

De quel nucléaire avons-nous besoin ?

Claire Kerboul

Docteur ès sciences physiques

Introduction

A l'heure du dérèglement climatique et du déclin des énergies fossiles, s'interroger sur les filières d'avenir du nucléaire impose de ne pas se tromper de problématique, alors que la production électronucléaire est, avec l'hydroélectricité, la seule ressource énergétique disponible, décarbonée, massive et pilotable. La question n'est pas celle des déchets pour lesquels des solutions techniques existent, quoi qu'en disent les opposants au nucléaire. La question n'est pas non plus choisir entre EPR ou SMR qui sont respectivement les versions haute et basse d'une même technologie et seront nécessaires pour assurer la jouvence à court terme du parc nucléaire et des besoins spécifiques industriels de chaleur ou d'électricité décarbonée. La question principale, qui doit guider la stratégie, doit porter sur la ressource naturelle dont le nucléaire a besoin pour se projeter sur le long terme (la fin de ce siècle et au-delà) afin d'assurer l'approvisionnement en électricité décarbonée et pilotable de notre pays. Comment est-elle utilisée ? Quelles sont les réserves disponibles ?

Cet article est centré sur le nucléaire de fission. L'électronucléaire de fusion (par confinement magnétique ou inertiel), si jamais il a lieu, ne saurait être envisagé qu'à un horizon lointain, peut-être au siècle prochain. ITER (fusion magnétique) est un projet de recherche, très éloigné encore d'un démonstrateur industriel électrogène. Quant à la fusion inertielle, malgré le battage mé-

Un des grands déterminants de la stratégie d'une filière industrielle devrait être la disponibilité de la ressource. La disponibilité de l'uranium étant finie, la technologie des réacteurs à neutrons rapides (RNR) est indispensable à la construction d'un nucléaire durable.

diatique récent en provenance des USA ¹, on est encore très loin du compte avant de pouvoir espérer produire de l'électricité de façon massive et pilotable.

Quelle est la ressource primaire de la fission ?

En France et partout dans le monde, les réacteurs fonctionnent en fissionnant l'uranium 235. La raison en est simple : l'uranium 235 est le seul noyau fissile qui existe dans la nature, c'est-à-dire qu'il est le seul noyau capable d'auto-entretenir une réaction de fission en chaîne. Or l'uranium 235 est un isotope de l'uranium présent à moins de 0,7 % dans l'uranium naturel ; les deux autres isotopes sont l'uranium 238 (99 %) et, à l'état de traces, l'uranium 234, deux noyaux fissiles ².

La fission de l'uranium 235 étant d'autant plus probable que le neutron incident est

lent, les réacteurs électrogènes actuels sont des réacteurs à neutrons lents, qui utilisent l'eau comme milieu caloporteur car c'est un des meilleurs ralentisseurs de neutrons qui soit. Les neutrons ralentis y évoluent avec une énergie moyenne inférieure à 1 eV (électron-volt, $1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$) qui correspond à des vitesses moyennes d'environ 2 à 3 km/s. A ces énergies, la probabilité de fissionner l'uranium 235 est maximale ; en contrepartie, en cas d'échec de la fission, le neutron est capturé par le noyau – processus de capture neutronique – ce qui conduit à la production de noyaux plus lourds, les « transuraniens ». Ces transuraniens ne peuvent fissionner sous l'impact des neutrons trop lents, et constituent des déchets de haute activité et à vie longue (plusieurs siècles à plusieurs centaines de milliers d'années).

Ce choix de l'uranium 235 et du caloporteur « eau » a donné lieu à la technologie actuelle des réacteurs à eau pressurisée (REP) ³. Le combustible est enrichi en uranium 235, au-delà de la teneur naturelle ⁴ trop faible pour atteindre les conditions de criticité nécessaire à l'auto-entretien de la réaction en chaîne. Ces réacteurs sont dits à neutrons lents, ou thermiques. En dépit de leur succès dans le monde entier pour assurer une production d'électricité fiable, massive, ●●●

¹ <https://www.llnl.gov/archive/news/lawrence-livermore-national-laboratory-achieves-fusion-ignition>.

² L'uranium et les noyaux plus lourds que l'uranium, produits dans les réacteurs (neptunium, plutonium, américium, curium...) sont gros, donc fragiles : il est assez facile de les faire éclater sous l'impact d'un neutron. Quand ils sont de type pair-impair (uranium 235, plutonium 239) ils fissionnent sous l'impact de neutrons d'énergie quelconque, avec une probabilité d'autant plus grande que le neutron est lent et autoentretiennent une réaction de fission en chaîne ; ces noyaux sont fissiles. Quand ils sont de type pair-pair (uranium 238, plutonium 240...) la fission n'est possible que sous l'impact d'un neutron rapide, sans entretenir de réaction en chaîne ; ces noyaux sont fissionnels.

³ EPR dans sa version modernisée.

⁴ Dans un réacteur à uranium enrichi et dont le modérateur est l'eau, la proportion d'uranium 235 dans le combustible est comprise entre 3 et 5 % (la teneur en uranium 235 est d'environ 0,7 % dans l'uranium naturel).

●●● pilotable et décarbonée, ces réacteurs ont comme principal inconvénient de gaspiller la ressource uranium, les 99 % d'uranium 238 étant mis au rebut.

Toutefois, dès les premières expériences de fission des années 1940, les physiciens ont démontré qu'il était possible de réaliser une fission électrogène à partir de l'uranium 238. Pour cela il faut disposer de neutrons rapides, d'une énergie de l'ordre du MeV (1 million d'électrons-volts), capables soit de fissionner directement l'uranium 238, soit de fissionner le plutonium 239 produit lors de la capture du neutron par l'uranium 238. Une fission, quel que soit le noyau qui fissionne, produit une énergie de 200 MeV. Sous l'impact de neutrons rapides, tous les gros noyaux fissionnent, y compris les transuraniens, s'ils sont créés. A contrario, dans un REP seul l'uranium 235 fissionne et une très faible proportion du plutonium 239 (~1 %). Avec un réacteur à neutrons rapides (RNR), le bilan énergétique est donc amélioré considérablement, d'un facteur 100, puisqu'on fissionne quasiment la totalité de l'uranium au lieu d'à peine 1 %.

Seul le RNR est capable d'optimiser ainsi le processus de fission nucléaire ; il est donc de fait l'outil du « *nucléaire durable* », parce qu'il économise la ressource naturelle et minimise les déchets produits. Le mot « *durable* » est la traduction de l'anglo-saxon « *sustainable* » dans la définition précise qui lui a été donnée pour la première fois en 1987 par l'ONU : « *développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs* ». Une énergie « *durable* » doit donc s'entendre comme une énergie « *économe de la ressource et minimaliste dans la production de déchets* ». Attention à ne pas confondre le concept « *durable* » avec « *durable dans le temps* ».

Dès le milieu des années 1950, la France avait d'ailleurs défini sa stratégie nucléaire en visant le développement d'une filière de RNR pour sécuriser ses approvisionnements énergétiques. A l'époque le concept « *durable* » n'existait pas encore, l'obligation d'abandonner les énergies fossiles

fortement émettrices de CO₂, n'était pas dans l'air du temps, en revanche la sécurité d'approvisionnement énergétique était bien au premier rang des préoccupations d'un pays en reconstruction. Jusqu'à la fin du XX^{ème} siècle ce cap fut maintenu avec le succès des premiers RNR, Rapsodie (40 MWth), conçu en 1957 et démarré en 1967, puis Phénix (250 MWe) mis en service en 1973 et Superphénix (1200 MWe) en 1976. Malheureusement, en 1997, l'arrêt de Superphénix⁵ sonna le glas d'une stratégie nucléaire cohérente. En 2010, l'étude d'un démonstrateur de RNR de 4^{ème} génération⁶, Astrid, fut lancée dans le cadre de la loi du 28 juin 2006 sur les recherches pour la gestion des matières et des déchets radioactifs ; l'enjeu était de retrouver une capacité de gestion de nos matières stratégiques, l'uranium et le plutonium. En 2019, le projet Astrid fut à son tour abandonné.

Quel nucléaire pour le futur ?

Le constat actuel est l'absence de vision et de volonté politiques. Or l'urgence de disposer de RNR est dictée par l'absolue nécessité de garantir à la France une fourniture d'électricité pilotable, décarbonée, fiable et pérenne. La seconde raison est la prise en considération des exigences de durabilité, au sens onusien du terme. Dans un monde où les ressources s'épuisent et où la dérive climatique s'amplifie, le choix de la technologie des REP fait par la France pour les prochaines décennies ne saurait faire l'économie d'une stratégie de long terme visant à porter à maturité industrielle

5 Pour des raisons politiques au détriment de raisons scientifiques.

6 Le nucléaire des débuts avec des neutrons lents a donné lieu aux réacteurs de 1^{ère}, puis de 2^{ème} (le REP) et de 3^{ème} génération (l'EPR) au fur et à mesure que progressaient les exigences de sûreté. À partir de la 4^{ème} génération, le concept de « durabilité » entre en jeu, avec de surcroît un haut niveau de sûreté et de fiabilité et une résistance accrue à la prolifération et aux agressions externes. Notez que « durabilité » et 4^{ème} génération ne se confondent pas : la 4^{ème} génération inclut la « durabilité ». L'inverse n'est pas vrai : Superphénix, réacteur de RNR de 2^{ème} génération, permettait déjà un fonctionnement nucléaire durable.

une technologie électronucléaire durable à base de RNR. Mais ces considérations n'ont pas été suffisantes pour les décideurs et la stratégie n'a cessé de se déliter depuis une trentaine d'années face aux coups de buitoir de l'écologie politique⁷.

Si la préoccupation éthique et la volonté politique sont absentes, que nous disent les analyses sur la disponibilité physique de l'uranium ?

De combien d'uranium disposons nous ?

Si l'on continue d'exploiter les réacteurs à neutrons lents, les tensions sur l'approvisionnement en uranium se profileront bien avant la fin du siècle, compte-tenu des projets annoncés par l'AIEA et l'OCDE (plus de 150) et du parc mondial de 444 réacteurs en service, dont bon nombre verront leur durée de vie prolongée à 50-60 ans voire au-delà.

Sachant qu'un REP de 1 GWe fissionne annuellement 1 tonne de noyaux d'uranium 235, la puissance électronucléaire mondiale de 400 GWe correspond à la consommation annuelle d'environ 60 000 t d'uranium. Les ressources mondiales identifiées sont de 6 millions de tonnes ; les réserves ultimes seraient de 16 millions de tonnes ; 2 millions de tonnes ont déjà été consommées.

Dans l'hypothèse basse d'une croissance de la puissance nucléaire mondiale d'environ 2 % par an, dès le milieu du siècle la consommation intégrée dépassera 4,5 millions de tonnes pour atteindre presque 14 millions de tonnes à la fin du siècle... ! En d'autres termes, dès le milieu du siècle il deviendra hasardeux d'investir dans de nouveaux réacteurs nucléaires supposés fonctionner au moins soixante ans.

7 Cf. Bernard Accoyer et Chantal Didier – Une affaire d'Etat. Une tentative de sabotage du nucléaire français – Ed. Hugo Doc, 2022

L'hypothèse d'une croissance à 2 % est modeste car dès à présent, et de façon de plus en plus importante, la consommation énergétique mondiale d'environ 170 000 TWh⁸ - dont plus de 80 % est encore assurée par les combustibles fossiles - va se reporter vers tous les substituts énergétiques possibles. Les conditions d'approvisionnement en uranium deviendront critiques dès le milieu du siècle.

Le contexte est donc déjà celui d'une pénurie physique annoncée, car, sans changement de technologie vers les RNR, nous sommes d'ores et déjà engagés dans une consommation jusqu'à l'épuisement de la ressource fissile avant la fin de ce siècle. De fait, le RNR est la seule filière d'avenir que nous devrions considérer dès à présent pour être assuré d'en disposer pour la seconde moitié de ce siècle ; à défaut le nucléaire de fission s'arrêtera.

Le potentiel de surgénération du réacteur à neutrons rapides (RNR)

Quand les neutrons sont très énergétiques (~ MeV), la probabilité de fission de l'uranium 238 devient très importante. De surcroît, la fission provoquée par un neutron rapide libère au moins trois neutrons, à comparer aux 2,4 neutrons produits en moyenne lors d'une fission par neutrons lents. C'est pourquoi dans un RNR, il se produit davantage de noyaux fissiles nouveaux - par transmutation de noyaux fertiles⁹ - qu'il ne s'en détruit par fission ou capture. Cette spécificité des RNR est appelée surgénération ; elle est particulièrement intéressante en termes d'économie de la ressource car elle augmente le stock de matière fissile au fur et à mesure du fonctionnement du réacteur. C'est évidemment un atout considérable pour disposer d'énergie décarbonée à hauteur des besoins mondiaux.

8 IEA, World Energy Outlook, 2022

9 Un noyau est dit fertile s'il se transforme en noyau fissile après avoir capturé un neutron. Par exemple, l'uranium 238 et le plutonium 240 sont fertiles : ils se transforment respectivement en plutonium 239 et en plutonium 241.

Un chiffre suffit à montrer le potentiel des RNR : si un pays comme la France disposait d'un parc de RNR, son autonomie énergétique serait en réalité de plusieurs millénaires sur la base de son stock actuel de matières¹⁰. Ce stock correspond à une quantité d'énergie de plus mille milliards de tep, soit 10 millions de TWh¹¹ ! Or, le besoin énergétique de la France, dès 2050, peut être estimé à plus de 1500 TWh¹².

La question des déchets revue par le RNR

Le RNR apporte une révolution complète de l'amont du cycle puisqu'il consomme la ressource sans gaspillage, avec un gain d'un facteur 100 dans la production d'énergie. Mais il minimise aussi les déchets produits, en fissionnant les gros noyaux produits fatalement à l'aval des REP.

Cette spécificité des neutrons rapides, qui favorise la fission au détriment de la capture neutronique, ne laisse aux déchets que les produits de fission. Les périodes radioactives nettement plus courtes de ces déchets, plusieurs dizaines d'années, changent la donne en matière de stockage.

Certes, les déchets nucléaires actuels issus des REP sont l'objet d'une gestion rigoureuse qui garantit leur stockage de façon sûre dans des couches géologiques profondes, sans migration dommageable dans l'environnement pendant des centaines de milliers d'années¹³. Il n'en de-

10 Du fait de son histoire, la France dispose de plusieurs centaines de milliers de tonnes d'uranium appauvri et de plusieurs centaines de tonnes de plutonium en partie confiné dans le combustible usé.

11 La fission de 1 g d'uranium ou de plutonium libère 2 tep environ.

12 Cf. NegaTep, Pour réduire les émissions de CO2 de la France d'ici 2050-2060, SLC 2021, Éd. Les un-pertinents, p. 62.

13 Cf. Rapport no 6 de la CNE2 : « Les verres et l'argile d'une couche géologique profonde sont des barrières efficaces de confinement des produits de fission et des actinides pour des centaines de milliers d'années. Cette durée suffit à abaisser leur nocivité à un niveau tel qu'elle ne pose plus de problème pour les populations vivant au-dessus du stockage ».

L'auteure

Claire Kerboul est docteur ès sciences-physiques, spécialisée en physique nucléaire, administrateur de PNC-France et SLC. Elle est l'auteur de « L'urgence du nucléaire durable », paru le 14 mars dernier aux éditions De Boeck supérieur, préfacé par Bernard Accoyer, médecin, ancien Président de l'Assemblée nationale, Président de PNC-France.



meure pas moins qu'il serait plus satisfaisant de ne pas les produire. Par ailleurs, les stockages de déchets ultimes des RNR, sur quelques centaines d'années, répondraient aussi à l'un des critères importants de la durabilité, à savoir développer des solutions économiquement et socialement acceptables.

En résumé : les atouts des RNR pour un nucléaire durable

On sait depuis longtemps que les RNR sont la technologie de fission la plus pertinente pour utiliser correctement l'uranium. Cela seul devrait suffire pour définir toute filière nucléaire future.

À cet avantage considérable, s'ajoutent d'autres atouts à porter également au crédit des RNR. Le coût de l'énergie produite n'a plus à intégrer les coûts de l'extraction minière et de l'enrichissement, ni les risques géopolitiques associés à l'importation. De plus, les RNR refroidis au sodium, produisent de la vapeur à plus haute température que les REP ; leur rendement thermique est donc élevé (43 % à comparer à 33 % pour un REP)¹⁴. Enfin la gestion de leurs déchets ultimes nécessite un stockage pendant environ 500 ans, au lieu des centaines de milliers d'années nécessaires aux déchets des REP.

14 Cf. Jean Bussac et Paul Reuss, op. cit.

●●● Quid du thorium alors ?

On entend souvent suggérer de « passer au thorium » pour conjurer les difficultés du nucléaire actuel ou rêver à un avenir innovant qui changerait la donne.

Effectivement, sous l'angle de la disponibilité de la ressource, le thorium est trois fois plus abondant que l'uranium. Sa période radioactive étant de plus de 14 milliards d'années, la disponibilité de la ressource ne se pose pas avant des temps très reculés aux échelles des temps humains. Cependant, le thorium n'existe que sous la forme d'un seul isotope, le thorium 232, qui n'est pas fissile et ne peut donc auto-entretenir une réaction en chaîne. Pour utiliser le thorium, il faut d'abord le transmuter en uranium 233. De fait, le comportement du thorium vis-à-vis de la fission est analogue à celui de l'uranium 238.

Donc, même si l'on voulait utiliser le thorium, la priorité serait de développer des réacteurs à neutrons rapides avec des combustibles thorium 232-uranium 233, à l'instar des combustibles uranium 238-plutonium 239. Or, en France, les stocks de matière sont constitués d'uranium 238 et de plutonium.

Seuls des pays comme l'Inde, qui dispose de thorium en abondance, ou la Chine,

qui fait feu de tout bois compte tenu de l'ampleur de ses besoins, peuvent être légitimement intéressés par les recherches correspondantes, mais certainement pas la France qui dispose de milliers d'années de réserves d'uranium 238.

Conclusion

Un des grands déterminants de la stratégie d'une filière industrielle devrait être la disponibilité de la ressource. En l'absence de réacteurs à neutrons rapides capables de limiter la consommation de matière fissile et de la surgénérer, la limitation physique en uranium naturel disponible sur Terre interviendra assez rapidement au cours de ce siècle, mettant un terme à l'électronucléaire à des échéances plus ou moins échelonnées suivant les pays. Ainsi l'électronucléaire n'aura été qu'une étape transitoire au problème de l'énergie qui, par voie de conséquence, restera sans solution. Parler de filières d'avenir du nucléaire c'est inéluctablement cibler les RNR.

La « relance du nucléaire » telle qu'envisagée actuellement n'offre pas de réponse à cette question d'une filière durable pour le futur. Derrière le slogan on peine à discerner une stratégie nucléaire qui devrait nécessairement être au moins à l'échelle du siècle à venir.

Pourtant, la France est le seul pays d'Europe qui dispose d'un des meilleurs atouts : un stock exceptionnel de plusieurs centaines de milliers de tonnes d'uranium appauvri, qui n'est rien d'autre que de l'uranium 238. En outre, notre pays dispose déjà de la quantité de plutonium nécessaire au démarrage¹⁵ de 5 à 6 réacteurs de ce type.

Non seulement cette ressource stratégique assure à notre pays une souveraineté énergétique sans égale, mais elle le rend indépendant de toute importation d'uranium. *Last but not least*, la France a ainsi la capacité de devenir *de facto* un fournisseur-clé d'électricité pilotable décarbonée, offrant à l'Europe une sécurité électrique indéfectible. Encore faut-il pour cela disposer de RNR.

Enfin soulignons au regard du décideur politique que, si la première raison évidente pour disposer de RNR est la garantie de pérennité de la fourniture d'électricité, la seconde raison, plus subtile mais à forte charge éthique, est que l'utilisation jusqu'à l'épuisement de l'uranium 235 rendrait définitivement impossible tout démarrage de réacteur de fission. ■

¹⁵ L'uranium 238 n'étant pas fissile, il faut une quantité minimale de matière fissile, ici le plutonium, pour amorcer la réaction en chaîne.

Résumé

Un des grands déterminants de la stratégie d'une filière industrielle devrait être la disponibilité de la ressource. Ainsi dans le cadre d'un programme électronucléaire, la ressource en uranium doit être un point central. C'est pourquoi dans une vision de long terme (au-delà de 2050), il est important de mettre en place une stratégie autour de la technologie des réacteurs à neutrons rapides (RNR) qui est la seule à pouvoir utiliser l'intégralité du potentiel énergétique de l'uranium naturel. En utilisant les stocks d'uranium naturel dont elle dispose sur son sol, la France assurerait son autonomie électrique pour plusieurs millénaires. Enfin, si cela était souhaitable, une telle filière pourrait valoriser les matières énergétiques contenues dans les combustibles usés des centrales à technologie REP. A défaut la limitation physique en uranium naturel disponible sur Terre interviendra assez rapidement au cours de ce siècle. ■

Abstract

One of the major determinants of an industry's strategy should be the availability of resources. Thus, in the context of an electronuclear program, the uranium resources should be a key point. That is why, in a long-term vision (beyond 2050), it is fundamental to build a national strategy based on fast-neutron reactor technology, which is the only technology being able to use the full energy potential of the natural uranium. By using its stocks of natural uranium, France would ensure its electrical autonomy for several millennia. Finally, if it were desirable, such a sector could recover the energy materials contained in the spent fuel of PWR power plants. Otherwise, the physical natural uranium available on Earth will occur fairly rapidly during this century. ■