

## **L'électricité nucléaire durable : l'énergie décarbonée du futur**

**Claire Kerboul**  
Sauvons Le Climat

- I. L'électronucléaire : une énergie encore à ses balbutiements**
- II. Le nucléaire de la maturité : l'électronucléaire durable**
  - 1. Bref rappel sur l'uranium**
  - 2. Un potentiel énergétique considérable**
  - 3. Utiliser toute la matière énergétique contenue dans l'uranium**
- III. Des premiers pas à la maturité : l'indispensable recherche**
- IV. Quelques idées fausses ou illusoire qui empêchent d'avancer :**
  - 1. L'avenir c'est la fusion, attendons.**
  - 2. Le nucléaire à fission d'uranium c'est le passé, le futur c'est le thorium.**
  - 3. Il y a bien assez d'uranium**
  - 4. Le prix de l'uranium est encore très bas.**
  - 5. On pourra toujours aller chercher l'uranium de l'eau de mer**
  - 6. Le SMR (Small Modular Reactor) est le nucléaire du futur**
  - 7. L'avenir est aux réacteurs à sels fondus (MSR pour Molten Salt Reactor)**

### **Conclusion**

# L'électricité nucléaire : l'énergie décarbonée du futur

## I. L'électronucléaire : une énergie encore à ses balbutiements

On lit ou l'on entend parfois que le nucléaire serait une énergie du passé. Comment peut-on faire une erreur d'appréciation aussi grossière au simple regard de l'histoire ?

La découverte de la fission nucléaire auto-entretenu par une réaction en chaîne date de 1938, il y a moins d'un siècle. La première pile atomique mondiale, réalisée à Chicago, fêtera ses 80 ans à la fin de cette année. Le premier réacteur nucléaire électrogène du monde produisit ses premiers kWh à Idaho en décembre 1951. Enfin, la première centrale nucléaire française fut celle de Marcoule dans la vallée du Rhône, en janvier 1956, il y a 66 ans.

Que nous disent ces dates au regard des millénaires de domestication du feu et de recours aux énergies animales, éoliennes et marines ? Que sont ces décennies au regard des siècles où l'humanité a commencé à utiliser les énergies fossiles, avec le charbon en fer de lance de cette révolution à partir du XVIII<sup>ème</sup> siècle ? De fait, l'énergie nucléaire est une énergie toute jeune qui figure encore aujourd'hui comme un point singulier dans la longue histoire de l'énergie de l'humanité.

Sauf à manquer singulièrement de compréhension des événements, des succès, des échecs, des contre-pieds et des balbutiements qui ont marqué la recherche et l'industrialisation nucléaires, comment remiser cette grande aventure au passé ? A la fois puissante et complexe, l'énergie nucléaire suscite d'autant plus de passion et de crainte que les concepts physiques à sa base sont difficiles à comprendre, sauf à y consacrer des efforts et du temps. Tout ceci n'est pas facilement compatible avec l'époque contemporaine, paralysée par ses peurs et de plus en plus souvent dans la régression de la pensée scientifique, ceci expliquant souvent cela. L'énergie nucléaire est donc bien davantage une énergie mal connue que passée.

Énergie méconnue, à l'aube de son développement, c'est aussi une chance extraordinaire que nous en disposions au moment même où l'humanité bascule dans une dérive climatique inexorable causée par l'exploitation intense de ressources carbonées, le pétrole, le charbon et le gaz. Quelles seraient les perspectives pour une planète à plus de huit milliards d'habitants – dix milliards en 2050 - qui ne disposerait que des énergies intermittentes et aléatoires du soleil et du vent, et de l'énergie hydraulique, certes pilotable et durable, mais au potentiel limité<sup>1</sup> ?

Car ses atouts sont incontestables : l'électronucléaire est capable de produire des quantités considérables d'énergie - largement supérieures à celles produites par les énergies fossiles - entièrement décarbonée et totalement pilotable.

Actuellement, le nucléaire représente à peine quelques 4,3 % de la consommation mondiale d'énergie<sup>2</sup>. Les énergies fossiles (pétrole, charbon et gaz naturel) représentent près de 82%<sup>3</sup>. Ces chiffres, vertigineux face aux pénuries annoncées, disent assez le défi pour un pays d'être capable de recourir massivement à l'électronucléaire.

---

<sup>1</sup> Ne sont pas citées les sources d'énergie encore plus limitées comme la biomasse, la géothermie, la force des océans. L'hydrogène quant à lui est un vecteur énergétique.

<sup>2</sup> Le nucléaire assure 10,1% de la production mondiale d'électricité.

<sup>3</sup> Cf. AIE – Key World Energy Statistics - 2021

## L'électricité nucléaire : l'énergie décarbonée du futur

Car la réalité physique s'impose à nous : huit milliards d'êtres humains ne pourront vivre, ni même survivre, de l'énergie du soleil et du vent. Les ordres de grandeur n'y sont pas<sup>4</sup>. La plupart de ceux qui ont sérieusement étudié la question de notre approvisionnement énergétique, pris en tenaille entre les exigences climatiques et la disparition des énergies fossiles, en conviennent : dans l'état actuel des connaissances scientifiques et techniques, l'énergie nucléaire est la solution<sup>5</sup> car c'est la seule de toutes les énergies connues à avoir les bons ordres de grandeur. L'énergie nucléaire de fusion pourrait peut-être un jour devenir le grand futur durable du nucléaire, à la hauteur du défi. Mais sa mise au point industrielle<sup>6</sup>, si elle doit intervenir, se fera au mieux dans le siècle prochain c'est-à-dire bien après les urgences auxquelles nous devons faire face, dès aujourd'hui et dans les décennies immédiatement à venir.

L'électronucléaire n'en étant qu'à ses premiers pas, la question est de savoir comment le conduire à maturité. Comment amener l'électronucléaire tel que nous le connaissons aujourd'hui à un niveau de développement pérenne, en d'autres termes « durable », et ce à l'échelle globale de notre planète. Cela signifie que son développement doit être économe vis-à-vis de la ressource primaire et minimaliste dans la production de déchets.

La croyance à un nucléaire qui serait une énergie du passé – ingrédient vénérable de l'idéologie écologiste politicienne ? - alimente en germe deux catastrophes dans lesquelles nous nous sommes laissés piéger en France : d'une part l'arrêt de la R&D nécessaire au nucléaire durable, d'autre part la perte d'attractivité de la discipline auprès des jeunes talents. Pourtant indispensables au regard des exigences climatiques et énergétiques, la recherche pour le nucléaire durable et la formation des scientifiques et ingénieurs de haut niveau ont été stoppées net.

Quelques rappels dans la suite de cet exposé permettront de mieux comprendre l'enjeu du nucléaire durable, et de saisir à quel point, pour se projeter et préparer l'avenir, il est important de retrouver la compétence scientifique et la capacité de diriger les recherches nucléaires urgentes dont le pays a besoin.

## II. Le nucléaire de la maturité : l'électronucléaire durable

Tel qu'il fonctionne aujourd'hui l'électronucléaire n'est pas durable. La préoccupation d'économie de la ressource et de minimisation des déchets n'était pas la priorité au début de l'aventure nucléaire. Or nous vivons encore aujourd'hui en exploitant l'énergie de fission avec les premières technologies mises au point à son démarrage. A n'y prendre garde, sans revoir cette vision pour l'avenir, on reproduirait avec l'uranium, l'erreur qui consista en deux siècles à brûler des réserves d'énergie fossiles accumulées pendant des centaines de millions d'années. L'uranium, comme toutes les ressources naturelles de la Terre, est en quantité limitée.

---

<sup>4</sup> Cf. « Sustainable Energy – Without the Hot Air » par David J.C. MacKay – 2009 - p. 314 de l'édition française – [http://www.inference.eng.cam.ac.uk/sustainable/book/translate/french/sewtha\\_20111001\\_lowres.pdf](http://www.inference.eng.cam.ac.uk/sustainable/book/translate/french/sewtha_20111001_lowres.pdf)

<sup>5</sup> Cf. *Sans énergie nucléaire, la transition sera impossible* – Editorial AIE – 12 octobre 2020

<sup>6</sup> Rappelons qu'ITER est une installation expérimentale de fusion qui doit permettre de produire une quantité d'énergie de suffisamment longue durée, mais qui ne sera pas convertie en électricité. ITER n'est pas un projet de prototype industriel. Voir page 8 du présent document.

# L'électricité nucléaire : l'énergie décarbonée du futur

## 1. Bref rappel sur l'uranium

L'uranium est l'atome le plus lourd disponible dans l'environnement naturel ( $Z = 92$ ). Faiblement radioactif et de très longue durée de vie<sup>7</sup>, c'est un élément assez rare, moins abondant que le cuivre, le nickel ou le zinc, mais 500 fois plus abondant que l'or. Il est présent dans les roches à hauteur de 1 à 3 g par tonne et en concentration bien moindre dans l'eau de mer, 3 mg/t.

L'uranium est composé de 99% d'uranium 238, de moins de 1% d'uranium 235 et de traces d'uranium 234. Seul l'isotope uranium 235 est fissile. De ce fait, son seul usage est lié aux applications de la fission nucléaire puisqu'il est le seul noyau sur Terre capable d'auto-entretenir une réaction en chaîne. A cause de ces caractéristiques uniques, l'uranium est fort mal connu du grand public et même des experts des autres domaines que celui de l'énergie nucléaire. Cela explique les interrogations, les frayeurs sinon les rejets qu'il suscite, comme toute chose qu'on ne connaît pas bien.

C'est en 1938, en bombardant de l'uranium avec des neutrons et en pensant découvrir des transuraniens<sup>8</sup>, que les physiciens découvrent la fission nucléaire : l'uranium, contre toute attente, s'est cassé en deux éléments plus légers. L'uranium ayant proportionnellement plus de neutrons que les deux noyaux légers produits, deux à trois neutrons sont émis lors de la fission. Le principe de la réaction en chaîne est ainsi mis au jour, il y a moins d'un siècle.

## 2. Un potentiel énergétique considérable

Quand on fissionne un noyau d'uranium, on casse des liaisons nucléaires, à la différence de la combustion de charbon ou d'hydrocarbures où l'on casse des liaisons chimiques. Le rapport des quantités d'énergie récupérée est de l'ordre du million. Ceci explique pourquoi la fission de 1g d'uranium produit autant de chaleur que 1,7 t de pétrole, ou 2,8 t de charbon, ou 1000 m<sup>3</sup> de gaz<sup>9</sup>.

La combustion du pétrole, du charbon ou du gaz dégage des quantités considérables de gaz à effet de serre (GES) dont le CO<sub>2</sub>. Les « cendres » de la fission sont les produits de fission (PF) et les transuraniens si on ne dispose pas de réacteurs à neutrons rapides. Il n'y a pas d'émission de CO<sub>2</sub> puisqu'il s'agit de cassure nucléaire et non de cassure chimique.

L'uranium est donc une ressource énergétique décarbonée, d'intensité plus d'un million de fois supérieure aux ressources fossiles carbonées. C'est donc une matière hautement stratégique. Dès le début de l'électronucléaire, la prise de conscience s'est faite de détenir, avec la fission nucléaire, la clé de l'approvisionnement énergétique pour de nombreux siècles.

## 3. Utiliser toute la matière énergétique contenue dans l'uranium

---

<sup>7</sup> 4,5 milliards d'années pour l'uranium 238, ~700 millions d'années pour l'uranium 235, ~ 245 000 ans pour l'uranium 234.

<sup>8</sup> Les transuraniens sont des éléments plus lourds que l'uranium ; ces éléments n'existent plus à l'état naturel et sont fabriqués par l'homme, par exemple dans les réacteurs nucléaires.

<sup>9</sup> L'énergie de fission de 1 g d'uranium est de  $7,2 \times 10^{10}$  joules ; la combustion d'1 tonne de charbon libère  $3 \times 10^{10}$  joules, celle d'1 tonne de pétrole  $4,2 \times 10^{10}$  joules, celle de 1000 m<sup>3</sup> de gaz naturel  $3,6 \times 10^{10}$  joules.

## L'électricité nucléaire : l'énergie décarbonée du futur

En France comme partout dans le monde, la production d'électricité nucléaire repose sur la fission de l'uranium 235 qui représente moins de 1%, de l'uranium naturel. On laisse de côté l'essentiel de la ressource, l'uranium 238 que les réacteurs actuels ne peuvent pas fissionner. Ce qui veut dire que la production nucléaire actuelle, certes, est une production décarbonée, mais elle gaspille environ 98%<sup>10</sup> de la ressource naturelle. Ce fut un bon choix technique pour les premiers pas de l'électronucléaire mais c'est insuffisant pour un développement mature.

Quand un noyau d'uranium 235 fissionne sous l'impact d'un neutron, il produit deux noyaux plus petits et quelques neutrons. Quelle que soit l'énergie du neutron initial, les neutrons produits par la fission sont des neutrons rapides. Or plus le neutron est lent, plus la probabilité qu'il fissionne l'uranium 235 est grande jusqu'à atteindre 200 fois celle de fissionner l'uranium 238. C'est la raison pour laquelle, à l'origine du démarrage de l'énergie nucléaire, on a choisi de favoriser au maximum la fission de l'uranium 235 en ralentissant les neutrons avec un modérateur, en l'occurrence l'eau. L'optimisation neutronique a débouché sur la technologie actuelle des réacteurs à eau pressurisée avec un combustible enrichi en uranium 235<sup>11</sup>. Ces réacteurs sont dits réacteurs à neutrons lents, ou thermiques, de type REP ou EPR en France.

De plus, par conception, les réacteurs à neutrons lents favorisent la production de transuraniens<sup>12</sup>. Les transuraniens sont des noyaux plus lourds que l'uranium, qui sont produits lorsque l'uranium capture un neutron sans fissionner ; ce processus de capture est d'autant plus facile que les neutrons sont lents.

En l'état actuel de l'exploitation de la fission nucléaire, nous en sommes donc aux premiers pas qui ont donné par exemple à la France un parc électronucléaire composé de REP, extrêmement performant et fiable. Mais cette exploitation laisse de côté l'essentiel de la matière énergétique, l'uranium 238, et produit des transuraniens qu'il n'est pas possible de recycler dans les réacteurs à neutrons lents, excepté le recyclage en partie du plutonium 239<sup>13</sup>.

Cela étant, on sait depuis le début de cette physique, qu'il est possible d'utiliser l'uranium 238 à condition de ne pas ralentir les neutrons. Les neutrons produits lors de la fission sont des neutrons rapides. Avec ces neutrons rapides la probabilité de fission des noyaux fertiles<sup>14</sup> comme l'uranium 238 et le plutonium 240 devient très importante.

De plus, comme la fission provoquée par un neutron rapide libère au moins trois neutrons, il se produit dans le réacteur plus de noyaux fissiles nouveaux, par transmutation de noyaux fertiles, qu'il ne s'en détruit par fission ou capture. C'est cette capacité spécifique des réacteurs fonctionnant avec des neutrons rapides, qui est appelée surgénération.

Cette dynamique propre au réacteur à neutrons rapides en fait un outil remarquable de gestion de la matière énergétique : économie de la ressource puisqu'on gagne un facteur 100 sur la production

---

<sup>10</sup> Dans un réacteur à neutrons lents, 2% de l'uranium 238 se transmute en plutonium 239 qui fissionne pour moitié.

<sup>11</sup> Le combustible est dit à uranium enrichi car pour augmenter le nombre de fissions dans le réacteur, on augmente la teneur en uranium 235 bien au-delà de la teneur naturelle, soit entre 3 et 4%.

<sup>12</sup> Dans la terminologie des éléments de la classification, ces transuraniens sont des « actinides » car ils appartiennent à la famille des 15 noyaux dont le numéro atomique, ou nombre de protons, est compris entre Z=89, l'actinium, et Z=103, le lawrencium.

<sup>13</sup> Les opérations de retraitement du combustible usé pratiqué en France permettent le recyclage de 15% de matière fissile, soit 15% des 1% de l'uranium naturel utilisé.

<sup>14</sup> Un noyau est dit fertile s'il se transforme en noyau fissile après avoir capturé un neutron, par exemple <sup>238</sup>U et <sup>240</sup>Pu sont fertiles.

## L'électricité nucléaire : l'énergie décarbonée du futur

d'énergie à partir de la même quantité d'uranium naturel, et brûlage des déchets puisqu'on fissionne les transuraniens<sup>15</sup>.

Le réacteur à neutrons rapides est donc l'outil de la maturité de l'électronucléaire vers laquelle il est indispensable de s'orienter. C'est un atout considérable pour disposer d'énergie à hauteur des besoins mondiaux en énergie décarbonée. Mais en tant qu'outil clé du développement de l'électronucléaire durable, il est devenu très tôt la cible des écologistes politiques qui n'ont eu de cesse, après les succès français de Rapsodie et Phénix, d'arrêter Superphénix, ce qui fut fait en 1997, puis Astrid, en 2019.

On notera qu'on présente souvent les réacteurs à neutrons rapides (RNR) d'après leur capacité à brûler les déchets (transplutoniens<sup>16</sup>) produits dans les REP et les EPR. C'est exact mais c'est très réducteur et cela a pu faire perdre de vue qu'ils sont d'abord et avant tout la technologie de fission la plus pertinente d'utilisation de la totalité de l'uranium. Cette supériorité provient de leur capacité, grâce aux neutrons rapides, à fissionner les isotopes fissiles et fertiles, soit directement, soit après qu'ils ont été transmutés en isotopes fissiles.

Le RNR présente ainsi un grand intérêt pour la réduction des déchets à longue durée de vie. Les transplutoniens issus du recyclage sont principalement l'américium 241 (période 432 ans) et l'américium 243 (période 7370 ans) issu de capture neutronique dans le plutonium 242. Il y a également d'autres éléments issus de la capture neutronique par les noyaux précédents se transmutant en curium 242 (période 163 jours), curium 244 (période 18 ans) et plutonium 238 (88 ans)<sup>17</sup>. Le recyclage de ces noyaux dans un RNR permet de les fissionner en quantité importante, ce qui, d'une part produit de l'énergie, d'autre part donne lieu à des produits de fissions de périodes nettement plus courtes. Ainsi, le multirecyclage des transplutoniens en RNR réduit de façon significative la quantité de transuraniens présents dans le cycle, ce qui change la donne en matière de stockage.

Certes les déchets du nucléaire actuel qui contiennent PF et actinides mineurs<sup>18</sup>, sont gérés, séparés puis vitrifiés ; ils sont stockables en couche géologique profonde sans migration dans l'environnement pendant des centaines de milliers d'années. Si scientifiquement et techniquement la solution est viable, il n'en demeure pas moins que disposer de réacteurs qui transmutent et fissionnent *in situ* la majeure partie de ces noyaux de haute activité et à vie longue serait encore plus satisfaisant !

Un chiffre suffit à démontrer le potentiel du développement durable du nucléaire : avec des RNR, l'autonomie énergétique de la France est en réalité de plusieurs millénaires sur la base de son stock actuel de matières énergétiques<sup>19</sup>. Ces matières, uranium naturel et plutonium, sont issues des premières

---

<sup>15</sup> Les noyaux des transuraniens (actinides) sont gros donc fragiles. Plus ces noyaux grossissent sous l'effet de la capture de neutrons, plus il devient facile de les faire éclater par fission sous l'impact d'un neutron rapide. A noter aussi que les gros noyaux peuvent fissionner spontanément quand ils sont de type pair-pair (par exemple, le californium 254 (Z=98 ; N=156) fissionne spontanément pour près de 99,7% de ses désintégrations).

<sup>16</sup> Eléments plus lourds que le plutonium, appelés aussi actinides mineurs.

<sup>17</sup> Traité de neutronique par Jean Bussac et Paul Reuss – Ed. Hermann - chapitre XXXII- 1985

<sup>18</sup> « Mineurs » car le plutonium en a été extrait.

<sup>19</sup> Actuellement la France dispose de plus de 500 000 tonnes d'uranium appauvri et de plusieurs centaines de tonnes de plutonium, dont une partie confinée dans le combustible usé. La fission de 1 gramme d'uranium ou de plutonium libère une énergie de 2 tep environ, ce qui donne l'ordre de grandeur de la valeur énergétique de ces matières : plus de mille milliards de tep (à comparer avec la consommation annuelle d'énergie primaire de la France qui est de 250 millions de tep).

## L'électricité nucléaire : l'énergie décarbonée du futur

décennies de son histoire nucléaire, scientifique et industrielle. Ce stock correspond à une quantité d'énergie de plus de mille milliards de tep, ou encore plus de 10 millions de TWh... !

La demande d'énergie finale de la France en 2050 est estimée à 130 Mtep<sup>20</sup> au moins, soit environ 1300 TWh. Cette énergie ne pourra être totalement décarbonée que si la plus grande partie est électrique. Il est évident que la question n'est alors plus celle de l'approvisionnement en uranium mais celle de la mise en service de RNR, seuls réacteurs capables de l'utiliser efficacement.

### III. Des premiers pas à la maturité : l'indispensable recherche

Depuis les premiers essais industriels des années 1950, les physiciens ont compris l'avantage des neutrons rapides pour fissionner 100% de la matière énergétique (uranium 235, uranium 238, plutonium 239 et autres transuraniens) gagnant ainsi un facteur 100 sur la production d'électricité, pour la même quantité d'uranium naturel utilisée.

C'est la raison pour laquelle les recherches pour mettre au point ces réacteurs ont été lancées très tôt en France mais aussi partout dans le monde. Après les rapides et premiers succès, Rapsodie (1967), Phénix (1973), Superphénix (1985), les écologistes politiques, pour qui le nucléaire durable est un cauchemar, se sont acharnés avec succès à arrêter cette filière : arrêt du prototype industriel Superphénix en 1997, arrêt du prototype de recherches Astrid en 2019. Ils ont ainsi condamné, non seulement la seule solution énergétique décarbonée pilotable qui permettrait au pays de préserver son indépendance, mais la recherche indispensable.

Pendant ce temps, la Russie et la Chine, mais aussi les Etats-Unis, le Japon, le Canada et le Royaume-Uni ont poussé les feux d'une R&D où la France avait longtemps tenu l'une des toutes premières places.

Les tenants de l'idéologie d'un nucléaire qui appartiendrait au passé, expliquent que point n'est besoin de recherches puisqu'il s'agit d'une énergie passée, voire dépassée. L'incapacité à comprendre le besoin de recherche en dit long sur leur méconnaissance de cette énergie, de la physique qui la sous-tend et des perspectives de son développement. C'est évidemment très grave pour un pays comme la France qui a été un des berceaux de cette aventure scientifique et qui ne serait plus en mesure aujourd'hui d'en tirer parti, au moment même où l'électronucléaire devient la solution.

Ainsi, le CEA, organisme de R&D nucléaire français que le monde entier nous enviait, a abandonné la préparation de l'avenir du nucléaire, son cœur de métier. Pis, le peu de recherches nucléaires qui s'y trouvent encore, visent à « *ne pas réaliser à court terme le démonstrateur de réacteur à neutrons rapides au sodium Astrid tout en déployant une stratégie progressive pour préparer l'avenir, reposant notamment sur le multirecyclage du combustible dans les réacteurs actuels de 2e et 3e générations* »<sup>21</sup>.

Non seulement, le CEA arrête les recherches sur un prototype de RNR demandé explicitement dans la loi du 28 juin 2006 relative à la R&D pour la gestion des matières et des déchets radioactifs, mais il engage une R&D de multirecyclage en REP. Ceci constitue un contresens absolu, les réacteurs à neutrons lents étant dans l'incapacité physique, comme on l'a vu plus haut, de fissionner les actinides : en REP, au fur et à mesure du recyclage, la compétition entre fission et capture neutronique se fait à l'avantage de la capture.

---

<sup>20</sup> Cf. NegaTep – « Pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> de la France d'ici 2050-2060 » - SLC 2021 – Ed. Les un-pertinents p.62.

<sup>21</sup> Cf. Contrat d'objectifs et de performances du CEA - 2021-2025.

## L'électricité nucléaire : l'énergie décarbonée du futur

Ainsi, le multirecyclage du plutonium en REP conduit inexorablement à sa transmutation en actinides mineurs, principalement en américium, dont le total augmente *in fine* de 333%... ! Ce fonctionnement du réacteur détruit le plutonium sans tirer parti de son potentiel énergétique, ce qui nécessite en outre de consommer de l'uranium 235 pour ne pas étouffer le réacteur. Après 5 ans d'entreposage du combustible usé, on montre que la quantité de déchets a été multipliée par un facteur 3<sup>22</sup>. Le multirecyclage en REP est un processus qui augmente la consommation de la ressource, l'uranium 235, et la production de déchets radioactifs, principalement l'américium.

Que ce programme de recherche figure au contrat d'objectifs et de performances du CEA avec l'Etat pour les années qui viennent, comme axe de recherche majeur du nucléaire futur, est fort préoccupant. Voilà à quelles aberrations nous conduisent les croyances en un nucléaire du passé, doublées d'une profonde ignorance de la physique nucléaire de base. Le bilan d'ici à quelques années, en termes économique, technologique, environnemental et éthique, sera évidemment largement questionnable et se fera au détriment de la crédibilité de la filière nucléaire française.

Malheureusement cela ne soulève pas d'émotions particulières dans les milieux politiques et au plus haut niveau de l'Etat où l'expertise scientifique n'est plus perçue comme essentielle. Au sein des institutions nucléaires, les ingénieurs compétents sont consternés mais silencieux ; certains désertent. Nous sommes pourtant là au cœur stratégique de la gestion des matières énergétiques de la France, civiles et militaires...

Cela est d'autant plus grave que la faisabilité des recherches sur les RNR était largement acquise puisque, dans les standards de la 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> génération, nous sommes allés jusqu'à la mise en œuvre du premier prototype industriel mondial de grande puissance, Superphénix. La question qui est posée à la recherche française est donc de refaire le même chemin qu'elle avait ouvert il y a 30 ans, et de le pousser au niveau des exigences technologiques et de sûreté du XXI<sup>ème</sup> siècle.

Le processus pour passer de la R&D à un réacteur industriel demande deux à trois décennies. Nous étions en avance jusqu'au début des années 2000. Nous sommes maintenant, non seulement en retard, mais fourvoyés dans des recherches inappropriées que plus personne n'est en mesure d'évaluer correctement. Seules les avancées des autres grands pays qui maîtrisent la production d'énergie nucléaire, montrent, par contraste, l'effort qui serait nécessaire pour reprendre le pilotage de la R&D du nucléaire durable.

Les premiers pas de l'électronucléaire se sont faits dans l'effervescence des décennies qui ont succédé aux ravages de la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale. L'entrée dans la maturité vise à faire face aux besoins mondiaux d'énergie décarbonée ; elle nécessite en France une reprise en main urgente de la R&D, en ciblant les vraies questions, sans s'éparpiller.

### IV. Quelques idées fausses ou illusoirs qui empêchent d'avancer :

#### 1 - L'avenir c'est la fusion, attendons.

De nombreux dispositifs expérimentaux internationaux ont permis d'approcher les conditions théoriques minimales de température, de densité et de temps de confinement nécessaires à la fusion. Cependant, malgré des résultats très encourageants, le critère de Lawson, durée x densité x température de la réaction, reste à des valeurs illusoirs pour la production d'énergie.

---

<sup>22</sup> Note interne CEA pour le dossier en réponse à l'article 51 du PNGMDR (Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs, élaboré sous l'égide de l'ASN en application de la loi du 28 juin 2006).

## L'électricité nucléaire : l'énergie décarbonée du futur

En l'état actuel des recherches, l'utilisation électrogène de la fusion n'est pas pour demain, ni même pour après-demain. Or la dérive climatique et les besoins qui en découlent ne pourront attendre le siècle prochain voire davantage.

### 2 – Le nucléaire à fission d'uranium c'est le passé, le futur c'est le thorium.

Rappelons d'abord qu'en France nous disposons de centaines de milliers de tonnes d'uranium 238 dont on a vu la valeur énergétique colossale. Il serait aberrant de se tourner vers le thorium dont le cycle par ailleurs n'est pas connu. Les 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, sont naturellement intéressés par les recherches correspondantes.

Le thorium naturel ne possède qu'un seul isotope, le thorium 232, qui n'est pas fissile ; il ne peut donc auto-entretenir une réaction en chaîne. Pour utiliser son potentiel énergétique nucléaire, il faut donc le transmuter en uranium 233 qui lui est fissile. Le comportement du thorium vis-à-vis de la fission est analogue à celui de l'uranium 238.

Cependant la probabilité de fission de l'uranium 233 sous l'impact d'un neutron lent (REP ou EPR) est supérieure à celle de fission de l'uranium 235 (0,92 contre 0,85). De plus, lors de la fission, il émet en moyenne un peu plus de neutrons que l'U235 : 2,49 contre 2,42. Le produit de la probabilité de fission par le nombre de neutrons est un paramètre important de la neutronique, noté  $\eta$ , appelé « facteur de reproduction des neutrons ». Le facteur de reproduction des neutrons en REP,  $\eta$ , est donc égal à 2,29 pour l'uranium 233 contre seulement 2,07 pour l'uranium 235. C'est l'écart de  $\eta$  à 2 qui compte pour le processus de surgénération. Cet écart est de 0,29 pour l'uranium 233 contre 0,07 pour l'uranium 235. Cette différence, qui peut sembler faible *a priori*, est cependant suffisante pour fabriquer, avec l'uranium 233, plus de matière fissile qu'on n'en consomme, bien qu'on soit dans un réacteur à neutrons lents. *A contrario*, c'est quasiment impossible avec l'uranium 235 car l'excédent de neutrons est perdu par des captures stériles et des fuites hors du cœur du réacteur.

Cette alternative intéressante du thorium, au cycle de l'uranium, nécessiterait d'abord de produire des quantités suffisantes d'uranium 233 qui devrait être recyclé du combustible utilisé (à l'instar du plutonium 239 dans le cycle de l'uranium).

Malgré cette particularité de la fission de l'uranium 233 en réacteurs à neutrons lents, la meilleure économie neutronique est obtenue avec des neutrons rapides. Alors les fissions des noyaux fertiles (thorium 232, uranium 238, plutonium 240...) contribuent significativement au bilan neutronique<sup>23</sup>. La faible valeur des sections efficaces<sup>24</sup> de capture en neutrons rapides réduit notablement les captures stériles de neutrons dans les matériaux du cœur<sup>25</sup>.

---

<sup>23</sup> Bilan des pertes (capture, fuite...) et des productions (fission) de neutrons, obtenu à partir de l'équation de Boltzmann qui est l'équation fondamentale de la neutronique. Cette équation relie les paramètres liés aux neutrons (densité, énergie, position, vitesse) et les paramètres liés au milieu (sections efficaces des différents noyaux).

<sup>24</sup> En physique nucléaire ou en physique des particules, la section efficace est une grandeur physique représentant la probabilité d'interaction ou de collision d'une particule avec une autre particule ou noyau ou objet de matière impénétrable. La section efficace est homogène à une surface. Son unité est le barn qui vaut  $10^{-24}$  cm<sup>2</sup>.

<sup>25</sup> « Traité de neutronique » Jean Bussac et Paul Reuss – Ed. Hermann – ch. XXXII

## L'électricité nucléaire : l'énergie décarbonée du futur

Donc en tout état de cause, la priorité serait d'abord de développer des réacteurs à neutrons rapides, pour lesquels les combustibles uranium 238-plutonium 239 ou thorium 232-uranium 233 pourront être utilisés en fonction des stocks de matière disponibles.

### 3 – Il y a bien assez d'uranium

Les réserves d'uranium sont estimées comme pouvant alimenter pendant 90 à 130 ans le parc mondial de réacteurs existant qui sont des réacteurs à neutrons lents. Ainsi estimées, elles dépendent du prix qu'on serait prêt à payer l'uranium. Rappelons que le parc mondial de 444 réacteurs<sup>26</sup>, assure à peine plus de 4% de la consommation mondiale d'énergie.

Cependant, raisonner sur ces seuls chiffres revient à négliger l'évolution des besoins en énergie décarbonée d'ici à la fin de ce siècle. En outre, s'en tenir à des réacteurs à neutrons lents revient à se satisfaire d'un gaspillage qui à l'échelle de la planète pose un véritable problème éthique vis-à-vis des générations futures.

### 4 – Le prix de l'uranium est encore très bas.

Cet argument a été constant depuis des décennies pour freiner la R&D sur les RNR ; argument dont on mesure aujourd'hui l'inconséquence. Par ailleurs cet argument renvoie à celui inacceptable du gaspillage. Enfin, pour ceux qui s'obstineraient dans un raisonnement par l'économie, alors que c'est d'abord celui sur la physique qui devrait primer, rappelons que : 1) l'argument du prix de l'uranium est ambivalent et prédire son évolution est pour le moins aléatoire sinon présomptueux ; 2) à l'aube du XXI<sup>ème</sup> siècle, alors qu'on s'apprête à déployer l'électronucléaire dans le monde entier, il paraît de moins en moins acceptable d'utiliser cet argument pour justifier d'en rester à la technologie des réacteurs à neutrons lents qui gaspille la ressource.

### 5 – On pourra toujours aller chercher l'uranium de l'eau de mer

Cet argument est assez consternant au regard de la teneur en uranium de l'eau de mer, certes, mais aussi des stocks de matière énergétique déjà excavée comme l'uranium 238. Il revient à dire qu'on serait prêt à mettre en œuvre une entreprise industrielle démesurée - dont d'ailleurs le bilan énergétique positif est loin d'être acquis - qui ne serait pas sans lourds détriments environnementaux, pour essorer quelques microgrammes d'uranium par litre d'eau de mer alors que nous avons des centaines de milliers de tonnes d'uranium à l'abandon sur le sol français<sup>27</sup> !

Extraire l'uranium de l'eau de mer est une idée pour le moins irréaliste alors que nous savons réaliser des RNR surgénérateurs.

### 6 – Le SMR (Small Modular Reactor) est le nucléaire du futur

Dans certains esprits, le SMR marquerait une rupture technologique au même titre que les réacteurs de génération 4. Or le SMR n'est pas un changement de technologie, mais, comme son nom l'indique, un petit réacteur ; et d'ailleurs on en a déjà réalisé en grand nombre, preuve s'il en

---

<sup>26</sup> Données de l'AIEA au 27 septembre 2021.

<sup>27</sup> Pour obtenir 1 tonne d'uranium, il faudrait utiliser plus de 300 milliards de m<sup>3</sup> d'eau de mer. Rappelons qu'avec les réacteurs actuels, on consomme 65 000 tonnes d'uranium par an dans le monde correspondant à 4% de la consommation énergétique mondiale et 10% de sa consommation d'électricité.

## L'électricité nucléaire : l'énergie décarbonée du futur

est que ce n'est pas une rupture<sup>28</sup> ! Un SMR, réacteur à uranium 235 et neutrons lents, reste un réacteur de 3<sup>ème</sup> génération au mieux, sans capacité de multirecyclage des déchets, contrairement à ce qu'on a pu entendre ou lire, ici ou là.

Tel qu'il est développé actuellement, par effet de mode mais aussi parce qu'il peut répondre à des besoins de niche (très petits territoires, réacteur embarqué, réacteur sur barge, réacteur adapté à des besoins précis comme le dessalement de l'eau de mer ou la production d'hydrogène), le SMR reste un réacteur à neutrons lents et n'est donc pas un outil de nucléaire durable.

Par contre un SMR à neutrons rapides, serait de la famille des RNR, et du fait de ses caractéristiques propres (modularité, puissance modérée, sûreté passive) serait un développement pertinent, par exemple pour nous aider à rattraper le temps perdu dans le domaine de la R&D. On pourrait alors progressivement faire évoluer le parc de REP et d'EPR français vers une production électronucléaire durable. Il pourrait être judicieux d'associer à chaque site d'EDF sur lequel on installe des EPR, des SMR rapides, dimensionnés pour gérer le combustible utilisé des EPR. Il faudrait, *in situ* également, disposer d'un pilote (robotisé) de traitement-refabrication du combustible pour le SMR, autre axe de R&D à programmer sans attendre.

### 7 - L'avenir est aux réacteurs à sels fondus (MSR pour Molten Salt Reactor)

De fait, le concept est séduisant, mais sa réalisation est encore lointaine. Ces réacteurs où la matière fissile est « diluée » dans un milieu liquide, un sel fondu, ont été essayés dès le début des années 1960 aux Etats-Unis. Le combustible étant sous forme liquide peut être extrait et recyclé en continu. On peut ainsi retirer régulièrement les produits de fission pour les stocker à l'extérieur du réacteur. Les transuraniens restent dans le cœur jusqu'à ce qu'ils fissionnent à leur tour et soient donc totalement « brûlés ».

Le thorium 232 et l'uranium 233 constituent le combustible privilégié du MSR, avec la possibilité d'un mode surgénérateur pour tous les spectres de neutrons, lents et rapides, compte tenu de la dynamique neutronique propre au thorium (cf. point 2-thorium ci-dessus). Le démarrage du réacteur se ferait avec une charge de plutonium 239 ou d'uranium enrichi à 15% d'uranium 235 environ.

Comme pour le RNR, grâce aux hautes températures qu'il est possible d'atteindre sans pressurisation, le rendement thermodynamique est élevé (> 40%, au lieu de 33% pour un réacteur à neutrons lents).

Le combustible étant liquide, on adapte en permanence la quantité de matière fissile dans le réacteur. En cas d'urgence la vidange est très rapide, ce qui est un avantage important au regard de la sûreté. De même, il est possible d'extraire en continu les produits de fission ce qui réduit l'inventaire radiologique.

Compte tenu de ces nombreuses qualités, le réacteur à sels fondus fait partie des concepts de 4<sup>ème</sup> génération. Mais de nombreux problèmes restent à résoudre pour passer du concept à la réalisation. En particulier, des verrous technologiques nécessitant une R&D d'envergure, sont à lever dans le domaine des matériaux et de la chimie du sel (corrosion, haute température,

---

<sup>28</sup> Des centaines de SMR existent déjà (plus de 400 en mer), et les projets actuels sont tous des SMR à eau légère (neutrons lents), y compris ceux qu'on a pu voir dans des propositions récentes, prétendument pour l'avenir.

## L'électricité nucléaire : l'énergie décarbonée du futur

irradiation car la cuve est directement exposée au combustible, phénomènes de précipitation, gestion des produits de fission, traitement des sels...). En outre, certaines captures ( $n,2n$ ) par le thorium aboutissent à la formation de l'uranium 232 qui pose des problèmes de radioprotection.

En l'état actuel des recherches, en France<sup>29</sup> et à l'étranger, le réacteur à sels fondus est encore au stade de « réacteur papier ». Or la dérive climatique et les besoins qui en découlent d'un nucléaire durable, nécessitent de mettre au point, dès la décennie en cours, les premiers prototypes de réacteurs à neutrons rapides de 4<sup>ème</sup> génération.

Ce foisonnement d'idées en tous sens, chacune étant plus ambitieuse ou originale ou risquée que sa concurrente, pourrait bien être un symptôme supplémentaire d'une discipline qui a perdu pied, sans capacité de tri et de hiérarchisation des projets, et sans stratégie. Là encore, la double peine, arrêt de la R&D et fragilisation de la filière, a largement contribué à ce désordre.

Or, on n'a plus le temps en France de s'éparpiller. Toute stratégie de redémarrage du nucléaire français va nécessiter impérativement de se concentrer sur ce qui est encore faisable, alors que nous devons rattraper plusieurs décennies et que le RNR refroidi au sodium a fait ses preuves, précisément dans les laboratoires et les usines françaises.

L'une des leçons de ces dernières années, c'est que reléguer le nucléaire au passé parce qu'on ne le connaît pas, n'est plus acceptable. On est en train de le payer très cher dans nos performances en recherche, maintenant à la remorque des recherches mondiales. De plus, l'effondrement de notre R&D nucléaire, avec des programmes scientifiquement infondés comme le multirecyclage en REP, n'aura pas échappé à nos anciens partenaires étrangers de R&D.

Et en conséquence, sans surprise, on continue d'observer une perte sévère d'attractivité du nucléaire auprès des jeunes scientifiques de talent. La transmission de cette discipline, au cœur de la connaissance de la matière et porteuse de notre futur énergétique, est au point mort, quand elle ne se fait pas le relais de contenus appauvris voire erronés.

Notre pays a besoin de sortir de cette incapacité, dans laquelle il s'est mis, à se projeter dans le futur. Faire repartir la dynamique là où l'histoire a commencé, c'est-à-dire du côté de la recherche, est probablement la meilleure solution.

### Conclusion

Ce n'est sans doute pas un hasard si ceux qui prennent le nucléaire pour une énergie du passé sont souvent les mêmes qui ne comprennent pas l'absolue nécessité de la recherche, la confondant d'ailleurs avec l'innovation qui n'en est qu'une retombée, et imaginant qu'en matière nucléaire il est toujours possible de faire de la recherche de pointe dans son garage !...

Ceux qui parlent du nucléaire au passé n'ont compris, ni son histoire, ni la physique la plus récente qui émergea au siècle dernier. En réalité nous n'en sommes qu'au début des développements et, sans reprise en urgence des travaux de recherche pour mettre au point un RNR de 4<sup>ème</sup> génération, l'énergie

---

<sup>29</sup> En France, les recherches sur le MSR sont dirigées par le CNRS et portent sur un concept dit MSFR (« Molten Salt Fast Reactor ») qui est une version de MSR à neutrons rapides.

## L'électricité nucléaire : l'énergie décarbonée du futur

électronucléaire, en France, finira reléguée comme une parenthèse de son histoire énergétique, restée à ses balbutiements.

Il se trouvera toujours de beaux esprits pour soutenir, blasés de toute ambition pour notre pays, qu'on achètera russe, ou chinois ou américain...Les mêmes seront sans doute sans émotion face au déclin inexorable du rayonnement scientifique et technologique de notre pays. Les mêmes expliqueront l'incapacité de notre industrie à se relever. Et nous finirons par nous habituer à notre affaiblissement au gré des chocs énergétiques, climatiques et géopolitiques successifs.

Car finalement, ce contresens absolu sur la place de l'électronucléaire, hypothèque notre futur. Comment réindustrialiser notre pays sans électronucléaire performant ? Comment, sans R&D, accéder à la maturité, technologique et industrielle, du nucléaire durable ? Comment, sans l'ambition et la conviction des plus jeunes, réussir ce renouveau de la R&D et la refondation des secteurs de hautes technologies qui caractérisent le nucléaire ?

Pour se réorienter vers le futur, si indispensable à la lutte contre la dérive climatique, l'unique stratégie serait de lancer sans attendre un programme de développement concerté, recherche et industrie, selon deux axes :

- d'une part plusieurs dizaines d'EPR permettant de réaliser la jouvence du parc existant à la hauteur des besoins en électricité qui vont *a minima* doubler d'ici à la fin du siècle ;
- d'autre part un programme de R&D d'envergure, piloté par des scientifiques aux compétences reconnues, qu'on aura missionnés pour mettre au point dans les plus brefs délais un prototype de RNR répondant aux exigences de sûreté de la 4<sup>ème</sup> génération. Ce prototype sera développé en même temps que le pilote de retraitement- fabrication nécessaire à la transition progressive du parc d'EPR français vers un électronucléaire durable.

\*

**Copyright © 2022 Association Sauvons Le Climat**