

Potentiel de l'uranium avec les RNR

Avec les réacteurs à neutrons rapides (RNR), les réserves d'uranium permettraient de produire de l'électricité au rythme actuel de production pendant plusieurs milliers d'années.

Cette affirmation heurte de plein fouet un des arguments des « antinucléaires » relatif au caractère non durable de la production électronucléaire. Cet argument est fondé sur le fait que les quelques 500 réacteurs du parc électronucléaire mondial actuel **utilisent très médiocrement la ressource énergétique uranium**. En effet, en l'état actuel des recherches géologiques, les réserves d'uranium sont évaluées à :

- 1)- 3 500 000 t à un coût inférieur à 130 \$ / kg uranium naturel U,
- 2)- 7 000 000 t à un coût inférieur à 260 \$ / kg uranium naturel U.

Avec les réserves en 1) ci-dessus, le parc électronucléaire peut être alimenté pendant seulement 80 ans environ.

Ce choc de deux points de vue mérite une explication !

L'électronucléaire actuel : des réacteurs à neutrons thermiques

L'uranium naturel U est composé de deux isotopes¹ :

- 99,3% d'uranium U²³⁸,
- 0,7% d'uranium U²³⁵.

Seul l'U²³⁵ est fissile par un neutron avec dégagement d'énergie et émission de 2 à 3 neutrons : ce phénomène permet d'entretenir la réaction en chaîne de fission produisant l'énergie de manière continue dans les réacteurs actuellement en exploitation. Ces réacteurs des 1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} générations sont appelés « réacteurs à neutrons thermiques » parce que l'entretien continu de la réaction de fission en chaîne nécessite le ralentissement des neutrons produits par un élément modérateur². Les principales filières de ces réacteurs à neutrons thermiques sont :

- Les réacteurs à uranium naturel, dits de 1^{ère} génération, où les neutrons sont ralentis par du graphite (Grande Bretagne, France,...) ou par de l'eau lourde (Canada, Inde,...).
- Les réacteurs à uranium légèrement enrichi en U²³⁵ (3 à 5%), dits de 2^{ème} et 3^{ème} générations, où les neutrons sont ralentis par un modérateur moins efficace (mais moins cher) que les deux premiers ci-dessus : l'eau ordinaire. Ces réacteurs, initialement développés aux Etats Unis et en Russie (pays ayant disposé très tôt d'usines d'enrichissement), constituent environ 90% du parc nucléaire mondial actuel, avec les deux filières : réacteur à eau sous pression REP et réacteur à eau bouillante REB.

¹ Isotopes : composants d'un élément ayant des propriétés physiques différentes (masse, nombre de neutrons du noyau de l'atome,...), mais ayant les mêmes propriétés chimiques (nombre de protons et d'électrons).

² Les neutrons émis lors de la fission d'un atome d'uranium sont rapides. Ils sont ralentis par chocs successifs sur des atomes légers du modérateur : par exemple, le carbone C du graphite, l'hydrogène H de l'eau H₂O ou l'isotope deutérium D de l'hydrogène de l'eau lourde D₂O. Etant ralentis au niveau de l'agitation thermique des particules, on les appelle « thermiques ».

L'uranium faiblement enrichi en U^{235} est produit dans des usines d'enrichissement par diffusion gazeuse ou par ultracentrifugation d'un composé gazeux de l'uranium naturel : l'hexafluorure d'uranium UF_6 . Le deuxième procédé, l'ultracentrifugation, supplante progressivement le premier pour son avantage d'être plus économe en énergie ; il présente l'inconvénient de permettre de passer plus facilement d'un uranium faiblement enrichi à un uranium très enrichi en U^{235} (quasi pur, de 90 à 100%), dit de « qualité militaire », parce qu'il permet de réaliser des bombes atomiques (engin dans lesquels la réaction de fission en chaîne se développe de façon explosive). Evidemment, ces usines d'enrichissement produisent d'un côté l'uranium enrichi en U^{235} et de l'autre une grande quantité d'**uranium appauvri en U^{235} à des teneurs de l'ordre de 0,3%, stocké à Bessines sur Gartempe, qui est une énorme ressource énergétique potentielle**³.

On voit donc que les centrales électronucléaires actuelles fonctionnant avec des réacteurs à neutrons thermiques n'utilisent comme « combustible »⁴ (ne « brûlent ») qu'une faible partie de l'uranium naturel, dont l' U^{235} ne constitue que 0,7%.

Mais, comme la fission d'un atome d' U^{235} par un neutron s'accompagne de l'émission de 2 ou 3 neutrons, le maintien de la réaction en chaîne ne nécessite qu'un de ces neutrons : il en reste donc 1 ou 2 en plus. Que deviennent ces neutrons en excès ? Une partie est absorbée par les matériaux de structure du réacteur. La plus grande partie est l'objet d'un autre phénomène physique appelé « capture » : le neutron excédentaire est capturé par le noyau d'un atome U^{238} (constituant 95 à 97% des pastilles « combustibles ») qui se transmute ainsi en un atome d'un élément différent, le plutonium Pu^{239} . **Or, cet atome de Pu^{239} est fissile de manière analogue à l' U^{235} .** Au cours du fonctionnement du réacteur, il s'accumule peu à peu dans le matériau « combustible » : une partie participe à la réaction en chaîne de fission et fournit de l'énergie en complément de celle obtenue par la fission de l' U^{235} ; une autre partie se retrouve dans le combustible usé en fin de cycle (3 à 4 ans en réacteur). Les combustibles usés sont envoyés dans une usine dite de « retraitement » (son activité permet le **recyclage** de matières premières et le traitement des déchets ultimes). Le traitement chimique d'une tonne de combustible usé produit :

- Des matières réutilisables :
 - o 935 kg d'uranium dit de retraitement, avec une teneur en U^{235} encore légèrement supérieure à celle de l'uranium naturel,
 - o 10 kg de plutonium.
- Des éléments considérés comme des déchets ultimes :
 - o 36 kg de produits de fission divers,
 - o 0,8 kg d'actinides (éléments encore plus lourds que le plutonium également formés par le phénomène de capture neutronique : neptunium Np, américium Am, etc...).

Ces déchets ultimes, dits HA-VL (haute radioactivité et vie longue) constituent la part principale de la radioactivité des déchets qui seront stockés en couche géologique profonde.

³ Le stock actuel de 300 000 tonnes d'uranium appauvri en U^{235} à Bessines sur Gartempe constitue une réserve énorme d' U^{238} pour les réacteurs de 4^{ème} génération « surrégénérateurs ».

⁴ « Combustible » : par analogie avec les combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz) produisant de la chaleur par combustion avec l'oxygène de l'air (phénomène chimique), on emploie ce terme « impropre » pour désigner les éléments dans lesquels se produit la chaleur par fission en chaîne d'atomes lourds (uranium, plutonium) par des neutrons (phénomène physique).

L'uranium de retraitement peut être enrichi à nouveau et réutilisé pour fabriquer des éléments combustibles neufs.

Le plutonium peut être recyclé dans des assemblages neufs où il remplace partiellement l' U^{235} : c'est le combustible dit MOX (Mixed Oxyde U-Pu). Mais, ce recyclage n'est possible qu'une fois dans les réacteurs à neutrons thermiques parce que le phénomène de capture de neutrons entraîne l'accumulation d'autres isotopes du plutonium Pu^{240} , Pu^{241} et Pu^{242} qui sont des poisons pour la réaction en chaîne, les isotopes de rang pair, comme l' U^{238} , n'étant pas fissiles par les neutrons thermiques.

L'électronucléaire futur : les réacteurs à neutrons rapides

Très tôt, la question de mieux utiliser le potentiel énergétique de l'uranium naturel s'est posée : pour cela, des piles expérimentales, des prototypes de réacteurs à neutrons rapides ont été construits aux Etats Unis, en Grande Bretagne, en France, en Russie, au Japon, en Inde,... En effet, ces réacteurs à neutrons rapides peuvent utiliser comme combustible le plutonium formé par les réacteurs des générations précédentes. Le cœur de ces réacteurs ne comporte pas de modérateur (graphite, eau ou eau lourde) et, de plus, le fluide caloporteur ne doit pas comporter d'éléments légers susceptibles de ralentir les neutrons. En disposant autour du cœur des « couvertures » d'assemblages « fertiles » en uranium naturel ou appauvri, il a été démontré, et vérifié concrètement au cours des 35 ans de fonctionnement du prototype Phénix en France, que ces réacteurs pouvaient produire plus d'éléments fissiles qu'ils n'en consomment : d'où leur dénomination de « surrégénérateurs ».

Ils permettent d'utiliser la totalité de l'uranium naturel (contenant 99,3% d' U^{238}), et notamment les stocks considérables d'uranium appauvri (donc de l' U^{238} quasi pur) résultant de l'alimentation en uranium faiblement enrichi des réacteurs des 1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} générations⁵.

Pour ces raisons, les travaux sur ces réacteurs à neutrons rapides ont été relancés, à l'initiative du Département de l'Energie des Etats Unis, dans le cadre d'un programme international dit « Forum Génération 4 » auquel participent une dizaine de pays⁶ disposant d'une industrie nucléaire.

Ce programme a fixé les objectifs suivant pour ces réacteurs de 4^{ème} génération :

- Durabilité de la ressource : pouvoir multi-recycler le plutonium et réaliser la transmutation des actinides (Np, Am, ...) formés par captures successives de neutrons à partir de l'uranium⁷ ;
- Sûreté : niveau au moins égal aux options de sûreté des réacteurs de la 3^{ème} génération, y compris les compléments résultant du retour d'expérience de l'accident de Fukushima ;

⁵ De plus, il faut signaler que ces réacteurs à neutrons rapides permettront d'utiliser le thorium Th^{232} fertile qui par capture d'un neutron se transmute en uranium U^{233} fissile de manière analogue à U^{235} et Pu^{239} . Ceci est intéressant car le thorium est plus abondant que l'uranium dans la croûte terrestre : en particulier, l'Inde disposant d'important gisements de thorium (sous forme d'urano-thorianite), a inclus cette perspective dans son programme à long terme de développement de l'électronucléaire.

⁶ Ces pays sont : Canada, Europe (EURATOM), France, Japon, Corée du Sud, Suisse, Etats Unis, Chine, Afrique du Sud et Russie.

⁷ Ceci permettra de réduire la radioactivité et la durée de vie des déchets ultimes (produits de fission + actinides).

- Economie : être compétitifs à service rendu équivalent, en tenant compte que la durabilité de la ressource est un service rendu supplémentaire ;
- Résistance à la « prolifération » militaire : utiliser un combustible inutilisable à des fins militaires, notamment dans les usines de traitement des combustibles.

Après examen de 60 filières envisageables de réacteurs, le groupe « Génération 4 » a retenu de poursuivre le développement de 6 filières dont 4 sont des réacteurs à neutrons rapides :

- SFR (Sodium Fast Reactor), réacteur rapide refroidi au sodium : compte tenu de l'expérience acquise dans cette filière (pile expérimentale Rapsodie, prototypes Phénix et Superphénix), la France est pilote et prépare un nouveau prototype ASTRID (Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration) qui sera construit à Marcoule ;
- LFR (Lead Fast Reactor), réacteur rapide refroidi au plomb : ayant une solide expérience du plomb comme caloporteur, la Russie est pilote ;
- GFR (Gaz Fast Reactor), réacteur rapide refroidi au gaz : depuis dix ans, la France a précisé la recherche appliquée nécessaire et propose un réacteur expérimental ALLEGRO ;
- MSR (Molten Salt Reactor), réacteur à sel fondu : un important travail de recherche appliquée est nécessaire pour surmonter les difficultés technologiques ;
- VHTR (Very High Temperature Reactor), réacteur à très haute température : développé pour la production d'hydrogène ;
- SCWR (Super Critical Water Reactor), réacteur à eau supercritique.

Ce programme doit permettre de mener à leur terme les travaux de recherche, d'étude, d'expérimentation et de développement industriel sur la filière des réacteurs à neutrons rapides. Entrepris dans plusieurs pays, notamment en France, depuis un demi-siècle, ce travail doit déboucher au niveau industriel dans des conditions satisfaisantes de fiabilité, de sûreté et d'économie. Cela présentera deux avantages notables intéressants du point de vue environnemental :

- Multiplier par un facteur de l'ordre de 100 la quantité d'énergie obtenue à partir de la ressource uranium par rapport à la situation actuelle ;
- Participer à la réduction de l'emploi des combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz) pour la production d'électricité, actuellement un des plus gros secteurs d'émission de gaz à effet de serre et de pollutions atmosphériques.

Le 28 novembre 2013

Jean-Michel GAMA