

# Histoire naturelle des réacteurs nucléaires

par Bertrand Barré

Président de l'European Nuclear Society (ENS), membre du Bureau de l'AFAS

Cet article reprend et met à jour une conférence prononcée en mai 2001 au Palais de la découverte, dans le cadre des Journées de l'énergie.

## Qu'est-ce que l'énergie nucléaire ?

Avant de nous pencher sur la courte mais passionnante histoire naturelle des réacteurs nucléaires, disons quelques mots de l'énergie nucléaire elle-même. On connaît la parabole des aveugles qui décrivent un éléphant : pour celui qui palpe la trompe, c'est une espèce de serpent ; c'est un tronc rugueux pour celui qui tâte une patte ; une espèce de chasse-mouches, dira celui qui touche la queue, etc. On peut, de même, considérer l'énergie nucléaire sous des angles différents.

Pour un physicien, l'énergie nucléaire résulte des forces qui maintiennent ensemble les nucléons, protons et neutrons qui constituent les noyaux des atomes, en dépit de la répulsion électrostatique entre les protons.

Pour le géographe - il s'agit ici de géographie humaine - c'est une source d'énergie nouvelle qui est récemment venue s'ajouter aux sources traditionnelles, fossiles et renouvelables, alors que les besoins de l'humanité sont en forte croissance.

Pour l'ingénieur, c'est une des façons de produire de l'électricité, autrement dit, un procédé compliqué pour faire bouillir économiquement de grandes quantités d'eau sans émettre de gaz de combustion dans l'atmosphère.

Pour l'économiste, c'est un facteur de stabilisation des prix de l'énergie, et d'équilibrage de la balance des paiements.

Pour le sociologue, c'est une question qui cristallise la contestation de certains aspects des sociétés occidentales industrialisées par divers groupes qu'il est commode de regrouper sous le vocable *écologistes*.

Pour l'homme de la rue, c'est une forme d'énergie, au mieux mystérieuse, au pire inquiétante.

Enfin, pour le poète que nous sommes tous peu ou prou, c'est une parcelle de l'énergie cosmique qui vient s'ajouter à celle de notre soleil, parce que l'uranium est né dans les supernovae...

Mais revenons un peu à la physique. Tout le monde connaît la formule d'Einstein  $E = mc^2$ , qui s'écrit plus exactement :

$$\Delta E = -c^2 \cdot \Delta m$$

et qui signifie que masse et énergie sont deux formes de la même réalité, qui peuvent se substituer l'une à

l'autre sous certaines conditions, et qu'à une petite variation de masse correspond une énorme variation d'énergie. La masse totale d'un noyau est ainsi plus faible que la somme des masses de tous les protons et tous les neutrons qui le constituent, et la différence de masse est l'énergie de liaison du noyau, qu'on exprime en général en million d'électronvolts, ou MeV.

Cette énergie de liaison est considérable : elle est environ un million de fois plus grande que l'énergie mise en jeu dans les réactions chimiques entre atomes ou molécules. Ce facteur 1 million est très important. C'est grâce à lui que la fission d'un gramme d'uranium ou de plutonium produit plus d'énergie que la combustion d'une tonne de pétrole.

Or il se trouve que cette énergie de liaison qui maintient la cohésion du noyau dépend de sa taille, du nombre de nucléons qui le constituent. Rapportée à chaque nucléon, elle présente un optimum aux environs de 60, ce qui correspond *grosso modo* au fer dans la classification périodique des éléments. L'assemblage le plus stable d'un groupe de nucléons est donc le noyau du fer.

Ceci veut dire que si l'on réussit à fusionner ensemble deux noyaux légers pour faire un noyau moyen, on libérera de l'énergie de liaison, et si l'on réussit à couper un noyau lourd en noyaux moyens, on récupère également de l'énergie. Nous venons de décrire respectivement la fusion thermonucléaire et la fission.

## La fission

La façon la plus simple (tout est relatif) de récupérer de l'énergie nucléaire est donc de casser les noyaux les plus lourds en fragments plus petits.

Ceci se produit spontanément dans la nature : tous les noyaux radioactifs expulsent ainsi régulièrement, mais à des rythmes très différents les uns des autres, des particules et de l'énergie à la fois. Ce n'est pas négligeable : la désintégration radioactive des noyaux d'uranium et de thorium dans l'écorce terrestre est la source de toute la géothermie, et contribue au maintien sur la terre d'une température propice à la vie. Mais on ne peut pas intervenir sur les désintégrations radioactives. On ne sait ni les ralentir ni les accélérer. Cette énergie n'est utilisable que pour certaines applications bien précises,

comme la fourniture de chaleur et d'électricité à bord des sondes spatiales qu'on envoie trop loin du Soleil pour que des panneaux solaires y suffisent.

La fission est un phénomène différent. Quand on bombarde un noyau d'uranium avec un neutron, qui n'est pas électriquement chargé et n'est donc pas repoussé par le noyau, celui-ci se casse en deux fragments, inégaux mais chacun relativement gros, relâche de l'énergie (sous forme de vitesse communiquée à ces fragments, puis de chaleur quand ces fragments sont freinés dans le milieu) et éjecte aussi deux ou trois neutrons surnuméraires.

Ces neutrons peuvent, à leur tour, aller *fissionner* un autre noyau d'uranium, et ainsi de suite : c'est le phénomène bien connu de la réaction en chaîne. L'avantage est qu'on sait déclencher la réaction, l'amener et l'entretenir au niveau voulu de puissance, et l'arrêter à volonté, en contrôlant à tout moment la population de neutrons. On peut le faire en introduisant ou retirant des noyaux de *poison*, qui absorbent les neutrons sans produire de fission<sup>1</sup>.

Dans la nature, seul un des isotopes de l'uranium, celui qui a une masse atomique 235 et qu'on note <sup>235</sup>U, est facile à fissionner par les neutrons : il est *fissile*. Il ne représente que 0,7 % de l'uranium naturel. L'autre isotope naturel de l'uranium, <sup>238</sup>U, ainsi que le thorium <sup>232</sup>Th ne sont pas fissiles, mais ils capturent les neutrons, et les noyaux excités qui résultent de cette capture se désintègrent et donnent naissance à de nouveaux noyaux fissiles, respectivement le plutonium <sup>239</sup>Pu et un autre isotope de l'uranium, <sup>233</sup>U. On dit que <sup>238</sup>U et thorium sont *fertiles*. C'est par un mélange judicieux de noyaux fissiles, de noyaux fertiles, et de poisons de contrôle qu'on peut entretenir la réaction en chaîne sur de longues périodes dans le cœur des *réacteurs* nucléaires.

L'inconvénient de la fission est que presque tous les fragments qui en résultent sont radioactifs, et continuent à se désintégrer en série avant d'aboutir, plus ou moins vite, à un noyau stable. La fission produit donc des *déchets radioactifs*, dont il faut protéger l'homme et l'environnement - nous en reparlerons.

Cette radioactivité des fragments de fission signifie aussi qu'ils continuent à dégager de l'énergie quand la réaction est arrêtée. Cette énergie *résiduelle* est beaucoup plus faible que l'énergie de fission et elle décroît rapidement, mais il faut continuer à l'évacuer quelque temps après l'arrêt, et ceci est une particularité très unique que doit prendre en compte le concepteur d'un réacteur nucléaire.

## Le réacteur nucléaire

Un réacteur nucléaire est une machine dans laquelle est entretenue une réaction en chaîne de fission de noyaux lourds par des neutrons ; cette réaction, nous l'avons vu, dégage de la chaleur. Le produit final de cette machine peut être un flux de neutrons (applications scientifiques et médicales, production de radioéléments, production de matières fissiles ou fusibles, neutronographie, test de matériaux sous irradiation neutronique, etc.), de la cha-

leur (réacteurs «calogènes» pour chauffage urbain ou chaleur de procédé), de l'énergie mécanique (certaines chaudières de propulsion navale) ou de l'électricité (réacteurs électrogènes). Nous nous intéressons ici surtout aux réacteurs électrogènes.

Avant d'examiner leur évolution, quelques mots sur leur fonctionnement.

## Comment ça marche ?

### Comment marche un réacteur nucléaire ?

Les réacteurs électrogènes comprennent deux ensembles principaux : un *îlot conventionnel* où de la vapeur d'eau actionne un groupe turboalternateur très analogue, et parfois identique, à ceux des centrales classiques à combustible fossile, et un *îlot nucléaire* qui fournit cette vapeur.

Dans l'îlot nucléaire se trouve d'abord le cœur proprement dit, où les réactions de fission se produisent dans les «éléments» ou «assemblages» combustibles. La réactivité du cœur est contrôlée par des dispositifs d'insertion de poisons neutroniques, actionnés par un système de contrôle-commande. Le cœur est refroidi par un fluide *caloporteur*.

Dans les *réacteurs à eau pressurisée*, REP, qui constituent le parc français, le fluide caloporteur est de l'eau à haute température (~300 °C), maintenue à l'état liquide sous une pression d'environ 150 bars, et qui circule en circuit fermé dans un *circuit primaire* en acier très épais. Cette eau circule au travers d'une forêt d'assemblages combustibles, longs fagots de minces tubes métalliques (en alliage de zirconium) où sont empilées des pastilles céramiques d'oxydes d'uranium ou de plutonium. Il n'y a pas de paroi entre les assemblages, le cœur est «ouvert».

L'eau primaire ne sert pas seulement à transporter la chaleur produite par les fissions et à refroidir le cœur. Les noyaux des atomes d'hydrogène servent aussi à ralentir, par chocs successifs, les neutrons émis à grande vitesse lors de la fission pour les amener le plus rapidement possible à la vitesse où ils seront le plus efficaces pour produire les fissions suivantes : on dit qu'elle sert de *modérateur*.

Cette eau primaire cède ses calories en faisant bouillir l'eau d'un *circuit secondaire* dans un gros récipient appelé générateur de vapeur. La vapeur ainsi produite va actionner le turboalternateur (voir figure 1, d'après EdF).

<sup>1</sup> Ceci n'est possible que parce que tous les neutrons ne sont pas émis instantanément lors de la rupture du noyau ; quelques-uns sont expulsés un peu plus tard par certains des fragments issus de la fission. C'est ce retard qui permet le contrôle. Sans ces *neutrons retardés*, tout irait beaucoup trop vite : on saurait faire des bombes atomiques, mais pas des réacteurs nucléaires.

Après s'être détendue dans les turbines dans l'îlot conventionnel, la vapeur est condensée grâce à un nouveau circuit d'eau, lui-même ouvert ou fermé sur un échangeur avec la source froide ultime.

L'essentiel de l'îlot nucléaire est logé dans une massive enceinte de confinement, qui joue le rôle de troisième barrière contre la dispersion dans l'environnement des produits de fission, après la gaine du combustible et le circuit primaire.

### Le cycle du combustible

Classiquement, un combustible est une substance qu'on peut combiner à l'oxygène pour produire de la chaleur par combustion. Par extension, on appelle combustible nucléaire un objet qui peut produire de la chaleur par fission des atomes lourds qu'il contient.

On ne met pas directement dans le réservoir de sa voiture le pétrole brut jailli du puits, on ne branche pas des ampoules électriques directement sur un barrage et même le bois doit être séché avant qu'on le mette dans la cheminée. De même ce n'est pas directement le minerai d'uranium qui constitue le combustible nucléaire : pour que les noyaux lourds puissent fournir de la chaleur utile par fission, ils doivent suivre un *cycle du combustible*, qui combine de nombreuses étapes industrielles schématisées sur la figure 2.

Les cycles du combustible dépendent du type de réacteur considéré. Le cycle habituel du combustible des REP comporte les étapes suivantes :

- Extraction du minerai d'uranium en mines souterraines, carrières à ciel ouvert ou par lixiviation *in situ*.
- Traitement du minerai pour en concentrer l'uranium, au voisinage du site même de l'extraction.
- Conversion des concentrés d'uranium en hexafluorure  $UF_6$ , solide à l'ambiante et gazeux à température modérée.
- Enrichissement isotopique de  $UF_6$ , pour augmenter la proportion de noyaux fissiles  $^{235}U$ , trop faible dans l'uranium naturel.
- Fabrication du combustible (conversion du fluorure en oxyde d'uranium enrichi  $UO_2$ , pastillage, frittage des pastilles, crayonnage, assemblage des crayons en faisceaux).

#### *Production d'électricité pendant 4 ans environ dans le réacteur*

- Entreposage temporaire, sous eau, du combustible usé.
- Gestion du combustible usé.

Entre chaque étape, il y a de nombreux contrôles et souvent une phase de transport. Chaque étape est elle-même un processus industriel complet : nous l'avons illustré en détaillant un peu l'étape de fabrication. La dernière étape, la gestion du combustible usé, diffère selon qu'on choisit un *cycle fermé*, comme celui décrit sur la

figure 2, qui correspond au choix français, ou un *cycle ouvert*, retenu notamment aux Etats-Unis.

Dans le cycle fermé, on trouve les sous-étapes suivantes :

- Traitement chimique du combustible usé pour récupérer les matériaux fissiles et fertiles qu'il contient encore - c'est-à-dire 95 % du combustible, en vue de les recycler.
- Conditionnement des déchets, et, en particulier, vitrification des déchets très radioactifs, résidus de la fission.
- Disposition finale des déchets conditionnés.

Le cycle ouvert - qui n'est pas un cycle du tout - se termine par la disposition finale du combustible usé, considéré alors en bloc comme un déchet.

Chaque installation du cycle, usine d'enrichissement, de fabrication ou de traitement des combustibles usés est dimensionnée pour alimenter plusieurs dizaines de réacteurs de grande taille.

### La préhistoire lointaine...

Si, dans les projets de réacteurs à fusion, nous nous évertuons à imiter les étoiles, pendant trente ans, nous avons cru que le réacteur nucléaire était un pur produit de l'ingéniosité humaine, créé artificiellement de toutes pièces et sans équivalent naturel.

Et pourtant... En 1972, à Pierrelatte, dans un laboratoire du CEA, on découvrait le «Phénomène d'Oklo» : des mesures de routines de lots d'uranium naturel en provenance du gros gisement gabonais d'Oklo montraient que ceux-ci contenaient moins d' $^{235}U$  que les 0,7 % fatidiques. Une enquête serrée élimina erreurs de mesures, erreurs de manipulation, etc. Il fallut se rendre à l'évidence : l'uranium naturel d'Oklo était appauvri !

La seule hypothèse qui «collait» à la réalité était d'une extrême hardiesse : l'uranium était appauvri parce qu'une partie de la matière fissile avait été consommée dans des réactions de fission en chaîne, déclenchées spontanément dans le gisement peu après la création de ce dernier, c'est à dire il y a presque 2 milliards d'années.

La période radioactive de  $^{238}U$  est de 4,47 milliards d'années : en 2 milliards d'années, nous n'avons perdu qu'un tiers environ des atomes de départ. La période de  $^{235}U$ , quoique respectable, est beaucoup plus courte : 700 millions d'années. Ce sont presque trois périodes qui nous séparent de la création du gisement d'Oklo. En remontant le temps, on calcule que la teneur isotopique de l'uranium naturel à cette époque lointaine était de l'ordre de 3,7 %, c'est-à-dire très voisine de celle de l'uranium enrichi que nous chargeons dans les REP actuels.

Les conditions géologiques étaient exceptionnellement favorables (ce qui explique sans doute que nous n'ayons pas découvert d'autres réacteurs «fossiles») : les réactions se sont déclenchées dans de massives lentilles

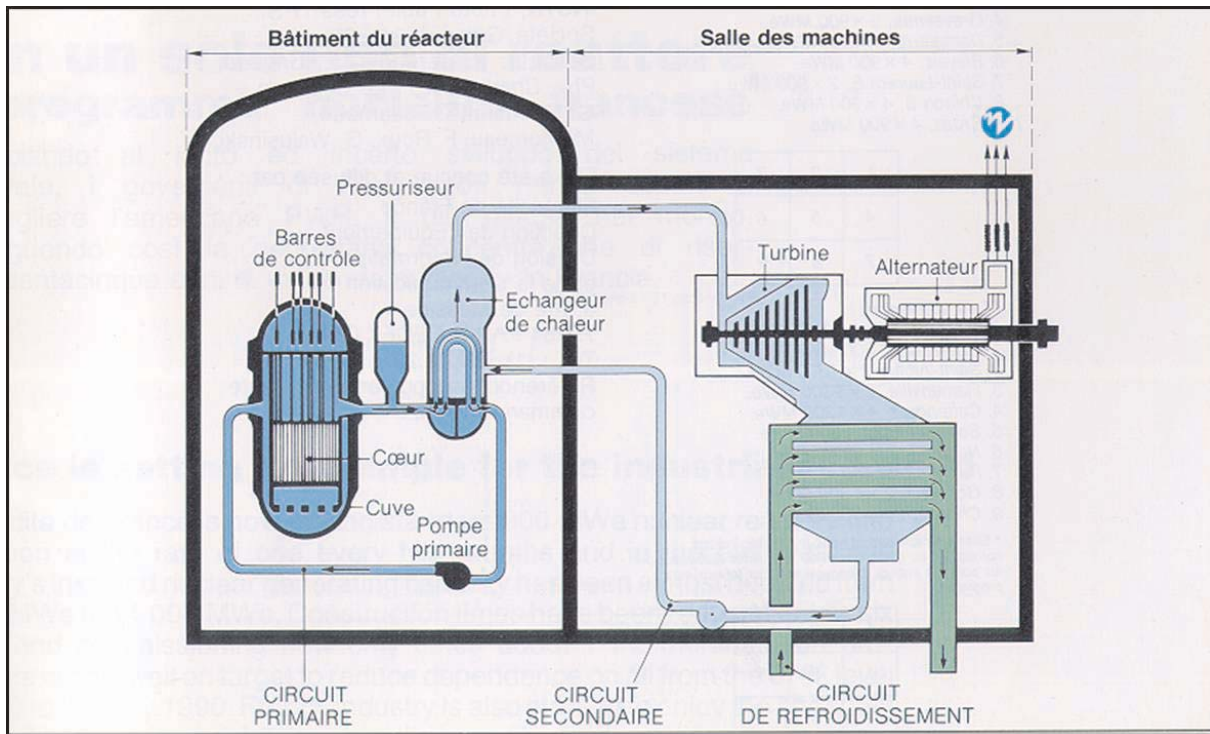


Figure 1 : d'après EdF

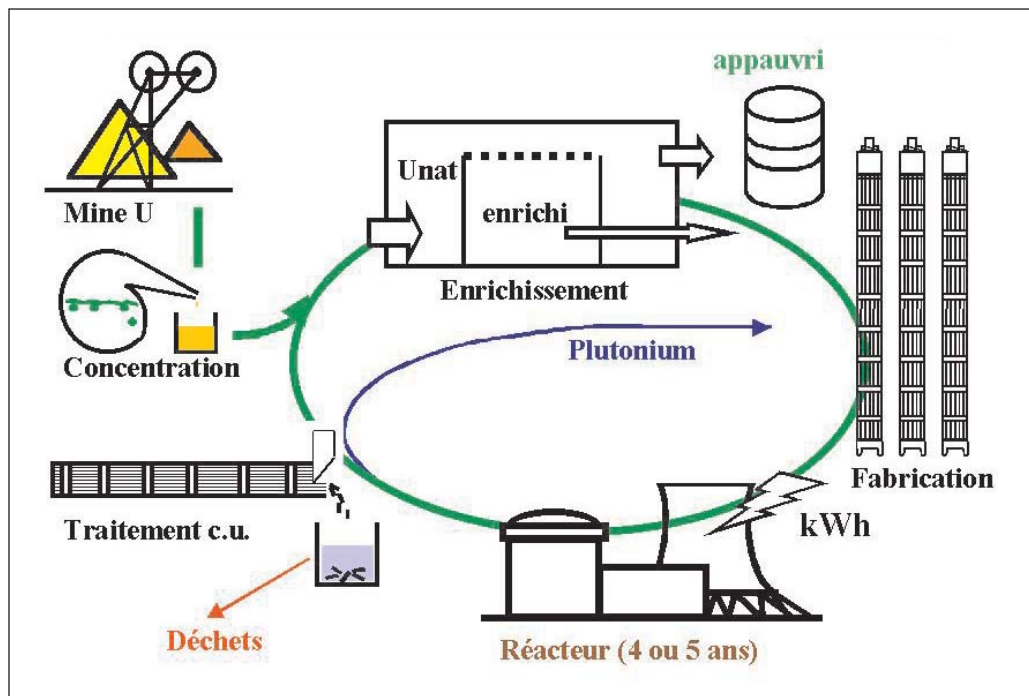


Figure 2 : Schéma du cycle du combustible

de gisement très riche, à plus de 10 % d'uranium, gorgé d'eau, entre 3 500 et 5 000 m de profondeur. A la pression qui régnait à ces profondeurs, l'eau est restée liquide, bien que sa température ait dû avoisiner les 400 °C. C'était vraiment un réacteur à eau pressurisée avant la lettre...

Ce qui était hypothèse en 1972 est devenu certitude. En fait, ce n'est pas un «réacteur naturel» qui a fonctionné dans ce gisement, mais plus d'une douzaine, et il ne s'est pas agi de réactions fugitives : on a calculé qu'elles se sont déroulées sur des durées qui s'étagent de 22 000 à 350 000 ans.

L'étude du phénomène d'Oklo a apporté de précieux renseignements sur la migration des produits radioactifs sur des périodes proprement géologiques - elle démontre notamment qu'en milieu argileux, les actinides sont immobilisés - mais nous ne l'avons évoqué ici qu'en lever de rideau, en préhistoire lointaine.

## Préambule historique

La découverte, dans les toutes dernières années du XIX<sup>e</sup> siècle, de la radioactivité naturelle a valu le prix Nobel à Henri Becquerel et Pierre et Marie Curie. La radioactivité artificielle fut découverte au début des années trente par Frédéric et Irène Joliot-Curie, et la fission, juste avant la deuxième guerre mondiale : la scène était dressée.

Si l'on excepte les «réacteurs naturels» d'Oklo, l'histoire des réacteurs nucléaires commence le 2 décembre 1942 sous les tribunes d'un stade de Chicago, où s'établit, dans le réacteur CP1, construit sous la direction d'Enrico Fermi, la première réaction en chaîne entretenue. La première, bien modeste, production d'électricité nucléaire remonte à 1951, et il faudra attendre le milieu des années cinquante pour les premiers réacteurs électrogènes «commerciaux» en Union soviétique et Grande-Bretagne... et le premier sous-marin nucléaire américain.

En l'an 2000, 45 ans plus tard, quelques 430 réacteurs électrogènes ont produit 2400 milliards de kWh, plus de 16 % de la production mondiale d'électricité, ce qui égale la production de tous les barrages hydrauliques. Pour produire la même quantité d'électricité, il aurait fallu brûler en centrales thermiques 550 millions de tonnes de pétrole, l'équivalent de la production de l'Arabie saoudite. Passer de 0 à 16 % de la production électrique mondiale en une grosse quarantaine d'années est une jolie prouesse, qui met en perspective la quasi-stagnation que nous connaissons à l'aube du XXI<sup>e</sup> siècle.

Mais ce n'est pas l'histoire de l'énergie nucléaire qui nous intéresse ici - d'autres, souvent anciens acteurs avant d'être historiens, l'ont narrée avec brio - c'est plutôt l'histoire naturelle de l'espèce «réacteur nucléaire», ce qui amènera à parler foisonnement vital, évolution et mutations, sur un fond de sélection, peut-être pas «naturelle», mais d'une extrême rigueur.

Il n'y a pas d'histoire naturelle sans classification des espèces, selon des critères parfois bien arbitraires... Nos

réacteurs peuvent se différencier par l'usage (ce que nous avons fait dans l'introduction), mais on les classe le plus souvent en fonction des composants essentiels du cœur : couple fissile/fertile, état physico-chimique du combustible, nature du modérateur ou son absence, nature et conditions thermo-hydrauliques du fluide caloporteur. Comme nous verrons que cette taxonomie est fort diversifiée, nous n'appellerons «filières» que les classes comportant plusieurs spécimens successifs.

## Le bouillonnement créateur <sup>2</sup>

Après la fin du Projet Manhattan, et dans l'ambiance «*Atoms for Peace*», a débuté aux Etats-Unis, pour l'essentiel, une période de créativité débridée, de foisonnement vital, qu'on a peine à imaginer aujourd'hui. Tous les réacteurs possibles (et quelques autres encore) ont été rêvés, dessinés, le plus souvent construits, *et la plupart ont effectivement fonctionné* ! Toutes les combinaisons imaginables de matières fissiles et fertiles, de modérateurs et de fluides de refroidissement ont été essayés sur des installations, certes de taille modeste, de sûreté approximative, et dans un respect relatif de la radioprotection et de l'environnement. Et, j'y reviens, presque tous ces «engins» ont fonctionné, ne serait-ce que quelques heures, et sans accident majeur qu'on connaisse<sup>3</sup>. Uranium, plutonium, thorium, métaux, oxydes, carbures, ou composés plus exotiques, air et gaz divers, eau légère, eau lourde, graphite, glucine, barreaux, aiguilles, macarons, sphères, particules, suspensions, lits fluidisés, métaux liquides et sels fondus, tout a été essayé au moins une fois entre 1950 et 1965. Plus de cinquante réacteurs ont été construits sur le seul «National Reactor Testing Station» d'Idaho Falls, aujourd'hui INEEL.

## Les rameaux primitifs

Au début, toutefois, il n'y avait pas tellement de choix possibles : la seule matière fissile disponible était l'uranium naturel, dont, en outre, on maîtrisait mal la métallurgie. Pour entretenir une réaction en chaîne dans ce milieu fissile, il faut ralentir le plus vite possible les neutrons rapides issus de la fission jusqu'à l'énergie thermique, où la section efficace de <sup>235</sup>U est grande, en évitant au maximum les captures résonnantes dans <sup>238</sup>U. Ce ralentissement s'effectue par chocs sur les noyaux d'un élément léger «modérateur», et il faut aussi éviter les captures dans le modérateur ou ses impuretés. L'hydrogène étant trop capturant, le choix du modérateur se limitait au deutérium, au béryllium et au carbone. En pratique, en 1942

<sup>2</sup> Les développements qui suivent sont extraits du Cours de génie atomique de l'INSTN [2].

<sup>3</sup> A l'exception de celui de SL1, parfois considéré comme un suicide bizarre.

aux Etats-Unis, seul le graphite était disponible industriellement et avec un niveau de pureté suffisant.

CP1 ne pouvait donc être que ce qu'elle a été : un réseau régulier et à peu près sphérique de billettes d'uranium naturel (oxyde et métal) disposées dans un empilement de briques de graphite. D'où le nom de «pile atomique» qui a longtemps désigné les réacteurs nucléaires, de même que les piles électrochimiques gardent le nom de l'empilement de rondelles de Volta.

Le jumeau russe de CP1, démarré quatre ans plus tard, est toujours opérationnel à l'Institut Kurchatov, près de Moscou. La première pile anglaise GLEEP (1947) était également un réseau uranium naturel - graphite<sup>4</sup>, tandis que Canadiens et Français utilisaient l'eau lourde D<sub>2</sub>O pour modérer leurs premiers réacteurs, respectivement ZEEP (1945) et ZOÉ (1948).

Pour leurs premiers réacteurs de puissance, alors qu'ils développaient en parallèle les technologies de l'enrichissement isotopique, les Américains ont continué dans la filière uranium naturel - graphite, avec la pile Oak Ridge 1 (1943) refroidie à l'air, puis avec les gros réacteurs plutonigènes de Hanford, refroidis en circuit ouvert par l'eau du fleuve Columbia. Pour ne laisser aucune voie inexplorée, ils avaient aussi démarré en 1944 une pile à D<sub>2</sub>O à Argonne.

Le monopole américain sur l'enrichissement ne laissait pas de choix aux Anglais et Français, qui ont fondé le développement de leurs premiers réacteurs, plutonigènes puis électrogènes ou mixtes, sur les filières «Magnox» et «UNGG», utilisant un combustible en uranium naturel métallique gainé en alliage léger, en réseau dans un empilement de graphite et refroidi par circulation forcée de gaz (d'abord de l'air, puis du dioxyde de carbone). Les Canadiens - aujourd'hui premiers producteurs d'uranium au monde - sont restés fidèles au cocktail uranium naturel - D<sub>2</sub>O, qui est à l'origine de la filière CANDU, filière qui continue à occuper une «niche» d'environ 8 % du parc électrogène actuel.

### L'uranium enrichi, *Deus ex Machina*

Dès que la technologie de l'enrichissement isotopique de l'uranium a été mise au point dans le cadre du Projet Manhattan, l'accès à l'uranium enrichi, de 1 à 93 % en <sup>235</sup>U, a libéré les concepteurs de réacteurs de la principale contrainte neutronique qui les bridait, et libéré leur bouillonnement créateur. La recherche de plus grande compacité, de rendements thermiques plus poussés et de meilleure utilisation de la matière fissile ont été les moteurs de cette évolution initiale ultra-rapide.

L'uranium enrichi aux environs de 3 % a notamment permis d'utiliser comme modérateur l'eau ordinaire, le plus simple de tous en dépit d'inconvénients déjà bien connus dans les centrales thermiques : bas point d'ébullition qui impose des pressions élevées (de 70 à 150 bars) pour obtenir un rendement thermique décent, et fort pouvoir de corrosion, surtout vis-à-vis des aciers ordinaires. Ce sont d'ailleurs ces défauts qui expliquent le choix de

métaux liquides (mercure, plomb, NaK et surtout sodium) comme caloporteurs concurrents.

Dans le même temps, les Soviétiques mettaient au point le réacteur à uranium faiblement enrichi, modéré par graphite et refroidi par eau bouillante circulant dans des tubes de force. Le prototype d'Obninsk était ainsi, en 1954, le premier vrai réacteur électrogène au monde. Il était aussi plutonigène, et ancêtre des RBMK...

Il devait être suivi par les réacteurs MAGNOX de Calder Hall, également à double usage, inaugurés en 1956 par la reine d'Angleterre, par Shippingport, le premier REP électrogène en 1957, puis par G2 à Marcoule en 1959 et, en 1962, à la fois NPD, ancêtre des CANDU et le prototype AGR de Windscale.

On voit qu'avant 1962, vingt ans après l'expérience de Chicago, toutes les filières actuelles étaient déjà présentes, à l'état embryonnaire. C'est enfin en 1966 que démarraient les prototypes de ce qui reste aujourd'hui des filières potentielles, le réacteur à haute température HTR Dragon, en Grande-Bretagne, et le réacteur à sels fondus MSRE, aux Etats-Unis.

Le processus de foisonnement qui s'est développé pendant ces deux décennies est schématisé sur le diagramme de la figure 3, calqué sur le «phylum» qui décrit l'évolution du monde animal.

Il y a tellement de critères possibles pour comparer les réacteurs entre eux qu'on n'en trouvera que deux dans le tableau I, la puissance volumique moyenne dans le cœur et le rendement thermique, éventuellement agrémentés d'une remarque spécifique par filière.

### Les facteurs de la sélection

Comme dans l'histoire naturelle des espèces, le bouillonnement créateur a été suivi d'une sélection qui a assuré la survie d'un nombre réduit de filières. Ces filières ont sans nul doute été les plus aptes à survivre, mais selon les critères de sélection qui dominaient dans les années cinquante à soixante-dix. L'environnement géopolitique, les sensibilités du public ont changé, de nouvelles technologies ont vu le jour et il n'est pas sûr que nous privilégierions aujourd'hui les mêmes critères : c'est une question ouverte que nous étudierons plus loin, car l'évolution future de l'espèce en dépendra.

La sélection a mis en œuvre des mécanismes très divers.

Certaines branches ont été interrompues par des problèmes technologiques (incompatibilité du sodium liquide et du graphite dans le réacteur de Hallam), par le manque de réalisme de leur objectif (réacteur «respirant» pour l'aéronautique), pour des raisons d'encombrement (réacteur à uranium naturel du sous-marin prototype Q 244), pour des

<sup>4</sup> GLEEP avait aussi de l'eau lourde.

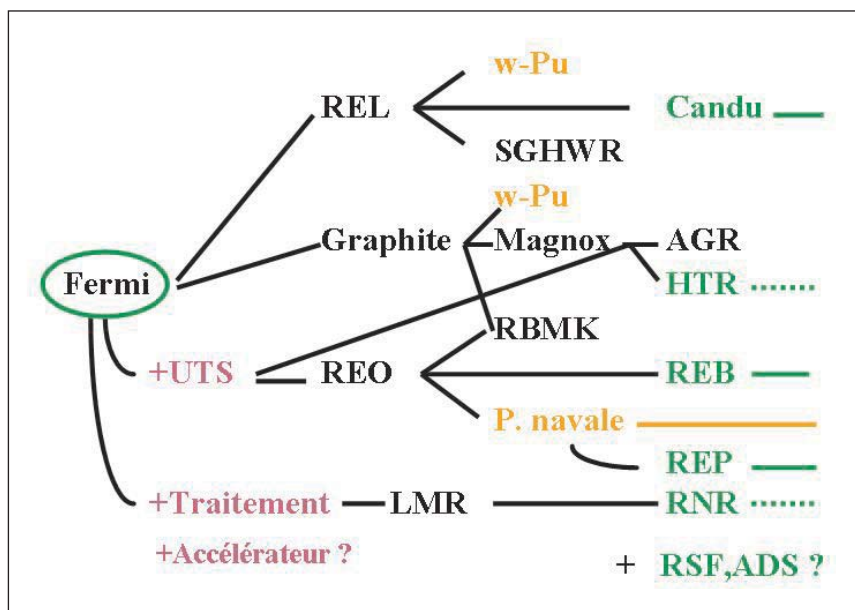


Figure 3 : Le «phylum» de l'espèce réacteur nucléaire

	Pvol (MWt/m <sup>3</sup> )	Rendement (%)	
Magnox, UNGG	1	30	Permet U naturel
AGR	2	41	
REP, VVER	100	33	
REB	50	33	
Candu	12	29	Permet U naturel
RNR	500	40	Permet la surgénération
HTR	8	45 ou plus	Cœur très réfractaire

Tableau I

raisons de commodité d'usage (réacteur à sodium liquide du sous-marin Seawolf, concurrent du Nautilus), etc.

La sûreté a, petit à petit, joué son rôle dans le processus d'élimination. L'accident de Windscale (1957) a sonné le glas des réacteurs au graphite refroidis par air, et la sous-espèce «Babcock & Wilcox» des REP n'a pas survécu à l'accident de Three Mile Island 2. S'il subsiste une douzaine de RBMK après Tchernobyl, leur extinction est garantie.

De même que l'enrichissement avait rendu inutile la «finesse» neutronique exigée par les réacteurs à uranium naturel, la découverte que l'uranium n'était pas vraiment rare sur la planète pour peu qu'on se donnât les moyens de prospecter à grande échelle a constamment diminué l'avantage compétitif que constitue, pour une filière, son économie de matières premières. Les surgénérateurs ont, bien sûr, souffert de cette érosion qui les rend chroniquement «indispensables, mais pas tout de suite», et les réacteurs à sels fondus, également.

La sélection a pu, enfin, être le résultat d'une mauvaise conjoncture : les réacteurs à hautes températures HTR ont ainsi réalisé leur percée commerciale aux Etats-Unis au début des années soixante-dix, juste avant la vague de fond d'annulation de commandes de centrales nucléaires qui a suivi, là-bas, le premier choc pétrolier de 1974.

Cette liste ne doit pas laisser croire que seuls des facteurs négatifs ont joué dans une sélection par simple élimination ; des facteurs positifs se sont aussi révélés déterminants. Il est manifeste que l'émergence des REP a été prodigieusement favorisée par le fait que ces réacteurs s'étaient préalablement imposés dans la propulsion navale, où la compacité était essentielle. Ils ont ainsi bénéficié aux Etats-Unis d'un développement industriel incomparable, qui a permis à Westinghouse de tailler des croupières au géant General Electric. De même, Magnox, UNGG et RBMK sont directement dérivés de réacteurs conçus et développés pour produire le plutonium des armements nucléaires.

## Les filières d'aujourd'hui

Les résultats de la sélection que nous venons de décrire se lisent clairement dans le tableau II :

Filière	En marche		En construction	
	GWe	Nb unités	GWe	Nb unités
<b>Magnox, AGR</b>	12	34		
<b>REP</b>	197	207	11	12
<b>REB</b>	79	91	7	6
<b>VVER</b>	31	49	16	18
<b>RBMK</b>	14	18	0,9	1
<b>Candu</b>	21	39	6	11
<b>RNR</b>	1	4	3	5
<b>TOTAL</b>	357	442	43	53

Tableau 2 (01/01/2000)

### Les réacteurs à gaz

Les filières graphite - gaz ont été progressivement abandonnées par la France, l'Italie, l'Espagne et le Japon, elles ne représentent plus que 4 % du parc actuel. Seuls subsistent les Magnox et AGR britanniques, mais le réacteur anglais le plus récent est un REP.

### Les réacteurs à eau ordinaire

Toutes variétés confondues, les réacteurs à eau ordinaire (ou «légère») représentent 86 % du parc en fonctionnement et 79 % des constructions en cours. Ces chiffres sous-estiment encore la domination réelle de ces filières car ils ne comptabilisent que les centrales électrogènes. Même avec les réductions de programmes militaires, il y a à peu près autant de réacteurs nucléaires à bord des sous-marins, porte-avions et brise-glaces qu'au cœur des centrales, et ce sont tous de petits REP (leur puissance unitaire est plutôt de l'ordre de 100 MWt que de 3000 MWt). **Les réacteurs à eau ordinaire sont, de loin, l'espèce dominante dans «l'éco-tope» nucléaire, ne laissant aux autres que quelques niches spécifiques.**

L'eau ordinaire a le meilleur des pouvoirs ralentisseurs ; les cœurs sont donc compacts. L'eau, en revanche, absorbe beaucoup les neutrons ; le combustible doit donc avoir une teneur significative en isotopes fissiles, de l'ordre de 4 % en  $^{235}\text{U}$  ou de 8 % en plutonium. Cette teneur autorise le déchargement du combustible à l'arrêt. L'utilisation de la matière fissile y est médiocre, le taux de conversion dépassant peu 0,65.

Les REP se taillent la part du lion, justifiant à posteriori le changement de filière décidé en France en 1969 (encore qu'on puisse imaginer que les caractéristiques du programme «quantitatif» d'EdF, standardisation, sites à tranches multiples, effet de série, effet de taille des installations de fabrication de gros composants, etc.

auraient assuré le succès de n'importe quelle filière). Ils sont robustes, fiables, et affichent des progrès continus en termes de disponibilité, taux de combustion, durée de cycle, capacité à suivre le réseau et dose collective aux opérateurs.

Le N4 français est le REP le plus moderne en service aujourd'hui. La compagnie TVO, de Finlande a commandé en décembre 2003 un réacteur EPR, réacteur de la lignée «évolutionnaire» qui emprunte beaucoup au N4 et au Convoy mais avec des dispositifs spéciaux pour limiter considérablement les conséquences d'une improbable fusion du cœur, et EDF s'apprête à faire de même. De son côté, Westinghouse a développé le concept AP1000, plus innovant, mais qui, en conséquence, ne bénéficie pas du même retour d'expérience.

Plus simples dans leur principe, les REB fonctionnent en régime diphasique, sans recours à des générateurs de vapeur : en effet, la vapeur est directement produite au sein de l'eau primaire, qui joue le double rôle de modérateur et de caloporteur. Après séparation, la fraction de vapeur va actionner les turbines, puis, après condensation, rejoint la fraction liquide recirculée.

Ne bénéficiant pas de la synergie avec la propulsion navale, les REB ont connu, au plan mondial, un succès un peu moindre que celui des REP, mais au Japon, par exemple, il font jeu égal, voire mieux. Tokyo Electric Power Co a mis en service deux unités du modèle le plus récent, l'ABWR, et des dessins plus avancés (SBWR, SWR) existent sur le papier.

Les Russes ont développé leurs propres variantes de REP, en deux tailles, 440 et 1 000 MWe, et les ont répandues dans les pays de l'ancienne Union soviétique et de sa zone d'influence. A l'exception de la première génération (VVER 440/230) qui n'a pratiquement pas de confinement, les VVER, correctement maintenus et équipés de contrôle - commande à l'occidentale -, sont au niveau des REP déjà anciens. On cite en exemple les réacteurs finlandais de Loviisa et les VVER hongrois de Paks. Si la sûreté de certains autres reste préoccupante, cela ressort plus de l'état de leur maintenance, et de la formation de leurs opérateurs.

Les Russes ont dans leurs cartons un modèle moderne, le VVER-640.

### Les réacteurs graphite-eau RBMK

C'est malheureusement avec l'accident de Tchernobyl que l'Occident a (re)découvert la filière RBMK, qui n'avait jamais été exportée hors d'URSS à cause de ses qualités plutoniques.



Le combustible, en oxyde d'uranium légèrement enrichi, est refroidi par de l'eau bouillante qui circule à l'intérieur de tubes de force, lesquels traversent un énorme massif de graphite modérateur. La grande taille du cœur et le découplage des fonctions modérateur/caloporteur font que la stabilité de ces réacteurs est précaire, et ils ne sont pas équipés d'une enceinte de confinement unique, comparable à celle des réacteurs occidentaux. Ces deux caractéristiques expliquent à la fois la possibilité de l'accident et la gravité de ses conséquences. L'arrêt complet de cette filière est programmé.

### Les réacteurs à eau lourde CANDU

Les CANDU<sup>5</sup>, spécialité canadienne, sont aujourd'hui la seule filière active qui se maintienne sur sa niche à côté des réacteurs à eau légère.

L'utilisation d'eau lourde comme modérateur et caloporteur leur permet d'utiliser un combustible en oxyde d'uranium naturel, capable d'atteindre des taux de combustion élevés. Le refroidissement du combustible, renouvelé en marche, s'effectue dans des tubes de force. L'eau lourde doit être régulièrement reconcentrée et détritée.

Les Canadiens ont remporté de beaux succès à l'exportation (Inde, Pakistan, Roumanie, Corée, Chine) grâce à leur spécificité : utiliser l'uranium naturel, et donc s'affranchir de l'enrichissement, technologie réservée à très peu de fournisseurs... et qui entraîne des droits de contrôle sur le combustible. Le CANDU peut aussi arguer de deux avantages pour un pays qui débute dans le nucléaire : il existe en petite taille, 600 voire 300 MWe, alors qu'il n'y a pas en fonctionnement de REP de conception récente à moins de 1 000 MWe, et la technologie des tubes de force est plus accessible que celle des grandes cuves.

### Evolution, dominance, environnement

Comme dans la nature, le succès d'une espèce rend d'autant plus difficile la pénétration d'une autre sur la même niche écologique : les usines de construction sont faites pour construire des composants de réacteurs à eau, les installations du cycle de combustible sont optimisées pour les réacteurs à eau, la R&D est majoritairement consacrée aux réacteurs à eau, et même les réglementations et standards de sûreté sont conçus avant tout pour des réacteurs à eau.

On peut donc raisonnablement s'interroger : y a-t-il place pour quelque autre espèce que les REP et REB ? Leurs technologies sont assez voisines pour que leur coexistence ne pose pas de vrai problème, et suffisamment différentes pour assurer cet élément de diversification que certains estiment indispensable, et qui explique peut-être en partie la survie «en niche» des CANDU. Ne peut-on se contenter de perfectionner doucement cette double filière ?

Peut-être faut-il raisonner, sinon en négatif, du moins en différentiel. Tout nouveau candidat ne trouvera un cré-

neau que s'il affiche un avantage indiscutable dans au moins un domaine important où les REP et REB présentent une faiblesse indiscutée. Mais les notions d'*avantage* et d'*important* peuvent varier au cours du temps.

Prenons en exemple l'automobile. Dans les débuts de cette technologie, on a également assisté à un grand foisonnement inventif, et la primauté du moteur à combustion interne sur la vapeur et l'électricité ne s'est pas établie du jour au lendemain. La première automobile à franchir la barrière des 100 km/h était une voiture électrique (la «Jamais contente» de Jenatzy, en 1899), exploit que je pourrais rapprocher de celui de EBR1, réacteur à neutrons rapides qui a été le premier à fournir de l'électricité en 1951. Mais la voiture électrique a été totalement marginalisée pendant des décennies, si l'on excepte son avatar sur rails qu'on appelle aujourd'hui TGV. Pourtant, dès 1900, il était *indiscutable* que la voiture électrique était très supérieure aux autres en termes de pollution atmosphérique, et de silence. Ce n'étaient pas, à l'époque, des domaines *importants*, mais ils le deviennent aujourd'hui, au moins en milieu urbain, et la voiture électrique, rebaptisée véhicule propre, n'a peut-être pas dit son dernier mot.

A côté des qualités qui ont assuré leur succès, les réacteurs à eau ordinaire présentent, vus d'aujourd'hui, au moins cinq faiblesses identifiées, que nous énumérons sans les hiérarchiser, et qui ouvrent, peut-être, autant de créneaux :

1. La première, connue depuis toujours, se situe dans un domaine qui semblait hier important, qui paraît aujourd'hui secondaire, mais qui ne peut manquer de redevenir très important, si l'énergie nucléaire elle-même a un avenir à long terme : ils utilisent très mal le potentiel énergétique de la matière première uranium. En cycle ouvert, leur taux d'utilisation n'atteint pas 1 %, valeur qu'ils ne dépassent pas de beaucoup en mode recyclage.
2. La deuxième n'est ressentie comme faiblesse potentielle que depuis peu : ces réacteurs se prêtent mal (pour la même raison d'économie neutronique) à la transmutation des déchets radioactifs à vie longue, qu'on étudie en France dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991.
3. Les réacteurs à eau ordinaire semblent ne pouvoir être compétitifs avec les centrales à combustibles fossiles que pour des tailles unitaires élevées, voire très élevées (> 1 000 MWe). C'est évidemment un frein à leur introduction sur des réseaux électriques limités, ou à leur adoption par des compagnies électriques de taille modeste.
4. La sûreté de ce type de réacteurs repose sur le déclenchement de systèmes de sauvegarde «actifs» en cas

<sup>5</sup> CANadian Deuterium Uranium.

d'accident, et, plus généralement, sur une bonne compréhension, par des opérateurs bien formés et régulièrement entraînés, d'un système global complexe. En dépit de progrès constants, ce ne sont pas encore des réacteurs «à mettre entre toutes les mains».

5. Ces réacteurs sont, enfin, limités dans leur rendement thermique aux environs de 33 %, ce qui les pénalise dans une compétition avec des centrales fossiles qui ont accompli, ces dernières années, de remarquables progrès dans ce domaine.

C'est en démontrant leur supériorité dans un ou plusieurs de ces domaines, que les filières que nous allons mentionner peuvent se présenter en «*challengers*» futurs.

## De la sélection naturelle à un processus formalisé de sélection

### INFCE

L'évolution que nous avons tenté de décrire jusqu'ici était fondée sur une sélection «naturelle», quasi spontanée, même si chaque choix individuel avait sa propre rationalité. Une première tentative a eu lieu, en 1977, pour orienter volontairement l'évolution. Par la volonté du Président Jimmy Carter, un exercice international de deux ans, l'INFCE (International Fuel Cycle Evaluation) a été mené sous les auspices de l'AIEA pour revisiter tous les modèles possibles de réacteurs et leurs cycles associés, afin de choisir systématiquement le système nucléaire du futur. Nous avons vu à quel point la sélection antérieure avait été multicritère : l'INFCE était complètement biaisé, dans la mesure où le Gouvernement américain entendait l'utiliser pour imposer au monde entier ses propres choix, sur la base du seul critère de la non-prolifération. Le Président Carter voulait notamment généraliser l'interdiction du traitement du combustible usé pour en recycler le plutonium. Cette tentative a échoué devant une alliance informelle des Européens et des Japonais, mais il est resté de l'INFCE une bonne synthèse technico-historique.

### Génération 4

En 1999, le DOE américain a lancé une invitation à un certain nombre de pays détenteurs de la technologie nucléaire pour participer à un exercice de définition des caractéristiques souhaitables des systèmes nucléaires «de génération 4», qui pourraient être mis en service industriel après 2030, afin de lancer à temps la R&D nécessaire à leur réalisation future.

Une dizaine de pays, France en tête, se sont joints à cette initiative, au sein du GIF (Generation 4 International Forum). Pendant deux ans des critères de sélection ont été formalisés, et une bonne centaine de concepts ont été passés au crible de ces critères :

- Durabilité (Utilisation des ressources fissiles, minimisation des déchets, résistance à la prolifération et protection physique)
- Sécurité et fiabilité (radioprotection, contrôle de la réactivité, évacuation de la puissance résiduelle, limitation des conséquences d'une fusion de cœur)
- Economie.

Six modèles ont passé la présélection :

- Réacteur à eau supercritique SCWR
- Réacteur à très haute température VHTR
- Réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium SFR
- Réacteur à neutrons rapides refroidi aux alliages de plomb LFR
- Réacteur à neutrons rapides refroidi au gaz GFR
- Réacteur à sels fondus MSR.

Nous donnerons plus loin quelques détails sur ces concepts, mais l'on peut déjà souligner que trois ou quatre sont à neutrons rapides, et que seul le réacteur à très haute température, qui vise la co-génération d'électricité et d'hydrogène, est à cycle «ouvert».

### INPRO

En parallèle, à partir de 2000, un exercice appelé INPRO (International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles) se déroule au sein de l'AIEA, suite à une initiative du Président Poutine, et qui, elle aussi, établit une méthodologie de comparaison de concepts futurs, à l'horizon 2050. Même s'ils ne sont pas dépourvus de recouvrement, les deux exercices sont complémentaires dans la mesure où Generation 4 regroupe des détenteurs de technologie alors que INPRO se focalise plus sur les demandes de clients éventuels.

Dans les deux cas, il s'agit d'une volonté délibérée de substituer un processus rationnel et formalisé de sélection à la sélection spontanée d'antan. A suivre !

### Réacteurs à neutrons rapides

C'est le critère d'utilisation des matières fissiles que visent, depuis les années cinquante, les réacteurs à neutrons rapides, parce que, en mode surgénérateur, ils peuvent, par recyclages successifs, utiliser la quasi-totalité de l'énergie contenue dans l'uranium, cent fois plus qu'un réacteur à eau ordinaire. Mieux encore, ils peuvent fonctionner en recyclant l'uranium appauvri laissé inutilisé lors de l'enrichissement isotopique.

Un exemple (certes schématique) illustrera l'importance de l'enjeu :

Un REP N4 fonctionnant en multi-recyclage optimisé aura accumulé en 40 ans sur le territoire national 20 tonnes de plutonium et 5000 tonnes d'uranium appauvri. Avec cet inventaire initial de plutonium, un RNR juste régénérateur pourra fonctionner en autarcie, par recycla-

ges successifs, en consommant une tonne par an d'uranium appauvri, c'est-à-dire... 5 000 ans, sans avoir à extraire du sol, ou de l'eau de mer, le moindre kilogramme d'uranium supplémentaire.

Les seuls RNR sur lesquels on ait un retour d'expérience significatif sont ou étaient refroidis par du sodium liquide, entre 300 et 500 °C. C'est un excellent caloporteur, très peu corrosif des aciers inoxydables quand il est pur, mais il s'enflamme spontanément à l'air et réagit vivement avec l'eau.

Pour éviter toute réaction possible entre le sodium activé du circuit primaire et l'eau du circuit des turbines, les RNR actuels comportent un circuit intermédiaire de sodium inactif. Ce circuit supplémentaire, et la nécessité d'utiliser des matériaux nobles au contact du sodium, font que le coût d'investissement des RNR est plus grand que celui des REP de même capacité. Les RNR n'ont donc de chance d'émerger que si - ou quand - leur qualité spécifique, l'économie de matière fissile, devient un facteur clé de succès.

Comme le développement de l'énergie nucléaire est resté très en deçà de ce qu'on espérait dans les années soixante-dix, pour les quelques décennies à venir, il ne semble pas que les préoccupations de pénurie possible et d'escalade des coûts de l'uranium doivent atteindre le degré qu'elles avaient en 1976, quand fut décidée la construction de Superphénix. Toujours aussi intéressants à terme, les surgénérateurs n'apparaissent plus urgents. Dans ce nouveau contexte, on a le temps d'envisager ou de revisiter des caloporteurs moins réactifs que le sodium, tels que le plomb et ses alliages, fortement promu par certains instituts russes, ou l'hélium, étudié dans les années soixante-dix.

Dans les années quatre-vingt-dix, un regain d'intérêt s'est manifesté pour les RNR, sous l'angle de la minimisation des déchets. Si la gestion des déchets radioactifs impose un jour de séparer et transmuter un certain nombre de radionuclides à longue période de décroissance, les RNR seront particulièrement bien adaptés à cette tâche, par l'importance de leur flux neutronique et la possibilité d'y optimiser localement le spectre pour favoriser telle ou telle capture résonante.

## Les réacteurs à haute température HTR

Les HTR ont été développés autour d'un combustible très original, conçu initialement en Angleterre, la «particule enrobée». Ce combustible très divisé, dispersé en proportion aisément ajustable au sein d'une masse de modérateur carboné, permet de constituer des cœurs très réfractaires, refroidis par un gaz à haute température, qui ouvre la possibilité de cycles thermodynamiques équivalents à ceux des meilleurs turbines à gaz. En mélangeant judicieusement des particules différentes, on peut aussi s'accommoder de tous les cycles de combustible, ou presque.

L'équivalent HTR d'un «assemblage» existe en deux versions différentes : le bloc prismatique traversé par des canaux de gaz et le boulet sphérique.

D'une grande inertie thermique, et dotés de larges marges par rapport à leur point de fonctionnement, les HTR sont particulièrement sûrs. Leur faible puissance volumique se traduit, en revanche, par un coût d'investissement élevé.

Après des démonstrations prometteuses, les HTR ont connu un premier faux départ au début des années soixante-dix aux Etats-Unis et dans les années quatre-vingt en Allemagne. Ils sont actuellement réétudiés sous la forme de petits réacteurs modulaires à cycle direct d'hélium, leur taille étant ajustée pour permettre l'évacuation «passive» de la chaleur résiduelle. C'est dans cette optique que se situent les projets GT-MHR dont Framatome est l'un des promoteurs et le projet sud-africain Pebble Bed Modular Reactor qui suscite un intérêt international. Génération 4 s'intéresse à une version poussée des HTR, le VHTR qui sortirait du gaz vers 1000 °C, car cette température rend possible la décomposition catalytique de la molécule d'eau, c'est-à-dire la production d'hydrogène par chaleur nucléaire sans passer par la production d'électricité et l'électrolyse. C'est tout le secteur des transports qui deviendrait dès lors accessible à l'énergie nucléaire.

## Les réacteurs à sels fondus RSF

Le plus futuriste des concepts sélectionnés par le GIF est le réacteur à sels fondus, qui peut être à spectre thermique (fluorures fondus et modérateur graphite) ou rapide (chlorures fondus).

Un très petit RSF a fonctionné à Oak Ridge de 1965 à 1969, et démontré les possibilités séduisantes de ce type de réacteurs : souplesse vis-à-vis du cycle de combustible, pas de fabrication de combustible, pas de fusion intempestive du combustible (il est déjà fondu !), pas de transports avec le traitement/recyclage en ligne, et faible surgénération possible en spectre rapide.

Périodiquement reconsidéré (et dernièrement en tant qu'ADS), le RSF est un peu l'outsider permanent. Il ne faut pas se cacher que le passage à un combustible liquide nécessiterait, outre les développements technologiques, en particulier pour maîtriser la corrosion, une véritable re-conception de la sûreté des réacteurs.

## Réacteurs hybrides ADS

Bien qu'il ne fassent pas partie des concepts de Génération 4, on peut enfin mentionner les concepts de réacteur «hybride», aussi désignés par ADS pour Accelerator Driven Systems. Ils sont constitués - sur le papier - d'un réacteur légèrement sous-critique, suralimenté en neutrons rapides par «spallation» des noyaux lourds d'une cible sous l'impact de protons accélérés à très haute énergie (~1 GeV).

Étudiés pour diverses raisons, ils le sont surtout en tant que réacteurs dédiés à la transmutation de radionuclides à vie longue (créneau 2) : dans ce type d'application, le réacteur serait un RNR, et l'intérêt de le maintenir sous-critique viendrait de la possibilité de charger beaucoup le

cœur en actinides mineurs, nucléides dont la fission s'accompagne d'une très faible part de neutrons retardés.

Il semble aujourd'hui qu'en dehors de ce créneau les autres avantages potentiels des ADS ne puissent compenser les surcoûts de systèmes couplés aussi complexes.

## Conclusion

Sous la double pression de la démographie et des aspirations légitimes au développement des populations non encore industrialisées, la demande en énergie de l'humanité n'a pas fini de croître. Simultanément, les menaces que fait peser sur le climat planétaire l'augmentation de l'effet de serre due à l'utilisation massive des combustibles fossiles nous contraindra à limiter leur expansion : dans ces conditions, on imagine mal un développement durable qui ne fasse pas appel de plus en plus aux ressources nucléaires.

Quels seront les réacteurs qui permettront ce nouveau développement nucléaire ? J'espère vous avoir démontré que la technologie est jeune, et que ses possibilités d'évolution, d'adaptation à de nouveaux contextes, à de nouvelles exigences sont encore considérables. Ma seule certitude - et vous me permettez ici d'affirmer sans complexe mon appartenance à une Compagnie dont c'est l'une des raisons d'être - c'est qu'il n'y aura de nucléaire durable que dans une stratégie de gestion responsable des déchets radioactifs et de recyclage des matières fissiles et fertiles.

## Références

- 1 BARRÉ B., L'énergie nucléaire, in Université de tous les savoirs, vol. 5 «Qu'est-ce que la technologie ?», Ed. Odile Jacob, 2001.
- 2 BARRÉ B., Tout sur l'énergie nucléaire, d'Atome à Zirconium, AREVA, 2002.

## Glossaire (par ordre d'apparition dans le texte)

CP1	Chicago Pile 1, premier réacteur nucléaire
UNGG	Réacteur à Uranium Naturel, refroidi par Gaz et modéré au Graphite
CANDU	Réacteur Canadien à Deutérium et Uranium
Magnox	Comme UNGG, mais en Grande-Bretagne
RBMK	Sigle russe pour Grand Réacteur à Eau
AGR	Advanced Gas-cooled Reactor
REL	Réacteur à Eau Lourde (en anglais : HWR)
REO	Réacteur à Eau Ordinaire (= LWR)
REB	Réacteur à Eau Bouillante (= BWR)
REP	Réacteur à Eau sous Pression (= PWR)
HTR	Réacteur à Haute Température
RNR	Réacteur à Neutrons Rapides (= FBR)
RSF	Réacteur à Sel Fondu (= MSR)
ADS	Accelerator Driven System
MWe	Mégawatt de puissance électrique
GeV	Milliard d'électron-volts

## Bertrand Barré

bertrand.barre@areva.com