

# LA FILIERE DES REACTEURS SURGENERATEURS PLUTONIUM-SODIUM<sup>1</sup> (PROTOTYPE ASTRID)

BERNARD LAPONCHE – 25 AVRIL 2012

\*

Extraits de la présentation par le CEA<sup>2</sup> des réacteurs de la quatrième génération et du prototype ASTRID :

« Selon l'AIE (Agence internationale de l'énergie) et l'AEN (Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE), les réserves mondiales d'uranium identifiées s'élèvent à 5,5 millions de tonnes<sup>3</sup>... Dès 2050, les réacteurs devraient être amenés à utiliser des réserves d'uranium fortement spéculatives<sup>4</sup> ».

Cette confirmation de la limite des réserves connues d'uranium<sup>5</sup>, constitue le fondement de la justification du développement des réacteurs surgénérateurs, dits de quatrième génération, utilisant le plutonium comme combustible fissile principal et le sodium comme fluide caloporteur et dont le projet de prototype français serait le réacteur ASTRID de 600 MWe.

Ce projet de développement a joui jusqu'ici d'un soutien public important<sup>6</sup> mais il paraît indispensable de l'analyser de façon approfondie, notamment sur le plan de la sûreté nucléaire, comme d'ailleurs sur le plan économique.

Cette note a pour objet de présenter les principaux aspects des questions posées par un tel projet.

Notons que, dans ce même document, le CEA n'envisage pas le déploiement industriel de cette filière avant 2040.

\*

## TABLE DES MATIERES

<b>1. LE FONCTIONNEMENT D'UN REACTEUR A NEUTRONS RAPIDES.....</b>	<b>2</b>
<b>2. LA SURGENERATION.....</b>	<b>2</b>
<b>3. LES COMBUSTIBLES AU PLUTONIUM .....</b>	<b>2</b>
<b>4. LE SODIUM.....</b>	<b>3</b>
<b>5. ELEMENTS DEFAVORABLES DE SURETE DES REACTEURS .....</b>	<b>3</b>
<b>6. LA QUESTION DE LA PROLIFERATION DES ARMES NUCLEAIRES .....</b>	<b>4</b>

---

<sup>1</sup> Note en support de l'audition du 25 avril par la Commission d'enquête du Sénat sur « Le coût réel de l'électricité ».

<sup>2</sup> CEA : « Quatrième génération : vers un nucléaire durable », 31 mars 2010.

<sup>3</sup> En 2008, la puissance installée électronucléaire mondiale s'élevait à 375 000 MWe. A raison d'une consommation annuelle de 200 tonnes d'uranium naturel par GW, cela représente une consommation annuelle totale de 74 000 tonnes.

<sup>4</sup> Ressources supplémentaires à découvrir et ressources non conventionnelles extraites des minerais de phosphate.

<sup>5</sup> De l'ordre du demi-siècle au rythme de consommation actuel, soit à peu près comme le pétrole, avec un niveau de contribution à la consommation mondiale d'énergie primaire beaucoup plus faible puisque l'uranium contribue pour 6% à la consommation d'énergie primaire mondiale contre 33% pour le pétrole.

<sup>6</sup> 650 millions d'euros issus de l'emprunt national de 35 milliards d'euros ont été alloués à la R&D sur ce projet (dont le niveau d'investissement serait de plusieurs milliards).

## 1. LE FONCTIONNEMENT D'UN REACTEUR A NEUTRONS RAPIDES

Dans un réacteur nucléaire à neutrons rapides, la fission et la réaction en chaîne se produisent sans que les neutrons issus de la fission soient ralentis par un modérateur (l'eau dans les réacteurs actuels à uranium enrichi, les REP). Il faut alors une quantité plus importante de matière fissile : on peut utiliser de l'uranium à un taux plus élevé que dans les REP (25% au lieu de 3 à 4%) mais le plutonium est plus intéressant du point de vue physique (plus de neutrons produits par fission dans le Plutonium 239 que dans l'uranium 235) et permet d'envisager une filière de « surgénérateurs ».

Le réacteur ASTRID est étudié comme futur nouveau prototype de réacteur à neutrons rapides<sup>7</sup>, à combustible mélange d'oxyde d'uranium appauvri (issu de l'enrichissement, donc contenant environ 99,7% d'uranium 238) et d'oxyde de plutonium (issu du retraitement des combustibles irradiés) dans une proportion d'environ 20 à 25% de plutonium.

L'élément fissile de base du combustible est donc le plutonium. Parallèlement, une fraction d'uranium 238 se transforme en plutonium au sein de ces combustibles. Si la quantité de plutonium ainsi fabriqué dans le réacteur est supérieure à celle qui est détruite par les fissions, on dit que le réacteur est surgénérateur.

Comme dans un réacteur REP, la chaleur produite dans le combustible doit être récupérée afin de produire de la vapeur, puis de l'électricité. La solution développée dans le monde et choisie pour le prototype ASTRID est le refroidissement par sodium liquide. Ce caloporteur répond en effet à deux impératifs imposés par ce type de réacteurs : un transfert de chaleur par ce métal liquide très supérieur à celui de l'eau (n'ayant pas de modérateur, les cœurs des réacteurs à neutrons rapides ont un très petit volume) et ralentir le moins possible les neutrons.

La puissance électrique du prototype ASTRID serait de 600 MWe.

## 2. LA SURGENERATION

L'utilisation du plutonium comme élément fissile de base implique le développement, outre celui des réacteurs, des opérations de production du plutonium par le retraitement des combustibles irradiés de la filière actuelle (REP) et, ensuite, l'extraction du plutonium des combustibles irradiés des réacteurs surgénérateurs eux-mêmes afin d'alimenter les rechargements du réacteur concerné et des réacteurs suivants.

Au-delà de la vision théorique de l'utilisation de l'ensemble des ressources en uranium 238, le paramètre qui va permettre d'apprécier l'intérêt réel de la surgénération est le temps nécessaire à un surgénérateur pour produire la quantité de plutonium nécessaire au démarrage d'un nouveau réacteur et au bouclage de son cycle du combustible.

***Ce paramètre dépendra des performances du réacteur mais aussi de la durée de stockage des combustibles usés avant retraitement, du retraitement lui-même et de la fabrication des nouveaux combustibles.***

Le raccourci de la présentation du surgénérateur comme la technique permettant l'utilisation « illimitée » de l'uranium masque la réalité et la complexité des opérations que cela implique et donc les coûts et les risques de l'ensemble des techniques à mettre en œuvre.

## 3. LES COMBUSTIBLES AU PLUTONIUM

Le plutonium produit dans les réacteurs est constitué d'un ensemble d'isotopes. Les uns, les plutoniums 239, 240, 241, 242, 243 sont produits à partir de la capture d'un neutron par un

---

<sup>7</sup> Trois réacteurs à neutrons rapides ont déjà fonctionné en France et ont été définitivement arrêtés : le réacteur expérimental Rapsodie, Phénix (250 MWe) et Superphénix 1240 MWe).

noyau d'U238 et l'isotope Pu238 est produit à partir de l'U235 .

Tous les isotopes et composés du plutonium sont toxiques et radioactifs. La radioactivité d'une quantité de plutonium dépend de sa composition en différents isotopes, chacun ayant une « durée de vie » différente et un type différent d'émission de particules<sup>8</sup>.

Si des particules de plutonium sont inhalées ou ingérées, elles irradient directement les organes où elles se sont déposées : le poumon dans le cas d'une inhalation et dans le cas d'une ingestion le foie et les surfaces osseuses notamment. La période biologique du plutonium est très longue car l'élimination de 50 % de la charge de l'organisme nécessiterait 100 ans environ. Il peut donc affecter l'ADN et provoquer des cancers.

Pour ces raisons, les installations industrielles traitant du plutonium (usines de retraitement, usines de fabrication de combustibles au plutonium, transports de plutonium) nécessitent des barrières de protection épaisses (béton, hublots épais...), pour se protéger des émissions de rayonnements « gamma » et « neutrons » (neutrons qui proviennent des réactions nucléaires dans l'oxyde de plutonium qui est la matière ouvragée).

En termes de radioprotection, la limite de dose annuelle, fixée par les autorités de radioprotection pour le public, se traduit pour un adulte à l'inhalation d'une quantité de 1 millième de microgramme de plutonium.

#### **4. LE SODIUM**

Le sodium présente de graves inconvénients qui se sont manifestés dans la plupart des accidents de surgénérateurs :

- Le sodium liquide réagit violemment avec l'eau pour former des oxydes de sodium, de la soude et de l'hydrogène.

Cette réaction exothermique peut se produire en particulier au niveau des générateurs de vapeur (accident de Chevchenko en URSS).

- Le sodium liquide brûle spontanément dans l'air, d'où il résulte des risques d'incendie (accident de Monju au Japon).

- Forte radioactivité du sodium primaire.

- Propriétés corrosives du sodium : peut désagréger le béton.

#### **5. ELEMENTS DEFAVORABLES DE SURETE DES REACTEURS**

- Le coefficient de vide de sodium est positif dans certaines régions du coeur : tout accident d'assèchement du combustible après ébullition du sodium se traduit par une augmentation de puissance.

- Les grandes densités de puissance (5 fois celle d'un REP) et la compacité du coeur le rendent très sensible aux défauts locaux de refroidissement pouvant conduire à la fusion d'un assemblage combustible.

Cela implique une surveillance très étroite du coeur, y compris au niveau de chaque assemblage, par des systèmes de détection diversifiés et redondants qui déclenchent automatiquement des actions de sûreté (baisse des barres de contrôle, baisse de la puissance, arrêt des réacteurs).

- Contrairement à la plupart des autres types de réacteurs (REP par exemple), le coeur n'est pas dans sa configuration la plus réactive (celle qui accélère au mieux la réaction en chaîne). Cela veut dire que si, pour une raison quelconque (secousse sismique par exemple) les

---

<sup>8</sup> Le Pu<sup>239</sup> a une « demi-vie » (temps au bout duquel la moitié de la quantité initiale de cet isotope s'est transformée) de 24 110 ans, tandis que celle de Pu<sup>241</sup> est de 14,4 ans et celle de Pu<sup>238</sup> de 87,7 ans.

Dans le plutonium couramment produit dans les réacteurs des centrales nucléaires, la radioactivité<sup>4</sup> provient surtout de Pu<sup>241</sup> (émetteur « bêta », électrons) et de Pu<sup>238</sup> (émetteur « alpha », noyau d'hélium). De plus, le Pu<sup>241</sup> se transforme en américium 241, émetteur « alpha » de 433 ans de demi-vie<sup>5</sup>. L'activité massique très élevée du plutonium 238 produit, par absorption des « alpha » dans le combustible, un fort dégagement de chaleur.

assemblages combustibles se rapprochaient les uns des autres ou si, à la suite d'une fusion partielle, les combustibles se rassemblait dans une région du coeur, il y aurait une possibilité de formation de masses critiques conduisant à une accélération de la réaction en chaîne (excursion nucléaire) libérant une grande quantité d'énergie sous forme explosive. Un tel accident conduirait, en cas de rupture de l'enceinte de confinement, à la diffusion d'aérosols de plutonium hautement toxiques dans l'atmosphère.

Notons enfin que, dans la note de présentation du prototype ASTRID<sup>9</sup> par le CEA (Commissariat à l'énergie atomique), on lit : « *Une sûreté améliorée<sup>10</sup>, au moins identique à celle d'un réacteur de 3<sup>ème</sup> génération de type EPR et prenant en compte les spécificités des réacteurs à neutrons rapides* ».

La deuxième partie de cette phrase paraît une évidence, la première partie ne nous rassure pas sur les progrès en matière de sûreté, au vu de ce qui a été dit précédemment sur l'EPR.

## **6. LA QUESTION DE LA PROLIFERATION DES ARMES NUCLEAIRES**

Le plutonium 239 est fissile. A l'état métallique (et sous forme de sphère), sa masse critique est de l'ordre de 6 kilos (sa densité étant de 19, le volume est faible).

Deux considérations sont à prendre en compte :

- a) La facilité du développement de l'arme nucléaire à partir de programmes civils incluant la production du plutonium à des fins de fabrication de combustibles nucléaires pour des réacteurs civils.
- b) La tentation de détournement de combustibles neufs contenant du plutonium pour la fabrication de bombes artisanales (le plutonium de qualité « réacteur », c'est-à-dire extrait des combustibles irradiés, permet de fabriquer une bombe dite rustique, moins efficace que les bombes militaires sophistiquées, mais cependant redoutable).

---

<sup>9</sup> CEA : « *Quatrième génération : vers un nucléaire durable* », 31 mars 2010.

<sup>10</sup> Par rapport aux surgénérateurs précédents.