

## La dissuasion nucléaire : 9 pays l'ont (les autres Etats ont-ils encore quelque chose à dire ?)

La Russie détiendrait, avec **5.580 ogives nucléaires** (en 2024), le plus grand arsenal au monde.

La Russie est suivie de près par les [Etats-Unis](#) avec **5.044 armes nucléaires** .

A eux seuls, ces deux Etats ont entre leurs mains plus de 80% des armes nucléaires mondiales.

Loin derrière, la Chine, troisième puissance nucléaire mondiale avec ses **500 ogives**.

Puis viennent **la France** (grâce au général De Gaulle) (290 ogives), le Royaume-Uni (225), le Pakistan (170), l'Inde (170), Israël (90) et la Corée du Nord (50).

sources ; FAS , Cnews , Lydie Kaïmakian

---

Un haut responsable militaire **iranien** a mis en garde Israël contre l'éventualité d'une attaque visant **ses sites nucléaires**, en affirmant que l'Iran était prêt à lancer en représailles de « *puissants missiles* » sur les installations **nucléaires israéliennes**.

source : **Le Monde**

---

L'**énergie nucléaire** est l'[énergie](#) associée à la [force de cohésion](#) des [nucléons](#) ([protons](#) et [neutrons](#)), la [force nucléaire forte](#) au sein du [noyau des atomes](#). Les transformations du noyau libérant cette énergie sont les [réactions nucléaires](#). La [force nucléaire faible](#) régit les réactions entre [particules](#) et [neutrinos](#).

La libération d'énergie nucléaire a lieu naturellement par les réactions de [fusion nucléaire](#) au sein des [étoiles](#) — par exemple le [Soleil](#) — ainsi que par [fission nucléaire](#) dans la [radioactivité naturelle](#), la principale source d'énergie du [volcanisme de la Terre](#)<sup>1</sup>. L'énergie libérée lors des réactions de fission ou de fusion nucléaires est exploitée à des fins civiles et militaires, au sein de [réacteurs nucléaires](#) ou lors d'[explosions atomiques](#).

## Radioactivité

La [radioactivité](#) est un [phénomène physique](#) naturel, se manifestant par le fait que certains types de [noyaux atomiques](#), instables, peuvent dissiper sous forme d'[énergie](#) une partie de leur masse initiale (transformée selon la célèbre formule  $E=mc^2$  d'[Albert Einstein](#)) et évoluer spontanément vers des noyaux atomiques plus stables, par [désintégration](#).

Un corps [radioactif](#) dégage naturellement cette énergie sous la forme d'un flux de [rayonnement ionisant](#) et de [chaleur](#). Cette chaleur est particulièrement intense pour le [combustible nucléaire](#) dans le réacteur ; c'est la raison pour laquelle le combustible irradié est entreposé dans une [piscine de désactivation](#) près du réacteur. C'est le même phénomène qui est à l'origine d'une partie de la chaleur de la [croûte continentale](#) terrestre.

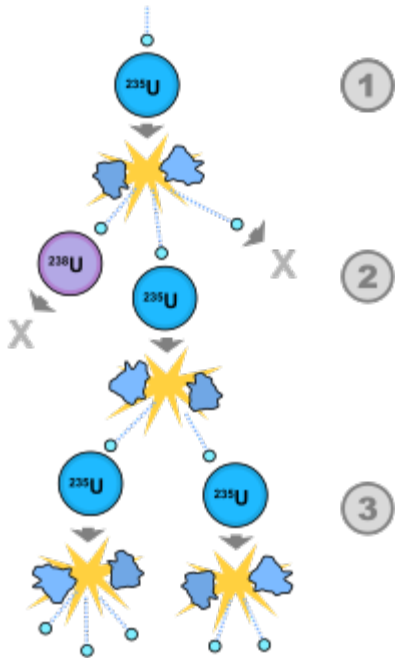
## Réaction nucléaire

Une [réaction nucléaire](#) est une interaction entre un [noyau atomique](#) et une autre particule ([particule élémentaire](#), noyau atomique ou [rayonnement gamma](#)) qui provoque un réarrangement nucléaire.

Ces réactions sont d'autant plus faciles qu'elles conduisent à des configurations plus stables. La différence d'énergie (correspondant au [défaut de masse](#)) constitue alors l'énergie libérée par la réaction. Cette transformation de la masse

en énergie (selon la célèbre formule  $E=mc^2$ ) est utilisée dans les [réactions nucléaires](#) de [fission](#) et [fusion](#).

## Fission[[modifier](#) | [modifier le code](#)]



Un exemple de [fission nucléaire](#) : une [réaction en chaîne](#) faisant intervenir de l'[uranium 235](#).

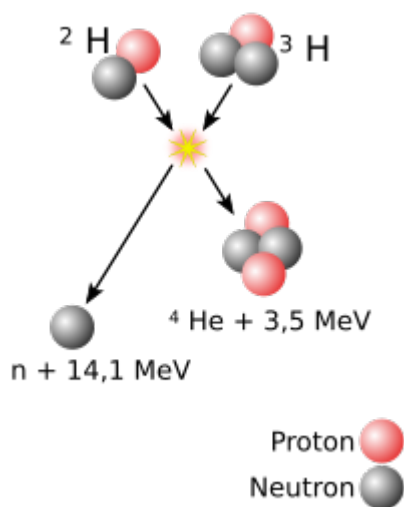
Lorsqu'un [neutron](#) percute le [noyau](#) de certains [isotopes](#) lourds, il existe une probabilité que le noyau percuté se scinde en deux noyaux plus légers. Cette réaction, qui porte le nom de [fission nucléaire](#), se traduit par un dégagement d'énergie très important (de l'ordre de 200 [MeV](#) par événement, à comparer aux énergies des [réactions chimiques](#), de l'ordre de l'[eV](#)).

Cette fission s'accompagne de l'émission de plusieurs neutrons qui, dans certaines conditions, percutent d'autres noyaux et provoquent ainsi une [réaction en chaîne](#). Dans un réacteur nucléaire, cette réaction en chaîne se déroule dans des conditions stables, à vitesse lente et contrôlée. Dans une bombe, où la matière est placée brusquement très loin de son domaine de stabilité, la réaction se multiplie si rapidement qu'elle conduit à une réaction explosive.

L'importance de l'énergie émise lors de la fission provient du fait que l'[énergie de liaison](#) par nucléon du noyau initial est plus faible que celle des noyaux produits (environ 7,7 MeV par nucléon pour les éléments lourds, contre 8,8 pour le fer). La plus grande partie de l'énergie se retrouve sous forme d'[énergie cinétique](#) des neutrons et des noyaux fils, une énergie récupérée sous forme de [chaleur](#) dans les

réacteurs. D'après le CEA, l'énergie produite par 1 kg d'uranium naturel dans un réacteur nucléaire est égale à l'énergie de 10 [tonnes équivalent pétrole](#) (tep)<sup>2</sup>. Selon les observations récentes d'ondes gravitationnelles<sup>3</sup>, cette [énergie de liaison](#) provient de la conversion d'énergie gravitationnelle en énergie cinétique, puis en énergie de liaison<sup>4</sup> lors de la formation d'éléments lourds par [processus r](#) au cours de la [coalescence](#) de deux étoiles à neutrons (un phénomène aussi appelé [kilonova](#)).

## Fusion nucléaire [\[modifier\]](#) | [modifier le code](#)



Un exemple de [fusion nucléaire](#) : la [fusion du deutérium](#) avec du [tritium](#) produit de l'[Hélium 4](#) et un [neutron](#) et libère de l'énergie.

La [fusion nucléaire](#) est une réaction dans laquelle deux [noyaux atomiques](#) s'assemblent pour former un noyau plus lourd ; par exemple, un noyau de [deutérium](#) et un noyau de [tritium](#) s'unissent pour former un noyau d'[hélium](#) plus un neutron. La fusion des noyaux légers dégage une quantité considérable d'[énergie](#) provenant de l'[interaction forte](#), bien plus importante que la répulsion [électrostatique](#) entre les constituants des noyaux légers. Ceci se traduit par un [défaut de masse](#) (voir [énergie de liaison](#) et  $E=mc^2$ ), le noyau résultant ayant une masse moins élevée que la somme des masses des noyaux d'origine.

Cette réaction n'a lieu qu'à des températures très élevées (plusieurs dizaines de millions de degrés) où la matière est à l'état de [plasma](#). Ces conditions sont réunies au sein des étoiles, lors de l'explosion d'une bombe à fission nucléaire qui amorce ainsi l'explosion thermonucléaire ([bombe H](#)), ou dans des [réacteurs nucléaires expérimentaux](#).

En [2021](#), aucune installation ne permet une production nette d'énergie par le contrôle de réactions de fusion nucléaire. Des recherches sont en cours afin d'obtenir un plasma sur une durée suffisante, afin que l'énergie de fusion produite soit supérieure à celle investie dans le chauffage des particules. En particulier, le projet international [ITER](#) fédère des chercheurs pour développer un usage civil de cette énergie. L'assemblage de ce réacteur a débuté le juillet 2020 à [Saint-Paul-lès-Durance](#) en France et ses premiers essais devraient avoir lieu en [2025](#).

## Comparaison des énergies nucléaire et chimique[[modifier](#) | [modifier le code](#)]



**Cette section peut contenir un [travail inédit](#) ou des [déclarations non vérifiées](#)** (janvier 2022). Vous pouvez aider en ajoutant des références ou en supprimant le contenu inédit.

L'énergie nucléaire est d'environ 1 % de l'énergie de masse donnée par la formule d'Einstein de l'énergie de masse (ici celle d'un proton) :

$$E_p = m_p c^2 = 938 \text{ MeV}$$

C'est [l'énergie nécessaire pour séparer un neutron d'un proton](#). C'est aussi [l'énergie de liaison](#) du [noyau](#) de l'[atome d'hydrogène](#).

Elle est de l'ordre de un million de fois de celle de [l'énergie chimique](#) qui est moins connue et donnée par la [constante de Rydberg](#) issue de la [théorie de Bohr](#) de l'atome d'hydrogène :

$$E_H = 13.6 \text{ eV}$$

L'énergie nucléaire est généralement attribuée à une interaction hypothétique, [la force forte](#). Une théorie développée sur la force de cohésion des noyaux des isotopes de l'hydrogène indique [7](#) qu'elle peut s'exprimer par une formule analogue aux précédentes et de valeur intermédiaire :

$$E_{\text{separation}} = 12 E_{\text{p}} = 3,5 \text{ MeV}$$

L'ordre de grandeur de cette énergie de séparation neutron-proton est proche de l'énergie de liaison du deutérium  ${}^2\text{H}$ , 2,2 MeV, soit 1,1 MeV par nucléon. Elle est la moitié de celle de la particule [8](#)

ui est aussi l'hélium 4,  ${}^4\text{He}$ . Les noyaux du fer Fe et du nickel Ni sont les éléments chimiques qui ont la plus grande énergie de liaison nucléaire, légèrement inférieure à 9 MeV.

Connaissant les formules des énergies nucléaire et chimique, on en déduit l'ordre de grandeur de leur rapport :

$$\frac{E_{\text{nucléaire}}}{E_{\text{chimique}}} = \frac{9 \text{ MeV}}{137 \times 1836 \text{ eV}} = 250000$$

- Ce résultat peut être obtenu de façon simple. En effet le [rayon de Bohr](#) caractérisant l'énergie chimique, celle de l'atome d'hydrogène, est

$$r_0 = \frac{0,53 \text{ nm}}{Z} = \frac{0,53 \times 10^{-10} \text{ m}}{Z}$$

.

Le rayon d'un nucléon n'est pas une constante universelle mais le rayon de Compton du proton,

$$r_p = \frac{h}{m_p c} = 0,21 \text{ fm}$$

est assez voisin du rayon du proton, 1 fm, en est une. Le rapport du rayon de Bohr à celui du proton est alors de l'ordre de 50 000.

Selon la loi de Coulomb, l'énergie électrostatique est en raison inverse du rayon. Faisons le rapport :

$$\frac{r_p}{r_0} = \frac{h}{m_p c} \frac{m_e c^2}{h^2} = \frac{h}{m_p c} \frac{m_e c^2}{h^2} = \frac{m_e c^2}{m_p c^2} = \frac{1}{1836}$$



On obtient la formule donnée plus haut, divisée par 2.

**En fait ce calcul ne donne que l'ordre de grandeur du rapport des énergies nucléaire et chimique, ce qui est déjà bien puisque personne n'a rien trouvé d'équivalent jusqu'à présent**, d'autant que l'énergie de liaison par nucléon varie de 1 MeV pour l'hydrogène lourd à près de 10 MeV pour le fer.

*Les symboles utilisés sont :*

Énergie                      de                      masse                      

Énergie                      nucléaire                      

Énergie

chimique




Énergie

du

proton

:

  $p = 938 \text{ MeV}$

Énergie de l'électron :  $E_e = 0,5 \text{ MeV}$

Constante de structure fine :  $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 h c} = 1/137$

L'énergie nucléaire est une fraction évaluée habituellement à 1 % de l'énergie de masse d'Einstein, ce qu'on retrouve avec un coefficient de 1/137 obtenu par un calcul basé sur la loi de Coulomb où le potentiel est en 1/r.

## Applications

### Réactions nucléaires modérées



Cœur de réacteur nucléaire ([EPFL](#)).

Les applications de l'énergie nucléaire concernent, pour l'essentiel, deux domaines :

- la [production d'électricité](#) dans des [centrales nucléaires](#) ;
- la [propulsion navale](#), principalement pour les flottes militaires (sous-marins et porte-avions) et pour quelques navires civils, notamment des brise-glaces.

Une autre application est la production d'[isotopes radioactifs](#) utilisés dans l'industrie ([radiographie](#) de soudure, par exemple) et en médecine ([médecine nucléaire](#) et [radiothérapie](#)). D'autres utilisations ont été imaginées, voire expérimentées, comme la production de chaleur pour alimenter un [réseau de chauffage](#), le [dessalement](#) de l'eau de mer ou la [production d'hydrogène](#).

Ces applications utilisent des [réacteurs nucléaires](#) (appelés aussi [piles atomiques](#), lorsqu'il s'agit de faible puissance, d'usage expérimental et de production de radioisotopes). Les réactions de [fission nucléaire](#) y sont amorcées, modérées et contrôlées dans le cœur, constitué de l'assemblage de [combustible](#) et de [barres de contrôle](#) et traversé par un [fluide caloporteur](#) qui en extrait la chaleur. Cette chaleur est ensuite convertie en énergie électrique (ou en énergie motrice pour la propulsion navale) par l'intermédiaire de [turbines](#) et [alternateurs](#) (ensemble appelé [turbo-alternateur](#)).

## Centrales nucléaires

Articles détaillés : [Liste de réacteurs nucléaires](#) et [Centrale nucléaire](#).

Les 441 réacteurs en fonctionnement au 4 juillet 2020 totalisent une puissance installée de 390 220 MW, dont 97 154 MW (24,9 %) aux États-Unis, 62 250 MW (16 %) en France, 45 518 MW (11,7 %) en Chine, 31 679 MW (8,1 %) au Japon (33 réacteurs dont seulement 9 ont été autorisés à redémarrer), 28 437 MW (7,3 %) en Russie et 23 172 MW (5,9 %) en Corée du sud<sup>8</sup>.

Les 54 réacteurs en construction dans 19 pays totalisent une puissance de 57 441 MW, dont 10 564 MW (18,4 %) en Chine, 5 380 MW (9,4 %) aux Émirats arabes unis, 4 824 MW (8,4 %) en Inde, 4 525 MW (7,9 %) en Russie et 3 260 MW (5,7 %) au Royaume-Uni<sup>9</sup>.



Production d'électricité d'origine nucléaire par pays (2012).



Pourcentages de production d'électricité d'origine nucléaire par pays (2012).

La production d'électricité des centrales nucléaires a atteint un pic de 2 661 [TWh](#) en 2006 ; après une chute à 2 346 TWh en 2012 consécutive à l'[accident nucléaire de Fukushima](#), elle est remontée progressivement à 2 586 TWh en 2019<sup>10</sup>.

La part du nucléaire dans la production mondiale d'électricité était de 10,3 % en 2017 contre 3,3 % en 1973. En 2019, les principaux pays producteurs d'électricité nucléaire sont les États-Unis (809 TWh, 31,8 % du total mondial), la France (382 TWh, 15,1 %), la Chine (330 TWh, 9,4 %), la Russie (195,5 TWh, 7,7 %) et la Corée du sud (139 TWh, 5,6 %) <sup>11,12</sup>. En 2020, la Chine augmente sa production de 4,4 points par le démarrage deux nouveaux réacteurs et prend sa deuxième place à la France<sup>13</sup>.

À la suite de l'[accident nucléaire de Fukushima](#), la production d'électricité d'origine nucléaire a chuté de 2 518 [TWh](#) en 2011, soit 13,5 % de la production mondiale d'électricité, à 10,8 % en 2012<sup>14</sup>, puis se maintient à environ 11 % jusqu'en 2015<sup>15</sup>.

La France est le pays dont la part d'électricité d'origine nucléaire est la plus élevée en 2019 (70,6 %), suivie par la [Slovaquie](#) (53,9 %), l'Ukraine (53,9 %), la Hongrie (49,2 %) et la [Belgique](#) (47,6 %). Cette production en Chine est en progression rapide depuis le milieu des années 2000, elle atteint en 2019 4,9 % de la production électrique du pays<sup>11</sup>.

Dans l'[Union européenne](#), 13 [États membres](#) produisent de l'électricité nucléaire. En 2020, cette production nucléaire se chiffre à 683 512 GWh — soit 25 % — de la production d'électricité de l'union. Le plus gros producteur de l'UE est la France (52 % de la production de l'UE), suivi de l'Allemagne (9 %), l'Espagne (9 %) et la Suède (7 %). Ces quatre pays ensemble produisent les trois quarts de l'électricité nucléaire l'UE<sup>16</sup>.

Le 28 novembre 2018, la Commission européenne publie une communication proposant une stratégie énergétique à long terme (2050) axée sur la [décarbonation](#) de la consommation d'énergie, réduisant les émissions de 90 % d'ici 2050 par la combinaison de mesures d'amélioration de l'[efficacité énergétique](#), d'augmentation de la part de l'électricité dans la consommation

finale d'énergie (53 % en 2050 contre 20 % en 2017) ; elle prévoit une utilisation accrue du nucléaire (15 % de la production d'électricité en 2050) à côté des énergies renouvelables (80 % en 2050)[17](#).

## Propulsion navale

Article détaillé : [Propulsion maritime](#).

Les bâtiments à propulsion nucléaire utilisent un ou plusieurs réacteurs nucléaires. La chaleur produite est transmise à un fluide caloporteur utilisé pour générer de la vapeur d'eau actionnant :

- des turbines couplées aux [hélices](#) de propulsion (propulsion à vapeur) ;
- des turbines couplées à des alternateurs alimentant en énergie électrique tout le bâtiment, et éventuellement des moteurs électriques de propulsion (propulsion électrique).

Environ 400 navires à propulsion nucléaire existent dans le monde, très majoritairement militaires, surtout des [sous-marins](#), mais aussi des [porte-avions](#) et des [croiseurs](#), et quelques navires civils, principalement des [brise-glaces](#). Des [cargos](#) nucléaires ont également été expérimentés dans les années 1960 et 1970 (l'Américain [NS Savannah](#), l'Allemand *Otto Hahn* et le Japonais *Mutsu*), mais leur exploitation ne s'est pas avérée rentable et ces expériences ont été abandonnées.

Les coûts d'investissement et d'exploitation de la propulsion nucléaire sont importants, ce qui la rend rarement intéressante pour une utilisation civile. Elle n'est véritablement intéressante que pour un usage militaire, et particulièrement pour les sous-marins. Cette énergie apporte :

- une très grande autonomie permettant d'éviter en opérations la contrainte du ravitaillement en combustible (retour à un port ou ravitaillement à la mer). Sur les porte-avions, l'espace libéré par l'absence de soute à combustible, permet de consacrer plus de volume au stockage des munitions ou des aéronefs par exemple ;
- une propulsion totalement indépendante de l'atmosphère,
  - alors que les sous-marins classiques sont contraints de remonter en surface (ou à l'[immersion périscopique](#) en utilisant un [schnorchel](#)) pour alimenter les moteurs Diesel en air ([oxygène](#))

et ainsi recharger leurs batteries électriques, après quelques dizaines d'heures de plongée aux moteurs électriques (quelques jours pour ceux dotés de propulsion [AIP](#)), les rendant ainsi détectables et vulnérables, les sous-marins à propulsion nucléaire peuvent rester plusieurs mois en plongée, préservant ainsi leur discrétion,

- ils peuvent également soutenir dans la durée des vitesses importantes en plongée qu'un sous-marin classique ne pourrait maintenir plus de quelques dizaines de minutes sans entièrement décharger ses batteries.

La propulsion nucléaire apporte donc aux sous-marins un avantage déterminant, au point que l'on peut, en comparaison, qualifier les sous-marins classiques de simples submersibles.

## Propulsion spatiale

Article détaillé : [Propulsion nucléaire \(astronautique\)](#).

Les sondes [Voyager](#) I et II ont déjà emporté des [générateurs nucléaires](#) pour alimenter leur système électronique. En revanche, la *propulsion* nucléaire, au cas où elle serait possible, n'est encore qu'envisagée. Elle aurait l'avantage de produire une poussée, certes faible, mais constante pendant tout le trajet, alors que les engins spatiaux actuels - sauf ceux utilisant l'énergie solaire et les [moteurs ioniques](#) - ne peuvent produire qu'une seule poussée initiale, ou quelques ajustements de trajectoire, à cause de la faible contenance de leurs réservoirs. C'est pourquoi on les nomme *balistiques* et c'est aussi pour cela qu'il leur faut atteindre la *vitesse de libération* dès le départ. Sur de longs trajets, interplanétaires par exemple, cette accélération continue pourrait être globalement plus efficace que l'accélération initiale utilisée actuellement.

Le gouvernement américain a accordé une enveloppe de 125 millions de dollars à la [NASA](#) pour concevoir une fusée propulsée grâce à un réacteur nucléaire qui chauffe un fluide, en général de l'hydrogène liquide, à très haute température ; ce fluide est éjecté via un conduit à l'arrière du moteur, créant ainsi une poussée permettant de propulser la fusée Cette technologie pourrait considérablement diminuer les temps de trajet. L'agence spatiale américaine espérerait pouvoir exploiter le futur moteur nucléaire dès sa mission lunaire de 2024, et surtout pour

l'objectif Mars en 2033[18](#),[19](#).

## Chauffage urbain[[modifier](#) | [modifier le code](#)]

La chaleur dégagée par la réaction de fission dans les centrales nucléaires sert à produire de la vapeur qui actionne les turbines de générateurs. Les parcs nucléaires actuels atteignent des températures d'exploitation de l'ordre de 300 °C, alors que le [chauffage urbain](#) et le [dessalement](#) de l'eau de mer nécessitent environ 150 °C. Les centrales nucléaires convertissent actuellement un tiers de la chaleur produite en électricité, la chaleur restante est généralement rejetée dans l'environnement. Au lieu d'être rejetée, celle-ci pourrait être utilisée pour le chauffage ou le refroidissement.

Cette [cogénération](#) est pratiquée dans plusieurs pays : Bulgarie, Chine, Hongrie, République tchèque, Roumanie, Russie, Slovaquie, Suisse et Ukraine. Depuis 1983, la [centrale nucléaire de Beznau](#) (Suisse) fournit ainsi de la chaleur aux communes, aux particuliers, à l'industrie et aux agriculteurs. L'[Akademik Lomonosov](#), première centrale nucléaire flottante au monde, dont l'exploitation commerciale a débuté en mai 2020, fournit de la chaleur à la région de Tchoukotka, dans l'extrême nord-est de la Russie. En Chine, le réseau de chauffage urbain utilisant la vapeur des deux réacteurs de la [centrale nucléaire de Haiyang](#) est devenu opérationnel à la fin de 2020 et la première phase du projet devrait permettre d'éviter l'utilisation de 23 200 tonnes de charbon et l'émission de 60 000 tonnes de CO<sub>2</sub> par an. À la fin de 2021, il doit fournir de la chaleur à toute la ville de Haiyang[20](#).

## Dessalement[[modifier](#) | [modifier le code](#)]

La faisabilité des usines de dessalement nucléaires intégrées a été confirmée par une expérience de plus de 150 années-réacteurs, principalement en Inde, au Japon et au Kazakhstan. Le [réacteur nucléaire d'Aktaou](#) (Kazakhstan), au bord de la mer Caspienne, a produit jusqu'à 135 MWe d'électricité et 80 000 m<sup>3</sup> d'eau potable par jour pendant 27 ans, jusqu'à son arrêt en 1999. Au Japon, plusieurs installations de dessalement liées à des réacteurs nucléaires produisent environ 14 000 m<sup>3</sup> d'eau potable par jour. En 2002, une centrale de démonstration couplée à deux réacteurs nucléaires de 170 MWe a été mise en place à la [centrale nucléaire de Madras](#), dans le sud-est de l'Inde[20](#).



## Centrales à usages multiples

En Chine, un [petit réacteur modulaire](#) à [haute température refroidi par gaz](#) est entré en service à la fin de 2021 ; il est conçu pour assurer la production d'électricité, la cogénération, la chaleur industrielle et la [production d'hydrogène](#). Le Japon a redémarré son réacteur expérimental à haute température (HTTR) en juillet 2021. La chaleur produite est utilisée pour la production d'électricité, le dessalement de l'eau de mer et la production d'hydrogène par un procédé thermochimique. L'initiative H2-@-Scale, lancée en 2016 par les États-Unis, vise à examiner les perspectives de production d'hydrogène au moyen de l'énergie nucléaire. Au Canada, les Laboratoires nucléaires canadiens (LNC) prévoient de lancer le Parc de démonstration, d'innovation et de recherche sur l'énergie propre (DIREP), site d'essai pour les applications de cogénération utilisant des petits réacteurs modulaires<sup>20</sup>.

## Réactions nucléaires explosives

Articles détaillés : [Explosion atomique](#) et [Arme nucléaire](#).



[Essai nucléaire](#) anglais du 11 octobre 1956.

La puissance de l'énergie nucléaire peut être utilisée comme explosif. L'échelle de l'énergie totale dégagée par les bombes nucléaires va de la kilotonne à la [mégatonne d'équivalent TNT](#). L'énergie d'une explosion nucléaire est répartie essentiellement dans l'[effet de souffle](#) (onde de choc), l'effet thermique, l'effet d'[impulsion électromagnétique](#) et les radiations.

## Types d'armes

Les [armes nucléaires](#) sont de deux types. Les armes à fission ou « [bombes A](#) » utilisent de l'[uranium](#) enrichi ou du [plutonium](#), mis en condition critique par implosion sous l'effet d'un explosif classique ; dans les armes à fusion ou bombes thermonucléaires ou « [bombes H](#) », les conditions de température et de pression nécessaires à la réaction de fusion d'isotopes d'hydrogène (deutérium et tritium) sont obtenues par l'explosion d'une « amorce » constituée par une bombe à fission au plutonium.

La [bombe à neutrons](#) est une variante de bombe thermonucléaire conçue pour maximiser la part de l'énergie émise sous forme de neutrons ; elle est supposée détruire les plus grandes formes de vie dans le voisinage de la cible, tout en provoquant un minimum de dégâts matériels.

## Histoire

Article détaillé : [Histoire de l'arme nucléaire](#).

La première utilisation [militaire](#) d'une arme nucléaire (« bombe A ») a eu lieu les 6 et 9 août 1945. Le largage de deux bombes sur les villes [japonaises](#) d'[Hiroshima](#) et de [Nagasaki](#) par l'[armée américaine](#) visait à mettre un terme à la [Seconde Guerre mondiale](#). Depuis, ce type d'armement n'a fait l'objet que d'[essais nucléaires](#) expérimentaux (atmosphériques puis souterrains) puis de modélisations informatiques. La bombe atomique a été à l'origine de la doctrine de [dissuasion](#) ou « [équilibre de la terreur](#) » qui a été développée durant la [Guerre froide](#).

## Doctrine d'emploi

Dans la doctrine d'emploi de la plupart des puissances nucléaires, on distingue :

- l'arme nucléaire [stratégique](#), instrument de la doctrine de dissuasion nucléaire ou de « non-emploi », destinée à prévenir un conflit ;
- de l'arme nucléaire [tactique](#), ou de bataille, susceptible d'être employée sur des objectifs militaires au cours d'un conflit. La précision des vecteurs aidant, ce type d'arme a conduit à la miniaturisation et aux faibles puissances ([mini-nuke](#) dans le jargon journalistique américain).

La doctrine française n'a jamais considéré l'emploi d'armes nucléaires à des fins

tactiques. Des armes de relative faible puissance (missiles [Pluton](#) puis [Hadès](#), aujourd'hui retirés, missiles de croisière [ASMP](#)) sont définies comme *pré-stratégiques* ; dans cette conception, ces armes ne servent qu'accessoirement à un but militaire sur le terrain, leur principal effet étant celui d'un « ultime avertissement », de nature politique, pour prévenir les dirigeants ennemis que les intérêts vitaux de la France sont désormais en jeu, et que le prochain échelon des représailles sera thermonucléaire.

## Industrie du nucléaire

Article détaillé : [Industrie nucléaire](#).

Pendant la [Seconde Guerre mondiale](#), la production d'armes atomiques était la principale raison d'être de l'industrie nucléaire. Depuis les années 1970, cette industrie travaille aussi pour la production d'énergie<sup>21</sup>.

La production d'énergie nucléaire est une activité de haute technologie et qui demande un contrôle rigoureux et permanent<sup>22</sup>. Ce contrôle est aussi bien le fait des [autorités de sûreté nationales](#) ([Autorité de sûreté nucléaire](#) pour la France) qu'internationales (comme l'[AIEA](#), ou [Euratom](#) en Europe).

## Recherche dans le domaine de l'énergie nucléaire

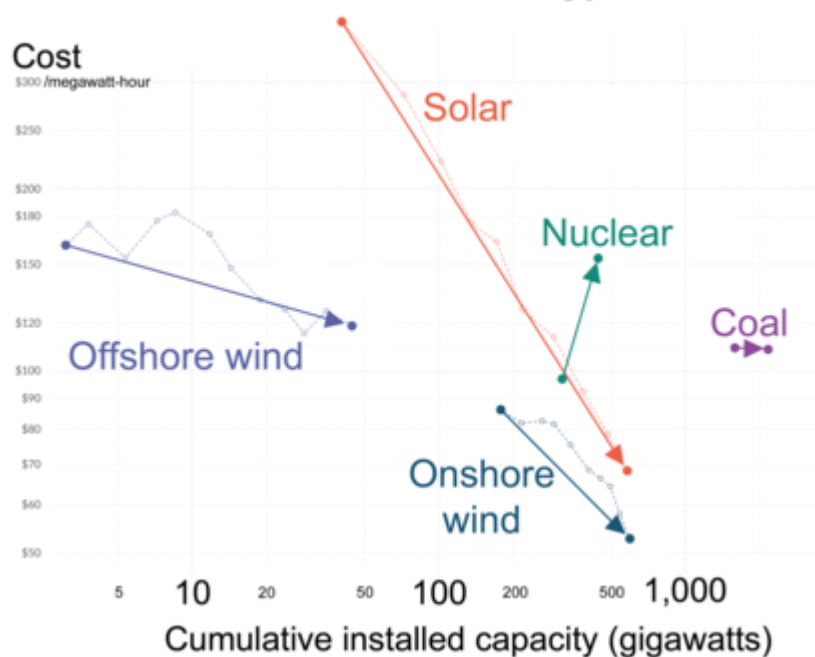
- Les [pays détenteurs de l'arme atomique](#) ([Russie](#), [États-Unis](#), [Royaume-Uni](#), [France](#), [Chine](#), [Inde](#), [Pakistan](#), [Israël](#) et [Corée du Nord](#)) mènent des recherches classées « [secret défense](#) » pour entretenir ou moderniser leur arsenal atomique.
- Les États-Unis, l'Union européenne, la Russie, le Japon, la Chine et la Corée du Sud se sont réunis autour du projet [ITER](#), programme d'étude à long terme de la [fusion nucléaire](#) contrôlée. C'est un projet de recherche qui a pour objectif la construction et l'exploitation expérimentale d'un [tokamak](#) de grandes dimensions. Le réacteur sera construit à [Cadarache](#) en France. Ce projet explore une des branches de la fusion, la [fusion par confinement magnétique](#).
- Des recherches portent également sur la [fusion par confinement inertiel](#),

aux États-Unis qui expérimentent la méthode [Z-pinch](#), ou en France où est construit le [laser Mégajoule](#)<sup>23</sup>.

- Dans le cadre du [Forum international génération IV](#), des études sont menées sur le développement de nouvelles filières de réacteurs nucléaires à fission<sup>24</sup>. Le planning de ce programme international prévoit la mise en service industriel de ces réacteurs à l'horizon 2030-2040.
- L'étude du [cycle du thorium](#) est en cours. Le [thorium](#) pourrait supplanter l'[uranium](#) actuellement utilisé, car ses réserves sont plus importantes. Toutefois, le thorium naturel est composé à 100 % de l'isotope 232 qui n'est pas fissile mais fertile (comme l'uranium 238). Son utilisation est donc assujettie au développement des réacteurs surgénérateurs et des procédés chimiques de [retraitement](#) afférents.
- Depuis mars 1996, au Japon, un programme de recherche international doté d'un centre d'études des matériaux a pour objectif d'inventer les matériaux qui pourront résister à la fusion thermonucléaire, baptisé [IFMIF](#).
- Des recherches sont en cours en [Chine](#), notamment sur la technologie de [réacteur à lit de boulets](#). Une unité de démonstration composée de deux réacteurs de type HTR-PM (réacteur à haute température refroidi à l'hélium) et d'une turbine de 210 MWe est en cours de tests en 2018 à la [Shidao Bay](#) et sa mise en service est attendue en fin d'année 2018 ; 18 unités de cette technologie sont planifiées pour la même centrale ; une version plus puissante de 650 MWe composée de six réacteurs et une turbine est à l'étude pour déploiement dans plusieurs centrales existantes<sup>25</sup>.
- Un prototype de [réacteur intégral à sels fondus](#) à uranium sera mis en service en 2020 au Canada en 2020 par la société Terrestrial Energy<sup>26</sup>. En Chine, un [réacteur à sels fondus](#) au thorium est également en développement en 2017<sup>27</sup>.
- Dans le domaine des [petits réacteurs modulaires](#), le groupe [Technicatome](#) prévoit de construire une tête de série du réacteur [Nuward](#) en 2030<sup>28</sup>.

## Coût de l'énergie nucléaire

## Trends in cost of energy (2010-2019)



Le prix de l'énergie nucléaire nouvellement construite a crû au cours des dernières années, alors qu'il a baissé pour les énergies renouvelables. Toutefois, les données de ce graphique ne prennent pas en compte le coût des équipements de stockage ou des centrales pilotables nécessaires pour compenser l'[intermittence de l'éolien et du solaire](#) ; les données sur le nucléaire sont d'origine incertaine<sup>29</sup>.

Comparé à d'autres sources d'énergie, l'énergie nucléaire civile nécessite des investissements initiaux très importants, mais bénéficie d'un coût d'exploitation plus faible par kilowatt heure produit<sup>30</sup>, conduisant à un faible [taux de rentabilité interne](#) : l'investissement dans le nucléaire ne se conçoit que dans le cadre d'une politique à très long terme<sup>31</sup>. Cette exploitation se poursuit sur des durées qui se chiffrent en dizaines d'années. Le coût de l'énergie nucléaire dépend fortement de la durée sur laquelle l'investissement initial est [amorti](#), et la prolongation éventuelle de leur exploitation constitue un enjeu économique très important<sup>32,33</sup>. La rentabilité varie aussi fortement suivant les solutions techniques proposées (type de centrale, de combustible...)<sup>34</sup>.

Le coût du combustible nucléaire est principalement dû à l'[enrichissement de l'uranium](#) et à la fabrication des éléments combustibles, qui nécessitent une technologie relativement complexe<sup>30</sup>. La part du [minerai d'uranium](#) dans le coût de l'énergie est faible comparée à celles des énergies fossiles : l'énergie nucléaire est par elle-même la source d'une activité industrielle spécialisée.

La Chine travaille, par ailleurs, en partenariat avec les États-Unis, sur la mise au

point d'une technologie de [réacteur nucléaire à sels fondus](#)<sup>35</sup>, dont le coût de revient serait à titre de comparaison inférieur<sup>36</sup> à celui du charbon<sup>37</sup>.

## Situation et perspectives aux États-Unis

L'Inde et la Chine sont les pays où le nucléaire se développe le plus en 2019,. Cependant, un seul réacteur nucléaire a été mis en service aux USA depuis 30 ans (Watts Bar 2, dans le [Tennessee](#), 1 200 MW connectés au réseau en 2016) alors que huit tranches ont été arrêtées de 2013 à 2019 (la dernière étant Pilgrim 1, dans le [Massachusetts](#), fin mai 2019) ; et seuls deux projets sont annoncés : les tranches 3 et 4 de la centrale de Vogtle, en Géorgie, qui devraient être dotées de réacteurs de [troisième génération](#) de type [AP100](#) en 2021 et 2022<sup>38</sup>. Les premiers de ces nouveaux réacteurs ont été lancés sur les sites de VC Summer en Géorgie et de Vogtle en Caroline du Sud, chacun doté de deux [réacteurs AP1000](#), mais en juillet 2017 le projet de VC Summer a été abandonné ([centrale nucléaire de Virgil Summer](#)). De plus, ces deux projets en cours ont subi des problèmes techniques, retards et dépassements et budget (27 milliards de dollars évoqués en 2019) à l'image de ceux de l'[EPR](#) européen à Flamanville en France, et à Olkiluoto en Finlande<sup>39</sup>.

Dans le même temps, le « boom du [gaz de schiste](#) », dû la technologie de la [fracturation hydraulique](#), a fait chuter les prix du gaz et de l'énergie, impulsant une multiplication de centrales à [cycle combiné](#) gaz. Quatre réacteurs nucléaires ont fermé en 2013 pour manque de compétitivité et un cinquième fin 2014. Cependant, le prix du gaz devrait augmenter à moyen ou long terme, rendant alors le nucléaire plus compétitif, surtout si des normes d'émissions de CO<sub>2</sub> plus sévères sont instituées. Dans le même temps le coût des énergies solaires et éoliennes a aussi beaucoup baissé. En mars 2017, le premier fabricant de réacteurs nucléaires, équipant plus de 50 % des réacteurs au monde, [Westinghouse](#), a été placé en faillite<sup>40</sup>. Des investisseurs ont récemment montré un grand intérêt pour les [réacteurs modulaires à sels fondus](#) (MSR pour *Molten Salt reactors*), qui pourraient remplacer les centrales à charbon appelées à fermer à cause des réglementations sur la [pollution de l'air](#) ; mais plusieurs sociétés développant ce concept ont réduit leurs programmes faute de perspectives de déploiement à court terme<sup>41</sup>.

En 2019, l'[Agence internationale de l'énergie](#) (IEA) estime que l'électricité

nucléaire pourrait aux États-Unis chuter de 17 % en 2025 par rapport au niveau de 2018, perte qui sera « largement compensée par (la hausse de production) des nouvelles centrales au gaz naturel, éoliennes et solaires »[38](#). En août 2019, l'administration Trump crée, en soutien à la filière nucléaire, le National Reactor Innovation Center (NRIC), un centre destiné au « déploiement de réacteurs avancés » dans le secteur privé en lui ouvrant les laboratoires publics américains, pour y valider de nouveaux systèmes et accélérer l'obtention de licences et la commercialisation de ces réacteurs, dont les [petits réacteurs modulaires](#) (*small modular reactors*, SMR) et autres microréacteurs[38](#). L'administration Trump a aussi pris des mesures législatives visant à lever les freins à l'expérimentation de nouvelles solutions nucléaires[38](#).

## Évolution possible du coût de l'énergie nucléaire en France[[modifier](#) | [modifier le code](#)]

Article détaillé : [Industrie nucléaire en France#Évolution possible du coût de l'énergie nucléaire en France](#).

## Débat sur l'énergie nucléaire

Article détaillé : [Débat sur l'énergie nucléaire](#).

Les risques et les coûts ne sont pas évalués de la même façon par les [pronucléaires](#) et les [antinucléaires](#), qui se divisent aussi au sujet de l'[utilité](#) des applications nucléaires civiles et militaires, en particulier de la production d'électricité nucléaire et de l'opportunité d'une [sortie du nucléaire civil](#).

Les applications civiles de l'énergie nucléaire sont controversées en raison :

- des risques d'[accident nucléaire](#) grave sur un réacteur nucléaire ou au cours du [cycle du combustible](#) ;
- du risque de [prolifération nucléaire](#) ;
- du risque de [terrorisme nucléaire](#) par le détournement de matière radioactive pour l'utiliser comme [toxique](#) ou pour fabriquer une « [bombe radiologique](#) », ou par l'attaque directe d'un réacteur ;



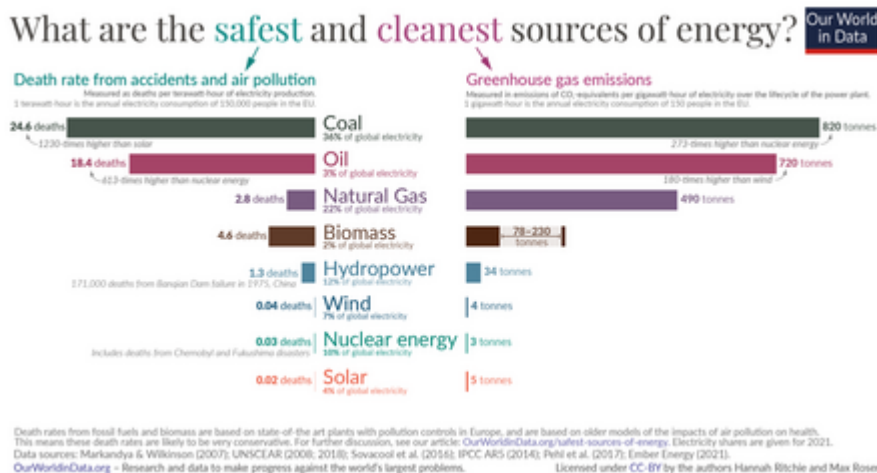
- du coût économique de la gestion des [déchets radioactifs](#) à très long terme (notamment son [financement](#)) et du [démantèlement nucléaire](#) ;
- de [réserves mondiales](#) en combustibles limitées : ces ressources exploitables dans les conditions économiques actuelles sont disponibles dans des ordres de grandeurs comparables, bien que plus élevés, aux ressources pétrolières et gazières (soit environ 90 ans à consommation constante<sup>42</sup> contre 50 à 60 ans pour les hydrocarbures) ;
- de la [dépendance énergétique](#) envers les [pays producteurs d'uranium](#) (tous [situés hors d'Europe](#)) ;
- des [impacts environnementaux de l'exploitation des mines d'uranium](#) ;
- des moyens utilisés par les pays occidentaux pour acquérir les ressources d'uranium dont elles ont besoin, suscitant des conflits<sup>43</sup> (comme pour le [pétrole](#) et les [métaux précieux](#)), notamment sur le continent africain ;
- de la complexité des moyens technologiques requis, qui rendent cette filière plus adaptée à un État centralisé<sup>[précision nécessaire]</sup> qu'à des collectivités territoriales décentralisées<sup>44</sup> ;
- des enjeux antagonistes de production et de sécurité, qui peuvent amener à des accusations de dissimulation de dysfonctionnements par des responsables, comme à la [centrale du Tricastin](#)<sup>45,46,47,48</sup> ;
- de la contribution du nucléaire à la réduction du [réchauffement climatique](#). Cette réduction serait très faible mais pas nulle : les centrales ne produisent pas de CO<sub>2</sub>, mais ont notamment libéré en France 1,3 à 2 tonnes de [SF<sub>6</sub>](#) en 2019<sup>49</sup>, un puissant [gaz à effet de serre](#), dont le [potentiel de réchauffement global](#) est 23 500 fois celui du CO<sub>2</sub>, soit 30 000 à 45 000 tonnes d'[équivalent CO<sub>2</sub>](#). Ces émissions restent faibles comparées aux quelque 500 000 tonnes équivalent CO<sub>2</sub> de ce gaz émises en France<sup>50</sup> et aux 396 millions de tonnes équivalent CO<sub>2</sub> tous gaz confondus émises en 2020, avant tout par les transports et le chauffage<sup>49</sup>.
- de problèmes de [sécurité nucléaire](#) en cas de conflit, illustrés en 2022 par l'[attaque russe contre la centrale nucléaire de Zaporijjia](#)<sup>51</sup> qui représente un objectif stratégique pour les deux belligérants<sup>52</sup>. Ce type d'attaque peut conduire selon l'[AIEA](#) à des risques de [fusion du cœur](#) ou d'explosion de nature à générer une dissémination d'éléments radioactifs « bien plus grave » que lors de l'[accident d'un réacteur à Tchernobyl](#), du fait qu'elle



comporte six réacteurs [53,54](#) ;

- de la durée de vie des [déchets nucléaires](#), qui pose des problèmes de [sûreté](#) du stockage [55,56](#) et d'information des populations futures concernant leur présence et leur dangerosité [57](#).

Les partisans des applications civiles de l'énergie nucléaire avancent d'autres arguments :



« Quelles sont les sources d'énergie les plus sûres et les plus propres ? » Le diagramme de gauche recense le nombre de morts par source d'énergie (par TéraWatt-heure produit), celui de droite leurs émissions de gaz à effet de serre (en [équivalent CO<sub>2</sub>](#) par gigawatt-heure d'électricité consommée, sur l'ensemble du [cycle de vie](#)).

- les filières nucléaires émettent relativement peu de [dioxyde de carbone](#), contrairement aux [énergies fossiles](#) qui en libèrent énormément. Elles peuvent de ce fait contribuer à la réduction de la production de ce gaz à effet de serre qui a été identifié comme le principal responsable du [réchauffement climatique](#) de la planète. Les ministres de l'énergie des [États-Unis](#), du [Canada](#) et du [Japon](#) ont lancé en mai 2018 l'initiative Nuclear Innovation: Clean Energy Future (NICE Future) pour promouvoir le nucléaire au côté des [énergies renouvelables](#). Dès son lancement, NICE Future a été rejoint par de nombreux États : [Royaume-Uni](#), [Russie](#), [Afrique du Sud](#), [Émirats arabes unis](#), [Pologne](#), [Argentine](#) et [Roumanie](#). Une dizaine d'autres seraient déjà intéressés [58,59](#) ;
- selon plusieurs études, la production nucléaire de l'électricité serait liée à moins de décès que d'autres manières de produire de l'électricité [60](#) ; la [Société américaine de chimie](#) estime en mars 2013 à « 1,84 million, le

nombre de vies humaines sauvées par l'énergie nucléaire, et à 64 gigatonnes (Gt), la réduction des rejets en équivalent CO<sub>2</sub> (gaz à effet de serre), du seul fait que la pollution associée aux énergies fossiles a été évitée ». De plus, en se fondant sur une projection des [conséquences de Fukushima sur l'utilisation de l'énergie nucléaire](#), la même source indique « qu'au milieu de ce siècle, c'est 0,42 à 7,04 millions de vies qui pourraient être sauvées et 80 à 240 Gt de rejets en équivalent CO<sub>2</sub> qui pourraient être évités (en fonction de l'énergie de remplacement). En revanche, l'expansion à grande échelle de l'utilisation du [gaz naturel](#) n'atténuerait pas le problème du [réchauffement climatique](#) et causerait beaucoup plus de décès que l'expansion de l'énergie nucléaire »<sup>61</sup> ;

- les [matières fissiles](#) n'interviennent que de manière marginale dans le coût de l'énergie produite et, si l'on accepte un coût supérieur de l'énergie, les ressources potentielles (écorce terrestre, eau de mer) sont plus élevées que les ressources existantes pour les combustibles carbonés (charbon, gaz, pétrole) ;
- la filière de [génération IV](#) permettant la [surgénération](#) (surgénérateurs de type [Superphénix](#)), les [filières utilisant le thorium](#) ou les centrales à [fusion nucléaire](#), si elles étaient mises au point, pourraient alimenter toute la planète durant plusieurs milliers d'années au rythme de consommation actuelle ;
- le nucléaire permet de réduire la dépendance européenne au [pétrole](#) (pour la France, acheté essentiellement en [Afrique](#), en [Russie](#) et autres pays de l'ex-URSS, au [Moyen-Orient](#)<sup>62</sup>) et fait partie des outils permettant de construire une Europe relativement autonome et indépendante<sup>[réf. nécessaire]</sup>, du fait que la [ressource en uranium](#) est largement dispersée sur tous les continents et que les principaux gisements sont situés dans des pays alliés<sup>[réf. nécessaire]</sup> à l'Union européenne (pour la France : [Kazakhstan](#), [Canada](#), [Niger](#), [Australie](#) et [Namibie](#)<sup>63</sup>) ;
- pour les pays<sup>[Lesquels ?]</sup> qui maîtrisent l'ensemble du [cycle du combustible nucléaire](#), l'énergie nucléaire permet également de réduire la dépendance énergétique nationale<sup>30</sup>.

# Avenir du nucléaire

Selon une note de l'[Institut français des relations internationales](#) (IFRI), « les retards et surcoûts des projets occidentaux dans le nucléaire civil sont en train de conforter un duopole russo-chinois sur les exportations de réacteurs de troisième et quatrième génération. Dans ce contexte, des [petits réacteurs modulaires](#) (*small modular reactors*, SMR) connaissent un regain d'intérêt et sont développés par de nombreux acteurs, allant principalement des entreprises d'État russes et chinoises à une multitude de start-up nord-américaines ». Cette note estime que l'ère des gros [EPR](#) est dépassée et les réacteurs de petite taille aux ingénieries intégrées et standardisées pourraient être produits de façon modulaire en usine, réduisant coûts et durée de construction. Ces petits réacteurs pourraient séduire les pays émergents<sup>64</sup>.

Lors de la conférence de l'AIEA en octobre 2019, le président du [GIEC](#), [Hoesung Lee](#), détaille les conclusions du [rapport spécial SR1.5](#) publié en 2018. Sur la base des 21 modèles disponibles, le GIEC a étudié 89 trajectoires permettant de contenir la hausse de la température globale à +1,5 °C à l'horizon 2100. Ces trajectoires montrent un effort important en termes d'efficacité énergétique, ainsi qu'un doublement de la part de l'électricité dans l'énergie totale (de 19 % en 2020 en valeur médiane à 43 % en 2050). Le nucléaire contribue aux efforts de [décarbonation](#) de l'électricité dans la très grande majorité des 89 trajectoires. Pour le président du GIEC, le nucléaire doit relever deux principaux défis : la compétitivité par rapport aux autres technologies non fossiles, et l'accélération de son rythme de déploiement ; il conclut : « Je vous souhaite de réussir à relever ces défis car le climat a besoin de toute l'aide possible ! ». Pour [Fatih Birol](#), directeur général de l'[Agence internationale de l'énergie](#) : « Nous devons regarder toutes les technologies propres. Le solaire et l'éolien sont importantes. Mais nous pensons que le nucléaire et le [CCS](#) sont aussi importantes. Nous ne pouvons avoir le luxe de choisir notre technologie préférée »<sup>65</sup>.

Une équipe de chercheurs publie en juin 2023 un article montrant que, pour contribuer de façon significative à la lutte contre le réchauffement climatique, le nucléaire ne peut pas se limiter à la seule fission de l'uranium, qui se heurterait à moyen terme aux limites des [réserves d'uranium](#). Le développement d'autres filières, en particulier celles de la régénération, notamment par l'utilisation du plutonium, est indispensable pour donner une perspective de long terme au

nucléaire. Mais la transition vers la régénération pourrait être longue, car elle dépend des ressources en plutonium produites par les centrales du parc actuel. Le choix de la stratégie de régénération est incompatible avec la stratégie actuelle de recyclage partiel du plutonium dans les REP, sous forme de [combustible MOX](#). Le choix entre ces deux stratégies est complexe et le contexte économique actuel est défavorable, la part du combustible dans le coût de l'électricité étant faible, mais ce choix doit être effectué avec une large anticipation du fait de la grande durée de vie des réacteurs<sup>66</sup>.

## Notes et références

### Notes[[modifier](#) | [modifier le code](#)]

- ↑ L'[hexafluorure de soufre](#) SF<sub>6</sub> est utilisé dans les systèmes électriques ([transformateurs](#), [disjoncteurs](#), etc.) des [centrales de production d'électricité](#) et de la [distribution électrique](#).

## Références

- [Cour des comptes, Les coûts de la filière électronucléaire - Rapport public thématique](#) [\[archive\]](#), janvier 2012.
  - Autres références
- ↑ « [Radioactivité](#) » [\[archive\]](#), Connaissance des énergies : « Dans le globe terrestre, la radioactivité de fission est la principale source de chaleur. »
  - ↑ [Les sources d'énergie](#) [\[archive\]](#), CEA, 2004.
  - ↑ (en) B. P Abbott *et al.*, [Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger](#) [\[archive\]](#), *Physical Review Letters*, 116, 061102 (2016)
  - ↑ [D'où vient l'énergie nucléaire ?](#) [\[archive\]](#) sur lederniercarbone.org
  - ↑ « [Iter fait un pas de plus vers la fusion nucléaire](#) [\[archive\]](#) », sur [Les Échos](#), 16 janvier 2017 (consulté le 7 janvier 2021)
  - ↑ [CEA |Dossier | L'énergie nucléaire | L'énergie nucléaire : fusion et fission La libération de l'énergie nucléaire \(1/3\)](#) [\[archive\]](#)
  - ↑ [J Fusion Energ \(2011\) 30 :377-381](#) [\[archive\]](#)
  - ↑ (en) [Operational Reactors](#) [\[archive\]](#), [Agence internationale de l'énergie](#)

- [atomique](#), Power Reactor Information System (PRIS), 4 juillet 2020.
9. ↑ (en) [Under Construction Reactors](#) [archive], [Agence internationale de l'énergie atomique](#), Power Reactor Information System (PRIS), 4 juillet 2020.
  10. ↑ (en) [Trend in Electricity Supplied](#) [archive], [Agence internationale de l'énergie atomique](#), Power Reactor Information System (PRIS), 4 juillet 2020.
  11. ↑ [Revenir plus haut en :a](#) et [b](#) (en) [Nuclear Share of Electricity Generation in 2019](#) [archive], [Agence internationale de l'énergie atomique](#), Power Reactor Information System (PRIS), 4 juillet 2020.
  12. ↑ (en) *Key World Energy Statistics 2019*, [Agence internationale de l'énergie](#), 26 septembre 2019 ([résumé](#) [archive], [lire en ligne](#) [archive] [PDF]), p. 19, 30.
  13. ↑ « [La Chine a produit plus d'électricité nucléaire que la France en 2020](#) [archive] », sur [francetvinfo.fr](#), 28 septembre 2021 (consulté le 3 octobre 2021).
  14. ↑ « <http://world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/Nuclear-Power-in-the-World-Today> »([Archive.org](#) • [Wikiwix](#) • [Archive.is](#) • [Google](#) • [Que faire ?](#))
  15. ↑ (en) *World energy resources 2016*, [Conseil mondial de l'énergie](#), 2016, 1028 p. ([lire en ligne](#) [archive] [PDF]), p. 19.
  16. ↑ (en) [25% of EU electricity production from nuclear sources](#) [archive], [Eurostat](#), 11 janvier 2022.
  17. ↑ (en) [A Clean Planet for all - A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy](#) [archive], [Commission européenne](#), 28 novembre 2018.
  18. ↑ [NASA : 125 millions de dollars pour développer une fusée à propulsion nucléaire thermique](#) [archive], [Clubic](#), 5 juin 2019.
  19. ↑ (en) [NASA nabs \\$125 million in funding to develop nuclear rocket propulsion](#) [archive], [Digital Trends](#), 29 mai 2019.
  20. ↑ [Revenir plus haut en :a](#) [b](#) et [c](#) [Au-delà de la production d'électricité : l'électronucléaire au service des applications non électriques](#) [archive], [AIEA](#), 8 décembre 2021.
  21. ↑ [Uranium and Depleted Uranium](#) [archive], [Association nucléaire mondiale](#), novembre 2020.
  22. ↑ [Rapport sur le contrôle de la sûreté et de la sécurité des installations](#)

- [nucléaires - deuxième partie : le bilan et les perspectives de la politique de sûreté des installations nucléaires](#) [archive] Claude Birraux, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques.
23. ↑ « [Le Laser Mégajoule et la fusion inertielle](#) » [archive], CNRS [PDF]
  24. ↑ ["YouTube: China's Nuclear Future"](#) [archive]
  25. ↑ (en) ["HTR-PM steam generator passes pressure tests"](#) [archive], world-nuclear-news.org (WNN), octobre 2018.
  26. ↑ « [IMSR: Transformative Clean Energy Technology](#) » [archive]
  27. ↑ [China hopes cold war nuclear energy tech will power warships, drones](#) [archive], *South China Morning Post*, 5 décembre 2017.
  28. ↑ ["Small Modular Reactor \(SMR\) : Nuward"](#) [archive], Technicatome, 2019.
  29. ↑ (en) « [Why did renewables become so cheap so fast? And what can we do to use this global opportunity for green growth?](#) [archive] », sur [Our World in Data](#), 1er décembre 2020.
  30. ↑ [Revenir plus haut en :a b et c](#) E. Bertel, G. Naudet, M. Vielle, [L'économie de l'énergie nucléaire](#) [archive], (ISBN 2-86883-691-7), EDP Sciences 2004.
  31. ↑ Christian Batailldee et Robert Galley, [Rapport sur l'aval du cycle nucléaire](#) [archive] (rapport parlementaire), Tome II : « Les coûts de production de l'électricité », chapitre II (partie II).
  32. ↑ [Contrôle no 184](#) [archive] : la poursuite d'exploitation des centrales nucléaires. Autorité de Sûreté Nucléaire, 2009.
  33. ↑ [Rapport sur la durée de vie des centrales nucléaires et les nouveaux types de réacteurs](#) [archive], Christian Bataille et Claude Birraux, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques
  34. ↑ ["Epri, p51/80: Exploring the Role of Advanced Nuclear in Future Energy Markets: Economic Drivers, Barriers, and Impacts in the United States"](#) [archive]
  35. ↑ [The U.S. is helping China build a novel, superior nuclear reactor](#) [archive], *Fortune*, 2 février 2015.
  36. ↑ ["Site internet: Fission Liquide"](#) [archive]
  37. ↑ ["Techniques de l'ingénieur: évaluation des coûts de production des énergies"](#) [archive]
  38. ↑ [Revenir plus haut en :a b c d et e](#) [Les États-Unis lancent un centre pour soutenir le nucléaire « du futur »](#) [archive], Connaissance des énergies, 2019.
  39. ↑ [Focus sur les 2 seuls réacteurs nucléaires en construction aux États-Unis](#) [archive], Connaissance des énergies, 10 octobre 2018.



40. [↑ "Journal Libération, 29 mars 2017 : La faillite de Westinghouse, symptôme d'un nucléaire en plein doute" \[archive\]](#)
41. [↑](#) (en) [Technology Roadmap - Nuclear energy - 2015 edition](#) [archive] [PDF], [Agence internationale de l'énergie](#).
42. [↑ Supply of Uranium](#) [archive], [Association nucléaire mondiale](#) (consulté le 31 juillet 2016).
43. [↑ https://www.cairn.info/minerais-strategiques-9782130618805-page-67.htm](#) [archive]
44. [↑](#) « [Nucléaire : une solution pour la planète ?](#) [archive] », THEMA, sur [Arte](#), 22 mars 2022 (consulté le 31 mars 2022), p. 1h30'30".
45. [↑](#) « [Tricastin : Un cadre d'EDF dépose plainte pour dénoncer plusieurs dissimulations d'incidents par sa hiérarchie](#) [archive] », sur [FR3](#), 12 novembre 2021 (consulté le 31 mars 2022).
46. [↑](#) Stéphane Mandard et Perrine Mouterde, « [Nucléaire : un cadre de la centrale du Tricastin dénonce une « politique de dissimulation » d'incidents de sûreté](#) [archive] », sur [Le Monde](#), 12 novembre 2021 (consulté le 31 mars 2022) : « Pour la première fois, c'est un cadre d'EDF, ancien membre de la direction d'une centrale nucléaire française, celle du Tricastin (Drôme), qui a décidé de briser le silence et de saisir la justice pour dénoncer ce qui, selon lui, s'apparente à une « politique de dissimulation » d'incidents et d'écarts en matière de sûreté ».
47. [↑](#) [France 5](#), Sur le front, [Nucléaire, éoliennes : des voisins encombrants !](#) [archive] (à 40 min), 21 mars 2022
48. [↑](#) « [Centrale nucléaire de Tricastin : information judiciaire ouverte pour "mise en danger d'autrui"](#) [archive] », sur [La Dépêche](#), 9 juin 2022.
49. [↑](#) [Revenir plus haut en :a et b](#) « [Fuites de SF6, puissant gaz à effet de serre : le nucléaire français doit faire mieux](#) [archive] », sur [Le Télégramme](#), 1er novembre 2021 (consulté le 11 février 2022).
50. [↑](#) [Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques : Bilan des émissions en France de 1990 à 2020](#) (rapport), [Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique](#) (no 1789sec / 2021), juillet 2021, 496 p. ([présentation en ligne](#) [archive], [lire en ligne](#) [archive] [PDF]), p. 143 : « SF<sub>6</sub> Hexafluorure de soufre ».
51. [↑](#) Nathalie Mayer, « [Ukraine : la centrale nucléaire de Zaporojie a subi des tirs sur des réacteurs et des déchets radioactifs](#) [archive] », sur [Futura Planète](#), 13 mars 2022 (consulté le 16 mars 2022).

52. [↑](#) Jennifer CHAINAY, « [Ukraine. Pourquoi la centrale nucléaire de Zaporijjia est une prise de choix pour les Russes \[archive\]](#) », sur [Ouest-France](#), 4 mars 2022 (consulté le 27 mars 2022).
53. [↑](#) « [Ukraine : le contrôle militaire russe des centrales nucléaires ukrainiennes suscite de graves inquiétudes \(AIEA\) \[archive\]](#) », 6 mars 2022 (consulté le 27 mars 2022).
54. [↑](#) Sharon Wajsbrodt, « [Ukraine : « C'est la première fois qu'il y a une guerre dans un pays avec autant de centrales nucléaires... » \[archive\]](#) », sur [Les Échos](#), 13 mars 2022 (consulté le 17 mars 2022).
55. [↑](#) « [Déchets nucléaires : la sécurité du site de Bure remise en cause \[archive\]](#) », [Le Parisien](#), 13 août 2017.
56. [↑](#) « [Enfouissement des déchets nucléaires en profondeur, un désastre annoncé ? \[archive\]](#) », sur [France Nature Environnement](#), 19 avril 2019 (consulté le 7 avril 2023).
57. [↑](#) [Des signes et des lettres pour avertir nos descendants \[archive\]](#), [Andra](#), 22 octobre 2020.
58. [↑](#) [NICE Future : une coalition d'États soutient le nucléaire \[archive\]](#), [Société française d'énergie nucléaire](#), 29 mai 2018.
59. [↑](#) (en) [Nuclear Innovation: Clean Energy Future \[archive\]](#), [département de l'Énergie des États-Unis](#), mai 2018.
60. [↑](#) (en) [Comparing deaths/TWh for all energy sources \[archive\]](#), [nextbigfuture.com](#), 13 mars 2011.
61. [↑](#) (en) Pushker A. Kharecha et James E. Hansen, « *Prevented Mortality and Greenhouse Gas Emissions from Historical and Projected Nuclear Power* », *Environmental Science & Technology*, vol. 47, no 9, 7 mai 2013, p. 4889–4895 (ISSN 0013-936X et 1520-5851, DOI 10.1021/es3051197, lire en ligne [\[archive\]](#), consulté le 23 novembre 2020).
62. [↑](#) INSEE, « [Provenances du pétrole brut importé en France \[archive\]](#) », 2020 (consulté le 1er avril 2022).
63. [↑](#) « [Origine de l'uranium naturel importé en France : Kazakhstan, Niger, Canada, Australie \[archive\]](#) », sur [Connaissance des énergies](#), 12 mai 2014 (consulté le 23 novembre 2020).
64. [↑](#) Charles Merlin, « [Les petits réacteurs modulaires dans le monde : perspectives géopolitiques, technologiques, industrielles et énergétiques \[archive\]](#) », sur [Institut français des relations internationales](#), mai 2019.
65. [↑](#) Valérie Faudon et Cécile Crampon, « [Le Président du GIEC à l'AIEA :](#)



« *le climat a besoin de toute l'aide possible* » [archive] », sur [Société française d'énergie nucléaire](#), 8 octobre 2019.

66. ↑ Sylvain David, Sandra Bouneau et Adrien Bidaud, « *Futur du nucléaire : la question cruciale du cycle du combustible* [archive] », *Pour la science*, 26 juin 2023.

## Voir aussi

Sur les autres projets Wikimedia :

- [L'énergie nucléaire](#), sur Wikimedia Commons
- [énergie nucléaire](#), sur le Wiktionnaire
- [Énergie nucléaire](#), sur Wikiquote



Il existe une [catégorie](#) consacrée à ce sujet : *[Énergie nucléaire](#)*.

## Bibliographie

- [Jaime Semprun](#), *La Nucléarisation du monde*, [éditions Gérard Lebovici](#), 1986 (ISBN 2-85184-172-6)
- Arnaud Michon, *Le Sens du vent : Notes sur la nucléarisation de la France au temps des illusions renouvelables*, [éditions de l'Encyclopédie des Nuisances](#), 2010.
- Thierry Garcin, *Le Nucléaire aujourd'hui*, Paris : LGDJ, coll. « Axes », 1995.
- *Géopolitique*, n° 52 (numéro spécial), *Le nucléaire : un atout maître*, hiver 1995-1996.
- Mary Byrd Davis, *La France nucléaire : matière et sites (2002)*, 340 p., format 21,9 × 15 cm ([Site \[archive\]](#)).
- Annie Thébaud-Mony, *L'Industrie nucléaire : sous-traitance et servitude*, éd. EDK et Inserm, 2000 (ISBN 2-85598-782-2)
- Claude Dubout, *Je suis décontamineur dans le nucléaire*, éd. Paulo-Ramand, 2009.
- Jean-Jacques Delfour, *La Condition nucléaire : réflexions sur la situation atomique de l'humanité*, éditions l'Echappée, 2014.

- Yves Lenoir, *La Comédie atomique. L'histoire occultée des dangers des radiations*, éditions La Découverte, 2016 ([ISBN 9782707188441](#)).

## Articles connexes

- [Centrale nucléaire](#), [Liste de réacteurs nucléaires](#)
- [Déchet radioactif](#), [Stockage des déchets radioactifs en couche géologique profonde](#)
- [Accident nucléaire](#), [Liste d'accidents nucléaires](#)
- [Fission nucléaire](#)
- [Débat sur l'énergie nucléaire](#)
- [Agence internationale de l'énergie atomique](#)
- [Communauté européenne de l'énergie atomique](#)
- [Idées reçues sur le nucléaire civil](#)

## Liens externes

- [Notices d'autorité](#)  :
  - [BnF \(données\)](#)
  - [LCCN](#)
  - [GND](#)
  - [Japon](#)
  - [Israël](#)
  - [Tchéquie](#)
- Notices dans des dictionnaires ou encyclopédies généralistes  :
  - [Britannica](#) [\[archive\]](#)
  - [Encyclopedia of Greater Philadelphia](#) [\[archive\]](#)
  - [The Encyclopedia of Oklahoma History and Culture](#) [\[archive\]](#)
  - [Gran Enciclopèdia Catalana](#) [\[archive\]](#)
  - [Larousse](#) [\[archive\]](#)
  - [Store norske leksikon](#) [\[archive\]](#)
  - [Universalis](#) [\[archive\]](#)
- Ressource relative à la littérature  :
  - [The Encyclopedia of Science Fiction](#)
- Ressource relative à la santé  :
  - [Medical Subject Headings](#)
- [Centre d'étude de l'énergie nucléaire](#) [\[archive\]](#), sur le site [sckcen.be](#)





- (en) [International Energy Agency \[archive\]](#), sur le site [iea.org](#)
- (en) [International Atomic Energy Agency \[archive\]](#), sur le site [iaea.org](#)
- [Greenpeace : Campagne anti-nucléaire \[archive\]](#), sur le site de [greenpeace.org](#)

| <b>[masquer]</b><br><b>v · m</b><br><b>Changement climatique et énergie</b> |   |
|---|---|
| <b><u>Changement climatique</u></b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Consensus scientifique</a></li> <li>• <a href="#">Histoire de la recherche sur le changement climatique</a> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Controverses</a> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Déni</a></li> </ul> </li> <li>• <a href="#">Atténuation</a></li> <li>• <a href="#">Adaptation</a></li> </ul> </li> <li>• ★ <a href="#">Élévation du niveau de la mer</a></li> <li>• <a href="#">Graphique en crose de hockey</a> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Politique climatique</a></li> </ul> </li> </ul>                   |
| <b>Actions internationales</b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Sommet de la Terre</a></li> <li>• <a href="#">Convention-cadre des Nations unies</a></li> <li>• <a href="#">Conférences des Nations unies sur les changements climatiques</a> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ★ <a href="#">Accord de Paris sur le climat</a></li> </ul> </li> <li>• <a href="#">Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat</a></li> <li>• ★ <a href="#">Sixième rapport d'évaluation du GIEC</a> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Protocole de Kyoto</a></li> <li>- <a href="#">Bourse du carbone</a></li> </ul> </li> </ul> |

|   |  |
|---|--|
| <p><b><u>Effet de serre</u></b></p>           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Albédo</a></li> <li>• <a href="#">Bilan radiatif de la Terre</a></li> <li>- <a href="#">Rayonnement sortant à grande longueur d'onde</a></li> <li>• <a href="#">Émission de dioxyde de carbone</a> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Gaz à effet de serre</a></li> </ul> </li> <li>• <a href="#">Mesure de température par satellite</a> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Nuage</a></li> <li>• <a href="#">Soleil</a></li> </ul> </li> </ul>   |
| <p><b><u>Énergie</u></b></p>                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Agence internationale de l'énergie</a></li> <li>• <a href="#">Agence internationale pour les énergies renouvelables</a> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Bilan carbone</a></li> </ul> </li> <li>• <a href="#">Consommation énergétique des bâtiments</a> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ★ <a href="#">Énergie durable</a></li> <li>• <a href="#">Énergie et effet de serre</a> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Énergie grise</a></li> <li>• <a href="#">Passoire thermique</a></li> </ul> </li> </ul> </li> <li>• <a href="#">Ressources et consommation énergétiques mondiales</a></li> <li>• <a href="#">Schéma régional climat air énergie</a></li> <li>• <a href="#">Transition énergétique</a></li> </ul> |
| <p><b><u>Énergie non renouvelable</u></b></p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Charbon</a> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Gaz</a></li> </ul> </li> <li>- <a href="#">Pic gazier</a></li> <li>• Nucléaire</li> <li>• <a href="#">Pétrole</a></li> <li>- <a href="#">Pic pétrolier</a></li> </ul>  |

|  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b><u>Énergie renouvelable</u></b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b><u>Électricité</u></b></li> <li>- <b><u>Gaz</u></b></li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Biogaz</a></li> <li>• <a href="#">Biomasse</a></li> <li>• <a href="#">Déchets</a></li> <li>• <a href="#">Éolienne</a></li> <li>• <a href="#">Géothermie</a></li> <li>• <a href="#">Hydraulique</a> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Marine</a></li> </ul> </li> <li>• <a href="#">Méthanation</a> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Solaire</a></li> </ul> </li> </ul>   |
| <p><b><u>Vecteur énergétique</u></b></p>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Électricité</a></li> <li>• <a href="#">Hydrogène liquide</a></li> <li>• <a href="#">Produits pétroliers</a></li> <li>• <a href="#">Réseau de chaleur</a></li> </ul>   |
| <p><b><u>Stockage</u></b></p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Air comprimé</a></li> <li>• <a href="#">Barrage hydraulique</a></li> <li>• <a href="#">Batterie d'accumulateurs</a></li> <li>• <a href="#">Condensateur et supercondensateur</a> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Conversion d'électricité en gaz</a></li> </ul> </li> <li>• <a href="#">Matériau à changement de phase</a> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Méthanolisation</a></li> <li>• <a href="#">Pompage-turbinage</a></li> </ul> </li> <li>• <a href="#">Stockage intersaisonnier de chaleur</a> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Volant d'inertie</a></li> </ul> </li> </ul>   |
| <p><b><u>Économies d'énergie</u></b></p>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Sobriété économique</a></li> <li>• <a href="#">Efficacité énergétique</a></li> <li>- <a href="#">Efficacité énergétique dans les transports</a> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Cogénération</a></li> <li>• <a href="#">Écomobilité</a></li> </ul> </li> <li>• <a href="#">Isolation thermique</a> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Facteur 4 et 9</a></li> <li>• <a href="#">Habitat passif</a> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Négawatt</a></li> </ul> </li> </ul> </li> <li>• <a href="#">Pompe à chaleur</a> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Télétravail</a></li> <li>• <a href="#">Zéro déchet</a></li> </ul> </li> </ul> |

|   |   |
|---|---|
| <p style="text-align: center;"><b><u>Société</u></b></p>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Mouvement pour le climat</a></li> <li>• <a href="#">Coopérative citoyenne d'énergie</a> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Décroissance</a></li> <li>• <a href="#">Justice climatique</a> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Localisme</a></li> <li>- <a href="#">Ville en transition</a></li> </ul> </li> </ul> </li> <li>• <a href="#">Projet de tribunal international climatique</a> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Tiers-investisseur</a></li> </ul> </li> <li>• <a href="#">Population optimale</a></li> </ul> |
| <p style="text-align: center;"><b><u>Anthropocène</u></b></p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Collapsologie</a></li> <li>• <a href="#">Écomodernisme</a></li> <li>• <a href="#">Esclave énergétique</a></li> <li>• <a href="#">Impact climatique du transport aérien</a></li> <li>• <a href="#">Séquestration du dioxyde de carbone</a></li> <li>• <a href="#">Risques d'effondrements environnementaux et sociétaux</a></li> </ul>  |

-  [Portail de l'énergie](#)
-  [Portail de la physique](#)
-  [Portail du nucléaire](#)
-  [Portail des technologies](#)

[Catégorie](#) :

- [Énergie nucléaire](#)

[+]

source : wikipedia

- La dernière modification de cette page a été faite le 19 février 2024 à 18:26.
- [Droit d'auteur](#) : les textes sont disponibles sous [licence Creative Commons attribution, partage dans les mêmes conditions](#) ; d'autres conditions peuvent s'appliquer. Voyez les [conditions d'utilisation](#) pour plus de

détails, ainsi que les [crédits graphiques](#). En cas de réutilisation des textes de cette page, voyez [comment citer les auteurs et mentionner la licence](#).  
Wikipedia® est une marque déposée de la [Wikimedia Fo](#)

▪