

Le thorium est-il une réponse pour fournir une énergie propre ?

[Thorium the Answer to Clean Energy ?](#)

La catastrophe de Fukushima a ravivé l'intérêt pour les réacteurs au thorium, qui peuvent être à la fois plus sûrs et plus économiques, comme le prétendent leurs promoteurs ; mais avons-nous vraiment besoin d'énergie nucléaire ? [Prof Peter Saunders](#)

Rapport de l' ISIS en date du 14/09/2011

La version originale, en anglais, avec toutes les références, s'intitule [Thorium the Answer to Clean Energy](#) ; elle est accessible par les membres de l'ISIS sur le site www.isis.org.uk/Thorium_the_answer_to_clean_energy.php

Le matériel du présent site ne peut être reproduit sous aucune forme sans autorisation explicite. POUR OBTENIR SON APPROBATION et les EXIGENCES DE REPRODUCTION, [ISIS CONTACT](#) S'IL VOUS PLAÎT. Lorsqu'une autorisation est accordée TOUS LES LIENS doivent rester inchangés

Les Etats-Unis, le Royaume-Uni et de nombreux autres pays en Europe envisagent de construire de nouvelles flottes de réacteurs nucléaires. Ce sont des **réacteurs à eau pressurisée** (REP), comme ceux qui sont déjà en construction à Olkiluoto en Finlande et à Flamanville en France. Le combustible sera l'U-235, un isotope fissile de l'**uranium**. Plus de 99 pour cent de l'uranium naturel est de l'isotope non fissile U-238, donc avant qu'il puisse être utilisé, l'uranium doit être enrichi, c'est-à-dire traité pour augmenter la proportion de l'U-235.

Cela se fait habituellement en fabriquant de l'hexafluorure d'uranium, qui est un gaz, et en séparant les molécules des différents isotopes en utilisant soit des filtres, soit des centrifugeuses [1] (voir aussi [2] [Energy Strategies in Global Warming: Is Nuclear Energy the Answer? SiS 27](#)).

Le processus est techniquement difficile et coûteux, ce qui explique pourquoi les puissances occidentales étaient si inquiètes quand elles ont appris que l'Iran voulait procéder au développement de ses propres capacités d'enrichissement. Pour les réacteurs à eau légère comme le REP, la proportion de l'U-235 est généralement augmentée, passant d'environ 0,72 pour cent de la masse d'uranium, à au moins 3 pour cent.

L'hexafluorure d'uranium enrichi est ensuite chimiquement transformé en poudre de dioxyde d'uranium qui est comprimé en pastilles, fritté sous forme de céramique, et chargé dans des tubes en alliage de zirconium. Ces tubes sont ensuite formés en barres de combustible.

L'uranium appauvri, c'est à dire ce qui est délaissé après le processus d'enrichissement, contient suffisamment d'U-235 qui est dangereux et qui nécessite un traitement spécial et son élimination. L'uranium appauvri est parfois utilisé pour fabriquer des armes anti-blindage à cause de sa haute densité. Et bien que les zones de guerre et de conflits armés ne soient pas bien adaptées pour y faire de la recherche, d'une part, et que les cancers peuvent prendre un certain temps pour se développer, d'autre part, il existe cependant des preuves solides selon lesquelles les minuscules particules, qui sont formées quand une enveloppe se fragmente, sont cancérigènes [3].

Il est connu depuis longtemps que le **thorium**, l'élément situé deux places en dessous de l'uranium dans le **tableau périodique** des éléments chimiques, peut également être utilisé comme combustible pour les réacteurs nucléaires. Le thorium ayant un seul isotope naturel, le Th-232, il n'y a donc pas de séparation isotopique à faire. Qui plus est, le Th-232 n'est pas fissile, de sorte que le minerai n'est pas dangereux pour les travaux dans la mine ni pendant les processus industriels.

Toutefois, si un atome de Th-232 absorbe un neutron et devient l'isotope Th-233, il émet deux électrons et devient alors fissile. La conversion peut se faire hors site et l'U-233 utilisé dans un réacteur classique et le Th-232 peuvent être utilisés conjointement avec l'U-235 ; mais il y a aussi des schémas dans lesquels le thorium est utilisé comme seul combustible et la conversion a alors lieu dans le réacteur lui-même.

Le réacteur au fluorure de thorium liquide, en anglais *Liquid Fluoride Thorium Reactor (LIFTR, prononcer 'lifter')*

Un **réacteur au fluorure de thorium liquide** (LIFTR, prononcé «lifter») se compose de deux parties principales, un «noyau» entouré d'une «couverture». Le noyau contient du tétrafluorure d'U-233 dans un sel de fluorure. La couverture contient du tétrafluorure de Th-232, également dans un sel de fluorure. Les deux sont conservés fondus par la chaleur du réacteur. Le cœur produit la sortie d'énergie et aussi des neutrons qui traversent la couverture et convertissent encore le thorium en U-233. L'uranium est ensuite chimiquement séparé du thorium non converti et transféré à la base pour produire plus d'énergie et d'autres neutrons [4].

L'avantage d'un carburant liquide, c'est qu'il est beaucoup plus facile d'en séparer les déchets produits. En particulier, le xénon, qui constitue un problème sérieux dans les réacteurs à combustible solide : juste des bulles dans la partie haute qui peuvent être évacuées. En conséquence, tout le thorium peut être utilisé, alors que, dans un réacteur classique, les barres de combustible doivent être supprimées lorsque seulement environ 5 pour cent de l'U-235 a été utilisé, parce qu'à ce moment là, les barres de combustible ont été dégradées. Les barres usagées sont hautement radioactives, parce qu'il y reste beaucoup de matière combustible.

L'ajout du thorium à la couverture, le transfert de l'uranium dans le cœur, ainsi que la suppression des déchets peuvent être réalisés d'une manière continue. Il n'est pas nécessaire de fermer à la base le réacteur au fluorure de thorium liquide.

Les déchets contiennent les mêmes produits qu'avec un réacteur à uranium, mais en quantités très différentes, et ils sont beaucoup moins dangereux. Ceci est en grande partie dû au fait qu'il faut plus de neutrons de capture pour produire les éléments transuraniens, comme le plutonium, à partir du thorium

qu'à partir de l'uranium.

Un réacteur doit avoir un coefficient de réactivité thermique négatif, c'est-à-dire que s'il s'échauffe, la réaction doit être ralentie. Le réacteur de Tchernobyl n'en disposait pas, du moins pas en toutes circonstances : c'est ce qui a été un facteur majeur de son explosion. Les réacteurs à uranium modernes sont conçus pour s'assurer qu'ils le font toujours, mais il est particulièrement facile à organiser dans un réacteur au fluorure de thorium liquide, car lorsque le combustible devient plus chaud, il se dilate, ce qui réduit la zone effective d'absorption de neutrons.

Dans presque tous les réacteurs à uranium en usage commercial aujourd'hui, l'eau est le caloporteur et le modérateur. L'eau est maintenue à haute pression pour élever son point d'ébullition et le rendre plus efficace pour transporter la chaleur. Le liquide de refroidissement d'un réacteur au fluorure de thorium liquide est un sel de fluorure qui reste liquide jusqu'à 1.400° C à la pression atmosphérique. Ceci est bien au-dessus de la température de fonctionnement du réacteur, qui se situe à environ 800° C. En conséquence, un réacteur de fluorure de thorium liquide n'a pas besoin de la même tuyauterie très solide, ni de réservoirs sous pression et de bâtiments de confinement. Si une panne se produit, cela se manifestera par une fuite que l'on peut gérer, plutôt que par la libération explosive de matières radioactives.

Un réacteur au fluorure de thorium liquide est aussi facile à réaliser en toute sécurité, afin de pallier à la possibilité d'une panne totale, comme cela est arrivé à Fukushima. Cela se fait par un simple dispositif ayant un dispositif de refroidissement au fond du cœur. Le sel est maintenu en dessous de son point de fusion par un ventilateur électrique. Si le ventilateur s'arrête pour une raison quelconque, y compris bien sûr une panne totale de l'alimentation électrique, le sel fondu et le contenu du cœur se déversent dans un bassin dont la géométrie garantit que les réactions vont s'arrêter.

Dans les années 1960 aux États-Unis, l'*Oak Ridge National Laboratory* avait construit un réacteur expérimental à sels fondus. Il n'avait pas la couverture qui est nécessaire et qui existe dans le réacteur au fluorure de thorium liquide pour produire de l'U-233, mais il avait permis de tester beaucoup d'autres fonctionnalités au cours des cinq années pendant lesquelles il avait été opérationnel.[5]

Les résultats furent encourageants, mais à cette époque les États-Unis avaient décidé de se concentrer sur les réacteurs fonctionnant au dioxyde d'uranium. Le directeur des réacteurs de la marine, l'amiral Rickover, avait choisi ce type d'installation pour les sous-marins nucléaires, et le programme civil avait été en mesure de partager la recherche et l'élan qui en résultait. Dans le contexte de la guerre froide, le fait que les réacteurs à uranium produisent une quantité considérable de plutonium avait été considéré à l'époque comme un avantage, alors aujourd'hui, bien sûr, cela constitue un inconvénient en raison des risques et du danger de la prolifération des armes nucléaires.

En janvier 2011, l'Académie chinoise des sciences a annoncé un programme visant à développer ce qu'ils appellent les **réacteurs à sels fondus** [6]. L'objectif est de les avoir en exploitation dans 20 ans. En Occident, plusieurs entreprises privées sont en cours de planification pour des réacteurs au fluorure de thorium liquide LIFTR.

Carlo Rubbia, lauréat du Prix Nobel et ancien directeur de l'établissement de physique nucléaire européenne du CERN, a proposé une méthode alternative pour la conversion du Th-232 en U-233 [7]. Un faisceau de protons, provenant d'un **accélérateur de particules**, impacte sur une cible de métal lourd, ce qui produit les neutrons nécessaires. La production d'énergie est proportionnelle à la force du faisceau de protons, en particulier si le faisceau est arrêté, le réacteur s'arrête.

Parce qu'ils utilisent du thorium, les systèmes pilotés par un accélérateur de particules, ont de nombreux avantages, comme les réacteurs au fluorure de thorium liquide. Ils peuvent être configurés pour utiliser de l'uranium appauvri par les réacteurs conventionnels, contribuant ainsi à réduire la quantité de déchets radioactifs qui doivent être éliminés par la suite.

Carlo Rubbia est maintenant en train de travailler avec AKER, une entreprise privée, pour développer le concept, qu'ils appellent l'*Accelerator Driven Thorium Reactor* (ADTR), le réacteur au thorium piloté par un accélérateur [8]. Ils prédisent que la mise en marché sera possible autour de 2030 et ils annoncent que le coût par unité d'électricité générée sera «extrêmement compétitif» avec les réacteurs nucléaires conventionnels, ainsi qu'avec les autres sources d'énergie.

Un avis contraire concernant l'usage du thorium

Il y a un an, au Royaume-Uni, l'organisme *National Nuclear Laboratory* (NNL) a publié une brève évaluation sur l'emploi du thorium comme source d'énergie nucléaire [9]. À leur avis, les avantages du thorium sont très exagérés. Par rapport aux réacteurs à uranium, ils ne constatent aucun avantage quant au coût. Ils soulignent que dans un pays comme le Royaume Uni, qui ne possède ni réserves de thorium, ni réserves d'uranium, le pays serait, de toutes façons, tributaire des importations.

Cet organisme britannique affirme que l'U-233 doit être considéré comme posant un risque de prolifération élevé, affirmant que tout l'U-238 qui serait ajouté pourrait être séparé par centrifugation. Les auteurs soutiennent qu'il n'y a que des gains modestes à attendre quant à la radiotoxicité, mais ils concèdent que le recyclage complet du thorium pourrait constituer une incitation « à long terme ».

Une critique est formulée à propos de l'utilisation du thorium dans les réacteurs conventionnels, parce qu'ils considèrent que la construction de nouveaux types d'installations, telles que les réacteurs à haute température et les systèmes pilotés par accélérateur de particules, ne seraient viables que dans le long terme, c'est-à-dire dans quarante ans ou plus.

Cette évaluation technologique mentionne brièvement le système piloté par un accélérateur de particules mais il ne dit rien sur le réacteur au fluorure de thorium liquide LIFTR.

Ironiquement, l'organisme *National Nuclear Laboratory* (NNL), mentionne comme une évidence la faiblesse de toutes les centrales nucléaires : les délais de réalisation sont si longs et les coûts de construction si grands, qu'une fois que nous avons décidé et pris une option sur une conception donnée, nous sommes enfermés dans ce système choisi pendant une très longue période, alors que les circonstances et les sources d'énergie alternatives peuvent changer, entre temps, du tout au tout.

Pour conclure

En lui-même, le thorium semble offrir une perspective bien meilleure que l'uranium. Il semble certainement être plus sûr, et on nous dit qu'il doit produire de l'électricité à peu près au même coût que les **réacteurs à eau pressurisée** (PWR), en gardant à l'esprit qu'il est déjà très difficile de travailler sur le coût réel des centrales nucléaires existantes, et *a fortiori* sur des centrales nucléaires qui n'ont pas encore été construites.

Dans cette mesure, c'est une bonne nouvelle d'apprendre que la Chine et l'Inde, tous deux engagés dans l'énergie nucléaire, prévoient d'utiliser le thorium, même si les réacteurs indiens ne vont pas utiliser le thorium seul. Et l'on pourrait souhaiter que nos propres gouvernements tournent leur regard vers le thorium, plutôt que d'être si fermement engagés dans les réacteurs à eau pressurisée conventionnels.

La vraie question est de savoir si nous avons vraiment besoin de l'énergie nucléaire. Le lobby nucléaire nous avertit constamment que si nous ne commençons pas à construire une nouvelle série de réacteurs nucléaires, les lumières vont s'éteindre dans toute l'Europe.

Il est certainement vrai que nous ne pouvons pas continuer à nous appuyer fortement sur les combustibles fossiles et être aussi voraces dans notre utilisation de l'énergie. Mais les énormes quantités de temps, d'efforts et de ressources, qu'il nous est demandé de consacrer à l'énergie nucléaire, seraient mieux dépensées dans les domaines de l'**efficacité énergétique** et des **énergies renouvelables** (voir [10] [Green Energies - 100% renouvelable en 2050](#) , ISIS publication) *.

* Voir les versions en français d'une série d'articles sur le sujet :

* "Le pouvoir aux populations : 100% d'énergies renouvelables d'ici 2050" par le Dr. Mae-Wan Ho, traduction et compléments de Jacques Hallard ; accessible sur le site <http://yonne.lautre.net/spip.php?article3756&lang=fr>

* "100% d'énergies renouvelables en Allemagne d'ici 2050 : un exemple pour tous les pays industrialisés" par le Dr. Mae-Wan Ho & le Professeur Peter Saunders, traduction et compléments de Jacques Hallard ; accessible sur le site <http://yonne.lautre.net/spip.php?article3770>

* "La maîtrise du pouvoir vert - Green Power Rules" par Sam Burcher. Conférence de lancement du rapport 'Green Energies - 100% Renewable by 2050', traduction et compléments de Jacques Hallard ; accessible sur le site <http://yonne.lautre.net/spip.php?article3850>

* 'Une croissance verte pour les pays en développement - Green Growth for Developing Nations'. D'après le [Dr.Mae-Wan Ho](#), traduction et compléments de Jacques Hallard ; accessible sur le site <http://www.isis.org.uk/greenGrowthForDevelopingNationsFR.php>

Définitions et compléments :

Accélérateur de particules - Introduction d'un article de Wikipédia, l'encyclopédie libre

«*Atom Smasher*» réoriente ici. Pour d'autres usages, voir [Atom Smasher \(homonymie\)](#) .

***Particle accelerator* (en.)**

From Wikipedia, the free encyclopedia

Photo - A 1960s single stage 2 MeV linear Van de Graaff accelerator, here opened for maintenance. See on http://en.wikipedia.org/wiki/File:2mv_accelerator-MJC01.jpg

A **particle accelerator**^[1] is a device that uses [electromagnetic fields](#) to propel [charged particles](#) to high speeds and to contain them in well-defined beams. An ordinary [CRT](#) television set is a simple form of accelerator. There are two basic types: [electrostatic](#) and oscillating field accelerators.

In the early 20th century, [cyclotrons](#) were commonly referred to as **atom smashers**.^[2] Despite the fact that modern colliders actually propel [subatomic particles](#)—atoms themselves now being relatively simple to disassemble without an accelerator—the term persists in popular usage when referring to particle accelerators in general.^{[3][4][5]}

[Rolf Widerøe](#) is considered the "grandfather of modern particle accelerators".

Contents

- [1 Uses](#)
 - [1.1 Low-energy machines](#)
 - [1.2 High-energy machines](#)
- [2 Electrostatic particle accelerators](#)
- [3 Oscillating field particle accelerators](#)
 - [3.1 Linear particle accelerators](#)
 - [3.2 Circular or cyclic accelerators](#)
- [4 Targets and detectors](#)
- [5 Higher energies](#)
 - [5.1 Black hole production and public safety concerns](#)
- [6 See also](#)
- [7 References](#)

- [8 External links](#)

Source : http://en.wikipedia.org/wiki/Particle_accelerator

Efficacité énergétique - D'après Wikipédia

 Cette page d'[homonymie](#) répertorie les différents sujets et articles partageant un même nom.

L'**efficacité énergétique** est une notion :

- physique : [efficacité énergétique \(thermodynamique\)](#) ;
- économique, et politico-juridique : [efficacité énergétique \(économie\)](#).

Elle est proche de la notion d'[économie d'énergie](#).

On peut se reporter à ces termes sur Wikipédia

Source : http://fr.wikipedia.org/wiki/Efficacit%C3%A9_%C3%A9nerg%C3%A9tique

En particulier, se reporter à :

Économie d'énergie

Les **économies d'énergie** résultent de la limitation de [production](#) et de [consommation d'énergie](#), en particulier d'[énergie non renouvelable](#) produite à partir de [combustibles fossiles](#) : [pétrole](#), [gaz](#), [charbon](#), [tourbe](#) (qui se sont accumulés dans des périodes géologiques passées, et qui ne se reconstituent pas ou extrêmement lentement).

Aux énergies d'origine fossile dégageant du [CO₂](#) (dont il est urgent de diminuer massivement la consommation, étant donné la dégradation du climat et les problèmes d'[acidification de l'océan](#) mondial) s'opposent :

1. les [énergies renouvelables](#), issues du [rayonnement](#) du [Soleil](#), soit directement via le [panneau solaire](#), soit indirectement par la production d'[hydrogène](#) par [électrolyse](#), et plus classiquement par l'utilisation de combustibles végétaux (bois, produits agricoles, algues), par la récupération des déchets biologiques ([biogaz](#)), par l'écoulement de l'eau ([moulins](#) et [turbines](#) à eau, [hydroélectricité](#)) ou du [vent \(énergie éolienne\)](#), par la force musculaire d'animaux domestiques (cheval, bœuf, éléphant..) ou des humains ; il faut y ajouter l'[énergie marémotrice](#) qui ne résulte pas du rayonnement du soleil mais de la masse de la lune;
2. l'[énergie nucléaire](#), qui émet moins de [gaz à effet de serre](#)¹, mais contribue à réchauffer les milieux (fleuves et rivières), est une source de [risques](#) et [dangers](#) durables, pose des problèmes d'ordre politique et de traitement des [déchets radioactifs](#), et détourne une quantité importante de fonds publics d'autres usages plus soutenables.

De la fin de la [préhistoire](#) au [XVIIIe siècle](#), l'Homme n'a pratiquement utilisé que des [énergies](#).

[renouvelables](#), avant que le [charbon](#), brûlé pour chauffer la [vapeur](#) d'eau, ne joue un rôle central dans la 1^{re} [révolution industrielle](#) (chemins de fer, usines..) ; à partir de la fin du [XIXe siècle](#), le [pétrole](#) permet le développement du [moteur à explosion](#) puis [Diesel](#) et [turboréacteurs](#), et donc des [véhicules](#) routiers, des [centrales thermiques](#), de l'[aviation](#)...

La seconde moitié du [XXe siècle](#) a été caractérisée par une croissance presque exponentielle :

- de la consommation des [produits pétroliers](#) ;
- des déplacements [routiers](#) et [aériens](#) notamment (les plus consommateurs en énergie) ;
- de la consommation électrique ;

et d'un gaspillage massif des énergies non renouvelables.

Un cas particulier d'économies d'énergie est constitué par les mesures d'efficacité énergétique, qui consistent à réduire l'énergie consommée tout en fournissant un service égal :

Article détaillé : [Efficacité énergétique](#).

Sommaire

- [1 Le pétrole source et consommatrice d'énergie](#)
- [2 Impact environnemental ou empreinte sur le milieu](#)
- [3 Actions de maîtrise de l'énergie](#)
 - o [3.1 Exemples de moyens de lutte individuelle contre les gaspillages](#)
 - o [3.2 Renonciation à une activité ou diminution de celle-ci](#)
 - o [3.3 Économies dans le secteur du bâtiment](#)
 - [3.3.1 Exemples relatifs à la conception et à la construction de bâtiments en prenant en compte l'énergie](#)
 - [3.3.2 Le cas de l'immobilier \(résidentiel, tertiaire\) et les enjeux de l'Habitat ancien](#)
 - o [3.4 Économies dans le secteur de l'industrie](#)
 - [3.4.1 Réduction de consommation des installations industrielles existantes](#)
 - [3.4.2 Mise à jour dans l'industrie](#)
 - o [3.5 Économies dans le secteur de l'informatique](#)
- [4 Droit et politique publique](#)
- [5 Effets des progrès techniques](#)
- [6 Controverses](#)
- [7 Notes et références](#)
- [8 Bibliographie](#)
- [9 Voir aussi](#)

- [10 Liens externes](#)

Article complet sur http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89conomie_d%27%C3%A9nergie

Efficacité énergétique - Document Union Européenne

Réduire la consommation d'énergie et prévenir les gaspillages énergétiques sont un objectif majeur de l'Union européenne (UE). En favorisant l'amélioration de l'efficacité énergétique, l'UE apporte une contribution décisive à la compétitivité, à la sécurité d'approvisionnement et au respect des engagements pris dans le cadre du protocole de Kyoto sur les changements climatiques.

Des potentiels de réduction importants existent, en particulier dans les secteurs très consommateurs d'énergie comme ceux des bâtiments, des industries manufacturières, de la conversion de l'énergie et des transports.

Fin 2006, l'UE s'est engagée à économiser 20 % de la consommation annuelle d'énergie primaire d'ici à 2020. Pour atteindre cet objectif, elle mobilise les citoyens, les décideurs publics et les acteurs du marché, et fixe, entre autres, des normes minimales de rendement énergétique et des règles concernant l'étiquetage, applicables aux produits, aux services et aux infrastructures.

- ORIENTATIONS POLITIQUES
 - o [L'efficacité énergétique à l'horizon 2020](#)
 - o [Plan d'action pour l'efficacité énergétique \(2007-2012\)](#)
 - o [Plan 2011 pour l'efficacité énergétique](#)
 - o [Livre vert sur l'efficacité énergétique](#)Archives
 - o [Programme-cadre pour l'innovation et la compétitivité \(CIP\) \(2007-2013\)](#)
 - o [Fonds mondial pour la promotion de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables](#)
 - o [Programme « Énergie intelligente pour l'Europe » \(2003-2006\)](#)Archives
 - o [Plan d'action pour l'efficacité énergétique \(2000-2006\)](#)Archives
 - o
- MISES EN OEUVRE DE L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE
 - o [Performance énergétique des bâtiments](#)
 - o [Efficacité énergétique dans les utilisations finales et services énergétiques](#)
 - o [La cogénération](#)
 - o Efficacité énergétique des produits
 - [Consommation en énergie des produits : Information et étiquetage \(à partir de juillet 2011\)](#)
 - [Étiquetage des pneumatiques](#)
 - [Écoconception pour les appareils consommateurs d'énergie](#)
 - [Exigences en matière d'écoconception applicable aux lampes fluorescentes, aux lampes à décharge à haute intensité et à leurs ballasts](#)
 - [Appareils électroménagers: étiquetage de la consommation en énergie \(jusqu'en 2011\)](#)
 - [Efficacité énergétique des équipements de bureau: Programme Energy Star \(UE-US\)](#)
 - [Chaudières à eau chaude](#)

Source officielle européenne :

http://europa.eu/legislation_summaries/energy/energy_efficiency/index_fr.htm

Énergie propre - Article Wikipédia

Une **énergie propre** ou **énergie verte** est une source d'[énergie primaire](#) qui produit une quantité faible de [polluants](#) lorsqu'elle est transformée en [énergie finale](#) puis utilisée comme telle. Le concept d'énergie propre est distinct de celui d'[énergie renouvelable](#) : le fait qu'une énergie soit renouvelable traduit le fait qu'elle se reconstitue et non qu'elle ne produise aucune pollution, aucun déchet, inversement le fait qu'une énergie soit propre n'implique pas qu'elle soit indéfiniment disponible.

A noter, six pays sont à l'origine de 80% des brevets déposés dans ce domaine, [selon une étude](#) de l'[Office européen des brevets](#) parue en 2010.

Sommaire

- [1 Sources d'énergie « propre »](#)
- [2 Exemples](#)
- [3 Controverses](#)
- [4 Notes et références](#)

- [5 Voir aussi](#)

Sources d'énergie « propre » [[modifier](#)]

Les sources d'énergie suivantes sont généralement citées comme énergie propre :

- [Énergie géothermique](#), haute ou basse énergie ;
- [Énergie éolienne](#) ([énergie cinétique](#) du vent → énergie mécanique) ;
- [Énergie solaire](#) ;
- [Énergie marémotrice](#), [énergie des vagues](#), [hydroliennes](#), etc. ;
- Traction animale ([halage](#), etc.) ;
- [Propulsion humaine](#).

On cite aussi, mais de façon beaucoup plus contestable :

- [Biomasse](#) ;
- [Énergie hydroélectrique](#) ;
- l'énergie gratuitement fournie par une [pompe à chaleur](#)
- les [négaWatts](#)
- l'[Énergie solaire spatiale](#)

Dans les deux derniers cas, il ne s'agit pas à proprement parler d'énergie, seulement d'une énergie virtuelle entre une consommation de référence arbitraire et la consommation réelle. Même si l'énergie la plus propre est celle que l'on ne consomme pas, et toute réduction de la consommation par [sobriété](#)

[énergétique](#) ou développement de l'[efficacité énergétique](#) est souhaitable, la propreté n'est pas un concept quantitatif mais qualitatif.

Exemples [modifier]

À titre d'exemple, en [Allemagne](#) (Hesse), [HEAG](#) a une filiale [Entega](#) spécialisée dans l'électricité verte. HSE, pourvoyeur de l'électricité en Hesse avec 2 329 salariés fournissant 7,9 milliards de kWh) aurait déjà mi-2008 360 000 abonnés, dont 55 000 en un an. Son objectif est de produire 70 % de son électricité avec des sources renouvelables, propres et sûres (en 2008, 55 % de son électricité est verte et 45 % issue de centrales au gaz, biogaz ou charbon)¹.

Controverses [modifier]

Le statut de l'énergie nucléaire comme « énergie propre » reste sujet à débat. En effet, si celle-ci présente l'un des plus bas taux d'émission de [gaz à effet de serre](#), elle est génératrice de [déchets nucléaires](#) dont l'élimination n'est pas résolue. Selon la définition actuelle de « [déchet](#) », ce n'est donc pas une énergie propre.

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

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

Notes et références [modifier]

- ↑ Enerpress 19 juin 2008, p. 4

Voir aussi [modifier]

- [Pollution](#)
- [Développement durable](#)
- [Catalyseur d'énergie de Rossi et Focardi](#)

Source : http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_propre

Énergies renouvelables – Introduction d'un article de Wikipédia

Les **énergies renouvelables** sont des formes d'[énergies](#) dont la consommation ne diminue pas la ressource à l'échelle humaine. L'énergie étant une [grandeur physique](#), on parlera en théorie de "sources d'énergie renouvelables" ou d'"énergies d'origine renouvelable" - la forme courte est toutefois consacrée par l'usage.

Le Soleil est la principale source des différentes formes d'énergies renouvelables : son [rayonnement](#) est le vecteur de transport de l'énergie utilisable (directement ou indirectement) lors de la [photosynthèse](#), ou lors du [cycle de l'eau](#) (qui permet l'[hydroélectricité](#)), le vent ([énergie éolienne](#)), l'énergie des vagues ([énergie houlomotrice](#)) et des courants sous-marins ([énergie hydrolienne](#)), la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans ([énergie thermique des mers](#)) ou encore la

diffusion ionique provoquée par l'arrivée d'[eau douce](#) dans l'eau salée de la mer ([énergie osmotique](#)).

La chaleur interne de la Terre ([géothermie](#)) est assimilée à une forme d'énergie renouvelable, et le système [Terre-Lune](#) engendre les [marées](#) des océans et des mers permettant la mise en valeur de l'[énergie marémotrice](#).

Les [combustibles fossiles](#) ou minéraux (matériaux fissiles) ne sont pas des sources d'énergie renouvelables, les ressources étant consommées à une vitesse bien supérieure à la vitesse à laquelle celles-ci sont naturellement créées ou disponibles.

Une [agence internationale de l'énergie renouvelable \(IRENA\)](#) a été créée en [2009](#) et compte 148 états signataires (dont 70 ayant déjà ratifié ses statuts)¹.

Sommaire

- [1 Aperçu général](#)
- [2 Les différents types d'énergies renouvelables](#)
 - [2.1 Énergie solaire](#)
 - [2.1.1 Énergie solaire thermique](#)
 - [2.1.2 Énergie photovoltaïque](#)
 - [2.2 Énergie éolienne](#)
 - [2.3 Énergie hydraulique](#)
 - [2.4 Biomasse](#)
 - [2.5 Énergie géothermique](#)
- [3 Avantages escomptés](#)
 - [3.1 Avantages en termes géopolitiques et de sécurité](#)
 - [3.2 Autres avantages](#)
- [4 Contraintes et limites](#)
 - [4.1 Nuisances et pollutions](#)
 - [4.2 Disponibilité](#)
- [5 Impact sur le réchauffement climatique](#)
 - [5.1 Intégration éco-paysagère](#)
 - [5.2 Risques pour la faune](#)
 - [5.3 Stockage et distribution](#)
 - [5.4 Contraintes économiques et organisationnelles](#)
- [6 Rentabilité économique](#)
- [7 Situation actuelle](#)
 - [7.1 En Europe](#)
 - [7.2 Électricité renouvelable dans le monde](#)
- [8 Perceptions, appropriation par le public](#)
- [9 Organisations professionnelles et Associations](#)
- [10 Notes et références](#)
- [11 Annexes](#)
 - [11.1 Articles connexes](#)
 - [11.1.1 Énergies renouvelables](#)

- [11.1.2 Développement durable et changement climatique](#)
- [11.1.3 Valorisation économique](#)
- o [11.2 Sources et bibliographie](#)

- o [11.3 Liens externes](#)

Article complet sur http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_renewable

Energies renouvelables - Portail d'entrée 'Observ'ER

- [Les énergies renouvelables](#)
- [Le baromètre EurObserv'ER](#)
- [L'électricité verte](#)
- [Baromètre 2010 des énergies renouvelables électriques en France](#)
- [Le crédit d'impôt](#)
- [Annuaire des énergies renouvelables](#)
- [L'architecture bioclimatique](#)
- [L'électricité renouvelable dans le monde](#)
- [Le centre de ressources](#)
- [Le collège des fondateurs d'Observ'ER : les liens](#)
- [Les partenaires d'Observ'ER : les liens](#)
- [Qui sommes-nous](#)

Systemes solaires : Soleil, Vent, Eau, Biomasse, Géothermie

- [Actualité](#)
- [Le sommaire du numéro en cours](#)
- [Le dossier du mois](#)
- [Les formations](#)
- [Les manifestations](#)
- [Les offres d'emploi](#)
- [Les demandes d'emploi](#)
- [Notes de lecture](#)
- [Les tarifs publicitaires 2011](#)
- [Le Journal de l'Éolien](#)
- [Le Journal du Photovoltaïque](#)
- [Découvrir la revue](#)

Fondation Energies pour le monde : Énergie, Environnement, Développement

- [Présentation](#)
- [Je fais un don](#)
- [Fondation Infos](#)
- [Fiches Action](#)

- [Bulletin Scarabée](#)
- [L'Électricité rurale décentralisée](#)
- [Le réseau Scarabée](#)
- [Les partenaires de la Fondation](#)

Sources <http://www.energies-renouvelables.org/>

Energies renouvelables – Documents Fondation Nicols Hulot (FNH)

Ce thème est traité avec un dossier d'information, des fiches pédagogiques et des témoignages présentés par tranches d'âges.

DOSSIER D'INFORMATION

- [Introduction](#)
- [Le décollage des énergies renouvelables](#)
- [Qu'est-ce que les énergies renouvelables ?](#)
- [Comment s'équiper ?](#)
- [Comment réduire sa consommation d'énergie ?](#)
- [Données chiffrées](#)

ACTIONS PÉDAGOGIQUES

- [Un, deux, trois... soleil](#) (fiche pédagogique générale)
- [Trois petites piles et puis s'en vont](#) (pour les moins de 7 ans)
- [Economiser l'énergie... c'est possible](#) (7 à 11 ans)
- [Soleil et vent à l'infini](#) (12 à 15 ans)
- [Energie, le choc du futur](#) (à partir de 16 ans)

EN IMAGES

- [Visite du parc éolien de Koudia Al Baïda](#) (Maroc)

KIOSQUE

- [Organismes-ressources](#)
- [Outils pédagogiques](#)
- [Livres et revues](#)

SPÉCIAL JEUNES

- [La biomasse](#)
- [La cogénération](#)
- [Les économies d'énergies](#)
- [L'énergie éolienne](#)
- [L'énergie hydroélectrique](#)
- [L'énergie solaire](#)
- [La géothermie](#)
- [La valorisation énergétique des déchets](#)

Accès aux sources FNH : http://www.fnh.org/francais/doc/en_ligne/energie/intro.htm

Réacteur à eau pressurisée, en français ou **PWR** qui fait référence à : [Pressurized Water Reactor](#) , en anglais.

(Redirigé depuis [Pressurized Water Reactor](#))  Pour les articles homonymes, voir [REP](#) et [PWR](#).

Le **réacteur à eau pressurisée** ou **REP** (PWR pour *pressurized water reactor* en anglais) est une technique de [réacteur nucléaire](#) dite de *deuxième génération*. C'est la [filière de réacteurs nucléaires](#) la plus répandue dans le monde en 2006. Elle est utilisée dans l'immense majorité des [navires à propulsion nucléaire](#) et les 58 [réacteurs français](#) de puissance en fonctionnement utilisent cette technique. Il s'agit d'une technologie d'origine américaine (Westinghouse), la France ayant jusqu'en 1969 misé sur une autre technologie l'[UNGG](#) ; cette dernière a été abandonnée pour des raisons de rentabilité et aussi en raison d'un début de fusion du cœur dans la [Centrale nucléaire de Saint-Laurent](#).

Le [combustible nucléaire](#) d'un REP est de l'[oxyde d'uranium faiblement enrichi](#) : la proportion d'isotope U-235 [fissile](#) varie de 3 à 5 % selon les pays. Le combustible se présente sous la forme de pastilles empilées et maintenues dans des gaines en [zircaloy](#) appelées crayons. Les crayons combustibles sont agencés sous forme d'assemblages dont la tenue mécanique est assurée par des grilles. Selon les modèles de REP, on charge entre 120 et 250 assemblages dans la cuve du réacteur.

Dans le circuit primaire, de l'eau ordinaire (dite [eau légère](#), par opposition à l'[eau lourde](#) D₂O) sous pression est chargée de récupérer la chaleur produite par le cœur : c'est ce [fluide caloporteur](#) qui circule au sein des assemblages entre les crayons où se produit la réaction en chaîne. Les produits de la réaction nucléaire ([produits de fission](#) et [transuraniens](#)) sont confinés avec l'oxyde d'uranium à l'intérieur de la gaine des crayons pour éviter leur dissémination et la contamination du circuit primaire.

L'eau du circuit primaire fait également office de [modérateur](#) : elle a la capacité de ralentir ou [thermaliser les neutrons](#) de [fission](#).

Comme n'importe quel type de réacteur thermique (nucléaire ou à flamme), un REP est refroidi par une grande quantité d'eau froide pompée dans un fleuve ou une mer. À proximité d'un REP, on trouve aussi parfois une [tour de réfrigération](#) pour refroidir et condenser la vapeur à la sortie de la turbine.

Sommaire

- [1 Fonctionnement](#)
- [2 Bilan neutronique d'un REP](#)
- [3 Architecture](#)

- o [3.1 Bâtiment réacteur \(BR\)](#)
- o [3.2 Bâtiment combustible \(BK\)](#)
- o [3.3 Bâtiment des auxiliaires nucléaires \(BAN\)](#)
- o [3.4 Bâtiment électrique \(L\)](#)
- o [3.5 Salle des machines \(M\)](#)
- o [3.6 Sûreté](#)
 - [3.6.1 Défaillances majeures](#)
- [4 Différents types de REP](#)
- [5 Voir aussi](#)
 - o [5.1 Articles connexes](#)
 - o [5.2 Lien externe](#)

Filière REP : schéma simplifié d'architecture du système - Voir sur http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Schema_reacteur_eau_pressuris%C3%A9e.svg

Article complet sur http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9acteur_%C3%A0_eau_pressuris%C3%A9e

Réacteur à sels fondus - Introduction d'un article de Wikipédia

Un **réacteur à sels fondus** (MSR) est un type de [réacteur à fission nucléaire](#) dans lequel le premier [liquide de refroidissement](#) est un [sel fondu](#) mélange. MSR fonctionnent à des températures plus élevées que les réacteurs refroidis à l'eau pour les plus élevés [rendement thermodynamique](#) , tout en restant à basse [pression de vapeur](#) .

La capacité de fonctionner à proximité de la pression atmosphérique réduit les contraintes mécaniques subies par le système, simplifiant ainsi les aspects de la conception du réacteur et l'amélioration de la sécurité. Le combustible nucléaire peut être des barres de combustible solide ou dissous dans le liquide de refroidissement lui-même.

Une sorte de MSR est le **réacteur de fluorure de thorium liquides** (LFTR), [récemment décrit par Kirk Sorensen à l'Université Mount Royal](#) . ^[1]

Dans beaucoup de conceptions du [combustible nucléaire](#) est dissoute dans le liquide [du fluorure](#) de refroidissement du sel comme [tétrafluorure d'uranium](#) (UF₄). Le liquide devient [essentiel](#) dans un [graphite](#) de base qui sert de [modérateur](#) . Réacteurs à combustible fluide ont significativement différents [de sécurité](#) des questions par rapport aux conceptions de combustible solide; le potentiel d'accidents majeurs de réacteur est réduite, tandis que le potentiel de [traitement](#) . accidents est augmenté ^[2]

Des recherches plus récentes ont porté sur les avantages pratiques de la haute température basse pression boucle de refroidissement primaire. Beaucoup de conceptions modernes reposent sur le carburant en céramique dispersées dans une matrice de graphite, avec le sel fondu fournissant basse pression, le refroidissement à haute température. Les sels sont beaucoup plus efficaces pour enlever la

chaleur du cœur, réduisant la nécessité pour le pompage, la tuyauterie, et de réduire la taille du noyau, car ces éléments sont de taille réduite.

Le début [Experiment Reactor Avions](#) (1954) a été principalement motivé par la petite taille que la conception pourrait fournir, alors que le [réacteur Expérience sel fondu](#) (1965-1969) était un prototype pour un [cycle thorium surgénérateur centrale nucléaire](#). Un des [réacteurs de génération IV](#) conceptions est un sel fondu refroidi, à carburant solide du réacteur, la conception de référence initial est de 1000 [MW_e](#) avec une date cible de déploiement de 2025.

Un autre avantage d'un petit noyau, c'est qu'il a moins de matériaux à absorber les neutrons. En employant un réacteur du combustible au thorium, l'amélioration de [l'économie de neutrons](#) fait plus de neutrons disponibles pour la race du thorium-232 dans l'uranium-233. Ainsi, le noyau compact permet la conception de sels fondus particulièrement adapté à la [cycle thorium](#).

Contenu

- [1 Histoire](#)
 - o [1.1 L'expérience des réacteurs Avions](#)
 - o [1.2 L'expérience des réacteurs à sels fondus](#)
 - o [1,3 Oak Ridge National Laboratory du réacteur en fusion Eleveur Sel](#)
 - o [1.4 Sel liquide de réacteur à très haute température](#)
 - o [1.5 Le MSR Fuji](#)
- [2 réacteurs à sels fondus alimentée](#)
 - o [2.1 Deux réacteur fluide](#)
 - o [2.2 Réacteur seul fluide](#)
 - o [2.3 Avantages](#)
 - [2.3.1 Sécurité](#)
 - [2.3.2 Economie](#)
 - [2.3.3 Simplicité](#)
 - [2.3.4 Facilité de retraitement](#)
 - [2.3.5 Les avantages économiques et sociaux](#)
 - o [2.4 Inconvénients](#)
 - [2.4.1 Défis de conception](#)
 - [2.4.2 concerne le cycle du combustible](#)
- [3 sels fondus réacteurs refroidis](#)
- [4 Sélection du sel fondu](#)
 - o [4.1 de purification du sel fondu et de retraitement](#)
- [5 questions politiques](#)
- [6 Comparaison avec d'ordinaire, réacteurs à eau légère](#)
- [7 Voir aussi](#)
- [8 Références](#)
- [9 Pour en savoir plus](#)

- [10 Liens externes](#)

Article complet sur <http://translate.google.fr/translate?hl=fr&langpair=en>

Réacteur au fluorure de thorium liquide

Réacteur nucléaire à base de thorium

Des réacteurs nucléaires au thorium ? Document Automates Intelligents 2011

Photo - *Élément de monazite. La monazite, phosphate de thorium et de terres rares, est le principal minerai de thorium*

Les risques liés à l'usage et à la dissémination de l'uranium et du plutonium mettent à l'actualité les possibilités d'un autre métal radioactif jusqu'ici ignoré du grand public, le thorium. L'accident très grave qui s'est produit récemment à la centrale japonaise de Fukushima redonne de l'intérêt à ce minerai. Selon les promoteurs de cette solution, il permettrait de poursuivre la production d'électricité grâce à des réacteurs ne présentant pas tous les risques des générations actuelles. Il fait déjà l'objet de nombreuses applications industrielles mais son emploi en fission présente certaines difficultés pratiques dont les défenseurs de l'uranium ont tiré prétexte pour ne pas l'expérimenter.

Wikipedia, comme à son habitude, propose une fiche documentaire décrivant le thorium sous ses divers aspects à laquelle nous ne pouvons que renvoyer le lecteur (voir ci-dessous)

Qu'en dire ici ? Le thorium est plus abondant et mieux réparti que l'uranium. Aux rythmes les plus optimistes de développement de l'énergie nucléaire, les réserves en paraissent pratiquement inépuisables. Il s'agit d'un atout géopolitique essentiel. La principale difficulté à résoudre pour l'utiliser comme combustible dans les centrales actuelles obligerait à reconvertir celles-ci afin de modifier le coeur du réacteur.

La méthode qui paraît aujourd'hui la plus pratique consiste à mettre en oeuvre des réacteurs à sels fondus, où ceux-ci jouent à la fois le rôle de combustible et de fluide caloporteur. On utilise pour cela un sel de fluorure de thorium (lithium fluoride) suffisamment chaud (700 K) pour être liquide, ce qui élimine le besoin de fabriquer des éléments combustibles solides.

Le thorium par lui-même est faiblement radioactif. Il faut lui ajouter une petite quantité d'uranium 233 pour faire démarrer les réactions nucléaires. L'U-233 est radioactif et sa fission libère des neutrons qui transforment les atomes de thorium en de nouveaux U-233 tout en produisant de la chaleur. Il s'agit d'un cycle continu. On brûle de l'U-233 en consommant des atomes de thorium qui produisent de nouveaux atomes d'U-233. Le combustible perd la plus grande partie de sa chaleur en passant à travers un échangeur contenant de plus grande quantités de sels fondus. Ce sel peut alors être utilisé pour faire tourner des turbines générant de l'électricité.

On n'utilise donc pas d'eau comme fluide réfrigérant. On ne risque donc pas ainsi de produire de l'hydrogène par décomposition de l'eau, ce qui élimine le risque d'explosion dont on a vu les effets désastreux à Fukushima. Le fluorure de thorium, par ailleurs, est ininflammable. Ceci n'est pas le cas des barres de combustibles solides, qui peuvent prendre feu en dégageant des fumées fortement radioactives.

Enfin, le combustible liquide peut être utilisé jusqu'à épuisement de tous ses éléments radioactifs, ce qui élimine en grande partie la question des déchets. Rappelons que ceux-ci proviennent pour l'essentiel, dans les réacteurs classiques, des barres d'uranium devenues pour diverses raisons non utilisables par vieillissement mais qui conservent encore d'importantes quantités d'uranium actif.

En contrepartie de ces avantages, les sels de thorium sont hautement corrosifs, ce qui oblige à les confiner dans des matériaux spéciaux. Dans le cadre d'un démonstrateur ayant fonctionné de 1965 à 1969 à Oak-Ridge, un alliage de nickel-molybdène avait été utilisé, mais il s'est dégradé à son tour. De nouvelles recherches s'imposent, portant non seulement sur cette question du confinement mais plus généralement sur les différents processus du cycle, qui n'ont pas été mis à l'épreuve récemment.

Jusqu'à présent ces recherches n'intéressaient personne, notamment pas les industriels du nucléaire s'étant investis dans les technologies utilisant l'uranium ou le plutonium, qui ne souhaitent pas susciter d'alternatives. Nous pensons pour notre part qu'il serait indispensable désormais d'expérimenter sérieusement et à grande échelle les réacteurs à fluorure de thorium liquide (LFRT ou Liquid Fluoride Thorium Reactor). Différents projets se font jour, dans différents pays dont la Chine et l'Inde, très motivés.

L'Europe, par l'intermédiaire d'Euratom, a lancé une petite étude d'1 million d'euros, avec la participation du Laboratoire de Physique Subatomique et Cosmologie de Grenoble. Elle se poursuivra jusqu'en 2013, avant de déboucher sur des recherches de financement.

Nous pensons qu'il serait dorénavant utile d'accélérer ces recherches et de créer un débat ouvert entre spécialistes de la question.

Pour en savoir plus

▶ Thorium. Wikipedia : <http://en.wikipedia.org/wiki/Thorium>

▶ Voir aussi en français : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Thorium>

▶ Voir aussi *Le Journal du CNRS* : <http://www2.cnrs.fr/journal/736.htm>

▶ Elsa Merle Lucotte du LPSC, chercheuse en électro-nucléaire :

<http://merlee.home.cern.ch/merlee/pages/recherche.html>

▶ Sur le thorium, on peut lire aussi cet article ainsi que les réactions

<http://www.agoravox.fr/actualites/technologies/article/energie-nucleaire-a-base-de-91442>.

© Automates Intelligents 2011 - Source

<http://www.automatesintelligents.com/echanges/2011/avr/thorium.html>

Energie nucléaire à base de Thorium: la Chine se lance

29 Mars 2011 Par [Vincent Verschoore](#)

En décembre 2010 je publiais cet article *Thorium, pour un avenir nucléaire propre?*, une alternative à la fission nucléaire à base d'uranium ou de MOX, dont l'actualité récente au Japon montre l'extrême dangerosité quand la réalité dépasse les prévisions les plus pessimistes des constructeurs. Le refus par la

France et des pays hautement "nucléarisés" de considérer sérieusement l'alternative à base de Thorium, alors qu'ici le nucléaire représente entre 70% et 80% de la production d'électricité, renvoie à un autisme difficile à comprendre si on fait abstraction d'une donnée fondamentale: le thorium ne produit pas de plutonium, et sans plutonium pas de bombes atomiques...

La réaction à base de Thorium, si elle ne résout pas tous les problèmes du nucléaire offre néanmoins de très importants avantages: la conception sous-critique faisant en sorte que la réaction s'arrête d'elle-même en cas d'accident, l'abondance et la capacité énergétique du thorium (200 fois plus que l'uranium, 3,5 million de fois la capacité du charbon...), très faible production de plutonium, déchets moins toxiques et à durée de vie plus courte.

La Chine, sans doute plus pragmatique et capable de considérer le long terme, vient de décider d'adopter la filière Thorium. Extrait de cet article qui circule sur le net, trouvé sur le blog noxmail.us:

La Chine vient cependant d'annoncer qu'elle a opté pour une alternative au nucléaire traditionnel, produisant mille fois moins de déchets que les réacteurs à uranium : le réacteur à sel fondu de thorium. Le thorium est un métal argenté nommé d'après le dieu scandinave du tonnerre Thor. Ce métal radioactif a ses inconvénients, mais surtout, de nombreux avantages : il est aussi commun que le plomb, par opposition à l'uranium, dont il ne resterait plus que l'équivalent de 80 ans de consommation dans le sol terrestre. Le thorium est également utilisable presque totalement, alors que l'uranium ne l'est qu'à 0,7%. Il y en a donc assez pour générer de l'énergie pendant des milliers d'années. Mais le vrai bonus, c'est sa sécurité d'emploi. « Lorsqu'il se met à surchauffer, une petite prise fond et conduit les sels dans un bassin. Plus besoin d'ordinateurs, ou de pompes comme celles qui se sont retrouvées en panne à cause du tsunami », explique Kirk Sorensen, ex-ingénieur à la NASA et expert du thorium. « Ils fonctionnent à la pression atmosphérique, donc le type d'explosion à l'hydrogène telles que celles auxquelles nous avons assisté au Japon ne peut pas survenir. Un réacteur de ce type aurait parfaitement pu faire face au tsunami. Il n'y aurait eu aucune fuite de radioactivité ». Le thorium peut être bombardé de neutrons pour produire une fission, mais sans que cela crée une réaction en chaîne. La fission cesse dès que l'on arrête le rayon de photons, explique le Professeur Robert Cywinski de l'université d'Huddersfield.

Ce sont les physiciens américains qui s'y étaient intéressés les premiers à la fin des années 40. Le thorium génère plus de neutrons que l'uranium, et permet d'obtenir de meilleurs cycles d'énergie. Mais les projets avaient été abandonnés, parce que le thorium ne produit pas de plutonium, dont on avait besoin à ce moment pour les bombes... Aujourd'hui, il semble que ce soit précisément ce qui retient l'attention : le thorium est définitivement moins nocif que l'uranium. Et comme si cela ne suffisait pas, il peut également brûler des déchets de plutonium provenant de vieux réacteurs, réduisant leur toxicité radioactive, et agissant comme un nettoyant biologique...

Certes le thorium n'est pas la panacée en matière environnementale mais à défaut d'une solution propre pour une énergie de base avant vingt ou trente ans (le temps de développer les filières solaires et géothermiques au niveau requis) la technologie thorium est bien moins dangereuse que l'uranium et bien plus propre que brûler du pétrole et du charbon. Peut-on espérer qu'un parti politique français inscrira cette approche dans son programme électoral pour 2012?

Billet en accès libre sur <http://rhubarbe.net/blog/2011/03/29/energie-nucleaire-a-base-de-thorium-la-chine-se-lance/>

Source <http://blogs.mediapart.fr/blog/vincent-verschoore/290311/energie-nucleaire-base-de-thorium-la-chine-se-lance>

Tableau périodique des éléments

 Pour les articles homonymes, voir [Tableau](#).

Le **tableau périodique des éléments**, également appelé **table de Mendeleïev**, **classification périodique des éléments** ([CPE](#)) ou simplement **tableau périodique**, représente tous les [éléments chimiques](#), ordonnés par [numéro atomique](#) croissant et organisés en fonction de leur [configuration électronique](#), laquelle sous-tend leurs propriétés chimiques.

Son invention est généralement attribuée au chimiste russe [Dmitri Mendeleïev](#), qui construisit en 1869 une table différente de celle qu'on utilise aujourd'hui¹ mais similaire dans son principe, dont le grand intérêt était de proposer une classification systématique des éléments chimiques connus à l'époque en vue de souligner la périodicité de leurs propriétés chimiques, d'identifier les éléments qui restaient à découvrir, et même de pouvoir prédire les propriétés de ces éléments alors inconnus.

Le tableau périodique a connu de nombreux réajustements depuis lors jusqu'à prendre la forme que nous lui connaissons aujourd'hui, et est devenu un référentiel universel auquel peuvent être rapportés tous les types de comportements physique et chimique des éléments. En [février 2010](#), sa forme standard comportait 118 éléments, allant de [¹H](#) à [¹¹⁸Uuo](#).

Le tableau périodique a connu de nombreux réajustements depuis lors jusqu'à prendre la forme que nous lui connaissons aujourd'hui, et est devenu un référentiel universel auquel peuvent être rapportés tous les types de comportements physique et chimique des éléments. En [février 2010](#), sa forme standard

comportait 118 éléments, allant de [¹H](#) à [¹¹⁸Uuo](#).

Sommaire

- [1 Le tableau périodique standard](#)
- [2 Construction du tableau](#)
 - o [2.1 Règle de Klechkowski](#)
 - o [2.2 Exceptions et règle de Hund](#)
- [3 Périodicité des propriétés chimiques](#)
 - o [3.1 Périodes et groupes du tableau périodique](#)
 - o [3.2 Variations des propriétés le long d'une période](#)
 - o [3.3 Variation des propriétés dans un groupe](#)
 - o [3.4 Relations diagonales](#)
 - o [3.5 Séries chimiques et autres regroupements](#)
 - o [3.6 Limites à la périodicité aux confins du tableau](#)
- [4 Isotopes et radioactivité](#)
 - o [4.1 Isotopes](#)
 - o [4.2 Radioactivité](#)
- [5 Extension du tableau périodique](#)
- [6 Historique](#)

- o [6.1 Première classification d'Antoine Lavoisier](#)
- o [6.2 Triades de Johann Döbereiner](#)
- o [6.3 Tétrades de Jean-Baptiste Dumas](#)
- o [6.4 Vis tellurique de Chancourtois](#)
- o [6.5 Loi des octaves de John Newlands](#)
- o [6.6 Notation d'éléments manquants par William Odling](#)
- o [6.7 Introduction de la valence avec Lothar Meyer](#)
- o [6.8 Classification périodique de Mendeleïev](#)
- o [6.9 Découverte de l'argon par William Ramsay et Lord Rayleigh](#)
- o [6.10 Classement par numéro atomique avec Henry Moseley](#)
- o [6.11 Concept des actinides de Glenn Seaborg](#)
- [7 Présentations alternatives](#)
- [8 Moyens mnémotechniques](#)
- [9 Notes et références](#)
- [10 Annexes](#)
 - o [10.1 Articles connexes](#)

 - o [10.2 Liens externes](#)

Tableau périodique des éléments à consulter sur http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Tableau_p%C3%A9riodique_des_%C3%A9l%C3%A9ments.svg

Suite de l'article sur http://fr.wikipedia.org/wiki/Tableau_p%C3%A9riodique_des_%C3%A9l%C3%A9ments

Thorium – Article Wikipédia

Le **thorium** est un [élément chimique](#), un [métal](#) de la famille des [actinides](#), de symbole **Th** et de [numéro atomique](#) 90.

Il a été découvert en [1829](#) par [Jöns Jacob Berzelius](#) et nommé d'après [Thor](#), dieu scandinave du tonnerre.

Ses principales applications sont dans les alliages de [magnésium](#) utilisés pour les moteurs d'aéronefs. Il a un énorme potentiel comme combustible nucléaire, mais cette voie est encore en cours d'exploration (avec divers types de réacteurs : [réacteur nucléaire piloté par accélérateur](#), [réacteur à sel fondu](#), [réacteur à haute température](#) (HTR), ...).

Sommaire

- [1 Historique](#)
- [2 Propriétés](#)
 - o [2.1 Physique et chimie](#)
 - o [2.2 Isotopes](#)
 - o [2.3 Radiotoxicité](#)

- [3 Géologie et minéralogie](#)
 - [3.1 Abondance et gisements](#)
 - [3.2 Extraction minière](#)
- [4 Utilisation](#)
- [5 Industrie nucléaire](#)
 - [5.1 Isotope fertile](#)
 - [5.2 Cycle du thorium](#)
 - [5.3 Contrôle des matières nucléaires](#)
- [6 Références](#)

- [7 Liens externes](#)

Historique [modifier]

Le thorium a été découvert sous forme d'un minéral noir sur l'île de Løvøy, en [Norvège](#), par M. T. Esmark. Il en envoya un échantillon au professeur [Jens Esmark](#), [minéralogiste](#) distingué, qui ne fut pas en mesure de l'identifier, et en envoya un échantillon au chimiste suédois [Jöns Jakob Berzelius](#) pour examen en 1828⁵. Berzelius en fit l'analyse, et nomma le nouvel élément *thorium*, d'après [Thor](#), [dieu scandinave](#) du tonnerre.

Ce nouveau métal resta pratiquement inutilisé jusqu'à l'invention du [manchon à incandescence](#) en 1885.

La radioactivité du thorium a été découverte en 1898, par la physicienne polonaise naturalisée française [Marie Curie](#) et le chimiste allemand [Gerhard Carl Schmidt](#).

Entre 1900 et 1903, [Ernest Rutherford](#) et [Frederick Soddy](#) démontrèrent que le thorium se désintègre suivant une loi de [décroissance exponentielle](#) en une série d'autres éléments. Ce constat conduisit à identifier la [demi-vie](#) comme l'une des caractéristiques importantes associées aux [particules α](#), expériences qui les conduisirent à leur théorie de la [radioactivité](#)⁶.

La [méthode de la zone fondue](#), découverte par [Eduard van Arkel](#) et [Jan Hendrik de Boer](#) en 1925, permit de produire du thorium métallique de haute pureté⁷.

Au début de l'étude de la radioactivité, le nom de **ionium** avait été donné à l'[isotope](#) ²³⁰Th, trouvé dans la [chaîne de désintégration](#) de l'[uranium 238](#), avant que l'on ne réalise que ionium et thorium sont chimiquement identiques. Cet hypothétique élément reçut le symbole *Io*.

Propriétés [modifier]

Physique et chimie [modifier]

Lorsqu'il est pur, le thorium est un métal gris-blanc qui conserve son lustre pendant plusieurs mois, grâce à l'[oxyde](#) qui le protège. Toutefois, quand il est exposé à l'[oxygène](#), le thorium ternit lentement dans l'air, devient gris et finalement noir.

- L'oxyde de thorium (ThO₂) est un des meilleurs matériaux réfractaires avec une température de fusion de 3 300 °C⁸.

Le thorium métal en poudre est souvent [pyrophorique](#) et doit être manipulé avec soin. Chauffé dans l'air, des copeaux de thorium peuvent s'enflammer et brûler brillamment avec une lumière blanche.

Le thorium est l'élément qui a la plus grande plage de température pour son état liquide : 3033 K entre son point de fusion et son point d'ébullition (à [pression atmosphérique](#)).

Isotopes [\[modifier\]](#)

Article détaillé : [Isotopes du thorium](#).

Tous les [isotopes](#) du thorium sont radioactifs. Le thorium naturel n'est constitué que du seul isotope, le [thorium 232](#), à très longue période radioactive (14 milliards d'années), ce qui fait du thorium un [élément mononucléidique](#).

Le thorium 232 est un [isotope fertile](#) : en absorbant un [neutron](#), il se transmute en thorium 233 (radioactif), qui se désintègre ensuite en [protactinium 233](#) (radioactif), qui se désintègre à son tour en [uranium 233](#), [fissile](#).

Son activité massique⁹ est de 4,10.10³ Bq.g⁻¹

Radiotoxicité [\[modifier\]](#)

Le thorium naturel se désintègre plus lentement que la plupart des autres matières radioactives, et les [rayonnements alpha](#) émis ne peuvent pas pénétrer la peau humaine. La détention et la manipulation de petites quantités de thorium, comme celles contenues dans un [manchon à incandescence](#), sont considérées comme non dangereuses tant que l'on prend soin de ne pas ingérer le thorium - les poumons et les autres organes internes peuvent être atteints par les rayonnements alpha. Une exposition à un aérosol de thorium peut conduire à une augmentation du risque de [cancer](#) du [poumon](#), du [pancréas](#) et du [sang](#). Une ingestion de thorium conduit à une augmentation du risque de maladies du [foie](#).

Cet élément n'a pas de rôle biologique connu. Il est parfois utilisé comme médium de contraste pour les radiographies.

La [chaîne de désintégration](#) du thorium produit du « thoron » (²²⁰Rn), qui est un émetteur alpha et présente un risque radiologique ; comme pour tous les isotopes du [radon](#), son état gazeux le rend susceptible d'être facilement inhalé. Une bonne ventilation des zones où le thorium est stocké ou manipulé est donc essentielle.

Géologie et minéralogie [\[modifier\]](#)

Abondance et gisements [\[modifier\]](#)

Faiblement radioactif, le thorium 232 se désintègre très lentement (sa [demi-vie](#) est environ trois fois l'[âge de la Terre](#), $14,05 \times 10^9$ années). Le thorium se trouve en petites quantités dans la plupart des roches et [sols](#), il est quatre fois plus abondant que l'[uranium](#), à peu près aussi fréquent que le [plomb](#). Un terrain normal contient en moyenne environ 12 parties par million (ppm) de thorium.

Le thorium se rencontre dans plusieurs [minéraux](#). Les minerais de thorium sont la [thorite](#) ThSiO_4 , la [thorianite](#) ThO_2 et surtout la [monazite](#) $(\text{Ce,La,Nd,Th})\text{PO}_4$, le plus commun, phosphate de thorium et de terre rare, qui peut contenir jusqu'à environ 12 % d'oxyde de thorium.

Il en existe de grands gisements en Bretagne, en [Australie](#), en [Inde](#) et en [Turquie](#). On trouve de la monazite à forte teneur en thorium en Afrique, en Antarctique, en Australie, en Europe, en Amérique du Nord et en Amérique du Sud¹⁰.

D'autres [isotopes](#) du thorium se rencontrent à l'état de traces. Dans la [chaîne de désintégration](#) du thorium (le ^{228}Th ; 1,91 an) ; de l'uranium 238 (le ^{230}Th ; 75 000 ans) ; et de l'uranium 235 (le ^{231}Th ; 25,2 h). Leur courte durée de vie entraîne une [activité massique](#) importante, et les rend beaucoup plus radioactifs que ^{232}Th ; mais en masse, ils sont d'une abondance négligeable.

Extraction minière [\[modifier\]](#)

Le thorium est principalement extrait de la monazite, par un traitement en plusieurs étapes.

Dans un premier temps, le sable de monazite est dissous dans un [acide inorganique](#) tel que l'[acide sulfurique](#) (H_2SO_4). Dans un deuxième temps, le thorium est extrait dans une phase organique contenant une [amine](#). Ensuite, il est séparé à l'aide d'ions tels que les nitrates, chlorure, hydroxyde ou carbonate, ce qui fait passer à nouveau le thorium en phase aqueuse. Enfin, le thorium est précipité et recueilli¹¹.

Utilisation [\[modifier\]](#)

Le thorium a de nombreuses applications industrielles :

- électrode, [cathode](#) : le thorium possède un [travail de sortie](#) bas, ce qui permet une intense émission d'électrons par émission [thermoionique](#). Pour cette raison, on l'utilise dans les électrodes de tubes à décharge en revêtement des filaments de [tungstène](#), ainsi que pour les cathodes de nombreux dispositifs électroniques.
- [verres optiques](#) : dans la fabrication de lentilles de qualité pour les appareils photo et des instruments scientifiques. Le verre contenant de l'oxyde de thorium a un [indice de réfraction](#) élevé et une faible [dispersion](#), ce qui diminue l'[aberration optique](#).
- [manchon à incandescence](#) : on utilise la très mauvaise [conductivité thermique](#) de l'oxyde de

thorium (en mélange avec l'oxyde de [cérium](#)) pour augmenter la température des manchons d'éclairage et donc leur luminosité.

- produit [réfractaire](#) (creuset) : Pour les applications à haute température de matériau céramique, par addition d'oxyde de thorium, on obtient un type de [porcelaine](#) très dure et résistante aux températures élevées.
- Comme agent d'alliage dans les structures en acier. On l'utilise également pour faire des électrodes de soudage, en alliage de [tungstène](#) qui a le plus grand point de fusion connu, près de 4 000 °C.
- Il est utilisé dans l'industrie électronique comme détecteur d'oxygène.
- Il est utilisé en chimie comme catalyseur dans la transformation de l'ammoniac en acide nitrique, dans l'industrie pétrolière pour le [cracking](#) et l'extraction d'hydrocarbures de carbone, et pour la production industrielle d'[acide sulfurique](#).
- L'oxyde de thorium a été utilisé dans les années 1930 et 1940 pour préparer le [thorotrast](#), une suspension colloïdale injectable utilisée comme [produit de contraste](#) en [radiologie](#) à cause de ses qualités d'absorption des [rayons X](#). Le produit sans effet secondaire immédiat s'est révélé [cancérogène](#) à long terme sous l'effet des [particules α](#) émises par le [thorium 232](#). La substance est inscrite sur la [liste des produits cancérogènes pour l'homme](#). Depuis les années 1950, ce produit a été remplacé par des molécules iodées hydrophiles, universellement utilisées aujourd'hui comme agents de contraste pour les examens aux rayons X.

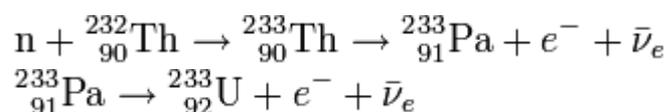
De plus, il est prometteur pour ses applications à l'énergie nucléaire : l'abondance (terrestre) du thorium 232 est 3 à 4 fois plus grande que celle de l'[uranium 238](#)¹²(l'autre isotope naturel fertile). Le thorium constitue ainsi une importante réserve d'[énergie nucléaire](#), en raison de son abondance ; il pourrait ainsi fournir plus d'énergie que l'uranium, le charbon et le pétrole réunis. Son utilisation nécessite la mise au point d'une nouvelle filière de [réacteurs nucléaires surgénérateurs](#).

Industrie nucléaire [modifier]

Isotope fertile [modifier]

Le thorium, ainsi que l'[uranium](#) et le [plutonium](#), peut être utilisé comme combustible dans un [réacteur nucléaire](#). Bien qu'il ne soit pas [fissile](#) lui-même, ²³²Th est un [isotope fertile](#) comme l'[uranium 238](#). En réacteur, il est susceptible d'absorber un [neutron](#) (thermique ou rapide) pour produire un atome d'[uranium 233](#), qui est fissile.

Le ²³²Th absorbe un neutron pour devenir ²³³Th qui, en principe, émet un [électron](#) et un [antineutrino](#) ($\bar{\nu}_e$) par [désintégration β⁻](#) pour se transformer en [protactinium 233](#) (²³³Pa), lequel émet encore électron et anti-neutrinos par une deuxième désintégration β⁻ pour se transformer en uranium 233 (²³³U) avec une période de 27 jours environ :



Le combustible irradié peut ensuite être déchargé du réacteur, l'uranium 233 séparé du thorium (ce qui est un processus relativement simple puisqu'il s'agit d'une séparation chimique et non d'une [séparation isotopique](#)), et réinjecté dans un autre réacteur dans le cadre d'un [cycle du combustible nucléaire](#) fermé.

Cycle du thorium [\[modifier\]](#)

Article principal : [Cycle du combustible nucléaire au thorium](#).

En tant que produit fissile, l'[uranium 233](#) (²³³U) présente de meilleures propriétés que les deux autres isotopes fissiles utilisés dans l'[industrie nucléaire](#), l'[uranium 235](#) et le [plutonium 239](#). Avec des neutrons lents, il fissionne en donnant plus de neutrons par neutron absorbé (en revanche, dans les réacteurs à neutrons rapides, le rendement neutronique du plutonium 239 augmente considérablement, dépassant celui du thorium). À partir de matières fissibles (²³⁵U ou ²³⁹Pu), il est possible de l'utiliser dans un cycle [surgénérateur](#) plus efficace que celui actuellement possible avec le plutonium ou l'uranium.

Différentes voies ont été proposées pour exploiter l'énergie du thorium. L'une d'entre elles, popularisée au début des années 1990 par [Carlo Rubbia](#), consiste à utiliser une source externe de neutrons pour créer l'²³³U (réacteur hybride ou [Réacteur nucléaire piloté par accélérateur](#), en anglais *ADS* « [Accelerator driven system](#) », ou encore « [Rubbiatron](#) »). Cette voie comporte cependant un certain nombre de difficultés de mise au point :

- le coût élevé de l'accélérateur et des infrastructures constituant la [source de neutrons](#) externe ;
- des problèmes sévères pour la résistance des matériaux soumis à des flux intenses de particules ;
- des problèmes techniques dans le retraitement et dans le recyclage non encore résolus de façon satisfaisante, en raison du thorium hautement radioactif ²²⁸Th (qui n'est pas transformé en ²³³U et s'accumule au fil des cycles) ;
- un caractère [proliférant](#) éventuel de ²³³U (ce qui est le cas de toutes les matières fissibles), mais il serait toutefois difficile de le purifier suffisamment pour qu'il puisse servir à la fabrication d'armes nucléaires.

Une autre voie possible pour l'exploitation du thorium consiste à mettre en œuvre des réacteurs à sels fondus, où ceux-ci jouent à la fois le rôle de combustible et de fluide caloporteur. L'un des premiers essais a eu lieu à [Oak Ridge](#) dans les années 1960. Un [réacteur à sel fondu](#) expérimental a été construit pour étudier la faisabilité d'un tel cycle, en utilisant un sel de fluorure de thorium suffisamment chaud pour être liquide, ce qui élimine en particulier le besoin de fabriquer des éléments combustibles. L'expérience, qui a fonctionné de manière satisfaisante de 1965 à 1969, utilisait du [thorium 232](#) comme élément fertile et de l'uranium 233 comme combustible fissile. Le programme a été définitivement interrompu en 1976 faute de crédits et faute d'intérêt suffisant des milieux militaires.

L'exploitation du thorium par des réacteurs nucléaires à sels fondus paraît néanmoins aujourd'hui être la voie la plus prometteuse ; elle est à l'étude dans plusieurs pays comme la France, les États-Unis, la Chine¹³, l'Inde et le Japon. À l'exception de la France, tous ces pays ont récemment décidé d'engager des efforts industriels significatifs dans cette direction. En France, des scénarios théoriques prometteurs ont été étudiés intensivement par le [CNRS](#) depuis le début des années 2000. En particulier, le Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie de Grenoble (LPSC)¹⁴ a développé un concept de réacteur à sels fondus « non modéré », dit MSFR (pour *Molten Salt Fast Reactor*, un type de [réacteur à neutrons rapides](#)), qui paraît susceptible d'offrir des caractéristiques de fonctionnement très favorables remplissant tous les critères des réacteurs de quatrième génération (cf. [Forum International Génération IV](#)) :

- utilisation optimale du thorium comme matériau fertile abondant, permettant de faire de la

[surgénération](#) - compte tenu des réserves connues, les ressources énergétiques disponibles seraient au moins 500 fois supérieures à celles que peuvent procurer les réacteurs actuels de deuxième génération (PWR, filière canadienne CANDU à uranium naturel, RBMK russes, ...). Au rythme actuel de production d'énergie nucléaire, les réserves potentielles se chiffrent en dizaines de milliers d'années.

- le cycle du combustible ne crée que peu de [plutonium](#) et d'[actinides mineurs](#) et génère par conséquent des [déchets radioactifs](#) beaucoup plus faciles à gérer ; certains groupes de promotion de la technologie¹⁵ qualifient même cette voie « d'énergie nucléaire verte », dans la mesure où elle pourrait contribuer significativement à la réduction des émissions de [gaz à effet de serre](#) sans présenter les inconvénients des réacteurs nucléaires actuels.
- une grande sûreté intrinsèque de fonctionnement, du fait de coefficients de vide et de contre-réaction thermiques très négatifs empêchant la réaction de s'emballer d'elle-même, et ce malgré l'absence de modérateur ;
- le circuit primaire du réacteur à sels fondus opère à la pression atmosphérique ambiante et ne met en œuvre que des substances chimiquement stables ; le risque de contamination radioactive ou d'incendie en cas de fuite est donc très faible ;
- l'utilisation de combustibles nucléaires liquides permet d'envisager un traitement chimique in situ des matières fissiles ; on éviterait ainsi d'avoir à décharger le cœur et à effectuer un retraitement externe, avec comme corollaire la nécessité du transport des matières radioactives ;
- la contamination inévitable de la matière fissile ^{233}U par des traces de ^{232}U , émetteur de [rayonnement gamma](#) très énergétique, rend celle-ci très délicate à exploiter pour des armes nucléaires ; en même temps de tels émetteurs gamma sont facilement détectables, ce qui facilite le contrôle de la [non-prolifération nucléaire](#) ;
- en fonction des schémas retenus et de la composition du mélange de sels d'actinides utilisés comme combustible, le [réacteur à sel fondu](#) est capable d'offrir une vaste plage de modes de fonctionnement ; il serait donc susceptible de valoriser comme combustible les matières nucléaires issues des centrales actuelles, alors qu'une partie importante de ces matières aboutit aujourd'hui en bout de chaîne de retraitement sous la forme de déchets de haute activité à vie longue ([HAVL](#)), difficiles à gérer. Le fonctionnement d'une fraction des réacteurs comme incinérateurs de déchets est envisageable, ce qui réduirait encore considérablement la quantité de déchets produite par l'ensemble du parc.

Des recherches complémentaires ainsi que des moyens financiers et industriels importants sont encore nécessaires pour la réalisation de réacteurs commerciaux. Il reste en particulier à développer des cuves en alliages spéciaux capables de résister à la corrosion pendant les décennies que durera l'exploitation des réacteurs. La faisabilité de la technologie paraît cependant presque acquise, l'horizon 2025 étant avancé par les équipes de développement les plus en pointe, bien que cela dépende très certainement du niveau des investissements et de l'intérêt que les états, les industriels et les sociétés y porteront. En août 2010, trois éminents physiciens français¹⁶ ont rédigé une tribune contestant le programme [ITER](#) de recherche sur la [fusion nucléaire](#), jugé hors de prix et irréalisable à court ou moyen terme, et préconisant plutôt l'intensification des recherches et des développements concernant les réacteurs à sels fondus et la filière du thorium.

Contrôle des matières nucléaires [modifier]

Article détaillé : [Contrôle des matières nucléaires](#).

Le thorium est une matière nucléaire dont la détention est réglementée (Article R1333-1 du code de la défense).

Références à consulter à la source <http://fr.wikipedia.org/wiki/Thorium>

Sels fondus et thorium : avenir du nucléaire ? Article CNRS France

A Grenoble, des chercheurs du CNRS étudient les avantages et les inconvénients d'une filière nucléaire en émergence. Explications.

Dans la vallée grenobloise, entouré des montagnes du massif du Vercors, le polygone scientifique regroupe de nombreux laboratoires nationaux et internationaux - tels le Synchrotron et l'Institut Laue-Langevin - spécialisés dans les études de structure de la matière. C'est dans ce cadre montagnard et boisé que se trouve le Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie (LPSC)¹. Un grand calme règne dans le bâtiment. Là, la quinzaine de chercheurs, enseignants-chercheurs et thésards du groupe de Physique des réacteurs, dirigé par Roger Brissot, élabore des scénarios pour le nucléaire du futur. L'un d'eux met en scène un nouveau protagoniste qui suscite beaucoup d'intérêt : le réacteur à sels fondus associé au thorium.

Pour Jean-Marie Loiseaux et Daniel Heuer, physiciens du nucléaire de l'équipe, comme pour l'ensemble des experts, en 2050, les énergies fossiles ne devraient plus représenter que 40 % de la production énergétique, effet de serre et épuisement des réserves obligent. Il faudra combler les besoins. « S'il ne peut être écarté des options futures, un développement de la filière du nucléaire ne pourra pas reposer sur le modèle actuel. Il devra répondre aux exigences fortes de sécurité, de compétitivité énergétique et d'un développement durable passant par une meilleure gestion des déchets radioactifs et des réserves naturelles », commente Daniel Heuer. Si elle doit devenir une option compétitive, nous estimons que l'énergie nucléaire devra représenter 25 % de la production mondiale d'énergie en 2050 soit sept à dix fois plus que sa valeur actuelle », poursuit Jean-Marie Loiseaux. Les chercheurs tentent donc d'imaginer les solutions possibles. Premier scénario : la continuité du développement des réacteurs à eau pressurisée (REP) actuels qui fonctionnent avec l'uranium enrichi comme combustible. Problème : « Cela n'est pas compatible avec un développement durable, commente Daniel Heuer. En effet, les réserves de vingt millions de tonnes d'uranium dans la nature seraient totalement épuisées en quarante à soixante-dix ans. » Par ailleurs, l'option REP génère des quantités très importantes de plutonium et de déchets radioactifs : les actinides mineurs (américium, curium et neptunium) très difficiles à recycler. Deuxième scénario : le développement de réacteurs à neutrons rapides (RNR) « régénérateurs ou surgénérateurs » qui utilisent comme combustible le plutonium produit par les réacteurs à eau pressurisée. Avantage : il produit plus de matière fissile qu'il n'en consomme. Ce scénario permettrait une multiplication des réacteurs, mais ne suffirait pas pour atteindre raisonnablement la production envisagée pour 2050. S'il permet le recyclage du plutonium, il présente l'inconvénient majeur de le faire circuler en très grande quantité, ce qui rend la filière difficile à gérer et son acceptation sociale encore plus délicate.

Comme les deux premiers scénarios ont leurs faiblesses, les chercheurs se sont penchés sur une nouvelle filière : les réacteurs à sels fondus (RSF) régénérateurs associés au cycle du thorium. « Nous sommes partis sur l'idée simple, explique Jean-Marie Loiseaux, que la meilleure façon de gérer les déchets du nucléaire c'est d'en produire le moins possible. La filière du thorium est, dans ce sens, prometteuse. » Les réacteurs à sels fondus utilisent, à la différence des autres, un combustible liquide. Comme il circule, il fait aussi office de « transporteur de chaleur ». Il permet par ailleurs, sans qu'on ait besoin d'aller au cœur du réacteur, de récupérer directement tout au long du circuit les produits de fission qui l'empoisonnent. Ce combustible est un mélange de fluorures d'uranium 233, un isotope de l'uranium, et de thorium 232, un des deux noyaux fertiles² présents dans la nature. L'uranium 233 qui n'existe pas à l'état naturel peut être remplacé pour le démarrage du réacteur par de l'uranium 235 ou du plutonium. Dans le premier cas, la mise en oeuvre est compliquée et peu efficace et dans le second, on produit énormément d'actinides

mineurs radioactifs. La solution ? Produire l'uranium 233 à partir d'un REP utilisant partiellement du thorium au lieu de l'uranium. À Orsay, des chercheurs de l'Institut de physique nucléaire se consacrent tout particulièrement à l'étude de ce mode de production. Cette filière « réacteurs à sels fondus-thorium » présente trois avantages de taille. Tout d'abord, les RSF nécessitent dix fois moins de matière fissile pour démarrer que les RNR. Les actinides mineurs sont produits en quantité nettement moindre. Et enfin, les produits de fission et les actinides qui restent peuvent être retraités en continu. Forts de ces résultats, les chercheurs ont bâti un troisième scénario. Un seul REP au thorium fournit pendant sa durée de vie (40 ans) de quoi démarrer quatre réacteurs à sels fondus. Mais aussi du plutonium pour les RNR si cette filière est aussi retenue pour ses performances d'une utilisation complète et optimisée du plutonium. À quoi pourrait ressembler le nucléaire du futur ? La solution serait donc de se diriger - pour 25 % des besoins mondiaux - vers un parc hétérogène de réacteurs nucléaires complémentaires. « Ce scénario nous plaît bien, conclut Jean-Marie Loiseaux. On n'utilise que 10 à 20 % des réserves naturelles d'uranium et on recycle les déchets en les incinérant dans des réacteurs appropriés. De plus, cette filière est beaucoup plus facile à gérer. »

Parallèlement, les scientifiques cherchent à mettre au point les caractéristiques physiques des différents de réacteurs. Peren, par exemple, une plate-forme récemment installée au LPSC, est dédiée à la neutronique. Elle va permettre aux chercheurs de valider certaines données concernant les composants du RSF comme la mesure des propriétés de ralentissement des neutrons, l'extraction des produits de fission et le retraitement des déchets. Roger Brissot, responsable du groupe, insiste : « Notre groupe repose sur une indispensable complémentarité. Nous avançons grâce aux résultats à la fois des simulations et des expériences. C'est ainsi que nous avons établi que le RSF devrait être démarré à partir de l'uranium 233. C'est sur ce résultat que nous avons bâti le scénario d'utilisation de ce type de réacteurs qui, peu à peu, est accepté au niveau national et même européen. » En effet, dans le cadre d'un programme européen, le CNRS en collaboration avec EDF prévoit de réaliser un démonstrateur du RSF au thorium dans les quinze années à venir. Une recherche d'importance puisque ce réacteur est aussi l'un des six concepts retenus pour la génération IV³. « Si nous prêtons une attention particulière au thorium, commente Jean-Marie Loiseaux, nous tenons à conserver une expertise sur l'ensemble des solutions. » Et il ajoute : « Les choix énergétiques doivent être logiques et non dirigés par les seuls intérêts économiques des industriels du secteur. C'est la raison pour laquelle il est important qu'une recherche académique soit menée⁴. Elle doit être le garant d'une transparence et d'une diffusion objective des connaissances. » Le nucléaire du futur et la filière du thorium figurent ainsi parmi les douze thèmes du programme Énergie du CNRS.

Stéphanie Belaud

Un monde dévoreur d'énergie

D'ici 2050, la population mondiale devrait passer de 6 milliards à 10 milliards d'individus. Ce saut démographique global couplé au fort développement des pays en voie de développement va se traduire par une augmentation de la consommation d'énergie mondiale estimée au double de la demande actuelle et ce, en dépit des dispositions prises en matière d'économie d'énergie. Actuellement, la répartition énergétique mondiale est la suivante : 7 % nucléaire, 14 % renouvelable et 79 % fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel). Largement majoritaires, les énergies fossiles posent deux problèmes : l'épuisement des réserves naturelles et leur participation au réchauffement climatique. Face à la croissance de la demande, il s'agit désormais de réduire la part de ces énergies (protocole de Kyoto) au profit du développement des énergies renouvelables, des nouvelles technologies de l'énergie avec la piste de l'hydrogène (cf. JDC n° 160-161) et du nucléaire.

Notes :

1. UMR CNRS-IN2P3/université Joseph-Fourier/INPG.
2. Noyau potentiellement fissile qui rend possible la réaction nucléaire. Il n'existe qu'un noyau fissile dans la nature : l'isotope 235 de l'uranium et deux noyaux fertiles : l'isotope 238 de l'uranium et l'isotope 232 du thorium.
3. À l'initiative des États-Unis et prévue pour un déploiement à partir de 2030, la génération IV des réacteurs nucléaires est à l'étude. Six concepts ont été retenus : quatre reposent sur la technologie des RNR, un sur celle du réacteur HTR (non régénérateur, au plutonium) et un sur celle du RSF au thorium.
4. Au CNRS, les groupes de Physique des réacteurs du LPSC de Grenoble et de l'IPN d'Orsay travaillent en collaboration avec le département de Chimie sur les réacteurs du futur.

Contact Jean-Marie Loiseaux - Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie, Grenoble
loiseaux@lpsc.in2p3.fr

Source <http://www2.cnrs.fr/journal/736.htm>

Uranium - Extraits d'un article de Wikipédia

L'**uranium** est un [élément chimique](#) de [symbole U](#) et de [numéro atomique 92](#). C'est un élément naturel assez fréquent, d'abondance supérieure à celle de l'[argent](#), comparable à celle du [molybdène](#) ou de l'[arsenic](#), quatre fois moins abondant que le [thorium](#). Il se trouve partout à l'état de [trace](#), y compris dans l'[eau de mer](#).

C'est un [métal lourd radioactif](#) (émetteur [alpha](#)) de [période](#) très longue (~4,5 milliards d'années pour l'[uranium 238](#) et ~700 millions pour l'[uranium 235](#)). Sa faible radioactivité, additionnée à celle de ses descendants dans la [chaîne de désintégration](#), génère une puissance de 0,1 [Watt](#) par tonne, ce qui en fait, avec le [thorium](#) (quatre fois plus abondant, mais trois fois moins radioactif), la principale source de chaleur qui tend à maintenir les hautes températures du [manteau terrestre](#), en ralentissant de beaucoup son refroidissement.

L'[isotope](#) ²³⁵U est le seul [isotope fissile](#) naturel. Sa [fission](#) libère une énergie voisine de 200 [MeV](#) par atome fissionné. Cette énergie est plus d'un million de fois supérieure à celle des [combustibles fossiles](#) pour une masse équivalente. De ce fait, l'uranium est devenu la principale matière première utilisée par l'[industrie nucléaire](#).

Les réserves 3P (prouvées + probables + possibles) d'uranium étaient estimées par l'[AIEA](#) à 5,4 millions de tonnes dans le monde en 2009⁷ réparties essentiellement entre l'[Australie](#) (31 %), le [Kazakhstan](#) (12 %), le [Canada](#) (9 %) et la [Russie](#) (9 %) ; la production mondiale s'est élevée quant à elle à environ 50 000 tonnes en 2009⁸ répartis entre le Kazakhstan (28 %), le Canada (20 %), l'Australie (16 %), la [Namibie](#) (9 %), la Russie (7 %), le [Niger](#) (6 %) et l'[Ouzbékistan](#) (5 %).

Sommaire

- [1 Uranium naturel](#)
 - o [1.1 Abondance](#)

- o [1.2 Dans la mer et les eaux naturelles](#)
- o [1.3 Découverte](#)
- o [1.4 Gisements et exploitation](#)
- o [1.5 Procédé de synthèse](#)
- [2 Propriétés](#)
 - o [2.1 Propriétés radiologiques](#)
 - [2.1.1 Produit fissible naturel](#)
 - [2.1.2 Les isotopes de l'uranium naturel](#)
 - [2.1.3 Activité massique](#)
 - o [2.2 Propriétés chimiques](#)
 - o [2.3 Dérivé organo-uranien](#)
- [3 Applications](#)
 - o [3.1 Utilisations historiques](#)
 - o [3.2 Industrie nucléaire](#)
 - o [3.3 Contrôle des matières nucléaires](#)
 - o [3.4 Uranium appauvri](#)
- [4 Toxicité](#)
 - o [4.1 Toxicité chimique](#)
 - o [4.2 Radiotoxicité](#)
 - o [4.3 Effets sur la reproduction](#)
 - o [4.4 Effets sur le développement](#)
 - o [4.5 Normes](#)
- [5 Prix](#)
- [6 Notes et références](#)
- [7 Voir aussi](#)
 - o [7.1 Articles connexes](#)
 - o [7.2 Liens externes](#)

Propriétés radiologiques [[modifier](#)]

Article connexe : [médecine nucléaire](#).

Produit fissible naturel [[modifier](#)]

L'[uranium 235](#) est le seul [nucléide](#) naturel qui soit [fissile](#), ou [fissible](#), autrement dit il peut, par capture de neutron, se scinder en deux noyaux fils avec émission de neutrons ([fission nucléaire](#)). Par suite, l'[uranium enrichi](#) en cet isotope est aujourd'hui utilisé comme [combustible nucléaire](#) dans les [réacteurs nucléaires](#) (voir [cycle du combustible nucléaire](#)) ou encore dans les [armes nucléaires](#), que ce soient les [bombes atomiques](#), ou comme amorce dans les [bombes H](#).

Au contraire de l'uranium 235, l'[uranium 238](#), lorsqu'il capture un [neutron](#), ne fissionne pas (sauf [neutrons rapides](#)). Il devient de l'[uranium 239](#) instable qui, par [désintégration](#) β^- , va se transformer en [neptunium 239](#). Or ce dernier est lui aussi [radioactif](#) β^- , et va alors donner naissance à un nouveau [noyau](#), le [plutonium 239](#). Ce [radioisotope](#) est fissile, comme l'uranium 235. L'uranium 238 est un [isotope fertile](#), qui peut produire des produits fissiles.

L'[uranium 234](#) n'est, lui, ni fissile, ni fertile, et provient de la [décomposition radioactive](#) de l'uranium 238 comme indiqué dans la précédente section.

La fission d'un atome d'uranium 235 libère de l'ordre de 200 [MeV](#) (la valeur exacte dépendant des [produits de fission](#)). De même, la fission d'un atome de plutonium 239 libère de l'ordre de 210 [MeV](#). Ces valeurs sont à comparer avec celles de la combustion de carburants fossiles, qui libèrent de l'ordre de 5 [eV](#) par molécule de [CO₂](#) produit²²: l'ordre de grandeur des énergies libérées par les combustibles nucléaires est un million de fois plus importante que celle des énergies fossiles chimiques.

Le potentiel d'énergie de l'uranium n'est exploité que très partiellement dans les réacteurs actuels, mais la différence reste nette : 1 kg d'uranium naturel permet la production d'environ 500 000 [MJ](#)²³ dans un réacteur conventionnel, à comparer avec les 49 [MJ](#) obtenus par 1 kg de [gaz naturel](#), 45 [MJ](#) pour 1 kg de [pétrole](#), et 20 à 30 [MJ](#) pour le [charbon](#)²⁴.

Les isotopes de l'uranium naturel [\[modifier\]](#)

L'uranium a 17 [isotopes](#), tous [radioactifs](#), dont 3 seulement sont présents à l'état naturel : ²³⁸U ; ²³⁵U et ²³⁴U. On trouve dans une tonne d'uranium naturel pur 7,1 kg d'uranium 235 et 54 g d'uranium 234, le reste étant de l'uranium 238.

- Les isotopes [238](#) et [235](#) ont beaucoup d'applications, militaires notamment, mais aussi civiles, comme, par exemple, la datation de l'âge de la Terre à partir de la [datation radiométrique](#) à l'[uranium-plomb](#) ou à l'[uranium-thorium](#).

Quelles que soient les teneurs en uranium des milieux, les proportions entre les deux principaux isotopes formant l'uranium naturel sont pratiquement les mêmes : [²³⁸U](#) : 99,28 % ; [²³⁵U](#) : 0,71 %.

La proportion d'[²³⁵U](#) décroît à l'échelle des temps géologiques. Leur rapport de formation dans une supernova est de un à 1,65²⁵, c'était (approximativement) la proportion de l'uranium présent sur [Terre](#) il y a ~4,5 milliards d'années, ce qui est juste inférieur à l'âge de la formation de ces isotopes (voir [formation et évolution du système solaire](#)).

Il y a deux milliards d'années, lors de la période de fonctionnement du [réacteur nucléaire naturel d'Oklo](#), la proportion d'[²³⁵U](#) était encore de près de 4 %, ce qui a permis à ce gisement d'atteindre la criticité, lors de la précipitation des composés dissouts formant le nouveau minerai.

- Le troisième isotope ²³⁴U appartient à la [chaîne de désintégration](#) de l'[²³⁸U](#).

L'isotope 234 est toujours présent sur Terre, à l'état de traces, bien qu'il ait une demi-vie de seulement 245 500 ans ; car il est constamment généré par désintégration radioactive de l'isotope [238](#) (après 3 étapes : une [transition α](#) donnant ²³⁴Th, puis deux [transitions β](#) donnant ²³⁴Pa, puis ²³⁴U). Quand il est à l'équilibre séculaire, la proportion entre [²³⁸U](#) et ²³⁴U est égale au rapport des demi-vies, soit 0,0056 %.

Cependant, les rapports isotopique peuvent varier légèrement d'un gisement à l'autre, entre 0,005 % et 0,006 % pour l'²³⁴U²⁶, du fait d'une légère différence de comportement dans le changement U⁶⁺ ↔ U⁴⁺²⁷. Le rapport isotopique ²³⁴U/[²³⁸U](#) peut être perturbé par différents processus environnementaux, tandis que le

rapport $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ reste assez largement constant¹¹.

L'industrie nucléaire produit deux autres isotopes artificiels de l'uranium, relativement stables à échelle humaine :

- L'isotope 236 est produit en réacteur par irradiation de l'isotope 235, qui dans près de 18 % des cas ne fissionne pas mais absorbe un neutron. Il tend à s'accumuler dans l'uranium de recyclage, dont il augmente fortement la radioactivité, et dont (étant neutrophage) il diminue le potentiel énergétique.
Bien qu'ayant une demi-vie de 23 millions d'années, presque du centuple de celle de l'isotope 234, cet isotope a disparu depuis longtemps dans la nature. Son produit est du thorium 232, qui s'est « confondu » au thorium 232 « initial » et se trouve à présent majoritairement sous cette forme ainsi que des éléments de sa [chaîne de désintégration](#).
- L'isotope 233 est un élément fissile produit en réacteur par irradiation du [thorium](#). Il est à la base du [cycle du thorium](#). Sa demi-vie de 159 000 ans est largement supérieure à celle du plutonium.

Article complet sur <http://fr.wikipedia.org/wiki/Uranium>

Traduction, définitions et compléments :

Jacques Hallard, Ing. CNAM, consultant indépendant.

Relecture et corrections : Christiane Hallard-Lauffenburger, professeur des écoles honoraire.

Adresse : 585 19 Chemin du Malpas 13940 Mollégès France

Courriel : jacques.hallard921@orange.fr

Fichier : ISIS Energie [Thorium the Answer to Clean Energy](#) ? French version.3 allégée
