

- 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 RECHERCHE  
À L'INDUSTRIE

# 5 > L'énergie nucléaire : fusion et fission



LA LIBÉRATION DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE  
LA FUSION THERMONUCLÉAIRE  
LA FISSION NUCLÉAIRE  
ET LA RÉACTION EN CHAÎNE



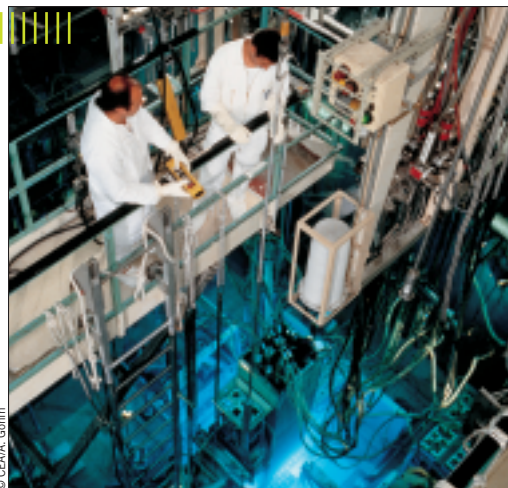
**LA LIBÉRATION DE L'ÉNERGIE  
NUCLÉAIRE** 4La cohésion des protons  
et des neutrons au sein  
du noyau atomique 5L'équivalence entre l'énergie  
et la masse 6Les réactions nucléaires  
libératrices d'énergie 7**LA FUSION  
THERMONUCLÉAIRE** 8La fusion thermonucléaire  
dans les étoiles 9

La fusion sur Terre 11

**LA FISSION NUCLÉAIRE ET  
LA RÉACTION EN CHAÎNE** 12

La réaction en chaîne 13

La masse critique 14

Énergie nucléaire  
et environnement 15

© CEA/A. Gohin

Réacteur de recherche Osiris.



© Médiathèque EDF

La centrale  
nucléaire de  
Civaux (Vienne).

© CEA

Parmi les  
pionniers,  
on retrouve,  
de gauche à  
droite, Bertrand  
Goldschmidt,  
Lew Kowarski  
et Frédéric  
Joliot-Curie.

“Ce sont les protagonistes de la Seconde Guerre mondiale qui, en encourageant la recherche à des fins militaires, ont contribué au développement de l'énergie nucléaire.”

## introduction

La matière est constituée d'atomes. En 1912, le physicien anglais Ernest Rutherford (qui avait montré que l'atome avait un noyau), et le physicien danois Niels Bohr mettent au point un modèle dans lequel l'atome est constitué d'un noyau de charge positive entouré d'un cortège d'électrons. En 1913, Rutherford découvre le proton et en 1932, le physicien anglais Chadwick le neutron. En 1938, Hahn et Strassmann découvrent la fission spontanée et le physicien français Frédéric Joliot-Curie, assisté de Lew Kowarski et Hans Von Halban, montre, en 1939, que ce phénomène de cassure des noyaux d'uranium s'accompagne d'un intense dégagement de chaleur. La découverte de la réaction en chaîne permettra l'exploitation de l'énergie nucléaire.

Pendant la guerre de 1939-1945, les études sur la fission se sont poursuivies aux États-Unis, avec la participation de physiciens émigrés. Le projet Manhattan est lancé, avec pour objectif de doter ce pays d'une arme nucléaire (qui a été utilisée à Hiroshima et à Nagasaki en 1945).

Dès la fin de la guerre, les recherches sur l'énergie dégagée par la réaction de fission nucléaire sont poursuivies dans le but d'une utilisation civile. En France, en 1945, le CEA (Commissariat à l'énergie atomique) est créé sous l'impulsion du général de Gaulle. Cet organisme public de recherche est chargé de donner à la France la maîtrise de l'atome dans les secteurs de la recherche, de la santé, de l'énergie, de l'industrie, de la sûreté et de la défense.

LA LIAISON DES PROTONS ET DES NEUTRONS INDUITE PAR DES FORCES TRÈS INTENSES AU SEIN DU NOYAU EST LA SOURCE DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE.

# La libération de l'énergie nucléaire

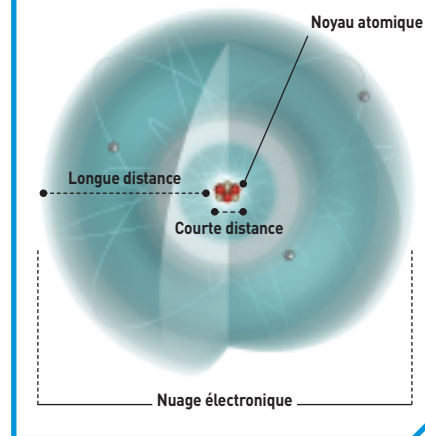


## LA COHÉSION DES PROTONS ET DES NEUTRONS AU SEIN DU NOYAU ATOMIQUE

Les constituants de la matière sont des atomes comprenant un noyau et des électrons qui tournent autour (voir livret *L'atome*). Pénétrons maintenant au cœur de l'atome, dans le noyau. Celui-ci est **un assemblage de protons et de neutrons concentrés dans un très petit volume et soumis à deux forces différentes : la force nucléaire forte et la force électrique.**

Le noyau atomique est très petit (environ  $10^{-12}$  mm) comparé à l'atome ( $10^{-7}$  mm).

### Représentation du nuage de l'atome de lithium



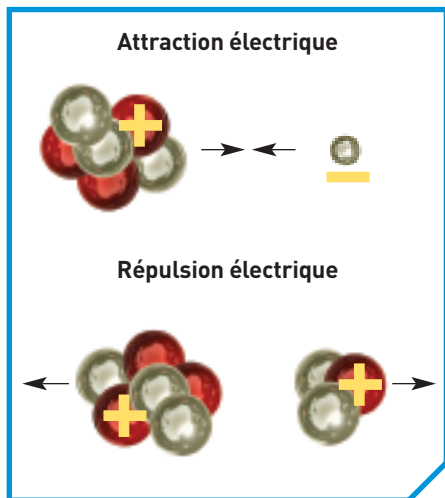
**“Force électrique et force nucléaire se compensent pour assurer la cohésion du noyau.”**

La force électrique n'agit que sur des particules chargées, attirant celles qui sont de signe opposé et repoussant celles de même signe. **Cette force agissant à “longue” distance** permet aux électrons, porteurs d'une charge négative, d'être retenus autour du noyau chargé positivement.

Les neutrons, en raison de leur absence de charge, ne sont pas soumis à la force électrique. Par contre, les protons, tous de même signe, ont tendance à se repousser. Pourtant, dans le noyau, les protons et les neutrons restent bien associés. Cette constatation permet de dire que **la force nucléaire, qui n'agit qu'à très “courte” distance sur les protons et les neutrons, est plus intense pour ces courtes distances que la force électrique.**

Cependant, la force nucléaire ne peut pas compenser à l'infini la force électrique pour la cohésion des protons et des neutrons dans les noyaux. Lorsqu'il y a beaucoup de protons, les noyaux des atomes sont moins liés et deviennent instables.

“La célèbre formule d'Einstein,  $E = mc^2$ , exprime l'équivalence entre la masse et l'énergie.”



### L'ÉQUIVALENCE ENTRE L'ÉNERGIE ET LA MASSE

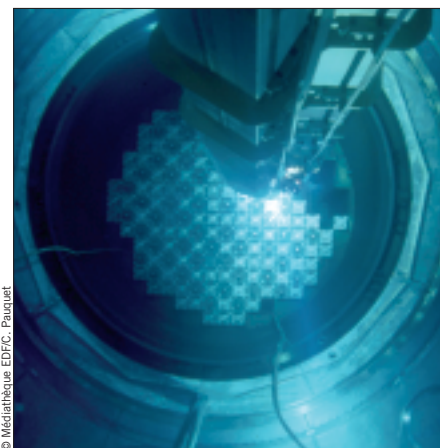
Par des techniques très précises, il est possible de mesurer la masse d'un noyau, celle d'un proton isolé ou d'un neutron isolé. La masse du noyau est inférieure à la somme des masses de chacun de ses **nucléons**. **Qu'est devenue la masse manquante? En fait, cette masse ne disparaît pas mais se transforme en énergie.** La célèbre formule d'Einstein,  $E = mc^2$ , nous permet de calculer celle-ci. En effet, cette formule associe à un corps de masse  $m$ , une énergie  $E$  qui est égale à sa masse multipliée par une constante  $c^2$ .

Particules (protons ou neutrons) constituant le noyau d'un atome.

Cette dernière est le carré de la vitesse de la lumière dans le vide ( $c = 300\,000$  km/s). Dans le cas de notre disparition de masse, l'énergie qui apparaît est donc égale à la perte de masse multipliée par la constante  $c^2$ . Cette quantité d'énergie sert de ciment pour tenir ensemble les constituants du noyau : on l'appelle pour cette raison **l'énergie de liaison**. Elle correspond à l'énergie qu'il faut fournir au noyau pour qu'il soit dissocié en nucléons isolés.

**L'énergie de liaison par nucléon (équivalente à une perte de masse par nucléon) n'est pas identique pour tous les noyaux.** Faible pour les noyaux légers, elle augmente jusqu'aux noyaux de masse moyenne, se trouvant aux alentours du fer 56, et décroît ensuite. Cette évolution de l'énergie de liaison indique que les atomes les plus liés sont les atomes de masse moyenne. Leur perte de masse est plus grande par nucléon. Donc, **toutes les transformations de noyaux tendant à produire des noyaux de masse moyenne vont permettre de libérer de l'énergie nucléaire.** Ces transformations sont appelées réactions nucléaires.

“L'énergie nucléaire se libère de deux façons : ou le noyau fusionne avec un autre noyau ou il se casse en deux.”



Cœur de réacteur où se produit la réaction de fission.

© Médiathèque EDF/C. Paucuet

### LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES LIBÉRATRICES D'ÉNERGIE

Elles sont de deux types :

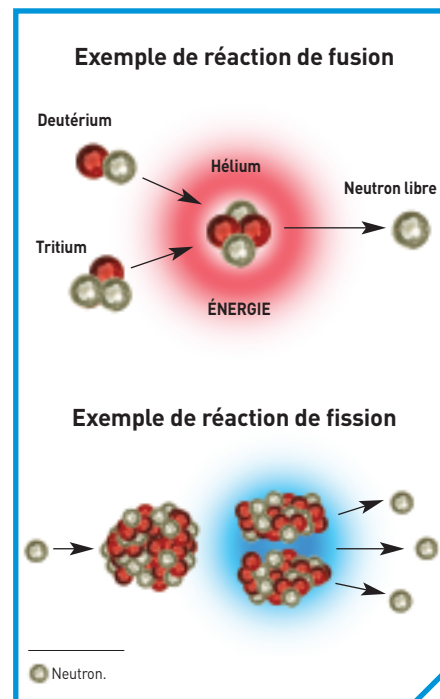
- la fusion de noyaux très légers en un noyau de taille moyenne.

Depuis une trentaine d'années, de nombreux laboratoires étudient la fusion de deux noyaux légers comme ceux du **deutérium** et du tritium qui sont deux isotopes lourds de l'hydrogène. Ce domaine est encore au stade de la recherche et il n'existe pas encore d'applications industrielles de la fusion pour la production d'électricité.

Le deutérium est très abondant (40 mg par litre d'eau de mer) et assez peu coûteux à isoler. Le tritium, corps radioactif, qui n'existe pas dans la nature, peut être obtenu en bombardant du lithium avec des neutrons.

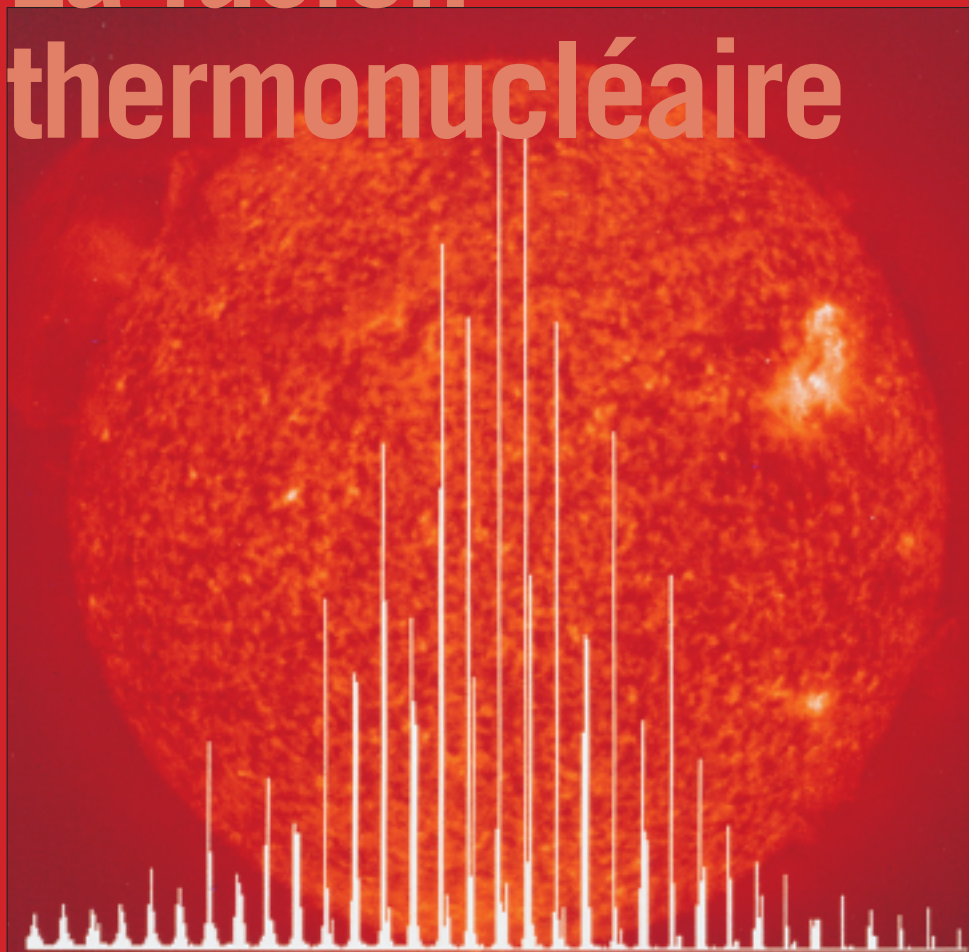
- la fission ou cassure d'un noyau très lourd en deux noyaux de taille moyenne.

La réaction de fission est plus simple à réaliser sur Terre que celle de fusion. Elle consiste à casser des noyaux lourds, comme ceux de l'uranium 235 ou du plutonium 239, sous l'effet de l'impact d'un neutron. **L'énergie de fission libérée est utilisée dans les réacteurs nucléaires.** Ceux-ci produisent actuellement le sixième de l'électricité consommée dans le monde, le tiers en Europe et les trois quarts en France.



DANS LES ENVIRONNEMENTS EXTRÊMEMENT CHAUDS, CERTAINS NOYAUX FUSIONNENT ET LIBÈRENT UNE FABULEUSE ÉNERGIE.

# La fusion thermonucléaire



“Grâce aux températures extrêmes du Soleil ou des étoiles, la fusion naturelle se produit.”

## LA FUSION THERMONUCLÉAIRE DANS LES ÉTOILES

La fusion est le mariage de noyaux légers qui donne naissance à des noyaux plus lourds comme l'hélium, par exemple. **Elle s'accompagne d'une très forte libération d'énergie.**

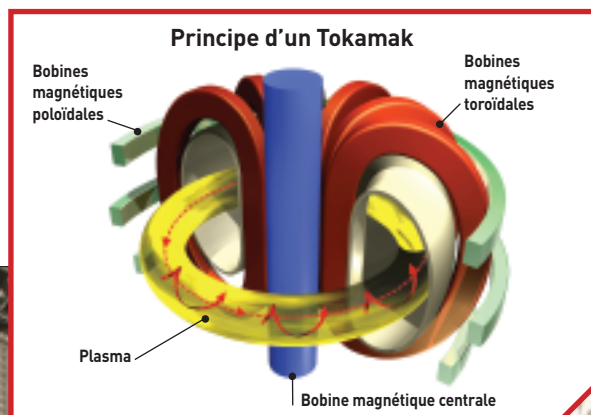
Cette réaction est difficile à réaliser car les forces nucléaires qui lient les nucléons n'agissent qu'à très faible distance alors que la force électrique crée une barrière répulsive qui empêche les noyaux des atomes, qui sont chargés positivement, de s'approcher assez près les uns des autres. Pour passer cette barrière, les noyaux doivent se trouver dans un état d'agitation thermique très grand. C'est le cas lorsqu'ils sont portés à très haute température.

La fusion existe naturellement dans les environnements extrêmement chauds que sont les

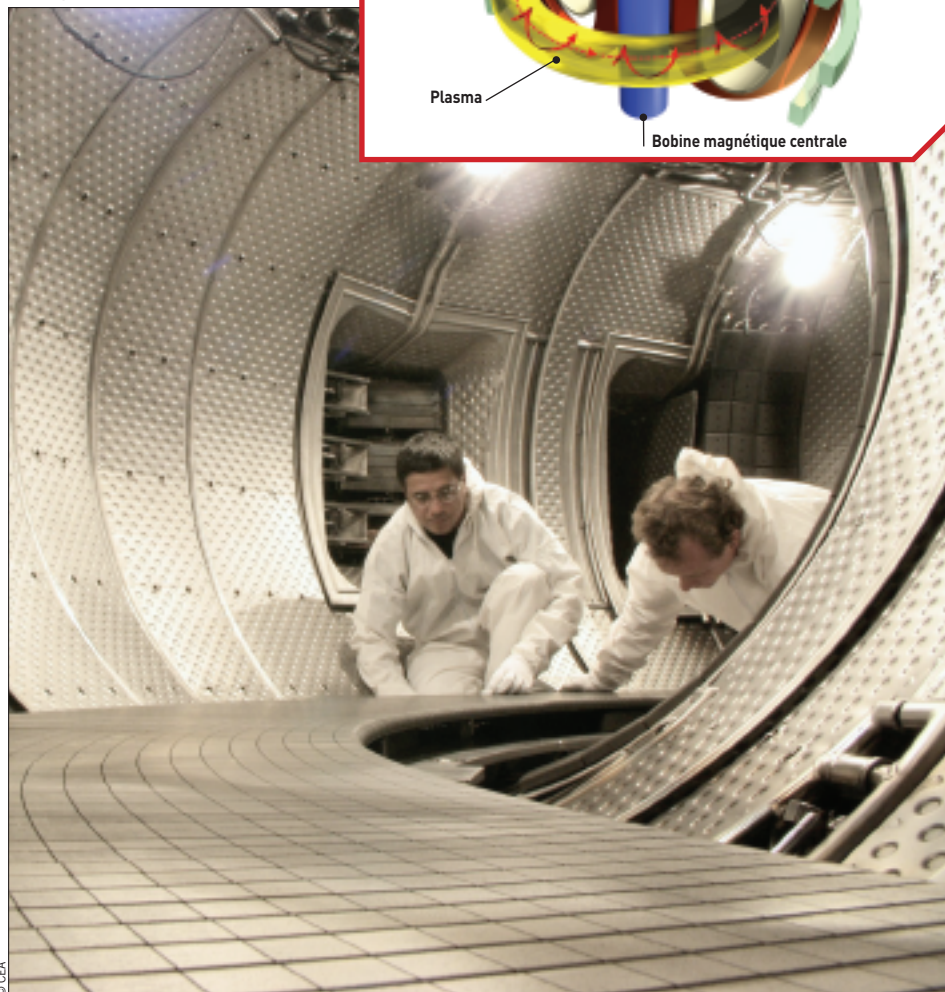
étoiles, comme le Soleil. Il y a, au cœur du Soleil, une température de l'ordre de plusieurs dizaines de millions de degrés qui permet la fusion de noyaux légers comme ceux d'hydrogène en hélium. Ces réactions de fusion thermonucléaire libèrent beaucoup d'énergie et expliquent la très haute température de cet astre qui atteint en surface les 5 700 °C. Une très petite partie de l'énergie rayonnée par le Soleil atteint la Terre et permet la vie sur celle-ci.

Dans des étoiles plus massives que le Soleil, des températures encore plus hautes permettent la fusion de noyaux plus lourds que ceux de l'hydrogène. Ces réactions produisent, entre autres, des noyaux de carbone, d'oxygène et même de fer au cœur des étoiles les plus chaudes.





Tore Supra.



© CEA

**“Un défi pour l'homme : parvenir un jour à maîtriser l'énergie exceptionnelle qui se dégage de la fusion.”**

## LA FUSION SUR TERRE

L'homme cherche à maîtriser les réactions de fusion pour récupérer cette fabuleuse énergie. Il a réussi à maîtriser celle-ci dans les bombes nucléaires de type H mais pas encore pour produire de l'électricité. Pour une application civile de la fusion, la réaction la plus étudiée est la fusion de deux noyaux d'isotopes de l'hydrogène, le deutérium et le tritium qui fusionnent pour créer un noyau plus lourd, celui de l'hélium. Pour atteindre des températures très élevées et des densités suffisantes de noyaux et pour augmenter la probabilité qu'ils se rencontrent, l'homme se heurte à de nombreuses difficultés techniques.

Deux types d'expériences sont étudiés en laboratoire :

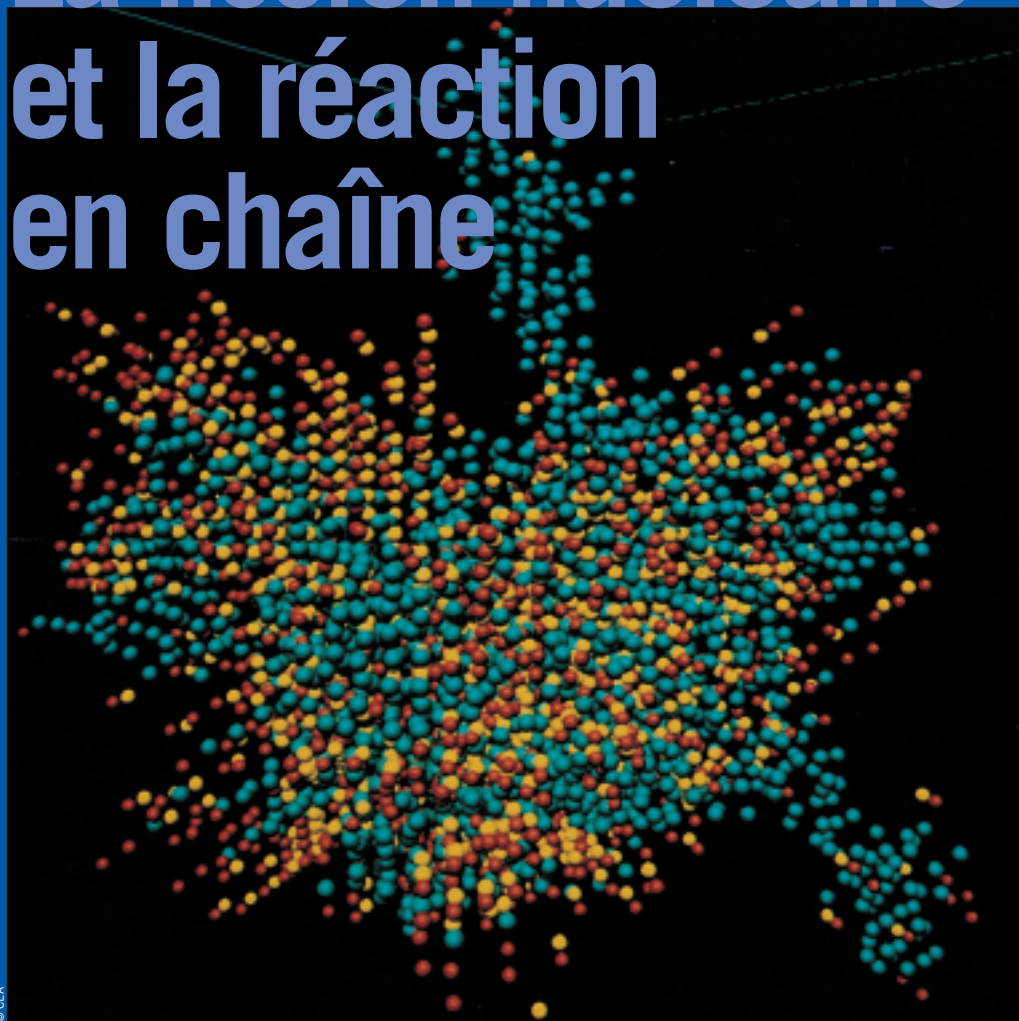
- à faible concentration, le mélange d'isotopes d'hydrogène gazeux (deutérium et tritium) à fusionner peut être renfermé à l'intérieur de parois immatérielles créées par des champs magnétiques. Les noyaux sont portés à plus de 100 millions de degrés dans des machines appelées **Tokamak**;
- à forte concentration, le mélange d'isotopes d'hydrogène à fusionner est contenu dans une microbille que l'on irradie très rapidement avec des **faisceaux de lasers très puissants**.

Machine de fusion en forme de tore (voir schéma p. 10).



SOUS L'IMPACT D'UN NEUTRON,  
CERTAINS NOYAUX SE CASSENT EN DEUX.  
CETTE "FISSION" SE RÉPÈTE, PRODUISANT  
UNE RÉACTION EN CHAÎNE.

# La fission nucléaire et la réaction en chaîne



© CEA

“Dans les centrales nucléaires,  
la réaction en chaîne est stabilisée,  
dans les bombes atomiques,  
elle est au contraire amplifiée.”

## LA RÉACTION EN CHAÎNE

La fission est la rupture d'un gros noyau (noyau d'uranium 235, par exemple) qui, sous l'impact d'un neutron, se scinde en deux noyaux plus petits. La fission s'accompagne d'un grand dégagement d'énergie. Simultanément se produit la libération de deux ou trois neutrons.

Les neutrons ainsi libérés peuvent provoquer à leur tour la fission d'autres noyaux et la libération d'autres neutrons, et ainsi de suite... On a une réaction en chaîne puisqu'en induisant une seule fission dans la masse d'uranium, on peut obtenir si on ne contrôle pas les neutrons au moins 2 fissions, qui vont en provoquer 4, puis 8, puis 16, puis 32...

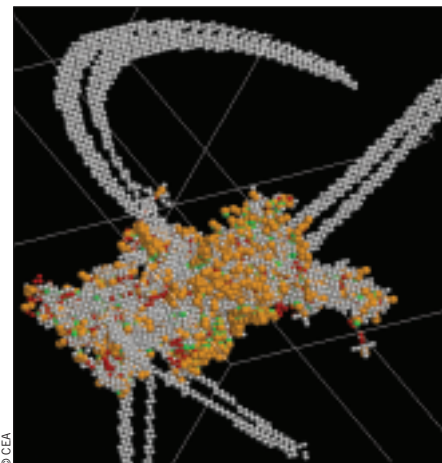
Les deux principales utilisations de la fission sont les réacteurs nucléaires et les bombes

nucléaires de type A. Dans les réacteurs, la réaction en chaîne est stabilisée à un niveau donné, c'est-à-dire qu'une grande partie des neutrons est capturée afin qu'ils ne provoquent pas d'autres fissions. Il suffit seulement qu'un neutron, à chaque fission, provoque une nouvelle fission pour libérer régulièrement de l'énergie (voir livret *Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire*). Au contraire, pour la bombe, la réaction en chaîne doit être la plus divergente possible dans le temps le plus court : on favorise sa croissance exponentielle et l'on confine l'énergie le plus longtemps possible.

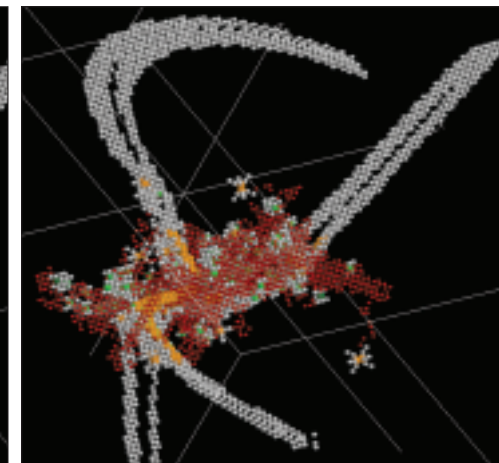
Fonction mathématique dont la croissance est de plus en plus rapide et continue.

La réalisation d'une bombe nécessite de grandes connaissances technologiques et un matériau fissile très pur.

Déplacements atomiques étudiés par simulation.



© CEA



La centrale nucléaire de Civaux (Vienne).



© Médiathèque EDF

## LA MASSE CRITIQUE

Les neutrons peuvent être capturés par certains noyaux d'atomes (l'uranium 238 présent dans la masse d'uranium avec l'uranium 235, par exemple) ou s'évader sans provoquer de fission. Pour que la réaction en chaîne s'établisse, il faut donc rassembler en un même volume une masse suffisante de noyaux fissiles, appelée "masse critique".

Celle-ci est un paramètre important pour une utilisation militaire de l'énergie nucléaire où, contrairement à son utilisation dans le civil, la réaction en chaîne doit se propager très vite et sans limites.

**“En Europe, 35 % de l'électricité est produite par le nucléaire. En France, la production d'électricité nucléaire est d'environ 75 %.”**

## ÉNERGIE NUCLÉAIRE ET ENVIRONNEMENT

Dans un autre domaine, la fission est largement utilisée, dans les réacteurs nucléaires pour produire de l'électricité. En France, environ 75 % de notre électricité est produite par l'énergie nucléaire. C'est une énergie très concentrée puisque 1 g de matière fissile permet de produire 24 000 kWh, soit l'équivalent de 2 tonnes de pétrole. Pour donner des ordres de grandeur, un Français consomme en moyenne 4,2 tonnes équivalent pétrole (tep) par an, un habitant des États-Unis 8,3 tep et un homme sur la terre consomme en moyenne 1,4 tep.

L'accroissement de l'effet de serre dû aux activités humaines devient une préoccupation importante car il pourrait conduire à un réchauffement climatique gravement préjudiciable à la planète. L'énergie nucléaire, en fonctionnement, ne produit pas de gaz carbonique, contrairement au pétrole, au charbon ou au gaz. Elle ne contribue pas, comme les énergies renouvelables, au réchauffement climatique. L'Europe qui produit 35 % d'électricité d'origine nucléaire permet d'éviter l'émission de gaz carbonique d'une quantité égale à celle produite par le parc automobile européen (environ 200 millions de véhicules). Comme toute activité industrielle, le nucléaire génère des déchets, mais en très faible quantité. La production de près de 80 % de notre électricité conduit à 1 kg de déchets radioac-

tifs par habitant et par an. Cette quantité est à comparer aux 2 200 kg de déchets ménagers et 800 kg de déchets industriels, par exemple, dont 100 kg sont fortement toxiques. Sur un kilogramme de déchets radioactifs, il faut particulièrement se préoccuper des 10 g de haute activité à vie longue. Ainsi, le volume de ces déchets provenant de **la fourniture de l'électricité d'une personne pendant les 75 ans de sa vie est équivalent à celui d'une cannette de bière** et dix fois supérieur si l'on tient compte du conditionnement.



© PhotoDisc