

# Les réacteurs à neutrons rapides surgénérateurs de 4<sup>ème</sup> génération

## Pourquoi, comment, quand

Dominique GRENECHE - Collège d'experts de PNC-France

---

### PREAMBULE

En septembre 2019 le gouvernement décidait d'arrêter le projet ASTRID<sup>1</sup> de prototype de réacteur à neutrons rapides (RNR) alors même que dans le monde une dizaine de projets sont en cours d'étude, ou de construction. La France avait 20 ans d'avance et va se trouver à la traîne. Comment ne pas citer Yves Bréchet, ancien Haut-Commissaire à l'Energie Atomique :

- « ... il faut avoir une idée bien singulière de ce qu'est une filière industrielle pour penser qu'on pourra se positionner dans cette course en se contentant d'études papier qui par miracle s'incarneraient dans un objet industriel le moment venu... ».
- « Au prix d'une pirouette rhétorique, la fermeture du cycle du combustible demeure la politique officielle de la France ».
- « Pour faire bonne mesure, on s'offrira quelques études sur des solutions technologiquement moins matures (pour être bien certains qu'elles ne passent jamais à l'étape d'industrialisation) ... et par une admirable tartufferie on renoncera à la fermeture du cycle tout en prétendant le conserver ».

Le décor est planté.

-----

### PREMIERE PARTIE : LES FONDEMENTS DE LA REGENERATION

Dans cette première partie, on décrit de façon simple mais complète le phénomène de régénération qui consiste à générer autant (isogénération) ou même plus (surgénérations) de combustible, la matière fissile que l'on en consomme dans un réacteur nucléaire pour produire de l'énergie, et on explique pourquoi un tel processus ne peut se réaliser qu'avec des réacteurs à neutrons rapides pour des combustibles à base d'uranium. On expose ensuite très succinctement la genèse des idées et des premières expériences sur ce phénomène.

#### 1 - Rappel de quelques fondamentaux

On sait que le « carburant » de l'énergie nucléaire est constitué par la fission de **noyaux** atomiques provoquée par l'absorption d'un neutron<sup>2</sup>. De plus, cette réaction nucléaire libère plusieurs neutrons qui peuvent à leur tour être absorbés par d'autres noyaux « fissiles » et conduire ainsi à enclencher une « réaction en chaîne ». Malheureusement, Il se trouve que ce processus ne peut se réaliser facilement qu'avec **un seul noyau atomique existant dans la nature** : l'isotope N° 235 de l'uranium, **l'U235**, dont la proportion est très faible dans l'uranium naturel (Unat) : 0,7 % seulement. L'autre isotope de l'Unat, **l'U238**, qui est donc en proportion de 99,3 %, n'est **pratiquement pas fissile**. Mais nous allons voir qu'il joue un **rôle fondamental dans le processus de régénération**.

---

<sup>1</sup> Titre de l'article : « L'arrêt du programme ASTRID : une étude de cas de disparition de l'état stratégique » (<http://23.pcf.fr/112980>)

<sup>2</sup> En effet, le neutron absorbé apporte au noyau une énergie de liaison qui déforme le noyau jusqu'à le faire éclater en deux morceaux en libérant une quantité d'énergie colossale comparée à celle de n'importe quel autre processus chimique : en ordre de grandeur, l'énergie nucléaire (libérée par une fission d'un noyau atomique) est un million de fois plus élevée que l'énergie chimique qui met seulement en jeu les électrons entourant chaque noyau atomique

Quelques rudiments de physique nucléaire permettent de comprendre : rappelons d'abord que la fission est d'autant plus probable que la vitesse des neutrons est faible<sup>3</sup>. Or les neutrons émis par une fission sont extrêmement rapides (plusieurs dizaines de milliers de km par seconde) et il faut donc réduire énormément leur vitesse pour espérer qu'au moins l'un d'entre eux puisse provoquer une autre fission. D'où l'idée de mélanger l'uranium avec un corps appelé « modérateur » formé de noyaux aussi légers que possible sur lesquels les neutrons peuvent « rebondir » et ainsi se ralentir (à l'instar de boules de billard qui s'entrechoquent). C'est le principe de fonctionnement des réacteurs nucléaires électrogènes actuels dit « réacteurs à neutrons lents », RNL<sup>4</sup>.

Pour concevoir un RNL il faut choisir le bon modérateur en tenant compte des autres contraintes de conception. Du seul point de vue de l'efficacité du ralentissement, le meilleur des modérateurs est l'hydrogène car son noyau est formé uniquement d'un seul proton dont la masse est pratiquement la même que celle du neutron<sup>5</sup>. L'élément le plus commun contenant beaucoup d'hydrogène est évidemment l'eau ordinaire, d'autant plus que l'eau peut servir en même temps de fluide caloporteur. Mais elle capture pas mal de neutrons ce qui oblige à enrichir l'uranium en isotope U235 fissile pour pouvoir entretenir une réaction en chaîne. Cet inconvénient est amplement surmonté aujourd'hui avec une technologie de l'enrichissement parfaitement industrialisée. D'où la très large domination des réacteurs à eau (ordinaire) dans le parc mondial actuel de réacteurs nucléaires, constitué de réacteurs à eau pressurisée (en France en particulier) ou bouillante, les REP et les REB.

## **2 - Pour bien comprendre ce qu'est la « régénération » : le bilan des neutrons dans un réacteur nucléaire.**

Le nombre moyen de neutrons émis par une fission dans les REL, noté usuellement  $\nu$ , est égal à 2,44, très nettement supérieur à un. Cela laisse a priori beaucoup de marge pour entretenir une réaction en chaîne puisqu'il suffit théoriquement qu'un seul neutron issu de fission puisse provoquer une autre fission. En réalité,  $\nu$  doit nécessairement être très nettement supérieur à 1 pour pallier les effets des différents processus de perte affectant les neutrons issus de fission.

- La première de ces pertes résulte du fait qu'un neutron absorbé dans un noyau fissile ne provoque pas nécessairement une fission de celui-ci. Par exemple, pour l'U235 absorbant un neutron lent, la probabilité d'une fission n'est que de 0,85, car dans 15 % des cas l'U235 conserve le neutron (et forme ainsi l'isotope supérieur U236), d'où un **facteur de reproduction des neutrons, noté  $\eta$** <sup>6</sup>.
- La seconde résulte de la **fuite de neutrons** à l'extérieur du cœur du réacteur (que l'on minimise à l'aide de réflecteurs de neutrons entourant le cœur).
- Les neutrons sont enfin **capturés** dans les autres matériaux présents dans le réacteur<sup>7</sup>,
- Mais, ce qui est important pour la suite, les neutrons sont aussi capturés par l'U238 fertile, qui est initialement 25 fois plus abondant dans le cœur du réacteur que l'U235 fissile .

Cette dernière capture est loin d'être stérile, car **la capture d'un neutron par l'U238 donne naissance à un nouvel élément artificiel, le plutonium 239 (Pu239), qui lui est fissile, au même titre que l'U235.**

<sup>3</sup> ce qui peut paraître curieux car on imagine intuitivement que plus la vitesse d'impact du neutron est élevée plus grandes sont les chances de casser un noyau. Toutefois, on peut le comprendre en admettant que plus le neutron est lent, plus il reste longtemps au voisinage du noyau ce qui laisse plus de temps à celui-ci « d'attraper » le neutron, un peu comme un gardien de but qui peut attraper d'autant plus facilement le ballon (« absorber le ballon ») que celui-ci arrive lentement dans les buts.

<sup>4</sup> Parfois appelés aussi réacteurs à neutrons « thermiques » car la vitesse des neutrons une fois ralentis est du même ordre que celle des atomes qui se déplacent dans la matière du fait de l'agitation thermique).

<sup>5</sup> De fait, le choc d'un neutron sur un proton peut lui faire perdre beaucoup de vitesse et même l'immobiliser totalement en un seul choc (un peu comme dans le cas d'un « carreau » à la pétanque)

<sup>6</sup>  $\eta$  est le nombre moyen de neutrons émis par fission,  $\nu$ , multiplié par la probabilité que se produise cette fission une fois le neutron absorbé dans le noyau :  $\eta = 2.44 * 0.85 = 2,07$  ce qui laisse une marge de 1,07 neutrons de perte possible.

<sup>7</sup> Ce sont le modérateur (eau), les éléments de structure (essentiellement les aciers des assemblages combustibles), les produits créés par les fissions, qui s'accumulent (notamment le xénon-135).

C'est en quelque sorte un « carburant de synthèse » qui vient d'être créé au sein du réacteur nucléaire. C'est pour cela que l'U238 est qualifié de **noyau « fertile »**<sup>8</sup>.

L'art du concepteur est d'ajuster au mieux le bilan neutronique afin de limiter les captures inutiles. Pour fixer les idées, dans le combustible « neuf » d'un réacteur à eau pressurisée, un peu plus de 60 % des neutrons de fission sont absorbés dans l'U235, environ un tiers dans l'U238 pour produire du Pu239 (désigné Pu par la suite) et près de 5 % sont perdus dans les captures stériles. Au cours de l'irradiation, les fissions du Pu (qui se forme progressivement dans le combustible) remplacent partiellement celles de l'U235 (dont la concentration diminue) tandis que les produits de fission qui s'accumulent finissent par capturer de façon stérile une partie significative des neutrons (environ 20 %). L'épuisement du combustible (ou taux de combustion) augmente avec la durée d'irradiation et nécessite de renouveler régulièrement le combustible.

Quelques valeurs globales

- 8700 tonnes d'uranium naturel procurent, dans les usines de séparation isotopique, 1250 tonnes d'U enrichi contenant 4 % d'U235, soit 50 tonnes
- Les 50 tonnes d'U235 fissionnés → 400 TWh, la production annuelle du nucléaire en France.
- 30 tonnes de Pu sont créées et il n'en restera que 10 dans le combustible nucléaire déchargé qui seront recyclées dans un combustible mixte U/Pu.
- 50 tonnes de produits de fission restent, constituant les déchets nucléaires.
  - 26 proviennent des fissions de l'uranium.
  - 20 des fissions du Pu
  - Et 4 des fissions de l'U235 par des neutrons rapides.

Finalement on n'utilise, hors recyclage, que **0.6 % de l'uranium extrait du sol pour faire de l'électricité !**

C'est un bien piètre rendement d'utilisation d'une ressource naturelle dont les quantités économiquement récupérables sont évidemment limitées<sup>9</sup>. C'est ainsi que, dès les années 1950/60 a émergé l'idée radicale de régénération.

### **3 - Le secret de la régénération : pourquoi faut-il des neutrons « rapides » ?**

L'idée de base est de mettre à profit la possibilité de **créer de la matière fissile artificielle, le Pu, dans un réacteur nucléaire en quantité supérieure à celle que l'on consomme en fonctionnement**. Autrement dit, et pour reprendre l'analogie avec une voiture à moteur thermique, il s'agit de trouver un moteur permettant de fabriquer autant ou même plus d'essence que l'on en consomme en roulant ! Nous allons voir que cette prouesse est parfaitement réalisable et qu'elle a même été mise en œuvre à une échelle industrielle dans des réacteurs régénérateurs (on y reviendra dans la deuxième partie de cette fiche).

L'élément fondamental de la régénération est que **le nombre moyen de neutrons émis par fission est significativement supérieur pour le Pu239 absorbant des neutrons rapides, soit 2,33 que pour l'U235 absorbant des neutrons lents, soit 2,07**. Or pour espérer produire plus de Pu que l'on en consomme il faut dépasser nettement la valeur 2<sup>10</sup>, ce qu'offrent les fissions sur le Pu

**Tel est le secret des Réacteurs à Neutrons Rapides (RNR).**

<sup>8</sup> Le même phénomène s'applique au Th232 fertile qui peut être transformé en uranium 233 fissile.

<sup>9</sup> Un multi recyclage du Pu, coûteux et peu performant dégraderait encore la qualité isotopique du Pu,

<sup>10</sup> Il faut réserver un neutron pour être absorbé dans un autre noyau fissile (afin d'entretenir une réaction en chaîne) et un autre pour être absorbé dans le noyau fertile (U238) et ainsi donner naissance à un noyau fissile (Pu239). Comme une fraction des neutrons issus des fissions est inévitablement perdue dans des captures stériles ou par des fuites à l'extérieur du cœur du réacteur, il faut que  **$\eta$  dépasse nettement la valeur 2**

Au-delà de cette propriété déterminante du Pu239 dans un RNR pour la régénération, d'autres caractéristiques physiques viennent encore la favoriser :

- il n'y a plus de pertes stériles dans un modérateur qui n'a plus de raison d'être (puisque les neutrons n'ont plus besoin d'être ralentis),
- Les pertes dans les autres matériaux et dans les produits de fission<sup>11</sup> sont inférieures car la probabilité de captures des neutrons rapides est plus faible que pour les neutrons thermiques lents,
- Les pertes de neutrons par capture dans les barres de contrôle est minorée car la « réactivité » du cœur évolue plus lentement grâce aux pertes moindres de neutrons et à une création plus importante de noyaux fissiles,
- Enfin, d'autres isotopes du plutonium tels que le Pu240 ou le Pu242, formés simultanément, deviennent également fissiles avec des neutrons rapides.

Certes les fuites de neutrons hors du cœur d'un RNR sont plus importantes que dans un REP avec modérateur mais ce phénomène est compensé en plaçant des « couvertures » constituées de noyaux fertiles<sup>12</sup> (U238), placées tout autour du cœur, pour absorber les neutrons fuyards tout en générant de nouveaux noyaux fissiles (Pu239).

Avant de conclure il importe de préciser deux notions qui interviennent dans le travail de conception et d'optimisation d'un réacteur RNR :

1. Le Pu formé dans les couvertures à la périphérie du cœur du réacteur des RNR est très riche en Pu239 (plus de 90 %) alors que celui formé au sein du cœur est plus riche en autres isotopes du Pu<sup>13</sup>, qui ont des caractéristiques neutroniques (aptitude à fissionner) très différentes. Or les deux doivent être recyclés avec la meilleure efficacité<sup>14</sup>.
2. Le gain de **régénération, GR** correspond à l'excédent net de Pu239 (en fait de Pu230 éq.) créé par fission dans l'ensemble du réacteur. Ce gain est nul en cas de simple isogénération c'est-à-dire si un réacteur fabrique juste autant de matière fissile qu'il en consomme pour s'autoalimenter

De manière plus globale, intégrant la temporalité du cycle du nucléaire, on définit un **Temps de Doublement Linéaire, TDL**, qui est le délai au terme duquel un RNR a produit une quantité suffisante de Pu239éq pour pouvoir démarrer un nouveau RNR de même puissance<sup>15</sup>. A titre d'exemple le TDL de Superphénix était de 37 ans.

En résumé, un réacteur régénérateur permet de fabriquer autant (isogénérateur) ou même plus (surgénérateur) de noyaux fissiles qu'il n'en consomme pour fonctionner. Ce processus est réalisable avec des réacteurs à neutrons rapides utilisant du Pu comme combustible<sup>16</sup>.

#### **4 – La genèse des idées<sup>17</sup>**

Le concept de régénération a été imaginé pour la première fois en **avril 1944** par le génial physicien Enrico Fermi qui était membre de la petite équipe d'une dizaine de pionniers du projet

<sup>11</sup> Les captures parasites des produits de fission, notamment le Xe135 ou le Sm149, sont réduites d'un facteur 4

<sup>12</sup> On utilise l'uranium appauvri, reliquat de l'enrichissement de l'uranium naturel, qui devient ainsi le combustible du futur.

<sup>13</sup> Le Pu 240, 241 et 242.

<sup>14</sup> Intervient dans la conception une notion de « Pu 239 équivalent » (Pu239éq).

<sup>15</sup> Le TDL tient compte du rythme auquel le Pu produit peut être recyclé, compte tenu des masses immobilisées dans l'ensemble des étapes : refroidissement du combustible, traitement, fabrication de nouveaux combustibles. Quand on raisonne sur un parc de RNR, et non un seul, on parle de Temps de Doublement Composé (TDC), qui est de 0,7 TDL.

<sup>16</sup> Il l'est également avec un combustible formé d'un mélange de thorium (fertile) et d'U233 (fissile) avec une valeur  $\eta$  de 2,33 comparable à celle du Pu238, mais impliquant une opération complémentaire de transformation du thorium en U233. Signalons simplement ici que les performances de régénération d'un cycle au thorium dans un RNL sont nettement moins bonnes que celles d'un cycle intégrant du Pu.

<sup>17</sup> Le lecteur intéressé par cette histoire en trouvera un résumé au chapitre 14.1 (page 530 et suivantes) de notre livre « Histoire et techniques des réacteurs nucléaires et de leurs combustibles » publié en 2016 chez EDP-Sciences

Manhattan (dont 3 prix Nobels), chargée de réfléchir aux différents concepts de réacteurs nucléaires producteurs d'énergie et aux applications civiles possibles de l'énergie nucléaire<sup>18</sup>. En fait, Fermi a émis à l'époque l'idée d'un réacteur nucléaire, qu'il a nommé « The Mother Plant », destiné à fabriquer du Pu239 pour servir de matière fissile à d'autres réacteurs. L'une des options qu'il avait évoquées alors pour la conception d'un tel réacteur était de se servir uniquement de neutrons rapides pour entretenir la réaction en chaîne. Mais c'est le physicien Léo Szilard, très inventif, qui a développé cette idée et proposé explicitement le sodium liquide comme fluide caloporteur pour ces réacteurs. Quelle intuition ! Il a énoncé également qu'un tel réacteur pourrait même produire plus de Pu que la quantité investie au départ pour le faire fonctionner : c'est le principe même de la surgénération (dénommée « Breeding » en anglais). Ajoutons qu'Enrico Fermi déclara juste après la fin de la guerre, en 1945 « *The country which first develops a breeder will have a great competitive advantage in atomic energy* ». Notons au passage que Fermi et Szilard ont été les deux co-auteurs du premier brevet sur la théorie et la conception de réacteurs nucléaires à usages civils, déposé le 19 décembre 1944<sup>19</sup>.

La Commission de l'Energie Atomique américaine (AEC) autorise officiellement le 9 novembre 1947 le Laboratoire National d'Argonne (ANL) à concevoir et à construire un premier RNR. La construction de ce premier prototype de RNR (qui fut également le premier réacteur nucléaire « civil ») est décidée en 1949 et il sera implanté sur le nouveau site nucléaire d'Idaho, ouvert la même année<sup>20</sup>. Il s'agissait d'un réacteur expérimental de puissance 1,4 MWth conçu pour produire de l'électricité. Il fut nommé EBR-1, pour « Experimental Breeder Reactor » N° 1<sup>21</sup>. C'est le **premier réacteur nucléaire au monde à produire de l'électricité** (en très faible quantité il est vrai) et **c'était un RNR ! C'est aujourd'hui un musée.**

La divergence du réacteur (criticité) eu lieu le 24 août 1951. Il ne sera définitivement arrêté qu'en 1964, après avoir engrangé une moisson de résultats très utiles, tant sur le plan technologique que sur le plan de la physique des cœurs des RNR. À cet égard, il a permis notamment de **démontrer en 1953 la possibilité d'atteindre la régénération** dans ce type de réacteur. EBR-1 symbolise donc sans aucun doute la naissance d'une nouvelle filière de réacteurs qui ne peut que se développer dans le futur tant ses possibilités sont riches. Mais c'est aussi le projet, ASTRID, que le gouvernement a arrêté en France il y a deux ans !

---

<sup>18</sup> On a pu se procurer le compte rendu de la réunion du 26 avril 1944 au cours de laquelle Fermi a présenté ce concept qu'il a appelé « Mother plant ». Il est reproduit en annexe IX de notre livre « histoire et techniques des réacteurs nucléaires et de leurs combustibles » publié en 2016 chez EDP-sciences. Onze autres scientifiques de très haut niveau participèrent à cette réunion, dont le futur prix Nobel Eugène Wigner (1963).

<sup>19</sup> "Neutronic reactor"- US Patent 2,708,656 - December 1944 - Enrico FERMI & LEO SZILARD

<sup>20</sup> Pas moins de 52 réacteurs nucléaires expérimentaux et prototypes seront construits sur ce site (INL). Il en reste aujourd'hui un seul en exploitation : l'ATR (Advanced Test Reactor). Mais il est intéressant de noter que la construction d'un nouveau projet de RNR expérimental au sodium de 300 MWth avec un combustible métallique U-Pu-Zr, baptisé « Versatile Test Reactor » (VTR) est prévue sur ce site en 2026.

<sup>21</sup> Le combustible, un **uranium hautement enrichi**, était entouré dans la cuve par une couverture en uranium naturel (Unat) et d'une deuxième plus épaisse à l'extérieur de la cuve et en partie amovible verticalement pour servir de moyen de contrôle de la réaction en chaîne. Le fluide caloporteur qui était un eutectique sodium-potassium (NaK), avec des échangeurs permettant de produire de la vapeur dirigée vers un turbo-générateur d'électricité.