

SOMMAIRE

- Introduction
- Le noyau de l'atome
 - Au cœur de la matière
 - Fission et fusion nucléaires
- Les risques du nucléaire
 - Sûreté et sécurité des centrales nucléaires
 - Incidents et accidents
 - Le cycle du combustible et les déchets nucléaires
- Les applications de la physique nucléaire
 - L'électronucléaire
 - Recherche et technologies de pointe
 - Les sciences du vivant et autres applications
- Le nucléaire dans le monde
 - Le nucléaire civil
 - Les contestations
 - La politique française d'indépendance énergétique
 - La défense et le nucléaire
 - La lutte contre la prolifération
- Classification

NUCLÉAIRE (notions de base)

ÉCRIT PAR

Universalis

Depuis la découverte de la radioactivité en 1896 par Henri Becquerel et celle du noyau atomique par Ernest Rutherford en 1911, des progrès scientifiques importants ont été accomplis en physique nucléaire. La maîtrise des réactions nucléaires a permis en particulier, dès le milieu du xx^e siècle, la mise au point des réacteurs et des armements nucléaires.

Malgré son abandon par de nombreux pays et les oppositions qu'elle suscite en raison des risques qu'elle présente pour les populations et l'environnement, l'énergie nucléaire est toujours tenue, spécialement en France, pour la seule véritable solution permettant de répondre aux besoins énergétiques de demain.

Le noyau de l'atome

Les propriétés nucléaires d'un atome dépendent de ses nucléons, c'est-à-dire de l'ensemble des protons et des neutrons qui constituent son noyau. Des transformations nucléaires affectent certains noyaux instables, qui se changent en noyaux plus stables.

Au cœur de la matière

Un atome est constitué d'un noyau extrêmement dense de charge électrique positive, entouré d'un cortège d'électrons chargés négativement. Le noyau concentre presque toute la masse de l'atome ; quant au nuage d'électrons, il s'étend à une distance cent mille fois plus grande que la taille du noyau. Le volume de l'atome est donc essentiellement constitué de vide.

Le tableau périodique des éléments est présenté avec une légende pour l'hélium (He) :

- masse atomique : 4
- numéro atomique (Z) : 2
- symbole de l'élément : He
- nom de l'élément : hélium

Les masses atomiques entre parenthèses correspondent à l'isotope le plus stable.

Tableau périodique des éléments

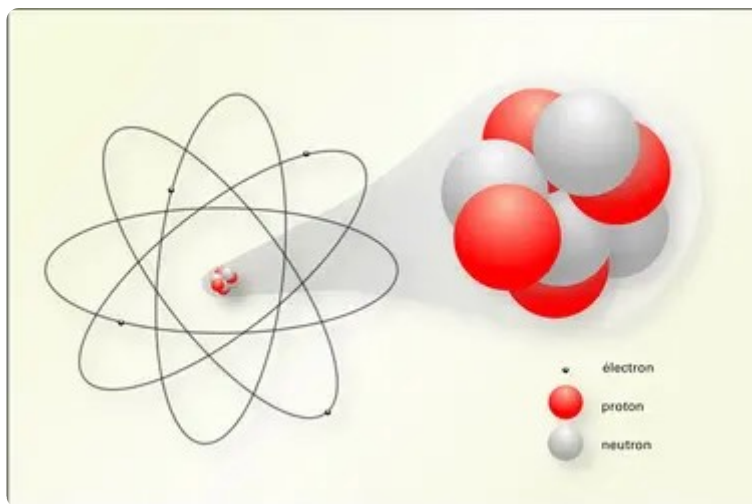
Encyclopædia Universalis France

Les nucléons qui composent les noyaux atomiques sont de deux types : des protons chargés positivement et des neutrons sans charge électrique. L'atome étant électriquement neutre, le nombre de protons est donc égal au nombre d'électrons. C'est ce nombre, ou numéro atomique, qui rend compte de la position des éléments dans le tableau périodique de Mendeleïev.

Néanmoins, les noyaux de même numéro atomique ne contiennent pas tous le même nombre de neutrons. Ces isotopes d'un même élément chimique possèdent des propriétés chimiques identiques, mais des propriétés nucléaires différentes. Par exemple, l'uranium naturel contient environ 0,7 p. 100 d'uranium 235 (92 protons + 143 neutrons) et environ 99,3 p. 100 d'uranium 238 (92 protons + 146 neutrons).

La cohésion du noyau est assurée par l'interaction nucléaire forte, la plus intense des quatre forces fondamentales. Dans la nature, la majorité des atomes sont stables. Mais certains assemblages de nucléons, dits radioactifs, sont instables et tendent à se transformer en d'autres noyaux de numéro atomique plus petit. Cette transformation naturelle est appelée désintégration. Elle s'accompagne d'une émission de particules chargées électriquement.

Chaque isotope radioactif est caractérisé par une période radioactive qui est, par définition, le temps nécessaire à la désintégration de la moitié de la population initiale de noyaux. La période radioactive des éléments varie de quelques fractions de seconde à des milliards d'années.



Composants de base de l'atome

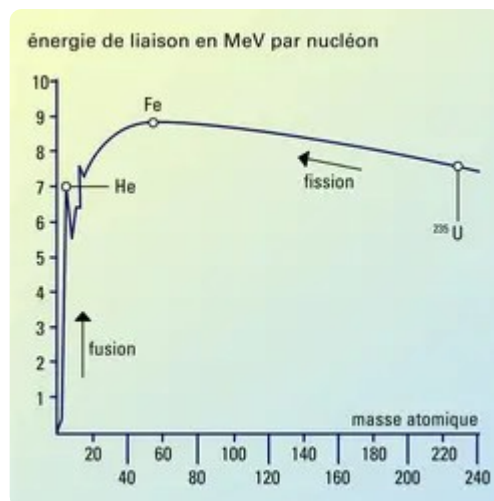
Encyclopædia Universalis France

Du fait de leur très courte période, certains noyaux n'existent plus dans la nature. Il est cependant possible de les recréer et d'étudier leurs transmutations. Il s'agit de la radioactivité artificielle, phénomène strictement identique à la radioactivité naturelle affectant les noyaux ayant une période assez longue pour subsister aujourd'hui dans la nature.

Fission et fusion nucléaires

L'énergie qui maintient les nucléons dans un noyau est appelée énergie de liaison. La masse d'un noyau stable est inférieure à la somme des masses de ses nucléons et l'énergie de liaison correspond à cette différence. Celle-ci se calcule par la formule d'Albert Einstein $E = mc^2$, qui permet d'expliquer que la masse peut se transformer en énergie. Pour casser un noyau, il est nécessaire de fournir une énergie au moins égale à l'énergie de liaison.

L'énergie de liaison n'est pas identique pour tous les noyaux. Elle augmente avec le numéro atomique, depuis les noyaux légers jusqu'au noyau de l'atome de fer, pour lequel elle est maximale, puis elle diminue pour les noyaux plus lourds. Le fer est donc le noyau le plus lié, et de ce fait le plus stable. Les autres noyaux, dans certaines circonstances, ont tendance à se transformer en noyaux plus stables : pour cela, les noyaux plus légers fusionnent les uns avec les autres et les noyaux plus lourds fissionnent. Ces réactions nucléaires de fusion et de fission, qui peuvent être spontanées ou provoquées, sont libératrices d'énergie.



Énergie de liaison

Encyclopædia Universalis France



Vidéo

Énergie nucléaire

Planeta Actimedia S.A. © Encyclopædia Universalis France pour la version française.

Les risques du nucléaire

La mise en œuvre de l'énergie nucléaire engendre plusieurs types de risques : celui de la sûreté et du démantèlement des installations d'abord, celui de la gestion des déchets ensuite. D'importants progrès ont été réalisés en matière de confinement des réacteurs. Mais les nombreux accidents nucléaires qui se sont produits depuis 1945 soulignent l'importance des risques. Par ailleurs, reste la difficulté à gérer les déchets.

Sûreté et sécurité des centrales nucléaires

Le risque majeur de l'électronucléaire est le rejet de matières radioactives dans l'environnement, un réacteur nucléaire ne pouvant pas engendrer d'explosion atomique. La conception et l'exploitation des installations doivent obéir aux principes fondamentaux d'indépendance et de

redondance des systèmes. La formation et l'entraînement des opérateurs jouent un rôle crucial.

Dans les réacteurs modernes (de type R.E.P. – réacteur à eau pressurisée –), trois niveaux de confinement ont été conçus pour réduire au minimum le risque d'accident nucléaire. Le premier niveau concerne directement le combustible. Celui-ci est confiné dans des pastilles en métal qui sont empilées dans des tubes métalliques appelés crayons et formant une gaine étanche pour prévenir la dispersion des produits de fission. Le deuxième niveau de confinement isole le cœur du réacteur du reste de l'installation. Les barres de combustible, qui contiennent les assemblages de crayons, sont insérées dans le cœur du réacteur. Celui-ci est constitué d'une cuve en acier de 20 à 30 centimètres d'épaisseur, revêtue d'un d'alliage inoxydable. Un dernier niveau de confinement entoure l'ensemble des boucles du circuit primaire de refroidissement, de la cuve, des pompes et du générateur de vapeur. Cela réduit considérablement les conséquences d'une fuite du liquide caloporteur du circuit primaire relié au cœur du réacteur. Cette enceinte de confinement en béton est prévue pour résister à la fois aux pressions que pourrait provoquer un accident sur le réacteur et aux agressions extérieures.

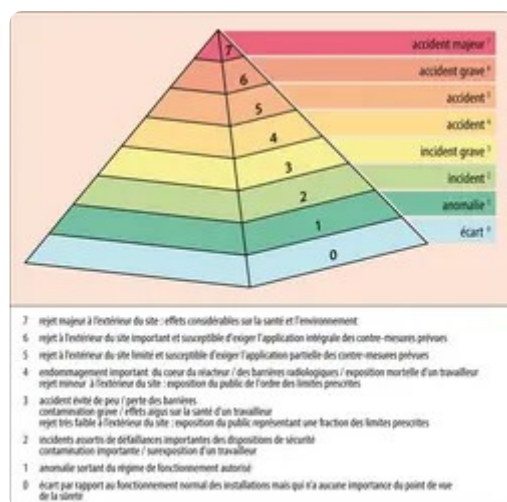
La troisième génération de réacteurs, telle que le programme européen E.P.R. (European Pressurized Reactor), n'est pas de conception révolutionnaire. Les systèmes existants sont améliorés ; le bâtiment réacteur est conçu pour résister à la fonte des barres de combustible. Différents concepts sont à l'étude pour la quatrième génération de réacteurs (au-delà de 2030), afin d'améliorer le rendement, la rentabilité et la sûreté des centrales nucléaires.

Incidents et accidents

Malgré toutes les précautions prises, des accidents nucléaires ont malheureusement assombri l'histoire de l'électronucléaire.

En 1979, à la suite d'un incident ordinaire sur le circuit de refroidissement de la centrale de Three Mile Island (États-Unis), tous les automatismes fonctionnèrent jusqu'à l'arrêt du réacteur. Mais, lors du retour à la normale, une soupape bloquée, couplée à des erreurs d'affichage sur le tableau de commande, priva le combustible de refroidissement et conduisit à la fonte partielle du cœur. Les rejets radioactifs n'ont affecté ni les populations ni l'environnement. Ils ont été limités par la bonne tenue de l'enceinte de confinement, qui a montré ici toute son importance en termes de sûreté nucléaire. Cet accident a entraîné de

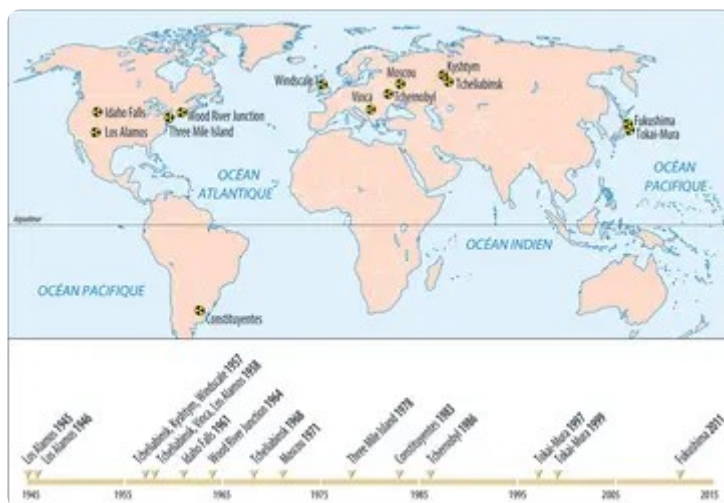
profondes révisions dans la conception et le pilotage des centrales nucléaires.



L'échelle I.N.E.S.

Encyclopædia Universalis France

Mais ce sont les très graves accidents nucléaires de Tchernobyl en avril 1986 et de Fukushima en mars 2011 qui ont le plus frappé l'opinion publique mondiale. Démonstrations tragiques des effets catastrophiques de risques non maîtrisés, ils ont conforté de nombreux pays dans leur refus du nucléaire civil ou leur souhait d'abandonner cette filière au plus vite.



Principaux accidents nucléaires

Encyclopædia Universalis France



Vidéo

La catastrophe de Tchernobyl

Encyclopædia Universalis France

Le cycle du combustible et les déchets nucléaires

La fabrication du combustible puis son retraitement après utilisation dans les réacteurs nucléaires constituent le cycle du combustible.

Un déchet radioactif correspond à la matière radioactive qui ne peut plus être ni recyclée ni réutilisée, et doit donc être stockée. En fonction de sa composition, il est plus ou moins dangereux pendant plus ou moins longtemps. Sa dangerosité dépend de son caractère radioactif mais aussi parfois de sa toxicité chimique.

En France, on classe les déchets nucléaires selon généralement deux critères : leur activité (nombre de désintégrations par unité de temps), autrement dit leur niveau de radioactivité ; la « période radioactive » ou demi-vie des éléments radioactifs contenus dans les déchets, ce qui correspond au temps nécessaire pour diviser par deux l'activité d'un élément radioactif. Cette période varie, selon les éléments radioactifs, de quelques jours à plusieurs milliers d'années

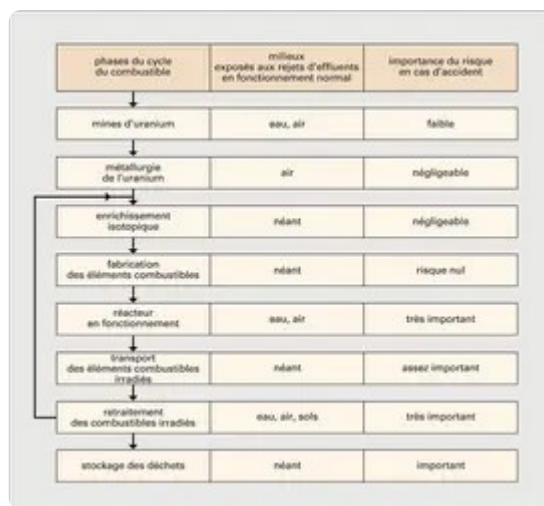
activité \ demi-vie	vie très courte < 100 jours	vie courte (V.C.) < 31 ans	vie longue (V.L.) > 31 ans
très faible activité (T.F.A.)	déchets gérés en laissant décroître la radioactivité sur place, puis filière de gestion de déchets conventionnels	stockage en surface : site de Morvilliers (Aube)*	
faible activité (F.A.)		stockage en surface : site de Soulaines (Aube), filière à l'étude pour les déchets tritiés	filière à l'étude (déchets radifères, déchets graphites)
moyenne activité (M.A.)			filière à l'étude : stockage profond réversible envisagé par la loi de 2006
haute activité (H.A.)		filière à l'étude : stockage profond, réversible envisagé par la loi de 2006	

* Il s'agit d'un stockage pour les déchets hors résidus de traitement du minerai d'uranium pour lesquels des stockages spécifiques à proximité des sites de production sont mis en œuvre.

Nucléaire : types de déchets et filières de gestion

Encyclopædia Universalis France

On distingue ainsi différentes catégories de déchets : les déchets de très faible radioactivité, qui proviennent du démantèlement des installations nucléaires, et les déchets de faible et moyenne activités et à durée de vie courte (période radioactive inférieure à 31 ans), qui représentent près de 90 p. 100 de l'ensemble des déchets radioactifs (installations nucléaires, laboratoires de recherche et d'analyse, hôpitaux, industrie) ; les déchets de faible activité et à durée de vie longue (période supérieure à 31 ans), et les déchets de moyenne activité et à vie longue, qui représentent moins de 10 p. 100 du volume total des déchets radioactifs (usines de fabrication et de traitement des combustibles, centres de recherche) ; les déchets de très haute activité et à durée de vie longue (généralement plus d'un millier d'années), qui ne constituent que 1 p. 100 du volume des déchets radioactifs en France, et proviennent du traitement des combustibles usés issus des centrales nucléaires. Chaque catégorie de ces déchets est gérée dans une filière spécifique qui comprend une série d'opérations (tri, traitement, conditionnement, entreposage et stockage).



Risques de pollution nucléaire

Encyclopædia Universalis France

D'autres pays ont choisi une politique différente en matière de déchets, en décidant de ne pas traiter leurs combustibles usés. Ces derniers sont alors confinés dans des conteneurs étanches en vue de leur entreposage de longue durée, et éventuellement de leur stockage dans un site géologique profond. Cette solution est toutefois moins attrayante du point de vue du développement durable, car elle ne fait pas appel au recyclage.

Les applications de la physique nucléaire

La tendance, naturelle ou non, des noyaux atomiques à subir des transformations et l'énergie qui est ainsi dégagée ont de nombreuses applications civiles. La production d'énergie reste l'utilisation la plus connue de la physique nucléaire. Mais celle-ci est aussi employée dans de nombreux autres domaines, en particulier dans les sciences du vivant (biologie et médecine).

L'électronucléaire

Le principe de la fission de l'uranium est connu depuis 1939 : l'absorption d'un neutron de faible énergie (neutron dit thermique) par un noyau d'uranium provoque la fission de ce dernier en deux noyaux plus légers. Cette réaction libère une grande quantité d'énergie et deux ou trois neutrons énergétiques. Si ces neutrons sont ralentis dans un matériau « modérateur », la réaction peut continuer et s'auto-entretenir. C'est cette réaction en chaîne contrôlée qui se produit au sein de tous les réacteurs à neutrons thermiques.

Tout réacteur nucléaire est composé d'un combustible capable de

fissionner (uranium naturel ou enrichi en isotope 235, plutonium...), d'un matériau modérateur favorisant la capture des neutrons (eau ordinaire ou eau lourde, graphite...), et d'un fluide caloporteur capable d'évacuer l'énergie thermique produite dans le cœur (eau liquide ou vapeur, sodium liquide...). L'énergie libérée sert à produire de la vapeur d'eau sous pression qui actionne une turbine couplée à un alternateur générant de l'électricité.

Les différentes solutions technologiques adoptées pour produire de l'énergie sont appelées les « filières » de l'électronucléaire. Les plus courantes actuellement en fonction dans le monde sont :

- Les filières à eau ordinaire ; le combustible est l'oxyde d'uranium enrichi ou un mélange d'oxyde d'uranium et de plutonium (combustible Mox). L'eau bouillante (réacteur R.E.B.) ou sous pression (réacteur R.E.P.) sert à la fois de modérateur et de caloporteur. La filière R.E.P. équipe l'ensemble du parc actuel de réacteurs industriels français. Un nouveau type de réacteur, l'E.P.R., a été conçu au début des années 1990 sur les mêmes principes que le réacteur R.E.P., l'objectif étant d'améliorer la sûreté et la rentabilité économique. La mise en service des premiers E.P.R., en Finlande (Olkiluoto) et en France (Flamanville), prévue respectivement en 2009 et 2012, a été repoussée de plusieurs années en raison de problèmes techniques.
- La filière à eau lourde (modérateur et caloporteur) permet d'utiliser l'oxyde d'uranium naturel comme combustible.
- La filière graphite-gaz utilise un combustible à base d'uranium, le graphite, comme modérateur et le gaz carbonique ou l'hélium comme caloporteur.

Il existe aussi une filière de réacteurs dits à « neutrons rapides », qui, à partir de l'uranium 238 naturel, produisent du plutonium en quantité inférieure, égale ou supérieure à celle qu'ils consomment ; dans le dernier cas, ils sont dits « surgénérateurs »



Enrico Fermi

Keystone/ Hulton Archive/ Getty Images



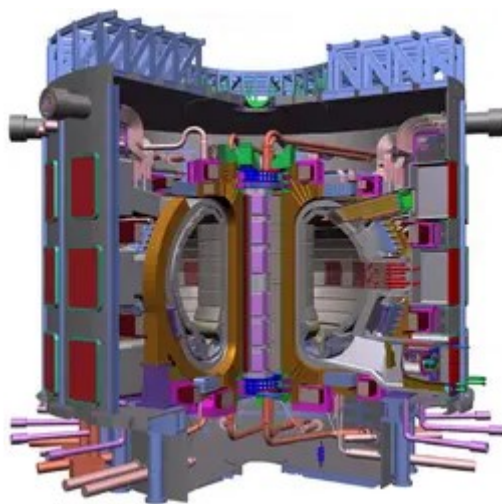
Vidéo

Principe de fonctionnement d'une centrale de type REP

Encyclopædia Universalis France

Recherche et technologies de pointe

Compte tenu de l'évolution de la population mondiale, de la consommation d'énergie par habitant et des ressources en énergies fossiles (pétrole, gaz...), de nouvelles sources doivent être développées.



Projet I.T.E.R. (International Thermonuclear Experimental Reactor)

I.T.E.R./D.R.

La fusion du deutérium et du tritium, qui donne de l'hélium 4 (et un neutron) et dégage une grande quantité d'énergie, est une alternative sérieuse pour le futur : les ressources sont très abondantes, la filière ne contribue pas à l'effet de serre, ne produit pas de déchets à longue période radioactive et n'est pas proliférante. En revanche, la maîtrise de la fusion est bien plus complexe que celle de la fission : le milieu réactif est un plasma qu'il faut maintenir à 100 millions de degrés. La réalisation d'un réacteur à fusion fait donc l'objet d'intenses recherches et de nombreux développements technologiques, notamment dans le cadre du projet international I.T.E.R.

Les sciences du vivant et autres applications

Les techniques liées à la physique nucléaire sont loin d'être réservées à la production d'électricité ou à l'armement, et leurs applications sont nombreuses dans le domaine des sciences du vivant.

L'imagerie nucléaire est une branche de la médecine nucléaire qui repose sur l'utilisation d'éléments radioactifs préalablement administrés au patient et d'une caméra enregistrant le rayonnement émis par les organes internes. On distingue l'imagerie conventionnelle, très répandue dans les hôpitaux, qui utilise des radiotraceurs émetteurs de photons détectés à l'aide de gamma-caméras, et la tomographie par émission de positons, qui utilise des traceurs émetteurs de positons produits dans un accélérateur de particules, les positons étant détectés à l'aide de caméras spécifiques.

Ces techniques de détection précoce des maladies permettent d'étudier les structures et la fonctionnalité des organes sans opérer le patient. La dose traceuse injectée est extrêmement faible, et l'examen est donc

inoffensif tout en étant indolore.

La radiothérapie, qui utilise l'effet des radiations ionisantes sur les tissus biologiques, est, avec la chirurgie et la chimiothérapie, un des trois moyens principaux de la lutte contre le cancer. Elle est utilisée dans le traitement de plus de la moitié des cancers. La tumeur est irradiée par un faisceau de particules légères (électrons) ou lourdes (protons), qui détruisent les cellules tumorales tout en préservant les tissus sains avoisinants. Ces techniques nécessitent un accélérateur de particules et une enceinte pour protéger patients et personnels médicaux.

Les rayonnements ionisants servent pour stériliser des objets tels que le matériel chirurgical ou certains aliments, comme pour la conservation des œuvres d'arts. L'irradiation par rayons gamma de ces objets détruit les micro-organismes tels que les virus, les bactéries, les champignons ou les insectes.



Vidéo

Imagerie médicale : de 1960 à nos jours

Encyclopædia Universalis France

Le pouvoir de pénétration des rayonnements tels que les rayons X a de multiples utilisations civiles : contrôle des bagages dans les aéroports, détection des défauts dans les matériaux (qui utilise aussi les rayons gamma). Se propageant facilement dans un milieu dense, les neutrons sont quotidiennement employés pour détecter des explosifs cachés derrière une paroi en acier.

Le nucléaire dans le monde

Tous les pays n'ont pas la même position vis-à-vis de l'électronucléaire. Mais, face à une demande énergétique croissante et à la diminution des ressources pétrolières qui se profile, le nucléaire semble être une alternative incontournable. Le développement des armes nucléaires reste

un choix géopolitique des détenteurs de cet armement ou de ceux qui voudraient le devenir.

Le nucléaire civil

En 2014, 439 centrales nucléaires étaient en service dans le monde, exploitées par 31 pays. Elles représentaient une puissance installée de plus de plus de 370 gigawatts, soit environ 12 p. 100 de la capacité mondiale de production d'énergie électrique. Les plus grands producteurs d'électricité nucléaire sont les États-Unis, la France et la Russie. Malgré la catastrophe de Fukushima, qui a eu lieu en mars 2011 et suscité une vive émotion, plus de 70 nouvelles centrales étaient en construction dans le monde en 2014, soit le plus grand nombre de mises en chantier depuis 1989. Le nucléaire connaît son développement le plus important en Asie, où de nombreux réacteurs sont en construction. L'Inde veut notamment passer, d'ici à 2020, de 2 p. 100 à 15 p. 100 d'électricité d'origine nucléaire. Aux États-Unis et en Russie, les autorités relancent l'utilisation de cette source d'énergie. En Europe occidentale, la situation est contrastée. En 2001, l'Allemagne a opté pour une politique de sortie du nucléaire d'ici à 2020, politique qu'elle a confirmée en 2011 après la catastrophe de Fukushima. D'autres pays, comme la France ou la Finlande, construisent de nouveaux réacteurs.

Les contestations

La technologie nucléaire est complexe et le grand public doit largement faire confiance aux experts pour se faire une opinion sur les orientations de la politique énergétique d'un pays. Le très long terme, qui caractérise les risques du nucléaire, et le sentiment d'impuissance face à cette situation accentuent les craintes des populations.

Dans les années 1970, les mouvements écologistes ont fait prendre conscience des risques du nucléaire, risques liés notamment à l'exploitation des centrales et à la gestion des déchets radioactifs. L'opinion du public à l'égard du nucléaire a toujours été mitigée, chaque accident nucléaire venant remettre en question la sûreté des installations nucléaires. Les sites de stockage des déchets radioactifs et les effets de ceux-ci sur la santé et sur l'environnement font l'objet de vives contestations.

La politique française d'indépendance énergétique

Après une phase expérimentale qui a abouti à la première production d'électricité d'origine nucléaire par la centrale de Marcoule en 1956,

l'électronucléaire français prend son essor dans les années 1960, avec la construction des premières centrales couplées au réseau électrique.



Les centrales nucléaires françaises

Encyclopædia Universalis France

Pour faire face aux chocs pétroliers des années 1973 et 1979, la France décide d'une politique d'indépendance énergétique en misant sur la production de plus de 70 p. 100 d'électricité d'origine nucléaire. Ce pays compte aujourd'hui 58 réacteurs de type R.E.P., répartis sur 19 sites.

La défense et le nucléaire

L'arme la plus puissante jamais conçue par l'homme est la bombe nucléaire. À la fin de la Seconde Guerre mondiale, les grandes puissances ont entrepris d'importants programmes scientifiques et technologiques pour se doter de cette arme. La première bombe atomique (Trinity) fut testée par les Américains le 16 juillet 1945. Cette même année, deux bombes atomiques ont été utilisées par l'armée américaine pour bombarder, respectivement le 6 et le 9 août, les villes japonaises d'Hiroshima et de Nagasaki. L'Union soviétique réalisa son premier test pour ce type d'armes en 1949.

Lors d'une explosion nucléaire, la fission (bombe A) ou la fusion (bombe H) des noyaux atomiques libère une énergie équivalente à plusieurs milliers voire plusieurs millions de tonnes de T.N.T. (trinitrotoluène, un explosif conventionnel de référence).

Une explosion nucléaire dans l'atmosphère provoque un énorme dégagement de chaleur (la température atteint 1 million de degrés), l'émission de radiations, la formation d'une onde de choc et l'apparition d'une boule de feu qui peut atteindre quelques kilomètres de diamètre. Elle crée aussi un nuage qui s'élève rapidement du fait de sa chaleur et prend la forme de ce qu'on a nommé le « champignon atomique ».

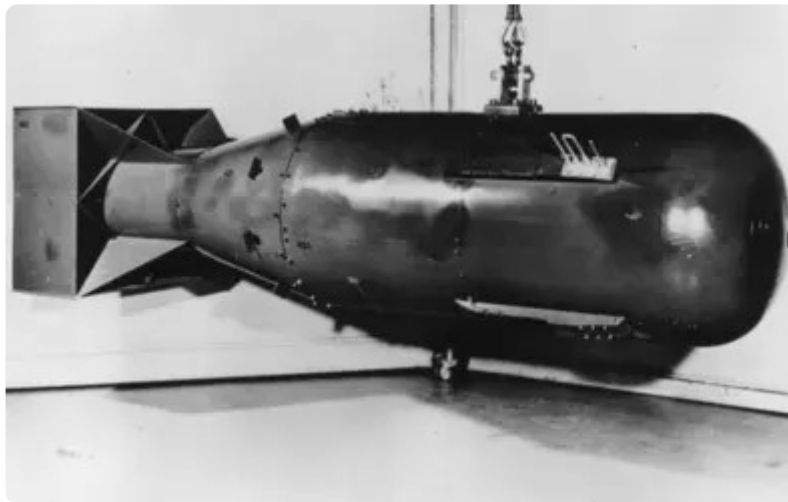


Vidéo

Hiroshima et la capitulation du Japon, 1945

National Archives

Durant la guerre froide, les deux superpuissances soviétique et américaine se sont engagées dans une surenchère sur le terrain de la « dissuasion nucléaire ». Le monde se partageait alors entre les pays disposant de la bombe, qui ne l'utiliseraient pas entre eux, et les autres...



Bombe atomique de type Little Boy

Bettmann/ Getty Images



Vidéo

Essais nucléaires français

Encyclopædia Universalis France



Vidéo

Propulsion et armes nucléaires

Encyclopædia Universalis France

La lutte contre la prolifération

L'Agence internationale de l'énergie atomique (A.I.E.A.), créée en 1957, a pour objectif de garantir l'utilisation de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques en contrôlant les installations des pays membres. Depuis 1970, l'Agence est en charge du respect du traité de non-prolifération des armes nucléaires (T.N.P.), lequel vise à empêcher l'acquisition d'armes nucléaires par les pays qui n'en disposent pas et à favoriser le désarmement de ceux qui en possèdent. Hormis l'Inde, le Pakistan, Israël et le Soudan du Sud (ainsi que la Corée du Nord, qui s'est retiré du T.N.P. en 2003), tous les pays en sont signataires. Depuis 1996, une volonté existe pour compléter ce dispositif par un autre traité, le traité pour l'interdiction complète des essais nucléaires (T.I.C.E.), qui doit être ratifié par 44 pays pour entrer en vigueur.

La prolifération des matières nucléaires a donné un autre aspect à la menace terroriste. Le risque de fabrication d'une « bombe sale », bombe conventionnelle contenant des matières radioactives, est devenu plausible. Après les attentats du 11 septembre 2001 aux États-Unis, les mesures de sécurité concernant les centrales nucléaires, les transports de matières radioactives ainsi que les usines de retraitement ont été considérablement renforcées.

— **E.U.**

CLASSIFICATION

Techniques

Énergie

Énergie nucléaire

Universalis, « **NUCLÉAIRE** (notions de base) », *Encyclopædia Universalis* [en ligne], consulté le 1 octobre 2023. URL : <https://www-universalis-edu-com.ezproxy.normandie-univ.fr/encyclopedie/nucleaire#c25781>