

Source : <https://www.sortirdunucleaire.org/Le-reacteur-au-thorium-une-nouvelle-impasse>

Réseau Sortir du nucléaire > Informez vous > Nos dossiers et analyses > Les mirages du nucléaire du futur > **Le réacteur au thorium : une nouvelle impasse**

**20 septembre 2016**

# Le réacteur au thorium : une nouvelle impasse

**Après l'EPR, l'ITER... le réacteur au thorium ! Depuis les années 1950, études et expérimentations de réacteurs au thorium ont été menées. Est actuellement étudiée sa faisabilité notamment en Chine et en Inde, mais aussi au Japon, en Norvège, aux États-Unis, en France.**

Les Chinois travaillent actuellement sur le réacteur à *neutrons lents*. Ils projettent d'étudier plus tard celui à *neutrons rapides*, beaucoup plus complexe, étudié actuellement en France.

Les Indiens travaillent sur un réacteur de type Candu alimenté en combustible solide, tandis que les Français étudient le réacteur à combustible liquide. Ne nous ferait-on pas continuellement miroiter de nouveaux réacteurs pour mieux nous faire accepter le nucléaire ? Pour nous faire croire que le nucléaire a encore de l'avenir ? Nous convaincre que sa haute technologie est incontournable pour produire suffisamment d'électricité ? Les promoteurs du réacteur au thorium mettent en avant ses prétendus « immenses avantages » par rapport à nos réacteurs actuels de type REP (Réacteur à Eau Pressurisée) :

- ▶ **Surgénération de la matière fissile** (l'uranium 233) à partir du thorium, aux ressources abondantes ;
- ▶ **Sûreté**, facilitée par l'état liquide du combustible. En cas d'urgence, le combustible s'écoulerait dans un réservoir de vidange immergé dans un bassin d'eau ;
- ▶ **Moindre risque de prolifération** nucléaire ;
- ▶ **Flexibilité** - L'état liquide du combustible permet une grande réactivité du réacteur, dont la puissance pourrait varier de près de 50 % en 10 minutes ;
- ▶ **Production réduite d'actinides mineurs**, et un retraitement sur le site même.

La supériorité du réacteur au thorium sur les réacteurs actuels semble importante. Toutefois, un appareil peut avoir des avantages sur un autre, mais présenter des défauts majeurs. Étudions de plus près cette promesse de réacteur miracle...

## D'abord, quid du thorium ? Où le trouve-t-on ?

---



Galet de Thorium purifié

Le thorium, ou **thorium 232** [1], est un métal lourd radioactif qui appartient à la même famille chimique (actinides) que l'uranium et le plutonium. **Souvent associé aux terres rares**, utilisées dans les nouvelles technologies, il est présent en petites quantités dans la plupart des roches. Il est principalement extrait du minerai de monazite. Ses **ressources, estimées trois fois plus abondantes que celles de l'uranium**, sont assez bien réparties sur la planète, en particulier en Turquie, Inde, Chine, Brésil, États-Unis, Canada, Australie, Afrique du Sud, Norvège. **En France, 8500 tonnes de thorium** [2] sont stockées, et il y a des gisements en Bretagne.

Mais l'abondance d'une matière ne justifie en rien son utilisation. Doit-on continuer à produire de l'électricité avec du charbon ?

## Le thorium, joint à ses descendants, présente une forte radiotoxicité

---

Radioactif, de période [3] 14 milliards d'années, le thorium se désintègre très lentement en émettant des **particules alpha** [4]. Si elles ne sont pas dangereuses au contact de la peau, elles le sont à l'intérieur du corps, après avoir été avalées ou inhalées.

Thorium et uranium – **L'inhalation de thorium est beaucoup plus dangereuse que celle d'uranium naturel**, pour la même quantité de radioactivité ou à poids égal. [5]

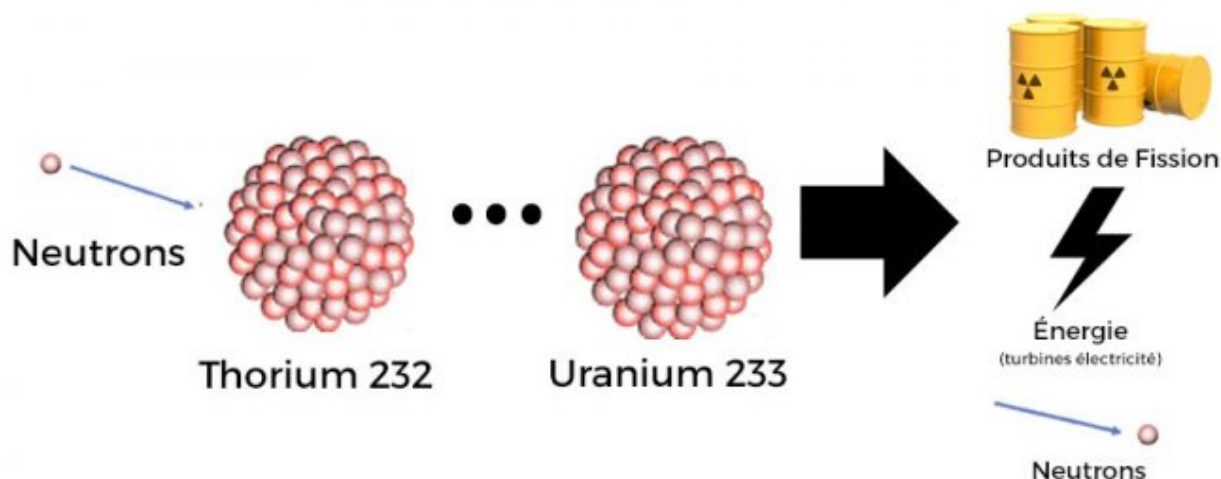
Thorium et plutonium – **Le thorium, joint aux descendants de sa chaîne radioactive, est trois fois plus radiotoxique que le plutonium.** [6]

## Quel est l'intérêt du thorium pour la production électrique ?

Seul, le thorium n'est pas un combustible. L'intérêt est de **le transformer en uranium 233**. Pour cela, il doit être bombardé de **neutrons**. Par capture de neutrons, le thorium 232 se transforme après plusieurs étapes en uranium 233, qui est un élément fissile [7] performant, ce qui facilite les réactions en chaîne.

L'uranium 233 [8] n'existe pas à l'état naturel, il ne peut que se former dans un réacteur.

Schématiquement :



## L'uranium 232, très dangereux produit secondaire de l'uranium 233

L'uranium 233 produit toujours de l'**uranium 232** (période : 70 ans). En se désintégrant, ce dernier génère des éléments qui émettent des rayons gamma très intenses (thallium 208 : 2,6 MeV). Une seule petite particule d'uranium 232 dans un poumon excède la dose limite réglementaire. [9]

Les présences d'uranium 232 et de ses descendants dans l'uranium 233 rendraient nécessaire **l'utilisation de chaînes blindées et robotisées** dans toutes manipulations. [10]

## La filière thorium n'empêcherait pas la prolifération nucléaire

Démarrer et entretenir les réactions nucléaires avec le thorium, nécessite une quantité suffisante de matière fissile : **uranium 233, uranium 235 et/ou plutonium 239**. Tous trois peuvent servir à fabriquer des bombes. L'uranium 233, qui serait produit (surgénération, cf. infra) et stocké, est aussi efficace pour cela que le plutonium. La présence d'uranium 232 limite la possibilité d'utiliser l'uranium 233 pour fabriquer une bombe, sans l'empêcher totalement : « *En principe, la séparation est réalisable, surtout si la sécurité de l'opérateur n'est pas une préoccupation première* » affirme l'ingénieur nucléaire Arjun Makhijani. [11]

Quant au **thorium**, qui se transforme en matière fissile par capture de neutrons, il est l'une des matières visées par le traité sur la non-prolifération des armes nucléaires (TNP).

## Le thorium est sans intérêt pour nos réacteurs actuels

Le fait que le thorium soit utilisable dans différents types de réacteurs, ne signifie pas qu'il soit avantageux pour autant de s'en servir. Son utilisation dans nos réacteurs actuels (REP) [12] est possible mais n'a pas d'intérêt. On resterait avec les déchets, les dangers et les coûts élevés de ce type de réacteur. De plus, la présence de l'uranium 232 et de ses descendants aux radiations très énergétiques, rendrait le combustible utilisé encore plus dangereux, et impossible à retraiter avec les procédés utilisés à La Hague.

## Quid du réacteur au thorium, le réacteur à sels fondus (RSF) ?

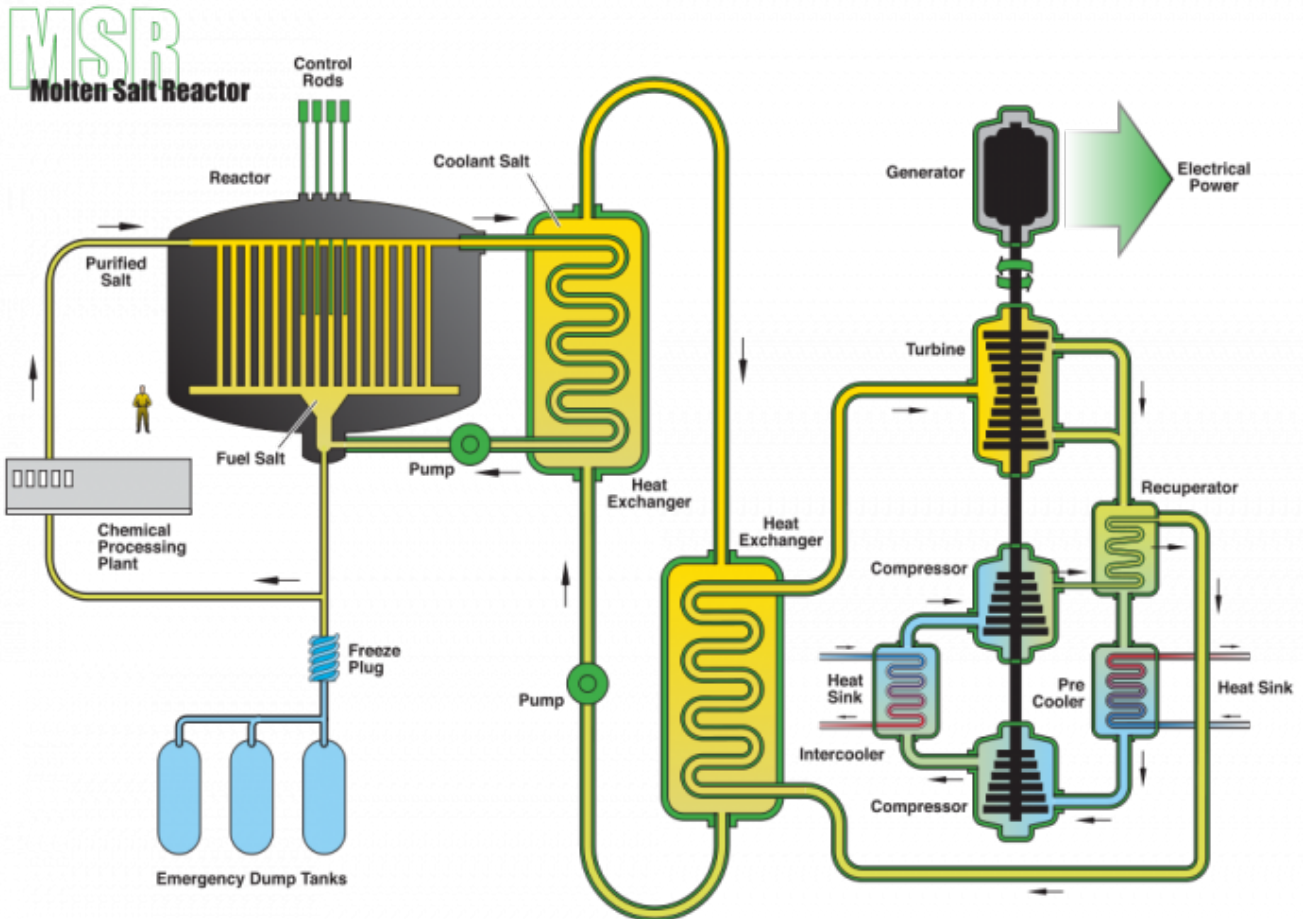


Schéma d'un réacteur à sels fondus (US Department of Energy)

Le **réacteur à sels fondus (RSF)** serait « la voie la plus prometteuse » comme réacteur au thorium. Dans ce type de réacteur, **le combustible est liquide**. Ce sont des sels fondus de **fluorures** [13] de **thorium 232** et **uranium 233** (22,5%) et de lithium (77,5%).

Le RSF contient **18 m<sup>3</sup>** de sels, dont moitié dans le cœur et moitié dans le circuit extérieur (échangeurs de chaleur, tuyauteries, pompes). Malgré leur poids important, une trentaine de tonnes, les sels circulent (pompes) très rapidement et en permanence, faisant le tour du circuit primaire en moins de 4 secondes (problèmes d'abrasion des matériaux). Si le circuit primaire est à pression atmosphérique (REP : 155 bars), en revanche la température est élevée, autour des **700°C** (REP : l'eau sort de la cuve à 300°C). Le RSF aurait une puissance de 3000 mégawatts thermiques et d'environ 1000 mégawatts électriques (puissance moyenne des réacteurs actuels). [14]

Le RSF est conçu pour être **surgénérateur**, c'est-à-dire **générer plus d'uranium 233 qu'il n'en consomme**. Sinon il dépendrait d'autres réacteurs pour lui fournir la matière fissile nécessaire, ce qui n'a pas d'intérêt. La surgénération exige le **traitement régulier des sels afin d'en extraire les produits capturant les neutrons** (ce sont les produits de fission) car ils font baisser la production d'uranium 233. Le retraitement vise à enlever les produits de fission, réinjecter les actinides mineurs, et extraire l'uranium 233 produit en excès (qui est ensuite stocké).

A d'abord été étudié le **RSF à neutrons lents** (dit aussi « à spectre thermique »), le graphite servant à modérer la vitesse des neutrons. Il présentait de graves défauts : volume élevé de combustible à retraiter chaque jour, dégradation du graphite, risques d'incendie. [15]

Le CNRS étudie actuellement le **RSF à neutrons rapides** (dit aussi « à spectre rapide » - en anglais : MSFR, Molten Salt Fast Reactor), sans graphite. **Plus complexe que celui à neutrons lents**, il pose d'importantes contraintes, notamment sur la résistance des matériaux. Neutrons rapides, caractère corrosif de certains produits de fission (en particulier le tellure), haute température... quelle serait la durée du RSF ?

## Le démarrage du RSF : une difficulté majeure

---

Le RSF est conçu pour produire plus d'uranium 233 qu'il n'en consomme. Encore faut-il pouvoir d'abord le charger en quantité suffisante de cet élément. L'uranium 233 n'existant pas à l'état naturel, les chercheurs proposent diverses solutions pour obtenir les 3,6 tonnes [16] nécessaires au démarrage :

Tapisser le cœur d'un REP d'une couverture de thorium, puis récupérer l'uranium 233 produit. Des dizaines d'années seraient nécessaires pour obtenir la quantité requise au démarrage d'un 1er RSF [17]. Et avec un retraitement de 40 litres de sels par jour (cf. infra), il faudrait 56 ans pour démarrer un 2ème RSF avec l'uranium 233 extrait de ce 1er RSF. [18]

Ou encore démarrer un RSF où le thorium serait transformé par un mix : plutonium et actinides mineurs des REP, mélangés avec de l'uranium 233 ou avec de l'uranium enrichi à 13 %. [19]

Il n'est possible d'utiliser ni le plutonium seul (il en faudrait 13 tonnes, quantité non suffisamment soluble dans les sels), ni l'uranium enrichi seul, qui devrait être trop enrichi (à 25 %). [20]

## Le RSF générerait d'importants déchets radioactifs

---

Le RSF générerait d'importants déchets radioactifs qu'il faudrait traiter, stocker, surveiller pendant des centaines d'années, des milliers d'années pour certains.

Ce seraient des **produits de fission**, en natures et quantités similaires à celles des réacteurs actuels. Hautement radioactifs pendant des centaines d'années, ces déchets sont classés dans la catégorie des plus dangereux : HAVL, Haute Activité à Vie Longue. Absorbent de neutrons, les produits de fission entravent la formation d'uranium 233, d'où la nécessité de les retirer. Gazeux, ils seraient extraits en continu par bullage d'hélium. Pour les autres qui sont solubles, 40 litres de sels seraient pompés chaque jour, d'où ils seraient extraits.

Les **actinides** seraient remis dans le cœur sauf 0,1 % qui sortiraient en déchets, n'ayant pu être séparés des produits de fission. Le thorium produit un actinide mineur très radiotoxique, le **protactinium 231** (période : 33 000 ans), qui n'existe qu'à l'état de traces dans la nature.

Peu d'actinides mineurs sortiraient en déchets réguliers, mais le circuit primaire en contiendrait une forte quantité.

Petit calcul... Un RSF d'une puissance de 1000 MWe requerrait une charge initiale d'environ 3,6 tonnes d'uranium 233 et 26 tonnes de thorium. En fonctionnement, à l'équilibre, il y aurait près d'1 % d'actinides mineurs [21], soit environ 300 kg. À comparer avec les 960 kg d'actinides mineurs compris dans les combustibles usés déchargés des REP chaque année, soit 17 kg par REP (960/58).

La présence d'uranium 233 implique celle **d'uranium 232 et de ses descendants** (cf. supra). D'autres éléments se forment également. Le thorium n'est pas fissile, mais fissionne, il peut fissionner sous un flux de neutrons rapides et générer des produits à période radioactive longue, comme le **technétium 99** [22] de période 215 000 ans.

Il est avancé que le RSF nous débarrasserait des déchets nucléaires les plus difficiles à gérer. Mais une grande partie de ceux déjà produits sont vitrifiés et ne sont pas extractibles. En revanche, le RSF créerait des déchets radioactifs supplémentaires.

De plus, la surgénération n'est possible qu'avec l'uranium et le thorium. Si le RSF était alimenté avec du plutonium ou d'autres actinides produits par le REP, il ne pourrait plus être surgénérateur. [23]

## Sûreté ?

---

En cas d'urgence, les sels s'écouleraient dans un réservoir... et après ? Le problème reste entier. Que fait-on de tous ces produits hautement radioactifs ? Comment en évacuer continûment et sûrement la chaleur ? Et si le réservoir est endommagé ? Le cœur peut aussi être endommagé, le combustible ne pas s'écouler...

En 2015, la commission européenne a alloué plus de 3 millions d'euros (pour 4 ans) au programme SAMOFAR (Safety Assessment of a Molten Fast Reactor) d'évaluation de la sûreté du RSF. [24]

## Un réacteur surfait, qui n'est encore qu'un concept théorique

---

Ce n'est que depuis 2008 que le RSF à neutrons rapides fait partie des 6 systèmes retenus par le Forum International Génération IV. Étudié au Laboratoire de Physique Subatomique de Grenoble, ce type de réacteur « *n'existe aujourd'hui qu'à l'état de concept théorique* » [25]. Les récentes publications du CNRS [26] l'attestent. Aucun réacteur de démonstration de ce type, même de faible puissance, n'a encore fonctionné. Sont ressassées les qualités de ce réacteur... mais technologiquement, **le RSF est-il faisable ?** Dans quel délai ? À quel coût ?

Délai - « *en partant du principe que la décision de passer au cycle thorium est prise vers 2040 - hypothèse prenant en compte la durée de vie des réacteurs actuels - le MSFR (RSF à neutrons rapides) est introduit à l'échelle industrielle en 2070* » estime Daniel Heuer [27], directeur de recherche au CNRS.

Coût - « *Nous avons l'espoir qu'il soit moins cher qu'un réacteur à eau pressurisée (...)* Cela reste à vérifier » poursuit-il [28].

En France, ni EDF-Areva, ni le Commissariat à l'Énergie Atomique ne semblent beaucoup s'y intéresser. Les premiers souhaitent avant tout rentabiliser les infrastructures industrielles de la filière uranium. Le second développe un prototype de surgénérateur au sodium (Astrid, 600 MWe) qui a bénéficié de 650 millions d'euros dans le cadre du grand emprunt national de 2010. Ce réacteur est l'axe prioritaire de recherche et développement. Est juste assurée « *une veille technologique* » pour le RSF [29], d'où les faibles crédits alloués à son étude.

L'Ademe [30] a publié le 22 octobre 2015 le rapport « *Vers un mix électrique 100 % renouvelable en 2050* » [31]. Il est montré que le scénario 100 % renouvelable est tout à fait réalisable, pour un coût raisonnable. Le RSF ? Le Réacteur où Se Fourvoyer, encore une impasse.

## Notes

- [1] Le noyau de l'atome de thorium 232 est constitué de 90 protons et 142 neutrons.
- [2] 6200 tonnes à La Rochelle, provenant du traitement de monazite jusqu'en 1994 par Solvay (ex Rhodia) pour l'extraction de terres rares, et 2300 tonnes à Cadarache, provenant du traitement de minerai urano-thoranite dans les années 60 par le CEA pour l'extraction d'uranium.
- [3] *Période* : temps nécessaire pour que la moitié de la masse du thorium se désintègre.
- [4] Une particule alpha est un noyau d'hélium, composé de deux protons et deux neutrons.
- [5] <https://www.fairewinds.org/nuclear-energy-education/thorium-reactors>
- [6] Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR), publication 61, 1990.
- [7] *Élément fissile* : bombardé par des neutrons lents ou rapides, son noyau peut fissionner. Il se divise, éjecte des neutrons, et il y a dégagement d'énergie. Les neutrons éjectés peuvent à leur tour heurter d'autres noyaux... Se produisent ainsi des réactions en chaîne qui émettent beaucoup d'énergie, énergie utilisée pour produire de l'électricité. Dans nos 58 réacteurs, sont utilisées les fissions de l'uranium 235 (aux 2/3), et celles du plutonium 239 (à 1/3).
- [8] Le noyau de l'atome d'uranium 233 est constitué de 92 protons et 141 neutrons. Faiblement radioactif, l'uranium 233 émet des particules alpha. Sa période est de 160 000 ans.
- [9] <https://ieer.org/wp/wp-content/uploads/2012/04/thorium2009factsheet.pdf>
- [10] [https://itese.cea.fr/\\_files/Lettreltese-2010-Printemps-Eclairages-Quel\\_interet\\_pour\\_les\\_reacteurs\\_au\\_thorium.pdf](https://itese.cea.fr/_files/Lettreltese-2010-Printemps-Eclairages-Quel_interet_pour_les_reacteurs_au_thorium.pdf)
- [11] <https://ieer.org/wp/wp-content/uploads/2012/04/thorium2009factsheet.pdf>
- [12] L'oxyde d'uranium enrichi à 4 % en uranium 235 devrait être remplacé par un mélange d'oxyde de thorium et d'oxyde d'uranium enrichi cette fois à 20 %. Cet enrichissement nettement supérieur serait plus coûteux, requerrait beaucoup plus d'uranium naturel, et produirait encore plus d'uranium appauvri.
- [13] Par action de l'acide fluorhydrique sur un métal (ici thorium ou uranium), on obtient un sel, appelé fluorure.
- [14] [https://lpsc.in2p3.fr/images/ActivitesScientifiques/Physique\\_des\\_Reacteurs/PDF/ANUCEN-64-2014\\_StartingModesMSFR.pdf](https://lpsc.in2p3.fr/images/ActivitesScientifiques/Physique_des_Reacteurs/PDF/ANUCEN-64-2014_StartingModesMSFR.pdf)
- [15] [https://energieduthorium.files.wordpress.com/2013/01/transcription\\_daniel\\_heuer\\_thorium\\_et\\_sels\\_fondus1.pdf](https://energieduthorium.files.wordpress.com/2013/01/transcription_daniel_heuer_thorium_et_sels_fondus1.pdf)
- [16]

[https://energieduthorium.files.wordpress.com/2013/01/transcription\\_daniel\\_heuer\\_thorium\\_et\\_sels\\_fondus1.pdf](https://energieduthorium.files.wordpress.com/2013/01/transcription_daniel_heuer_thorium_et_sels_fondus1.pdf)

[17] <https://www.paristechreview.com/2013/03/12/thorium-sels-fondus/>

[18] <https://www.youtube.com/watch?v=M4MgLixMrz8>

[19] <https://www.youtube.com/watch?v=M4MgLixMrz8>

[20] <https://www.youtube.com/watch?v=M4MgLixMrz8>

[21]

<https://lpsc.in2p3.fr/index.php/fr/groupe-de-physique/enjeux-societaux/physique-des-reacteurs/systemes-et-scenarios/rsf-reacteurs-a-sels-fondus/38-activites-scientifiques/physique-des-reacteurs-nucleaires/183-msfr-bibliographie> - Article : D. Heuer, E. Merle-Lucotte, M. Allibert, M. Brovchenko, V. Ghetta, P. Rubiolo , "*Towards the Thorium Fuel Cycle with Molten Salt Fast Reactors*", Annals of Nuclear Energy 64, 421-429 (2014) (PDF)

[22] <https://ieer.org/wp/wp-content/uploads/2012/04/thorium2009factsheet.pdf>

[23] <https://www.paristechreview.com/2013/03/12/thorium-sels-fondus/>

[24] <https://energieduthorium.fr/tag/reacteur/>

[25] <https://www.paristechreview.com/2013/03/12/thorium-sels-fondus/>

[26]

<https://lpsc.in2p3.fr/index.php/fr/groupe-de-physique/enjeux-societaux/physique-des-reacteurs/systemes-et-scenarios/rsf-reacteurs-a-sels-fondus/38-activites-scientifiques/physique-des-reacteurs-nucleaires/183-msfr-bibliographie>

[27] <https://www.paristechreview.com/2013/03/12/thorium-sels-fondus/>

[28] <https://www.paristechreview.com/2013/03/12/thorium-sels-fondus/>

[29] <https://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-reacteurs-nucleaires-de.html>

[30] L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie est un établissement public sous tutelle des ministères de l'Écologie et de la Recherche.

[31] <https://www.ademe.fr/mix-electrique-100-renouvelable-analyses-optimisations>