

# LES RÉACTEURS NUCLEAIRES

- ➔ La fission nucléaire
- ➔ Les composants d'un réacteur nucléaire
- ➔ D'une génération à l'autre
- ➔ Les réacteurs de quatrième génération

# Sommaire



## Introduction

03



## La fission nucléaire

04-06

Des atomes fissiles...  
...qui libèrent de l'énergie  
Les neutrons et  
la réaction en chaîne

05

05

06



## D'une génération à l'autre

12-17

Génération et filière :  
deux notions distinctes 13  
Quatre générations  
de réacteurs nucléaires 13  
Les filières de réacteurs nucléaires 16



## Les composants d'un réacteur nucléaire

07-11

Le combustible 09  
Les barres de commande,  
piégeuses de neutrons 09  
Le modérateur, ralentisseur  
de neutrons 09  
Le caloporteur, transporteur  
de chaleur 09  
Le générateur de vapeur,  
échangeur de chaleur 10  
L'enceinte de confinement 11



## Les réacteurs de quatrième génération

18-23

Pourquoi des réacteurs à  
neutrons rapides ? 19  
Pourquoi s'intéresser aux réacteurs  
à neutrons rapides refroidis  
au sodium ? 21  
Le projet de démonstrateur  
technologique Astrid 21

# Introduction



La maîtrise de l'approvisionnement en énergie est un enjeu essentiel du monde de demain. Plusieurs modes de production d'électricité, qui s'appuient sur différentes sources d'énergie, coexistent aujourd'hui : les énergies renouvelables (hydraulique, éolien, solaire...), l'énergie thermique à combustion (charbon, gaz, pétrole) et nucléaire. Ces modes de production (hors photovoltaïque) s'appuient sur des centrales, basées sur le même principe : faire tourner une turbine couplée à un alternateur pour produire de l'électricité. La différence de fonctionnement se situe au niveau de l'entraînement de la turbine.

Dans les centrales hydrauliques, c'est l'eau des barrages qui actionne la turbine. Dans les centrales thermiques classiques, elle est activée par la vapeur d'eau obtenue lorsque le combustible fossile (charbon, gaz naturel ou pétrole) est brûlé. Dans les centrales nucléaires, enfin, des atomes d'uranium, en se cassant, produisent de la chaleur qui transforme l'eau en vapeur, permettant ainsi la mise en mouvement de la turbine.

Le CEA, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, créé en 1945, est à l'origine du développement de la filière électronucléaire industrielle française. Aujourd'hui, l'énergie nucléaire représente près de 75 % de la production d'électricité française. Le parc, exploité par EDF, est composé de 58 réacteurs nucléaires, d'une puissance de 900 à 1 450 MWe. La loi de transition énergétique, promulguée en août 2015, est venue pérenniser sur le long terme un socle d'énergie nucléaire à 50 % de la production d'électricité.

Dès 1945,  
le CEA est à l'origine  
du développement de  
la filière électronucléaire  
industrielle française.

↓ 1- Zoé, première pile atomique française.  
2- Centrale nucléaire de Cruas-Meyssac.



Photo de couverture et haut page 2 : Grille d'assemblage combustible. © D.Sarraute/CEA -  
Petit visuel de couverture : Combustible de la centrale de Civaux. © EDF - Réalisation : Agence Gimmik - Avril 2016





# LA FISSION NUCLÉAIRE

La fission d'un atome dégage de l'énergie qui se transforme en chaleur. Dans un réacteur nucléaire électrogène, on récupère cette chaleur pour produire de l'électricité.



↑ Extraction sélective de l'uranium, en laboratoire.

## DES ATOMES FISSILES...

Sous l'effet d'une collision avec un neutron, le noyau de certains gros atomes a la propriété de se casser en deux noyaux de taille plus petite. On qualifie alors ce noyau de « fissile » et la réaction de « fission ».

En effet, le neutron, particule sans charge électrique, a la faculté de pouvoir s'approcher suffisamment près du noyau, chargé positivement, sans être repoussé par des forces électriques. Il peut alors pénétrer à l'intérieur et le briser en deux morceaux, appelés produits de fission, la plupart du temps **radioactifs**<sup>1</sup>. Le seul noyau fissile naturel est l'uranium 235.

## ... QUI LIBÈRENT DE L'ÉNERGIE

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

L'énergie emportée par les neutrons représente une faible partie de l'énergie totale libérée.

L'essentiel de celle-ci est emporté par les produits de fission sous forme d'**énergie cinétique**<sup>2</sup>. Ejectés avec une vitesse de l'ordre de 8 000 km/s, ils se frayent un chemin parmi les autres atomes en les « bousculant ». Lors de ces chocs, ils perdent rapidement de la vitesse (et donc de l'énergie) en chauffant la matière environnante, puis ils s'arrêtent dans la masse d'uranium. Leur énergie de départ se trouve finalement transformée en chaleur : localement, la température de l'uranium augmente. Dans un réacteur nucléaire électrogène, on récupère cette chaleur pour produire de l'électricité.

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

**2-** 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. Si la première percute un objet, les dégâts seront plus importants que si c'est la seconde. De même, une voiture a moins d'énergie qu'un camion roulant à la même vitesse.

## LES SAVIEZ-VOUS?



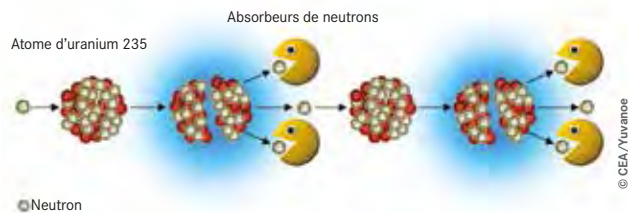
↑ L'équipe de Zoé en attente de la divergence.

Quand les premières réactions de fission en chaîne se produisent au sein d'un réacteur nucléaire, on dit qu'il diverge.

Le premier réacteur nucléaire, construit par Enrico Fermi, a divergé en 1942 aux États-Unis.

En France, le premier réacteur d'essai Zoé (puissance Zéro, Oxyde d'uranium, Eau lourde), construit par le CEA sur son centre de Fontenay-aux-Roses, a divergé le 15 décembre 1948. ■

### Réaction en chaîne contrôlée dans les réacteurs nucléaires



### LES NEUTRONS ET LA RÉACTION EN CHAÎNE

Chaque fission produit 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. Ces projectiles de petite dimension, neutres électriquement et de masse faible par rapport aux produits de fission, se propagent relativement loin avant d'interagir avec un autre noyau d'atome. Ils provoquent à leur tour de nouvelles fissions, libérant de nouveaux neutrons et ainsi de

suite : il s'agit de la réaction en chaîne.

Dans un réacteur nucléaire, ce phénomène est maîtrisé. Une grande partie des neutrons est capturée pour maintenir un rythme de fissions constant. Seul un neutron, issu de chaque fission, provoque une nouvelle fission pour libérer régulièrement de l'énergie. La quantité de chaleur libérée chaque seconde dans la masse d'uranium est ainsi contrôlée.

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



Simulation de neutronique →

## LES COMPOSANTS D'UN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

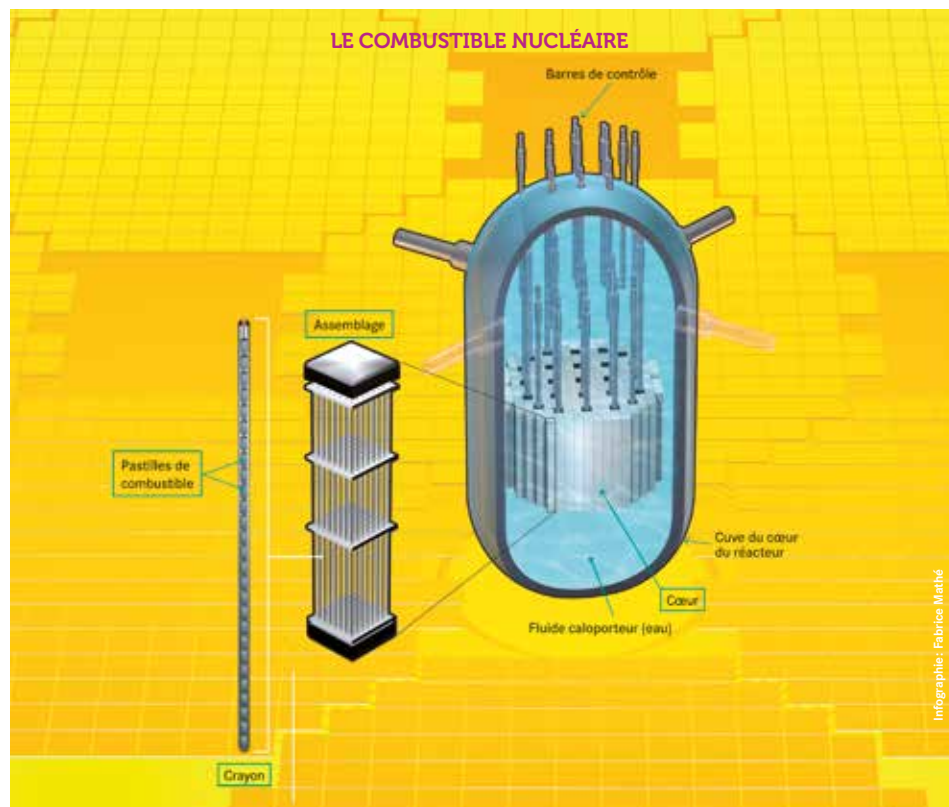
Il existe de nombreuses filières de réacteurs nucléaires. Toutefois, ces réacteurs ont tous en commun plusieurs composants tels que le combustible, les barres de commande, le modérateur et le caloporteur.



Alors que les barres  
de commande  
contrôlent la réaction  
en chaîne,  
le caloporteur extrait la  
chaleur du réacteur.

## Les 58 réacteurs nucléaires en exploitation en France sont électrogènes.

Leur objectif est de produire de l'électricité, en récupérant et véhiculant la chaleur produite par les réactions de fission jusqu'à une turbine et un alternateur. Les principaux composants spécifiques d'un réacteur se situent dans l'îlot nucléaire. Siège des réactions de fission nucléaire, il englobe la chaudière nucléaire et les installations relatives au combustible, ainsi que les équipements nécessaires au fonctionnement et à la sécurité de cet ensemble. L'autre partie de la centrale nucléaire, l'îlot conventionnel, se compose entre autres de la turbine, de l'alternateur et du condenseur.



## LE COMBUSTIBLE

Le combustible d'une centrale nucléaire contient des atomes fissiles dont on va extraire de l'énergie par fission. Celui le plus souvent utilisé est l'uranium 235. Comprimé en pastilles, le combustible est inséré dans des gaines étanches, appelées « crayons combustibles ». Ces derniers sont ensuite réunis en faisceaux dans des assemblages de combustible placés dans le cœur du réacteur. (Voir livret *Le cycle du combustible nucléaire*).

## LES BARRES DE COMMANDE, 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, faites dans un matériau capable d'absorber les neutrons. Ces barres sont mobiles dans le cœur du réacteur : elles peuvent être descendues pour réduire le taux de fission, remontrées pour le maintenir ou l'augmenter. En cas d'incident, la chute de ces barres au sein du combustible stoppe presque instantanément la réaction en chaîne.

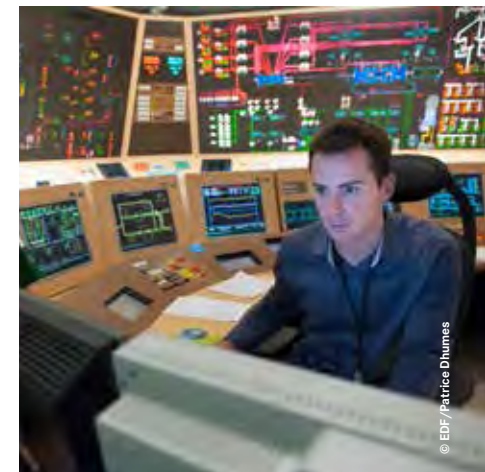
## LE MODÉRATEUR, RALENTISSEUR DE NEUTRONS

La plupart des réacteurs comporte ce que l'on appelle un modérateur. Son rôle est de ralentir les neutrons libérés lors de la fission nucléaire, trop énergétiques pour provoquer efficacement une nouvelle fission.

Les neutrons sont freinés lorsqu'ils traversent une matière composée d'atomes à noyaux légers qui ne les absorbe pas, comme de l'eau ou du graphite par exemple. Au final, cela permet de les ralentir, les faisant passer d'une vitesse initiale de l'ordre de 20 000 km/s à une vitesse d'environ 2 km/s.

## LE CALOPORTEUR, TRANSPORTEUR DE CHALEUR

L'énergie libérée sous forme de chaleur lors de la fission des noyaux d'uranium 235 doit être transportée hors du cœur du réacteur, vers les systèmes qui transformeront cette chaleur en électricité : turbine et alternateur. Ce rôle est assuré par le caloporteur, le fluide d'extraction de la chaleur produite par le combustible nucléaire. Celui-ci peut être de l'eau, un métal liquide (sodium ou plomb) ou un gaz (gaz carbonique ou hélium). Le caloporteur permet par ailleurs de maintenir la température du combustible à sa valeur nominale, compatible par exemple avec la tenue des matériaux.



↑ Salle de commande d'un réacteur électrogène.

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

## LE GÉNÉRATEUR DE VAPEUR, ÉCHANGEUR DE CHALEUR

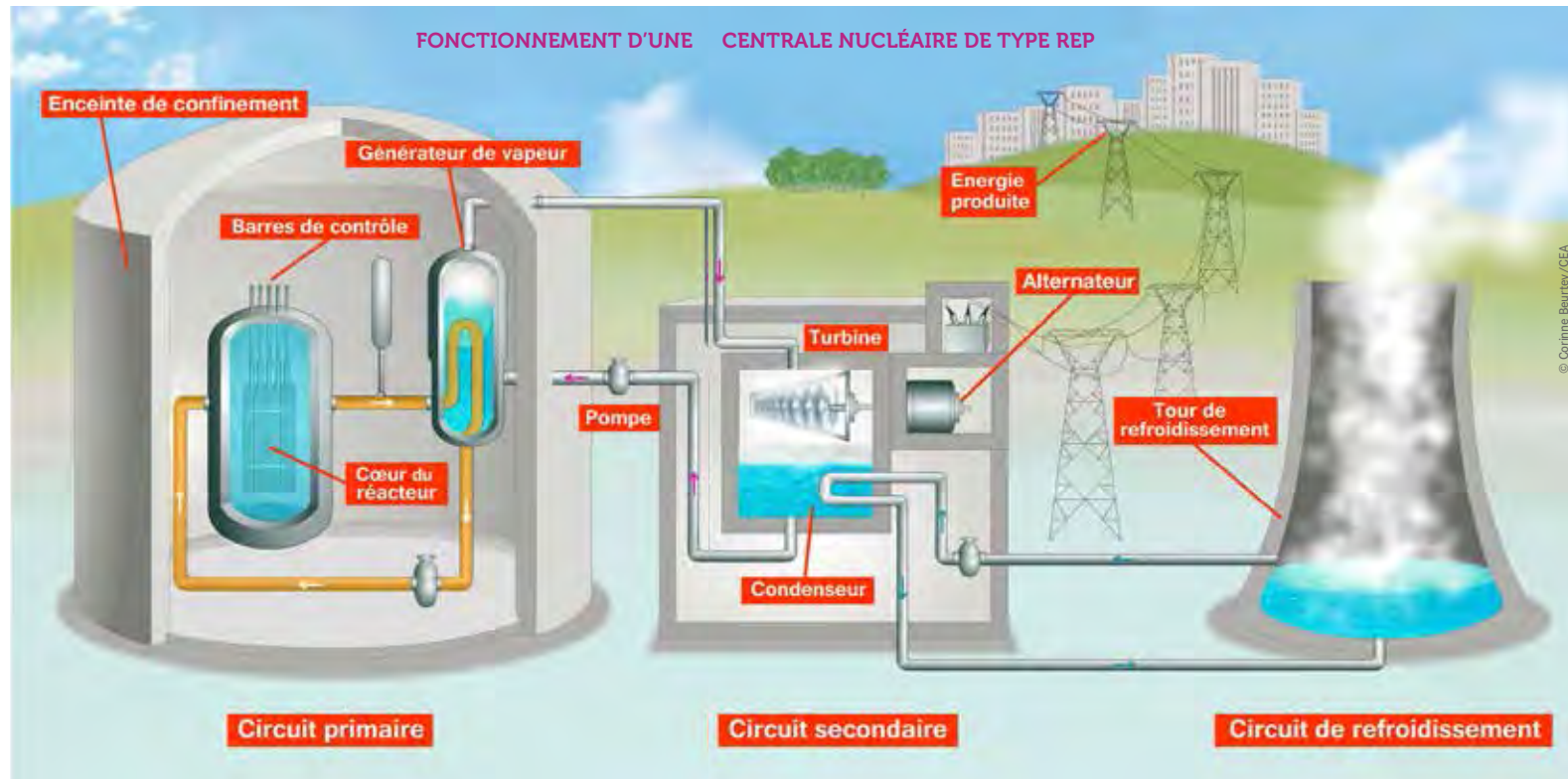
Un échangeur de chaleur permet de transférer de la puissance thermique d'un circuit à un autre. Par exemple, dans le cas des réacteurs à eau sous pression (les REP), le caloporteur primaire est l'eau qui sort du cœur du réacteur à une température élevée, environ 330 °C, et est maintenue à une pression élevée, environ 150 bars, pour éviter qu'elle ne se transforme en vapeur. Cette eau passe ensuite dans un générateur de vapeur qui permet

le transfert de puissance thermique entre les circuits primaire et secondaire. L'ensemble est dimensionné pour porter l'eau du circuit secondaire à ébullition et ainsi produire de la vapeur. En se détendant, celle-ci entraîne la rotation d'une turbine, couplée à un alternateur qui va produire de l'électricité. Ce circuit est également nommé circuit de conversion d'énergie ; l'énergie thermique a été convertie en énergie mécanique puis électrique. A noter qu'un troisième circuit est destiné au refroidissement et à la condensation de la vapeur.

Pour les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na), le caloporteur primaire est du sodium, un métal liquide qui sort du cœur à environ 550 °C et basse pression (quelques bars). Le circuit de conversion d'énergie est basé sur le même principe que celui d'un REP : un générateur de vapeur produit de la vapeur qui va se détendre dans une turbine couplée à un alternateur. La différence majeure est l'interposition d'un circuit supplémentaire entre le circuit primaire en sodium basse pression et le circuit de conversion d'énergie en eau/vapeur haute pression. L'objectif de ce circuit intermédiaire est de tenir compte du risque d'interaction entre le sodium et l'eau en découplant le risque radiologique présent dans le circuit primaire des autres risques. Au final, deux échangeurs de chaleur sont donc nécessaires entre le circuit primaire et le circuit de conversion d'énergie.

## L'ENCEINTE DE CONFINEMENT

Il s'agit d'une enceinte en acier et/ou en béton armé, contenant la cuve du réacteur, le circuit primaire, les générateurs de vapeur, ainsi que les principaux éléments importants pour la sûreté du réacteur. Etanche, elle a pour rôle d'éviter les fuites d'éléments radioactifs dans l'environnement, notamment en cas d'accident majeur comme la fusion du cœur (forte hausse de la température entraînant la fonte du combustible).







# D'UNE GÉNÉRATION À L'AUTRE

Chaque génération de réacteur apporte des améliorations majeures en réponse aux grands enjeux de leur époque.



Centrale nucléaire de Cruas-Meyssas

Les premiers réacteurs électronucléaires ont été construits au cours des années 1950 aux États-Unis, en Union Soviétique et en France. Depuis, plusieurs générations de réacteurs sont apparues à travers le monde ; on en distingue quatre aujourd'hui.

Ce classement correspond à des progrès majeurs intégrés dans chaque génération en termes de sûreté de fonctionnement, de sécurité et d'économie des ressources en combustible ou encore de compétitivité économique.

## GÉNÉRATION ET FILIÈRE : DEUX NOTIONS DISTINCTES

Dans l'industrie nucléaire, la notion de « génération » est distincte de celle de « filière technologique ». En effet, une génération peut inclure différentes technologies de réacteurs. Les différences entre les générations correspondent à des critères d'exigences spécifiques à chaque période.

## QUATRE GÉNÉRATIONS DE RÉACTEURS NUCLÉAIRES

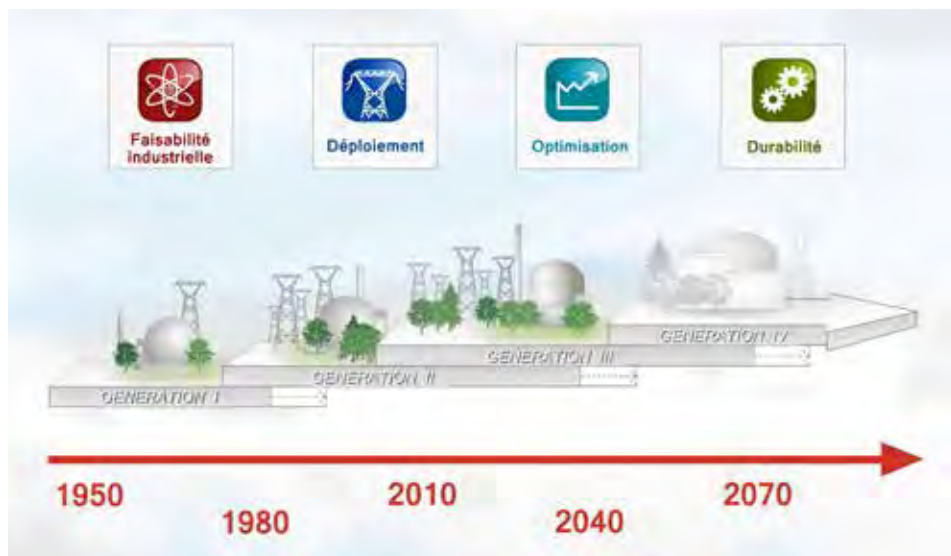
Depuis le lancement, en 2001, du Forum international Génération IV dédié aux recherches sur les « réacteurs du futur », les professionnels distinguent quatre générations de réacteurs à fission nucléaire. Chacune répond à des objectifs liés aux enjeux de l'époque de leur conception. Compte tenu de la durée de fonctionnement de ces équipements, on trouve des réacteurs de différentes générations en activité ou en cours de construction. Ainsi, la quatrième génération de réacteurs est en phase de conception, tandis que la majeure partie des réacteurs actuellement en exploitation est de deuxième génération, et que la troisième génération commence à se déployer.

La 1<sup>re</sup> génération comprend les prototypes et les premiers réacteurs de taille industrielle à usage commercial mis au point dans les années 1950 et 1960 et entrés en service avant les années 1970. Durant cette période, la France, qui ne disposait pas des technologies d'enrichissement de l'uranium, a développé une filière technologique utilisant l'uranium naturel comme combustible.

Les réacteurs nucléaires de 2<sup>e</sup> génération sont entrés en service à partir des années 1970. Ils répondaient à la nécessité d'atteindre une meilleure compétitivité de l'énergie nucléaire et d'améliorer l'indépendance énergétique, dans un contexte de fortes tensions sur le cours des énergies fossiles (choc pétrolier). La majorité des réacteurs actuellement en exploitation dans le monde sont des réacteurs de 2<sup>e</sup> génération. En France, ils appartiennent à la filière à eau sous pression (REP), une technologie américaine adaptée par EDF.

La 3<sup>e</sup> génération met l'accent sur les impératifs liés à la sûreté et à la sécurité : résistance renforcée aux agressions externes, type chute d'avion par exemple. Ces réacteurs tirent les enseignements du retour d'expérience de l'exploitation des réacteurs de 2<sup>e</sup> génération, des accidents de Three Mile Island

Les différentes générations de réacteurs nucléaires.



© Corinne Beurtey/CEA



Simulation du comportement du combustible dans un réacteur de 2<sup>e</sup> génération.

et de Tchernobyl ainsi que des attentats du 11 septembre 2001. Exemple de réacteur de ce type : l'EPR (*European Pressurized Reactor*), dont quatre sont actuellement en construction (un en France, un en Finlande et deux en Chine) et plusieurs autres sont prévus, notamment au Royaume-Uni.

La 4<sup>e</sup> génération correspond aux réacteurs, actuellement en phase de conception, qui pourraient voir un déploiement industriel à l'horizon 2050. Ils sont en rupture technologique totale avec tout ce qui a été réalisé jusqu'à présent. Les recherches sur ces systèmes du futur sont menées dans le cadre du Forum international Génération IV qui a établi les critères auxquels ils devront répondre : la durabilité, la sûreté, la compétitivité économique et la résistance à la prolifération nucléaire.

## ZOOM SUR

### LE FORUM INTERNATIONAL GÉNÉRATION IV

En 2001, les partenaires\* du Forum international Génération IV établissent une charte officielle et donnent le coup d'envoi de leur coopération en matière de R&D pour établir la faisabilité et les performances des réacteurs du futur.

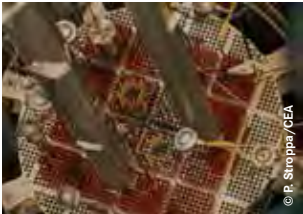
Objectif : développer des réacteurs à la sûreté renforcée, durables (entre autres, économes en uranium), économiquement compétitifs par rapport aux autres sources d'énergie, non proliférants, résistants aux attaques terroristes et créant peu de déchets ultimes.

Fin 2002, six concepts de réacteurs sont sélectionnés. Trois sont des filières à neutrons rapides (RNR) : RNR sodium, RNR gaz et RNR plomb. Les autres sont les réacteurs à eau supercritique (RESC), à très haute température (RTHT) et à sels fondus (RSF).

\* Aujourd'hui, ils sont 14 : Afrique du Sud, Argentine, Australie, Brésil, Canada, Corée du Sud, Chine, États-Unis, France, Japon, Royaume-Uni, Russie, Suisse ainsi qu' Euratom.



# LES SAVIEZ-VOUS?



▲ Cœur d'un réacteur expérimental dédié aux études neutroniques des réacteurs à neutrons thermiques.

Certains réacteurs sont destinés à la recherche et ne produisent pas d'électricité. Ils permettent par exemple de mesurer les caractéristiques neutroniques des réacteurs, d'étudier le comportement des matériaux et des combustibles sous irradiation, les conséquences de situations accidentelles mais aussi de valider des concepts nouveaux et des prototypes. Les réacteurs expérimentaux sont également utilisés pour produire des radionucléides utilisés en médecine pour le diagnostic et la radiothérapie. ■

## LES FILIÈRES DE RÉACTEURS NUCLÉAIRES

Depuis les débuts de l'industrie électronucléaire, plusieurs filières de réacteurs ont été développées à travers le monde. Ces filières se distinguent par des choix d'options technologiques. Parmi elles, trois caractéristiques majeures permettent de classer les réacteurs en différentes filières :

- la nature de la matière fissile utilisée comme combustible nucléaire (ex : uranium naturel, uranium enrichi, plutonium) ;
- le fluide caloporteur, qui permet de récupérer la chaleur produite au niveau du cœur et de l'acheminer (ex : eau ordinaire sous pression ou bouillante, eau lourde, gaz carbonique, sodium, hélium) ;
- le modérateur, qui détermine l'énergie moyenne des neutrons dans le cœur du réacteur (ex : eau ordinaire, eau lourde, graphite).

Une combinaison de ces trois éléments produit des réacteurs ayant des caractéristiques différentes, qui ne satisfont pas tous de la même façon les différents critères de sélection d'une filière de réacteurs nucléaires. Ces critères, d'ordre technique ou économique, évoluent avec le temps. Par exemple, les premières filières développées devaient être capables de fonctionner avec de l'uranium naturel comme combustible, limitant ainsi le choix du modérateur. Avec le développement des technologies d'enrichissement de l'uranium, de nouvelles filières fonctionnant à l'uranium enrichi ont vu le jour.

FILIÈRE	COMBUSTIBLE	MODÉRATEUR	CALOPORTEUR
<b>Réacteur UNGG</b> (Uranium naturel graphite-gaz) Première filière développée en France. Le dernier réacteur de cette génération a été arrêté 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> ( <i>Reactor Bolchoe Molchnastie Kipiachie</i> ou en français "Réacteur bouillant de grande puissance") Ces réacteurs constituent 40 % du parc nucléaire de l'ex- URSS.	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 a été 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> Le réacteur Phénix (250 MWe), prototype français, a fonctionné de 1973 à 2009.	Uranium enrichi ou plutonium	Aucun : les neutrons restent rapides.	Sodium liquide. Ne ralentit pas les neutrons.

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



# LES RÉACTEURS DE QUATRIÈME GÉNÉRATION

La France poursuit veille et programmes de R&D sur l'ensemble des systèmes intéressant la 4<sup>e</sup> génération. Elle pilote les études de conception d'un démonstrateur technologique de réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium.



★ Chaîne blindée, dédiée aux études sur le recyclage des combustibles usés.

## POURQUOI DES RÉACTEURS À NEUTRONS RAPIDES ?

Pour des raisons de physique, les réacteurs de 4<sup>e</sup> génération à neutrons rapides offrent des avantages pour l'économie de ressources en uranium et le recyclage des matières valorisables, en particulier du plutonium.

En effet, dans les réacteurs à eau actuels du parc français (REP), seule une petite partie de la matière première,

l'uranium 235 (isotope mineur de l'uranium naturel), est utilisée pour produire de l'énergie. Les 8 000 tonnes d'uranium naturel importées chaque année par la France servent à produire 1 000 tonnes d'uranium enrichi pour alimenter les centrales. Le reste, soit 7 000 tonnes d'uranium appauvri, est entreposé, en vue d'une utilisation future dans les réacteurs de 4<sup>e</sup> génération. Ces stocks, qui ne peuvent pas être utilisés dans les réacteurs du parc actuel,

représentent aujourd'hui plus de 270 000 tonnes. De plus, les matières valorisables (uranium et plutonium), issues du combustible usé des centrales actuelles, sont traitées puis recyclées, entre autres en combustible MOX (Oxyde mixte d'uranium et de plutonium). Celui-ci ne peut être utilisé efficacement qu'une seule fois dans les réacteurs à eau actuels.





© A. Gonty/CEA

↑ Hall du réacteur de la centrale Phénix, à Marcoule, où se sont déroulées les premières expériences sur la transmutation.

1- La transmutation consiste à casser les éléments plus lourds que l'uranium, qui sont également ceux qui contribuent le plus à la radiotoxicité à long terme des déchets. Cette réaction conduit à la formation de nouveaux éléments, d'une durée de vie souvent plus courte, voire non radioactifs.

2- Toxicité de nature radioactive qui peut subir tout organisme exposé, par ingestion ou inhalation.

Les réacteurs à neutrons rapides (RNR), au contraire, peuvent consommer intégralement l'uranium naturel (dont l'uranium appauvri) alors qu'aujourd'hui on ne sait en consommer que moins de 1 %. En permettant de valoriser la totalité de l'uranium extrait du sol, ils multiplient par un facteur proche de 100 l'énergie que l'on peut extraire d'une masse donnée d'uranium naturel. Ils peuvent utiliser sans limitation tout le plutonium produit par le parc actuel de réacteurs, ou par eux-mêmes ; ce qui permet d'en assurer, par multirecyclage, une gestion rationnelle et pérenne.

Par ailleurs, les RNR offrent également la possibilité de **transmuter**<sup>1</sup> certains éléments les plus radiotoxiques contenus dans les déchets ultimes. Il serait ainsi possible d'envisager une réduction d'un facteur 10 de l'emprise de la zone de stockage des déchets de haute activité à vie longue, avec, au bout de 300 ans, une diminution jusqu'à un facteur 100 de la **radiotoxicité**<sup>2</sup> contenue dans ces déchets.

Les RNR représentent donc la composante clé d'une stratégie de cycle fermé du combustible, permettant de gérer efficacement les matières valorisables présentes dans les combustibles usés, d'abord ceux du parc de réacteurs actuel, puis ultérieurement d'un parc homogène de RNR. Ils pourraient ainsi fonctionner pendant plusieurs milliers d'années en se passant totalement d'uranium naturel.

## POURQUOI S'INTÉRESSER AUX RNR REFROIDIS AU SODIUM ?

Le concept de RNR refroidi au sodium (RNR-Na) est la filière de référence dans le monde pour les systèmes de 4<sup>e</sup> génération. Sa dimension internationale potentielle et sa maturité laissent envisager un déploiement industriel à l'horizon 2050. Cet objectif nécessite la qualification préalable, à une échelle représentative, des diverses avancées technologiques liées aux objectifs de performance assignés à la 4<sup>e</sup> génération de réacteurs nucléaires.

## LE PROJET DE DÉMONSTRATEUR TECHNOLOGIQUE ASTRID

En France, les études sur les systèmes de 4<sup>e</sup> génération sont pilotées par le CEA autour du projet de démonstrateur technologique de RNR-Na **Astrid**<sup>3</sup>. Il bénéficiera de l'expérience des RNR ayant déjà fonctionné dans le monde, tout en étant en rupture technologique avec eux. Sa puissance a été définie pour concilier flexibilité d'utilisation suffisante et représentativité au regard des principaux aspects industriels.

Le projet Astrid est actuellement en phase d'étude. Celle-ci est menée en lien avec des partenaires industriels et permet des choix d'options technologiques particulièrement avancés, notamment en matière de sûreté et d'exploitabilité.

Plateforme d'essais en soutien à la conception de réacteurs de 4<sup>e</sup> génération.



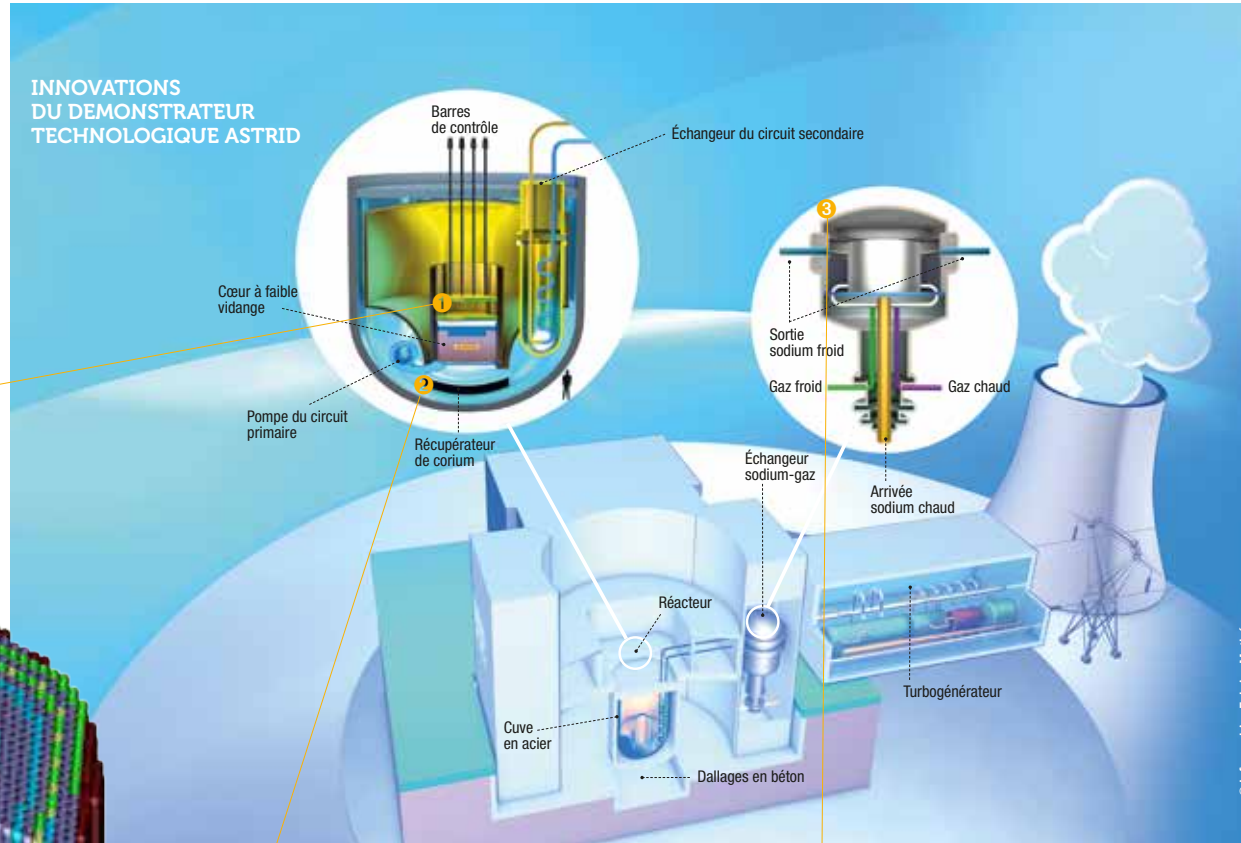
© PFGroblem/CEA

3- Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration.

## INNOVATIONS DU DEMONSTRATEUR TECHNOLOGIQUE ASTRID

Parmi les avancées décisives réalisées, on peut citer par exemple :

- 1 un cœur innovant naturellement résistant aux situations accidentelles, qui constitue une avancée essentielle, unique au monde, dans le domaine de la sûreté. Il permet de réduire la réactivité du cœur en cas de perte du refroidissement du réacteur, entraînant une augmentation de la température du sodium ;



- 2 un récupérateur de cœur fondu (le corium) intégré à la cuve du réacteur, qui permet d'empêcher la radioactivité de s'échapper dans l'environnement en cas d'accident grave de fusion du cœur ;

- 3 un système de conversion d'énergie qui n'utilise pas l'eau, mais un gaz, supprimant ainsi tout risque de réaction chimique entre l'eau et le sodium ;

- des dispositifs d'**inertage**<sup>4</sup> et de détection précoce de fuites qui suppriment les risques de feu de sodium ;
- des moyens multiples et redondants d'évacuation de la puissance résiduelle. Le réacteur peut utiliser l'air ambiant comme moyen de refroidissement, même en cas de perte des alimentations électriques et de la source froide ;
- la possibilité de réaliser des inspections et maintenances pendant le fonctionnement du réacteur ;
- des dispositions permettant d'augmenter le taux de combustion ainsi que la durée de cycles et de réduire la durée des arrêts pour le rechargement du combustible.

© Infographie : Fabrice Mathé

© CEA

↑  
Cœur innovant d'Astrid,  
à sûreté améliorée.

<sup>4</sup>- Utilisation d'un gaz inerte comme l'azote pour supprimer les risques de réaction du sodium avec l'air.





## LA COLLECTION

- 1 > L'atome
- 2 > La radioactivité
- 3 > L'homme et les rayonnements
- 4 > L'énergie
- 5 > L'ADN
- 6 > Les réacteurs nucléaires
- 7 > Le cycle du combustible nucléaire
- 8 > La microélectronique
- 9 > Le laser
- 10 > L'imagerie médicale
- 11 > L'astrophysique nucléaire
- 12 > L'hydrogène
- 13 > Le Soleil
- 14 > Les déchets radioactifs
- 15 > Le climat
- 16 > La simulation numérique
- 17 > Les séismes
- 18 > Le nanomonde
- 19 > Energies du XXI<sup>e</sup> siècle
- 20 > La chimie pour l'énergie

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



© Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, 2016

Direction de la communication

Bâtiment Siège

91191 Gif sur Yvette cedex - [www.cea.fr](http://www.cea.fr)

ISSN 1637-5408