

LA COLLECTION

- 1 > L'atome
- 2 > La radioactivité
- 3 > L'homme et les rayonnements
- 4 > L'énergie
- 5 > L'énergie nucléaire : fusion et fission
- 6 > Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire
- 7 > Le cycle du combustible nucléaire
- 8 > La microélectronique



> De la fission à la réaction en chaîne

DE LA RECHERCHE  
À L'INDUSTRIE

# 6 > Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire



LA FISSION NUCLÉAIRE  
LES COMPOSANTS  
D'UN RÉACTEUR NUCLÉAIRE  
LES DIFFÉRENTS TYPES DE RÉACTEURS



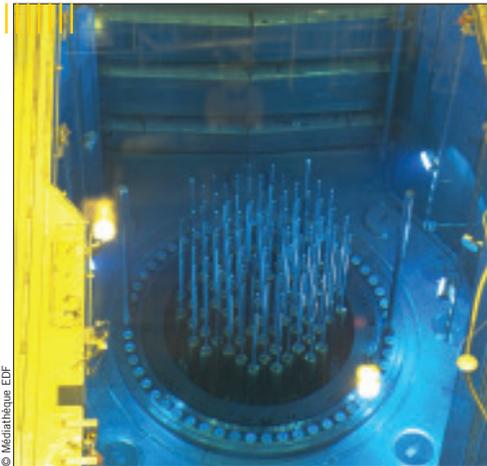
© Commissariat à l'Énergie Atomique, 2002  
Direction de la communication  
Bâtiment Siège - 91191 Gif-sur-Yvette cedex  
www.cea.fr

ISSN 1637-5408.



# Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire

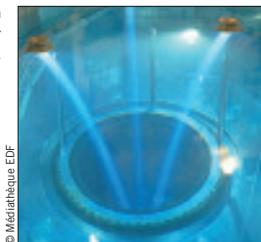
<b>LA FISSION NUCLÉAIRE</b>	<b>4</b>
Les atomes fissiles	5
L'énergie libérée par la fission	5
Les neutrons et la réaction en chaîne	6
<b>LES COMPOSANTS D'UN RÉACTEUR NUCLÉAIRE</b>	<b>7</b>
Le combustible	8
Les barres de contrôle, piègeuses de neutrons	9
Le caloporteur, un transporteur de chaleur	9
Le modérateur, un ralentisseur de neutrons	10
Le générateur de vapeur, un échangeur de chaleur	10
<b>LES DIFFÉRENTS TYPES DE RÉACTEURS</b>	<b>11</b>
Différentes familles de réacteurs	12
Les réacteurs à eau sous pression (REP)	15
Les réacteurs à neutrons rapides (RNR)	15
Les réacteurs à caloporteur gaz (RCG)	15



© Médiathèque EDF

Chargement du réacteur et fermeture du couvercle de la cuve au Centre national de production d'électricité (CNPE) de Civaux (tranche 1).

Gros plan d'un cœur de réacteur.



© Médiathèque EDF



Les fondateurs du premier réacteur d'essai : Lew Kowarski (à gauche) et Frédéric Joliot-Curie (à droite).



Ci-contre, le bâtiment du premier réacteur d'essai Zoé.

“Le premier réacteur nucléaire a été construit en 1942, aux États-Unis. Six ans plus tard, un réacteur similaire fonctionne pour la première fois en France.”

## introduction

Une centrale électrique est une usine qui produit de l'électricité. Il existe des centrales thermiques, des centrales hydrauliques... et des centrales nucléaires. Toutes sont basées sur le même principe : faire tourner une turbine couplée à un alternateur qui fabrique de l'électricité. La différence de fonctionnement se situe au niveau de l'entraînement de la turbine. Dans les centrales hydrauliques, l'eau des barrages actionne la turbine. Dans les centrales thermiques classiques, un combustible fossile (charbon, gaz naturel ou pétrole) est brûlé pour transformer de l'eau en vapeur capable d'entraîner la turbine. Dans les centrales nucléaires, les noyaux d'uranium remplacent le combustible fossile. En se cassant, ces gros noyaux libèrent de l'énergie nucléaire, qui sera utilisée pour produire de la vapeur d'eau laquelle, de la même manière que dans les centrales thermiques, peut activer la turbine. Le premier réacteur nucléaire est construit en 1942, aux États-Unis, par Enrico Fermi. Il est

constitué d'un empilement de 6 tonnes d'uranium métallique, 34 tonnes d'oxyde d'uranium et 400 tonnes de graphite. La “pile de Fermi” (appelée ainsi à cause des empilements) génère une puissance de 0,5 watt seulement. En France, le premier réacteur d'essai Zoé, est construit par le CEA dans son centre d'études de Fontenay-aux-Roses. Cette pile fonctionne pour la première fois le 15 décembre 1948. En 1953, sa puissance est portée à 150 kW et elle cesse de fonctionner en 1976. Depuis, le bâtiment Zoé a été transformé en “musée de l'Atome”. Aujourd'hui, les réacteurs des centrales nucléaires françaises délivrent de 900 à 1 450 mégawatts\* d'électricité. La chaudière nucléaire – présente dans les réacteurs – constitue la partie de la centrale nucléaire fournissant la chaleur nécessaire à la production de vapeur d'eau. Les autres éléments (turbine, alternateur, etc.) sont communs à toutes les centrales.

\* Mégawatt : un million de watts.

LA FISSION D'UN ATOME DÉGAGE UNE ÉNERGIE QUI SE TRANSFORME EN CHALEUR. LE PRINCIPE DU RÉACTEUR NUCLÉAIRE EST DE LA RÉCUPÉRER POUR EN FAIRE DE L'ÉLECTRICITÉ.

# La fission nucléaire



© Médiathèque EDF

De la fission à la réaction en chaîne

6 > Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire

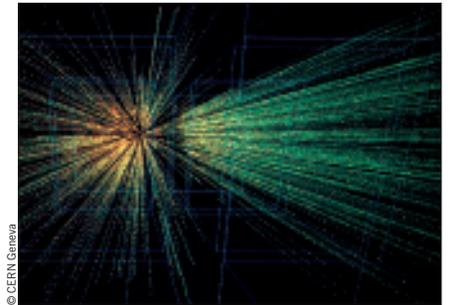
“Chaque fission libère deux à trois neutrons d'énergie élevée se déplaçant à 20 000 km/s.”

## LES ATOMES FISSILES

Le noyau de certains gros atomes a la propriété de se casser en deux sous l'effet d'une collision avec un projectile bien choisi. En l'occurrence, le neutron est un projectile particulièrement bien adapté.

En effet, sans charge électrique, cette particule a la faculté d'approcher suffisamment près le noyau, chargé positivement, sans être repoussée par des forces électriques. Le neutron peut alors pénétrer à l'intérieur de ce noyau et le briser en deux morceaux. Il ne s'agit pas d'une explosion du noyau sous l'effet du choc mécanique avec le neutron, **mais d'une cassure interne déclenchée par l'arrivée de ce neutron supplémentaire.** C'est le résultat du bouleversement induit lors de l'intégration du neutron arrivant dans le noyau, sous l'action de la force nucléaire (voir livret *L'énergie nucléaire : fusion et fission*). La fragmentation du noyau est appelée **réaction de fission**. Un atome ayant la faculté de se briser en deux lors d'une collision est dit **fissile**. Les plus connus d'entre eux sont l'uranium 235 et le plutonium 239. Les deux morceaux obtenus après la fission d'un gros noyau sont les produits de fission. Ils sont la plupart du temps **radioactifs**.

Les atomes dont les noyaux sont instables sont dits radioactifs. Ces noyaux se transforment naturellement en d'autres noyaux en émettant des rayonnements (voir livret *La radioactivité*).



© CERN Geneva

## L'ÉNERGIE LIBÉRÉE PAR LA FISSION

La réaction de fission d'un noyau s'accompagne d'un grand dégagement d'énergie.

Les deux produits de fission emportent une grande partie de cette énergie sous forme **cinétique**: ils sont éjectés avec une grande vitesse

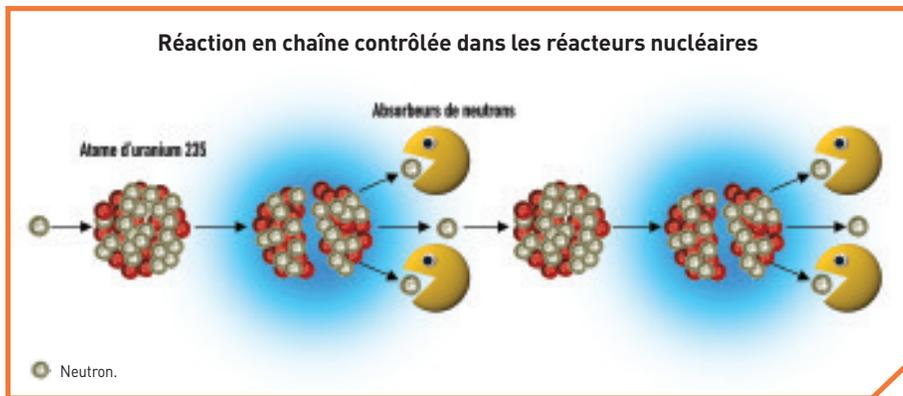
L'énergie cinétique est l'énergie d'un corps en mouvement. Elle augmente avec sa masse et sa vitesse. Une voiture roulant à très grande vitesse a plus d'énergie cinétique que la même voiture roulant à petite vitesse. En effet, si la première percute un objet, les dégâts seront plus importants que si c'était la seconde. De même, une petite voiture a moins d'énergie qu'un camion roulant à la même vitesse.

(8000 km/s). Ils se frayent un chemin parmi les autres atomes en les “bousculant” car ils constituent de gros projectiles. Au cours de ces chocs, ils perdent rapidement

leur vitesse (et donc leur énergie) en échauffant la matière environnante et s'arrêtent dans la masse d'uranium. Leur énergie de départ se trouve finalement transformée en chaleur : localement,

De la fission à la réaction en chaîne

6 > Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire



La température de l'uranium augmente. Le principe d'un réacteur nucléaire consiste à récupérer cette chaleur pour la transformer en électricité.

### LES NEUTRONS ET LA RÉACTION EN CHAÎNE

Chaque fission produit aussi en moyenne deux à trois neutrons d'énergie élevée qui se déplacent à très grande vitesse (20 000 km/s) parmi les atomes d'uranium. L'énergie emportée par les neutrons représente une faible partie de l'énergie totale libérée lors de la fission, l'essentiel de cette énergie étant emporté par les produits de fission. Mais les neutrons étant de masse faible par rapport aux produits de fission, leur vitesse est très grande.

Projectiles de petite dimension, neutres électriquement, les neutrons vont pouvoir se propager relativement loin avant d'interagir avec un autre noyau d'atome. S'il s'agit d'un atome d'uranium 235, ils donneront éventuellement lieu à une nouvelle fission.

**Les deux ou trois neutrons libérés lors d'une fission vont pouvoir provoquer à leur tour de**

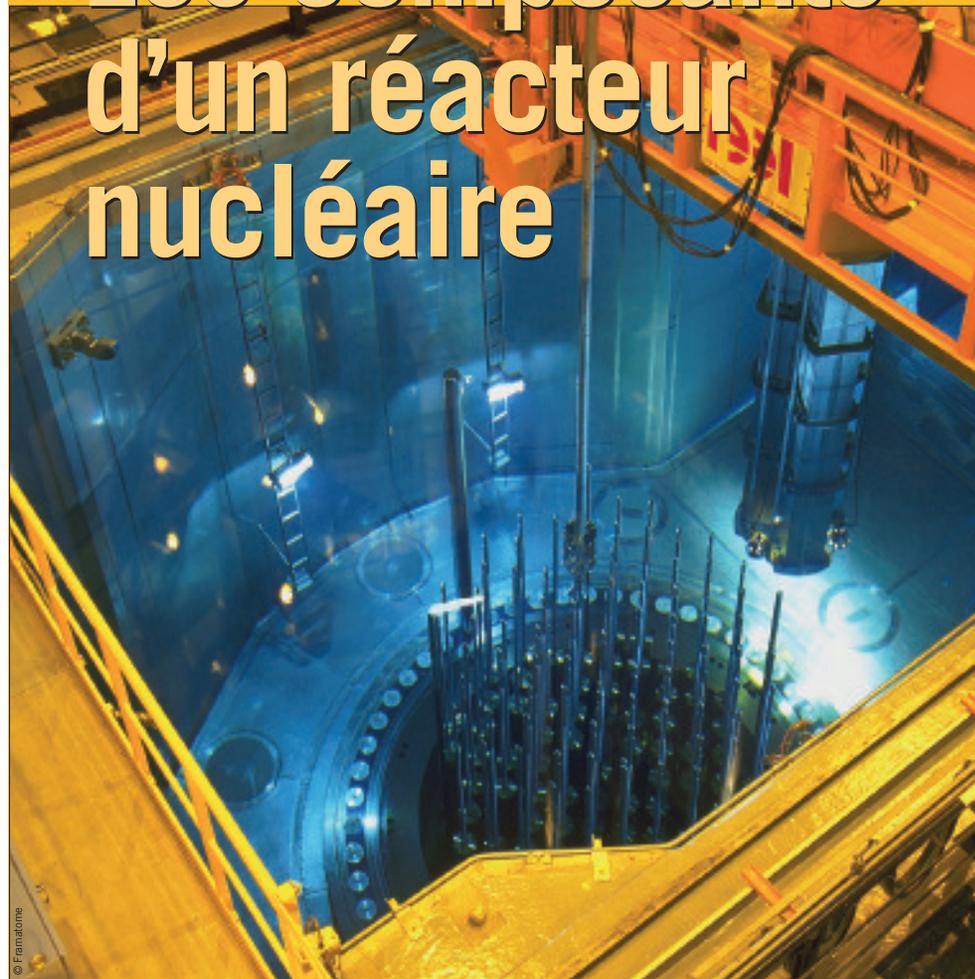
**“Dans un réacteur nucléaire, la réaction en chaîne est maîtrisée afin de maintenir un rythme de fissions constant.”**

**nouvelles fissions et la libération de nouveaux neutrons et ainsi de suite... c'est la réaction en chaîne.**

Dans un réacteur nucléaire, la réaction en chaîne est maîtrisée pour maintenir un rythme de fissions constant. C'est-à-dire que sur les deux ou trois neutrons libérés lors d'une fission, seul l'un d'entre eux en provoque une nouvelle, les autres étant capturés. Un équilibre doit être atteint : une fission donne une fission, qui donne une fission, qui donne une fission, etc. (et non pas une fission donne deux fissions qui donnent quatre fissions, qui donnent huit fissions, etc.). La quantité de chaleur libérée à chaque seconde dans la masse d'uranium est ainsi parfaitement contrôlée.

GRÂCE À SES DIFFÉRENTS COMPOSANTS, LE RÉACTEUR NUCLÉAIRE EST À MÊME DE RÉCUPÉRER ET DE TRANSFORMER LA CHALEUR.

# Les composants d'un réacteur nucléaire



“Alors que les « barres de commande » piègent les neutrons, le caloporteur extrait la chaleur du réacteur.”

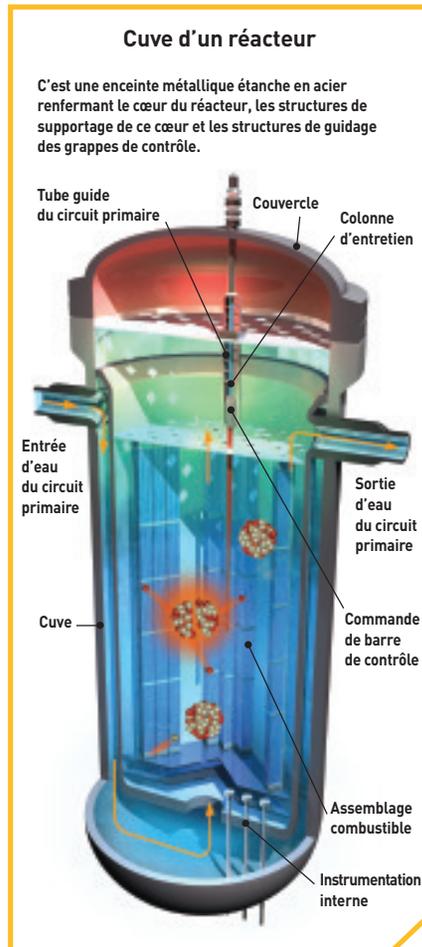
### LE COMBUSTIBLE

Le combustible d'une centrale nucléaire contient des atomes fissiles dont on va extraire de l'énergie par fission. Les principaux atomes fissiles sont l'uranium 233, l'uranium 235, le plutonium 239 et le plutonium 241. Seul l'uranium 235 se trouve à l'état naturel. C'est donc le plus souvent lui qui est utilisé comme combustible dans les centrales nucléaires.

Le combustible nucléaire est placé dans le cœur du réacteur (voir livret *Le cycle du combustible nucléaire*).



Les crayons de combustible renferment de l'oxyde d'uranium.



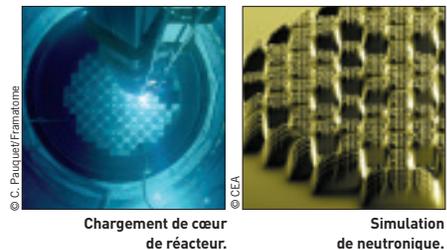
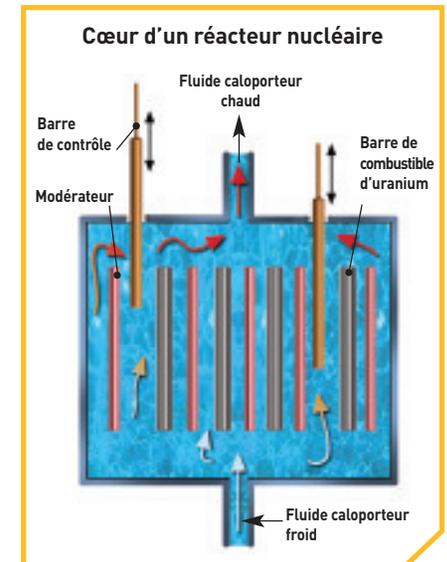
### LES BARRES DE CONTRÔLE, PIÉGEUSES DE NEUTRONS

Dans un réacteur, le contrôle permanent de la réaction en chaîne est assuré grâce à des “barres de commande”, également appelées “barres de contrôle”, absorbantes de neutrons qui sont, par exemple, à base de bore. Ces barres sont mobiles dans le cœur du réacteur : elles peuvent être remontées ou extraites en fonction du nombre de neutrons à absorber. Elles permettent de piloter le réacteur. De plus, en cas d'incident, l'enfoncement complet, ou chute, de ces barres au sein du combustible stoppe presque instantanément la réaction en chaîne.

### LE CALOPORTEUR, UN TRANSPORTEUR DE CHALEUR

L'énergie libérée sous forme de chaleur lors de la fission des noyaux d'uranium 235 doit être récupérée pour servir à la production d'électricité. Ce rôle est assuré par le caloporteur. Comme son nom l'indique, il s'agit d'un fluide transporteur de chaleur. En circulant autour des barreaux d'uranium, ce fluide joue deux rôles : prendre la chaleur du combustible pour la transporter hors du cœur du réacteur, et maintenir la température de celui-ci à une valeur compatible avec la tenue des matériaux.

Le combustible est entouré d'une gaine métallique formant un boîtier étanche afin de l'isoler du fluide caloporteur. Cette précaution évite que le combustible, qui est très chaud, soit



© C. Pauquet/Framatome

© CEA

Chargement de cœur de réacteur.

Simulation de neutronique.

directement en contact avec le caloporteur, ce qui pourrait provoquer des réactions chimiques entre les deux. Elle empêche aussi que des particules du combustible puissent passer dans le caloporteur et sortir ainsi de la cuve du réacteur. En fait, ce ne sont pas les particules d'uranium qui seraient les plus gênantes si elles passaient dans le caloporteur, mais les produits de fission qui sont radioactifs.

Transport d'un générateur de vapeur.



**“Le modérateur ralentit les neutrons afin qu'ils rencontrent les atomes et provoquent une fission.”**

**neutrons “thermiques”.** Les neutrons sont freinés lorsqu'ils traversent une **matière composée d'atomes dont les noyaux ne les absorbent pas**. En effet, comme des boules se déplaçant sur une table de billard où se trouvent d'autres boules, les neutrons perdent de la vitesse en rebondissant sur les noyaux. Ce ralentissement se produit rapidement lorsque les obstacles sont des noyaux légers, de masse voisine de celle des neutrons, tels que ceux d'hydrogène. **La matière constituée par ces atomes est appelée le modérateur.**

Pour un bon fonctionnement du réacteur, combustible et modérateur doivent être alternés : combustible, modérateur, combustible, modérateur...

### **LE GÉNÉRATEUR DE VAPEUR, UN ÉCHANGEUR DE CHALEUR**

Le caloporteur s'échauffe au contact du combustible. Il sort du cœur du réacteur à une température élevée, entre 300 et 550 °C.

Ce caloporteur est ensuite utilisé pour chauffer l'eau dans un appareil appelé “générateur de vapeur” et la porter à ébullition pour produire de la vapeur. Cette vapeur entraîne ensuite une turbine couplée à un alternateur produisant de l'électricité. À la sortie de la turbine, la vapeur se condense en eau dans un condenseur refroidi par l'eau d'une rivière.

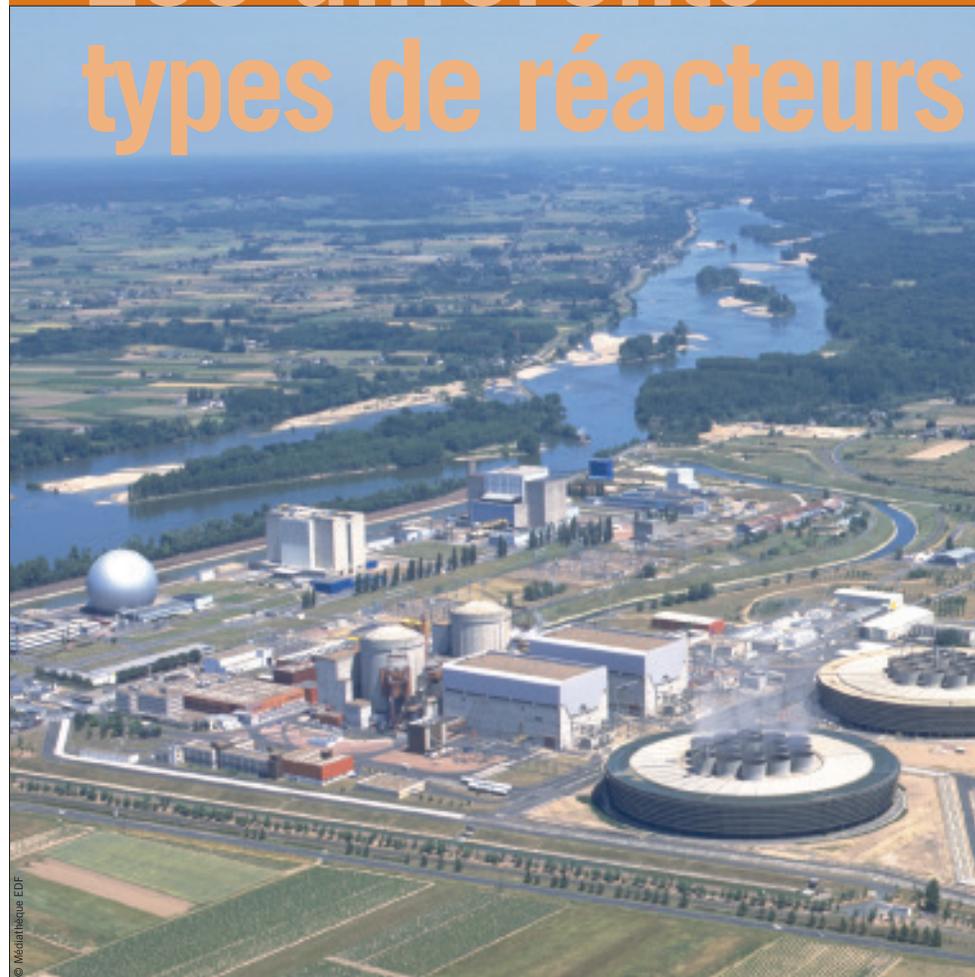
Les générateurs de vapeur n'existent pas dans les centrales à eau bouillante (REB) où la vapeur est directement produite dans le cœur. Il n'y a pas de centrales de ce type en France.

### **LE MODÉRATEUR, UN RALENTISSEUR DE NEUTRONS**

Outre le combustible gainé, le caloporteur et les barres de contrôle, la plupart des réacteurs comportent ce que l'on appelle un modérateur (voir schéma page 9). Le rôle de ce dernier est de ralentir les neutrons qui sont souvent trop énergétiques pour provoquer efficacement une nouvelle fission. Ces neutrons, du fait de leur grande énergie, se déplacent à grande vitesse (20000 km/s). Ce sont des neutrons rapides. En effet, lorsque les neutrons ont une trop grande vitesse, ils passent trop vite à proximité des atomes d'uranium et les réactions de fission sont difficiles à obtenir. Elles sont rares. Pour que les réactions de fission se produisent plus facilement, et en plus grand nombre, **il faut donc ralentir considérablement les neutrons, d'une vitesse de 20 000 km/s jusqu'à une vitesse de l'ordre de 2 km/s. Ces derniers sont alors appelés neutrons lents ou**

**LES DIVERSES COMBINAISONS POSSIBLES ENTRE COMBUSTIBLES, CALOPORTEURS ET MODÉRATEURS DÉTERMINENT LA FILIÈRE À LAQUELLE APPARTIENT LA CENTRALE.**

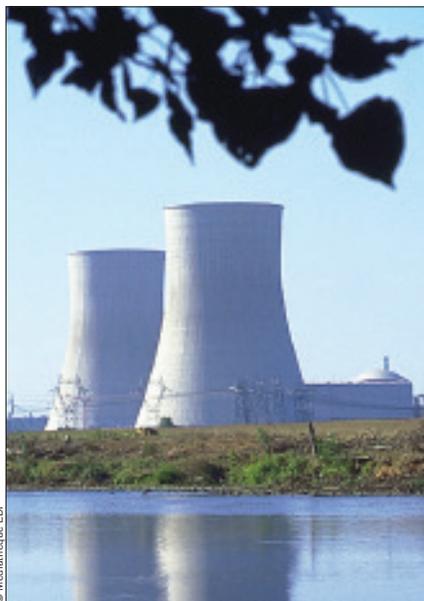
# Les différents types de réacteurs



## DIFFÉRENTES FAMILLES DE RÉACTEURS

Une centrale nucléaire est destinée à produire de l'électricité à partir d'un combustible nucléaire. Cependant, même si le principe de fonctionnement est identique dans toutes les centrales nucléaires, il existe plusieurs familles de réacteurs, que l'on appelle **filières**.

La centrale nucléaire de Civaux (Vienne).



Quatre constituants principaux sont nécessaires pour concevoir un cœur de réacteur :

- un combustible dans lequel se produit la fission ;
- un fluide caloporteur qui transporte la chaleur hors du réacteur ;
- un modérateur (sauf pour les réacteurs à neutrons rapides) qui permet de ralentir les neutrons ;
- des barres de commande qui contrôlent la réaction en chaîne.

Pour ces constituants, notamment les trois premiers, il existe plusieurs possibilités. Par exemple, le caloporteur peut être gazeux (gaz carbonique) ou liquide (eau). Cependant, parmi toutes les combinaisons possibles entre les différents combustibles, caloporteurs ou modérateurs, seules certaines ont été retenues et ont donné lieu à des réalisations industrielles. Les principales sont décrites dans le tableau page suivante.

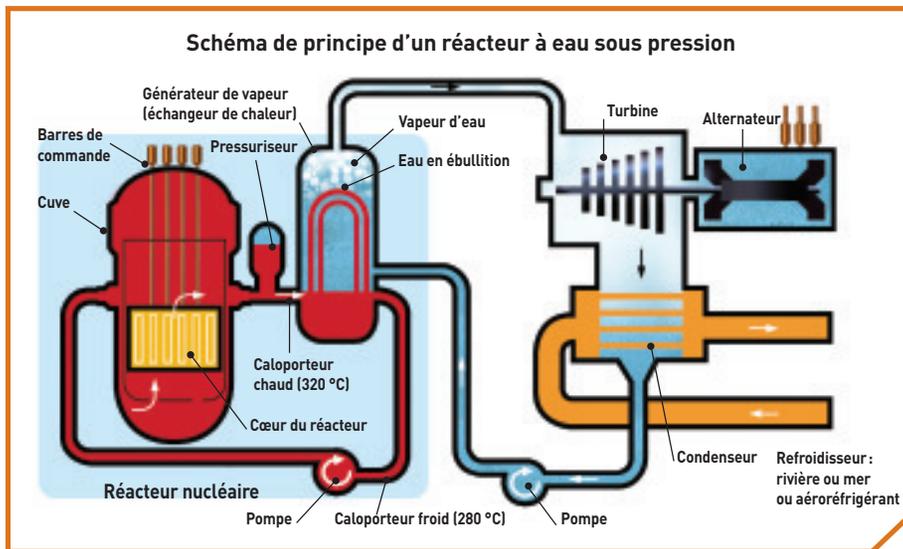
**“Un principe de fonctionnement identique dans toutes les centrales nucléaires, mais plusieurs familles de réacteurs.”**

**“Les réacteurs à eau sous pression produisent près de la moitié de l'électricité d'origine nucléaire dans le monde.”**

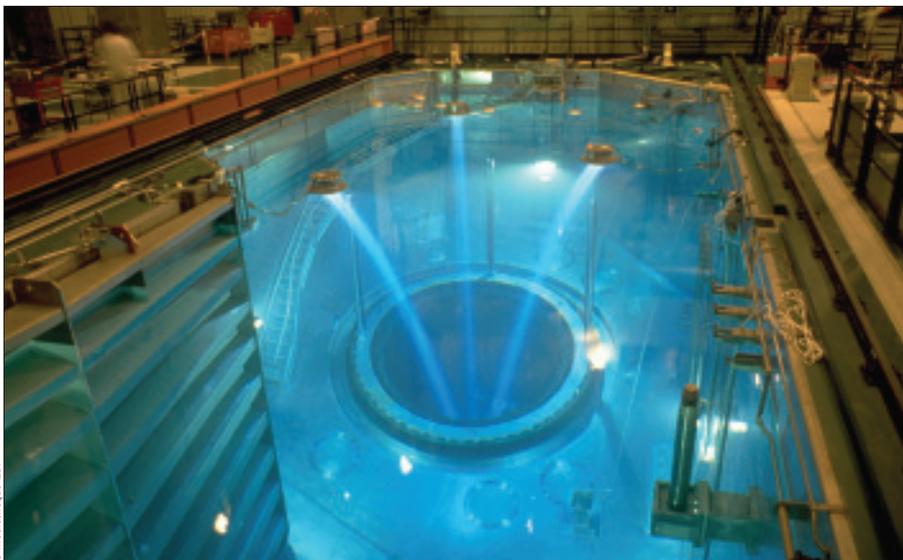
## LES DIFFÉRENTES FAMILLES DE RÉACTEURS

FILIÈRES	COMBUSTIBLE	MODÉRATEUR	CALOPORTEUR
<b>Réacteur UNGG</b> (Uranium naturel graphite-gaz)  Première filière développée en France. Tous les réacteurs de cette génération ont maintenant été arrêtés, le dernier en 1994.	Uranium naturel (0,7 % d'uranium 235)	Carbone solide (graphite)	Gaz carbonique
<b>Réacteur CANDU</b> Filière développée au Canada.	Uranium naturel	Eau lourde*	Eau lourde sous pression
<b>Réacteur RBMK</b> (Reactor Bolchoe Molchnastie Kípiachie ou en français “Réacteur bouillant de grande puissance”) Ces réacteurs constituent 40 % du parc nucléaire de l'ancienne Union Soviétique (par exemple, Tchernobyl...).	Uranium enrichi à 1,8 % d'uranium 235	Carbone (graphite)	Eau bouillante
<b>Réacteur à eau bouillante (REB)</b> Filière développée aux États-Unis, au Japon et en Suède	Uranium enrichi à 3 % d'uranium 235	Eau ordinaire entrant en ébullition dans le cœur	
<b>Réacteur à eau sous pression (REP)</b> La filière la plus classique dans le monde occidental. Elle est également développée en ex-URSS sous le nom de “VVER”.	Uranium enrichi à 3 % d'uranium 235	Eau sous pression maintenue à l'état liquide. L'eau sous pression est à la fois le modérateur et le caloporteur.	
<b>Réacteur à neutrons rapides (RNR)</b> La caractéristique de ces réacteurs est qu'ils ne comprennent pas de modérateur : les neutrons restent rapides. Un prototype en France : le réacteur Phénix (250 MWe).	Uranium enrichi ou plutonium	Aucun	Sodium liquide. Ne ralentit pas les neutrons

\*Eau lourde : eau constituée de molécules d'eau dont l'atome d'hydrogène est un atome de deutérium, isotope lourd de l'hydrogène (voir livret L'atome).



Centre national de production d'électricité de Cruas - bâtiment du réacteur - sonde de chargement des barres combustibles dans la cuve ouverte.



© Médiathèque EDF

**“Certains réacteurs utilisent l'hélium comme caloporteur, qui transporte la chaleur hors du réacteur et stabilise sa température.”**

### LES RÉACTEURS À EAU SOUS PRESSION (REP)

La filière des réacteurs à eau sous pression est la plus répandue dans le monde. Ces réacteurs produisent environ la moitié de l'électricité mondiale d'origine nucléaire.

En France, tous les réacteurs nucléaires, mis à part Phénix, sont des REP: 34 délivrent une puissance de 900 MWe (mégawatts électriques), 20 une puissance de 1 300 MWe et 4 une puissance de 1 450 MWe.

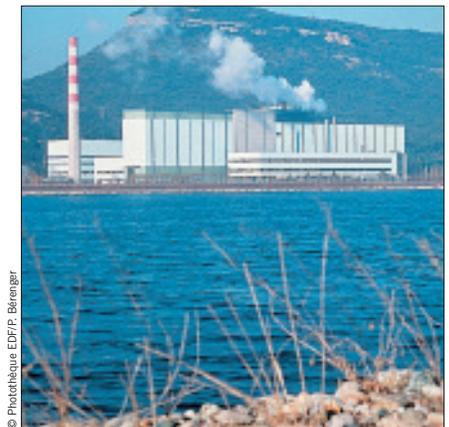
### LES RÉACTEURS À NEUTRONS RAPIDES (RNR)

Les réacteurs à neutrons rapides ont été conçus pour utiliser la matière fissile (l'uranium et le plutonium) comme combustible nucléaire, plus complètement que dans les réacteurs à neutrons thermiques.

Le fluide caloporteur peut être un métal liquide, tel le sodium (Phénix) ou un gaz (l'hélium). Ils présentent les avantages de pouvoir fabriquer de la matière fissile (surgénérateur) ou, au contraire, incinérer des déchets (actinides) à vie longue.

**“Les réacteurs à neutrons rapides n'utilisent pas de modérateur.”**

Réacteur à neutrons rapides, Phénix.



© Médiathèque EDF/P. Bérenger

### LES RÉACTEURS À CALOporteur GAZ (RCG)

L'utilisation de l'hélium comme caloporteur permet d'envisager une gamme de réacteurs à cycle direct (l'hélium à haute température alimente directement, sans échangeur intermédiaire, le groupe turbo-alternateur) avec un rendement thermodynamique élevé. Ils ont déjà été étudiés dans le passé, mais bénéficient aujourd'hui de très importants progrès accomplis en matière de turbine à gaz.

Ils sont susceptibles de permettre la réalisation d'unités de petite taille (de 100 à 300 MWe), économiques et sûres.

Ce type de réacteur est également susceptible de fonctionner avec des neutrons rapides et donc de présenter alors les avantages complémentaires des RNR.