivité locale en partie basse du réacteur et l'énergie déposée a conduit à la rupture brutale de quelques canaux. L'ébullition en masse de l'eau a ensuite engendré le passage du réacteur en situation de prompte *criticité* et la puissance a pu atteindre, en quelques secondes, cent fois la valeur nominale, soit 300 000 MW ! Les hautes températures atteintes ont conduit à une production d'hydrogène par réaction de l'eau sur les matériaux de la structure. L'hydrogène accumulé a provoqué une explosion qui a détruit la dalle supérieure en béton du réacteur.



La centrale de Tchernobyl après l'accident.