

LE THORIUM

RÉSUMÉ

Le thorium a été considéré depuis le développement de l'ère nucléaire comme un combustible potentiel pouvant compléter, voire se substituer, à l'uranium dont on pouvait craindre à l'origine la rareté. En effet, ce matériau est environ 4 fois plus abondant dans la croûte terrestre.

Cependant, le thorium naturel existant sur terre (Th-232), malgré ses qualités, ne peut pas constituer une véritable alternative à l'uranium comme combustible nucléaire car, contrairement à celui-ci, il ne possède pas naturellement d'isotope fissile. Il permet simplement d'en générer un, l'uranium (U-233) dans un réacteur nucléaire.

L'intérêt majeur d'un combustible au thorium laisse envisager des perspectives intéressantes dans la surgénération grâce à des réacteurs à neutrons lents d'un type nouveau qui nécessiterait beaucoup moins de matière fissile que celle nécessaire pour les réacteurs à neutrons rapides classiques.

Toutefois, malgré l'existence d'exemples concrets d'utilisation du thorium en réacteur dans le passé, et plus récemment dans un programme indien [PFBR : Prototype Fast Breeder Reactor], l'expérience industrielle sur ce cycle reste aujourd'hui limitée. Elle est même pratiquement inexistante sur l'aval du cycle (traitement et recyclage).

Ce cycle au thorium nécessiterait aussi de reconstruire une grande partie des procédures et des multiples réglementations ou normes du monstrueux référentiel de sûreté nucléaire laborieusement établi depuis plus de 50 ans.

1. LA VOIE DU THORIUM

Le Thorium de numéro atomique 92 se trouve dans la nature sous la forme de son isotope de masse 232 et de symbole ^{232}Th . Il est radioactif avec une période de 14 milliards d'années ; émetteur de rayonnement alpha, il est en équilibre avec ses descendants, en particulier ^{228}Ac , émetteur gamma. Il n'est pas fissile par les neutrons lents et ressemble, de ce point de vue, à l'Uranium 238.

Contrairement à l'uranium naturel, le thorium naturel ne possède qu'un seul isotope, le thorium 232 (Th-232), qui n'est pas fissile par des neutrons lents (aussi appelés « thermiques »). Tous les autres isotopes du thorium créés artificiellement ne le sont pas non plus (ou très peu) et, quand ils le sont, ils ont une période radioactive très courte.

C'est cependant un isotope fertile car, lorsqu'il absorbe un neutron, il génère un isotope fissile : l'uranium 233 (U-233), via les réactions nucléaires suivantes :

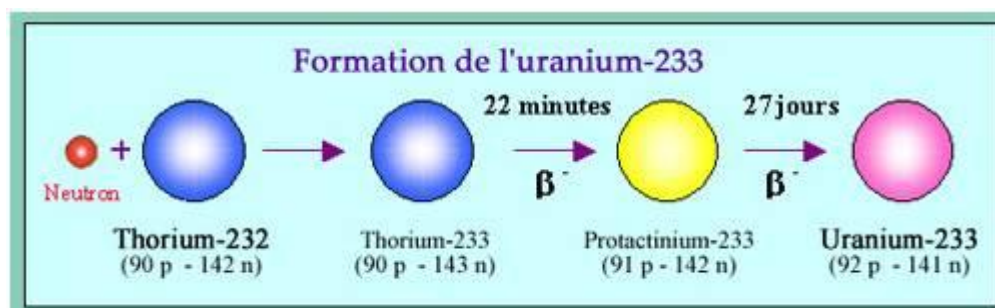


Figure 1 : Schéma de la formation de l'uranium-233 (fissile) à partir du thorium-232 (fertile)

Or, l'U-233 est le meilleur des isotopes fissiles qui existent pour des neutrons lents (ou thermiques), et c'est là l'intérêt majeur du cycle au thorium. En revanche, une réaction en chaîne ne peut évidemment pas être entretenue avec uniquement du Th-232 (contrairement à l'uranium naturel qui contient 0,71 % d'U-235 fissile). Il faut donc lui adjoindre une matière fissile (U-235, plutonium, ou U-233).

Dans ce cas seulement, le thorium introduit en réacteur avec cette matière fissile peut générer de l'U-233, qui, peut « brûler » (fissionner) in situ ou bien être recyclé comme le plutonium.

C'est le cycle au thorium qui n'est donc pas une alternative au cycle classique à l'uranium, mais un éventuel complément, tout au moins à échéance prévisible.

En effet, il faut d'abord que des quantités suffisantes de matières fissiles soient disponibles (U-235 et/ou Pu-239) pour que ce processus de génération d'U-233 à partir du thorium puisse être d'abord initié puis développé à grande échelle. Sous réserve bien entendu de recycler l'U-233 résiduel contenu dans les combustibles usés (comme cela est fait en France pour le plutonium dans le cycle uranium).

Dans le cycle de formation de l'U-233 ci-dessus, le Th-232, par capture de neutrons, se transmute en ^{233}U qui a des propriétés neutroniques de fission proches de celles de ^{235}U et de ^{239}Pu . Le cycle $^{232}\text{Th} - ^{233}\text{U}$ a donc des propriétés analogues à celles du cycle $^{238}\text{U} - ^{239}\text{Pu}$. Il y a toutefois plusieurs différences importantes entre les deux cycles :

- Le cycle $^{232}\text{Th} - ^{233}\text{U}$ peut être surgénérateur avec des neutrons thermiques, car la fission produit plus de neutrons que dans le cycle $^{238}\text{U} - ^{239}\text{Pu}$ qui exige des neutrons rapides pour atteindre la surgénération. Par contre en en spectre rapide, le cycle $^{238}\text{U} - ^{239}\text{Pu}$ a de meilleurs taux de surgénération que le cycle $^{232}\text{Th} - ^{233}\text{U}$.
- Les réacteurs utilisant le cycle $^{232}\text{Th} - ^{233}\text{U}$ produisent beaucoup moins de transuraniens (Neptunium, Américium, Curium) que le cycle $^{238}\text{U} - ^{239}\text{Pu}$, lesquels sont des déchets radiotoxiques de longue durée de vie.

2. CARACTÉRISTIQUES DU THORIUM

2.1. ABONDANCE

Le thorium naturel est un élément relativement abondant sur terre avec une concentration moyenne de 7,2 ppm dans la croûte terrestre. Cette valeur est nettement plus élevée que pour l'uranium (2,5 à 3 ppm), ce qui résulte de la très longue période radioactive du Th-232 (14,1 milliards d'années) par rapport à 4,5 milliards d'années pour l'U-238.

Néanmoins, cela ne signifie pas pour autant que les réserves exploitables de thorium soient deux ou trois fois supérieures à celles de l'uranium. En fait, en raison de ses usages jusqu'à présent limités à des applications spécifiques, il n'y a jamais eu de vaste prospection du thorium de sorte que des estimations fiables des réserves mondiales de thorium ne sont pas actuellement disponibles.

Sachant que seulement 60 tonnes d'uranium environ sont fissionnés par an en France pour produire près des trois-quarts de l'électricité du pays, le « livre rouge » de l'AIEA-OCDE sur l'uranium publiée en 2009 affiche une valeur de 3,6 millions de tonnes pour la ressource mondiale totale en thorium. Il s'agit de la somme des ressources dites « identifiées », dont le coût d'extraction serait inférieur à 80 US\$/kg, estimées à 2,2 millions de tonnes, et des ressources dites « pronostiquées », sans précision sur le coût d'extraction, estimées à 1,4 million de tonnes.

Les principaux pays détenteurs de ressources en thorium sont l'Inde, l'Australie, les États-Unis, le Canada et, dans une moindre mesure, l'Afrique du Sud. Toutefois, dans l'inventaire AIEA-OCDE, des pays comme la Norvège (qui étudie le cycle au thorium), l'Égypte, le Venezuela, la Russie et la Chine figurent également en bonne place, avec au moins 100.000 tonnes de ressources.

La plus grande source de thorium est la monazite minérale (phosphate), qui est par ailleurs une ressource primaire de terres rares. On trouve aussi le thorium dans la thorianite minérale (dioxyde de thorium) et certaines quantités de thorium ont ainsi été récupérées à partir des veines et dépôts de carbonate ignées appelées carbonatites.

En résumé, les quantités de thorium qui pourraient être extraites du sol dans des conditions industrielles raisonnables, se chiffrent certainement à plusieurs millions de tonnes et sont probablement au moins du même ordre de grandeur que celles de l'uranium. Si un cycle fermé du thorium était déployé un jour à une grande échelle industrielle, les réserves de thorium ne sont pas un problème puisque, comme l'U-238, c'est un isotope fertile qui peut être recyclé.

2.2. RADIO-TOXICITÉ DES DÉCHETS

Au-delà de quelques siècles de décroissance radioactive, la radiotoxicité des déchets nucléaires est dominée par celle des noyaux lourds radioactifs alpha produits par des captures successives de neutrons par les noyaux lourds du combustible nucléaire (voir Figure 2).

Dans le cas des surgénérateurs utilisant le cycle uranium-plutonium, ces deux derniers éléments sont complètement utilisés et ne concourent que très peu (pertes de retraitement) à la radiotoxicité des déchets qui est, de ce fait, deux ordres de grandeur plus faible que dans le cas des réacteurs REP classiques. En d'autres termes, à production d'énergie égale, les besoins de stockage géologique seront près de 100 fois plus faibles pour un ensemble de surgénérateurs uranium-plutonium que dans la pratique actuelle.

L'utilisation du cycle thorium-uranium est encore plus favorable de ce point de vue, car le thorium 232 ayant un nombre de masse de six unités inférieures à celui de l'uranium 238, la production des actinides mineurs (Neptunium, Américium, Curium), à l'origine de l'essentiel de la radiotoxicité des déchets du cycle uranium-plutonium, est fortement réduite.

La Figure 2 ci-dessous montre que la radiotoxicité des déchets du cycle thorium- uranium est beaucoup plus faible que celle du cycle uranium-plutonium pendant les premiers 10.000 ans. En particulier, la faiblesse de la radioactivité de ce cycle au début du stockage permettrait de grandes économies sur la dimension et donc le coût de celui-ci. Par ailleurs, un réacteur rapide U 233-thorium serait un bon incinérateur d'actinides mineurs.

À noter cependant que si un enrichissement supérieur à 20% était pros crit pour des raisons de non-prolifération, on retrouverait une quantité non négligeable d'actinides dans le cycle uranium-thorium.

Radiotoxicité (R(t) des rejets d'actinides à l'équilibre

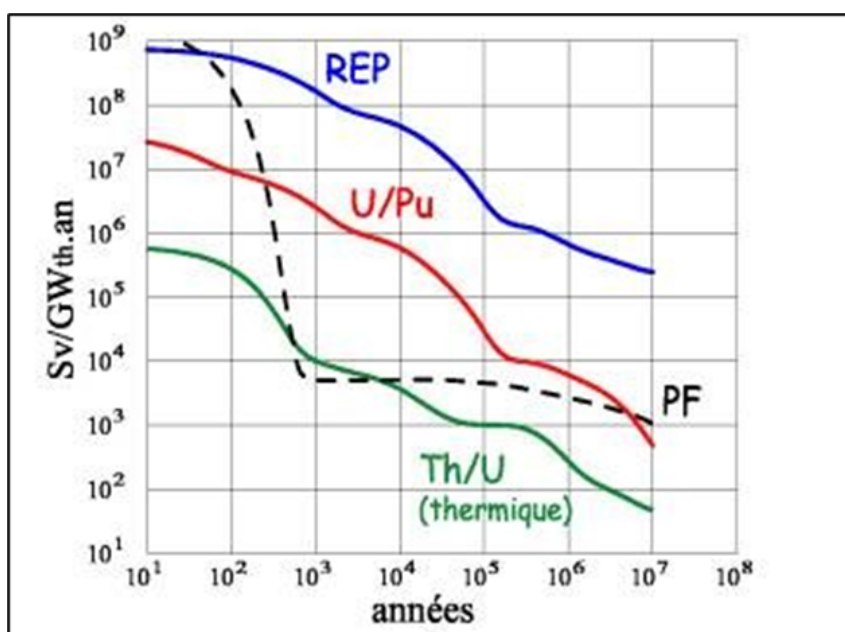


Figure 2 : Evolution temporelle de la radiotoxicité des déchets de haute activité (actinides) pour différents cycles

- REP : Cas des combustibles REP sans retraitement
- U/Pu : Cas de la surgénération par le cycle $^{238}\text{U} - ^{239}\text{Pu}$
- Th-U : Cas de la surgénération par le cycle $^{232}\text{Th} - ^{233}\text{U}$
- PF : Radiotoxicité des produits de fission

Voir : <https://cpdp.debatpublic.fr/cdpd-dechets-radioactifs/docs/pdf/cahiers-d-acteurs/sfpdefweb.pdf>

3. CYCLE DU COMBUSTIBLE AU THORIUM

3.1. RÉGÉNÉRATION (SURGÉNÉRATION) DE L'URANIUM 238

Dans le cycle thorium-uranium la surgénération peut être obtenue aussi bien avec des neutrons rapides qu'avec des neutrons lents. Les réacteurs surgénérateurs thorium-uranium à neutrons lents ne nécessitent qu'un faible inventaire d'uranium 233, de l'ordre de 1 tonne. Les temps de doublement théoriques sont équivalents à ceux des surgénérateurs uranium-plutonium à neutrons rapides.

Avec les neutrons rapides la surgénération est plus difficile que pour le cycle uranium-plutonium. Elle exige des inventaires initiaux élevés. Il s'ensuit que les temps de doublement (le temps au bout duquel le réacteur a produit deux fois plus de noyaux fissiles que n'en contenait son chargement initial) deviennent très grands.

En pratique, les réacteurs thorium-uranium à neutrons rapides seront des réacteurs simplement régénérateurs. Ils pourraient être du même type que les réacteurs rapides utilisant le cycle uranium-plutonium.

3.2. TRAITEMENT DU COMBUSTIBLE POUR RECYCLAGE

En ce qui concerne le retraitement du combustible (jusqu'aux déchets), le thorium présente des inconvénients :

- Nécessité de 2 usines de retraitement. Le thorium n'étant pas fissile, il faut amorcer le cycle avec du plutonium, ou de l'uranium très enrichi en isotope 235. Or la voie uranium très enrichi en uranium 235 entraîne des risques de prolifération. Le plutonium ne peut provenir que de réacteurs à uranium, ce qui implique de disposer de deux usines de retraitement, avec deux technologies différentes : une pour le cycle uranium/plutonium (voie aqueuse) et une pour le cycle thorium/uranium 233 (voie pyro-chimique).
- Le combustible thorium/uranium 233 irradié contient de l'uranium 232, source de Tl 208, émetteur d'un rayonnement gamma de haute énergie (2,6 MeV) très pénalisant dans l'usine de fabrication de combustible (nécessité de protections lourdes). À noter que cet inconvénient n'existe que dans la fabrication de combustible solide ; il est « noyé » dans le bruit de fond hautement radioactif d'une installation de retraitement intégrée auprès d'un réacteur à sel fondu.

Des combustibles ont été fabriqués et utilisés dans différents réacteurs, dont le REP expérimental américain de Shippingport (Pennsylvanie), le RHT de Fort Saint Vrain (Colorado) et le THTR allemand.

3.3. CHARGEMENT DU COMBUSTIBLE EN CONTINU

Les produits de fission empoisonnent de façon beaucoup plus efficace les réacteurs à neutrons lents que les réacteurs à neutrons rapides. Pour conserver un temps de doublement intéressant, il est donc nécessaire de minimiser les captures dans les produits de fission en les extrayant le plus souvent possible. C'est pourquoi la technologie des réacteurs la plus appropriée est avec chargement/déchargement du combustible en continu, comme les réacteurs CANDU ou les réacteurs à boulets refroidis au gaz et visant les hautes températures.

Une autre solution a été proposée dans les années 60 sous la forme de « réacteurs à sels fondus » dans lesquels le combustible est un sel fondu. Il était proposé de recycler le sel en ligne, au prix d'une grande complexité du réacteur qui devient une usine chimique. L'abandon de l'objectif d'un faible temps de doublement permet d'envisager des réacteurs à sel fondu où le retraitement en ligne est très simplifié.

Des études théoriques sur les réacteurs à sels fondus sont effectuées en France, particulièrement au CNRS. Ces réacteurs ont des propriétés très intéressantes aussi bien en ce qui concerne la sûreté que la non-prolifération. Le combustible s'y présente sous forme d'un mélange de fluorures de thorium, d'uranium, de béryllium et de lithium. Le combustible liquide passe par des échangeurs de chaleur.

Un schéma particulièrement intéressant consisterait à compléter un parc de régénérateurs thorium-uranium par des réacteurs rapides utilisant un cœur régénérateur uranium-plutonium entouré d'une couverture en thorium qui fournirait l'excédent d'uranium 233 nécessaire à la croissance du parc. Un tel schéma est envisagé par les Indiens qui ont l'expérience des réacteurs à eau lourde de type CANDU et construisent un RNR sodium.

4. SÛRETÉ DES RÉACTEURS AU THORIUM

4.1. PRINCIPE GÉNÉRAL

Sur le plan de la sûreté, il n'y a pas de différence significative avec les réacteurs à uranium/plutonium :

- les conditions de contrôle de la réaction en chaîne sont équivalentes ;
- les puissances résiduelles après arrêt de la réaction en chaîne sont identiques, et donc les conditions d'extraction de cette puissance résiduelle sont identiques ;
- l'essentiel de la radioactivité étant due aux produits de fission, les conditions de confinement de la radioactivité sont identiques.

4.2. RÉACTEURS À SELS FONDUS

Des études théoriques sur les réacteurs à sels fondus sont effectuées en France, particulièrement au CNRS. Ces réacteurs ont des propriétés très intéressantes aussi bien en ce qui concerne la sûreté que la non-prolifération. Le combustible s'y présente sous forme d'un mélange de fluorures de thorium, d'uranium, de béryllium et de lithium.

Le combustible liquide passe par des échangeurs de chaleur. L'équipe du CNRS (Voir https://in2p3.hal.science/in2p3-00025201v1/file/Materiaux_de_structure_RSf_decembre_2005.pdf) a démontré qu'il était possible de concevoir des réacteurs rapides à sels fondus dont les coefficients de température et de vide seraient fortement négatifs.

Par ailleurs, il est envisageable, en cas d'élévation inacceptable de la température du combustible, de vider tout ou partie du combustible dans un réservoir tel que le système devienne automatiquement sous-critique, et donc que la réaction en chaîne s'arrête d'elle-même. Des réacteurs à sels fondus à sûreté passive, se mettant en condition sûre sans intervention humaine, seraient donc parfaitement réalisables.

5. CONCLUSION

La filière thorium offre une alternative au cas où les filières uranium à spectre rapide rencontreraient des obstacles à leur développement. Le système nucléaire serait alors le suivant :

- Un parc de réacteurs à eau produisant du plutonium ;
- Un parc de réacteurs à sels fondus à neutrons thermiques, amorcés avec le plutonium produit dans les premiers.

Il serait regrettable que des orientations trop hâtivement décidées, et en absence de véritable débat scientifique et technique concernant les réacteurs et cycles du futur, soient prises sous prétexte que certaines orientations seraient trop éloignées des pratiques actuelles. La période se prête à une réflexion approfondie et ouverte. Les études « papier » ne suffisent pas et il est nécessaire que des maquettes de petite dimension de réacteurs prometteurs soient réalisées dans le cadre de collaborations internationales. C'est ainsi qu'il serait très intéressant de reprendre le programme sur les réacteurs à sels fondus initié dans les années 60 par le laboratoire d'Oak Ridge en réalisant une maquette de quelques dizaines de MW.

Le stock de ^{233}U nécessaire pourrait être facilement constitué en remplaçant quelques combustibles MOx classique par des combustibles MOx thoriés. Enfin la France pourrait proposer une collaboration au Canada et à l'Inde pour évaluer les potentialités des réacteurs CANDU et à sels fondus vis-à-vis du cycle thorium-uranium 233.

Les réserves et ressources d'uranium reconnues comme assurées et possibles permettent d'assurer l'approvisionnement des réacteurs actuels pendant environ 2 siècles, si la consommation reste stable. Par contre si, comme il est probable et souhaitable, elle croît de manière importante dans le monde, les réserves seront épuisées en quelques dizaines d'années dans le contexte technologique actuel. Heureusement nous disposons de plusieurs solutions pour surmonter ce problème : l'extraction de l'uranium de l'océan, et la mise en œuvre de surgénérateurs utilisant les cycles Uranium-Plutonium ou Thorium-Uranium.

6. SOURCES

IN2P3 : <https://in2p3.hal.science/in2p3-00124069/preview/LeTMSR2.pdf>

CEA : http://nucleaire.cea.fr/fr/nucleaire_futur/autres_voies.htm

WIKIPEDIA : Le thorium

LE MONDE DE L'ENERGIE : Combustible nucléaire au thorium : avenir ou délire ? Par Dominique GRENÊCHE, Michel GAY, 24 mai 2024 : <https://www.lemondedelenergie.com>