



**ASSOCIATION DES RETRAITÉS DU GROUPE CEA**  
**GROUPE ARGUMENTAIRE SUR LE NUCLEAIRE**

---

## LA GENERATION IV

### 1. INTRODUCTION :

Les générations de réacteurs nucléaires se suivent, mais ne se ressemblent pas !

La première génération, mise en service avant les années 1970, avait pour mission initiale la production de plutonium à des fins militaires, puis le développement progressif de la production d'électricité.

La deuxième génération, née dans les années 1970 et qui constitue la majorité du parc mondial actuel, avait pour fonction principale de réduire la dépendance énergétique des pays vis-à-vis du pétrole. En France, cette génération s'est accompagnée d'une politique de recherche intensive sur le retraitement des déchets.

La troisième génération, décidée après les accidents de Three Mile Island (1979) et de Tchernobyl (1986), se devait d'améliorer la sûreté et de redonner confiance dans la filière nucléaire. Le résultat en France de ces études communes franco-allemandes (FRAMATOME et SIEMENS) est le réacteur EPR (European Pressurised Reactor). Un exemplaire a été commandé par TIPO, société privée finlandaise, à la firme AREVA. Le gouvernement français a donné aussi son accord pour la commande par EDF d'un réacteur analogue. Bien que des améliorations aient été obtenues au niveau de la sûreté et du rendement énergétique, le problème des déchets n'est pas encore totalement résolu l'abandon de Super Phénix ayant privé la France de son avance dans l'utilisation plus complète de l'uranium.

Les réacteurs de quatrième génération devront y répondre de façon plus satisfaisante. Ils sont étudiés dans le cadre d'une association dite Forum International Génération IV, en vue d'une maturité technique autour de 2030 et d'un développement industriel vers 2035-2040. Ces réacteurs de quatrième génération devraient permettre des utilisations plus diversifiées (électricité, hydrogène, eau potable, chaleur).

Mais quelle est la raison d'une telle dynamique ?

### 2. EXPANSION DES BESOINS :

L'assurance d'un approvisionnement en énergie est la préoccupation quotidienne des pays pauvres en pétrole, en gaz, ou en charbon. Les échanges sociaux et économiques progressant entre les pays, c'est une vision mondialiste qu'il faut aujourd'hui avoir présente à l'esprit.

Sur les six milliards d'habitants que compte aujourd'hui notre planète, deux milliards n'ont pas encore l'accès à l'électricité, et ceci n'est qu'un des vecteurs. Vers 2050 nous serons huit milliards. Pour répondre à cette demande humaine et logique des pays pauvres et pour suivre en parallèle l'évolution des pays riches, il va falloir multiplier par 1,5 ou 2 la production mondiale d'énergie à l'horizon 2050, même si l'on s'attaque dès maintenant à une politique d'économie de l'énergie.

Cette évolution croissante devra se faire dans un contexte où les dates limites des réserves fossiles qu'entrevoient les spécialistes commencent à les préoccuper eux-mêmes ; ces limites pourront toujours être un peu repoussées, à condition d'accroître le prix d'obtention des combustibles fossiles recherchés. Les échéances que l'on voit énoncer, et que l'on doit afficher avec prudence, seraient de moins de 100 ans pour le pétrole et le gaz, et de 200 à 300 ans pour le charbon.

Mais ces faibles durées nécessitent dès maintenant le respect d'une politique environnementale déjà soumise à la menace d'un réchauffement climatique et à la réduction drastique du CO<sub>2</sub>, déchet envahissant des combustibles fossiles carbonés.

### 3. DIVERSITE DES UTILISATIONS

**3.1. LES REACTEURS ACTUELS**, principalement des réacteurs refroidis par eau, en majorité pressurisés (REP), sont exclusivement à vocation électrogène ; leur rendement de production électrique est voisin de 33%, le reste de la puissance générée l'est sous forme de chaleur, généralement rejetée dans cette famille de réacteurs ; il y aura donc lieu d'augmenter ce rendement, ce que fera l'EPR avec un rendement de 38 %.

### 3.2. AVEC UNE VISION DE PRODUCTION " ELECTRICITE ET/OU CHALEUR ", nous pouvons envisager :

- des réacteurs hybrides " électricité + chaleur ", c'est à dire la cogénération
- des réacteurs à vocation exclusivement calogène, en vue d'obtenir:
  - soit chaleur basse température (BT), vers 200°C, en vue du chauffage urbain
  - soit chaleur moyenne température (MT), entre 500 et 800°C, pour applications industrielles, dessalement de l'eau de mer
  - soit chaleur haute température (HT), entre 1000°C et 1200°C, pour applications spécifiques, H<sub>2</sub> par exemple.

## 4. PRINCIPAUX OBJECTIFS :

Devant l'éventail de solutions alternatives ou concurrentielles, l'énergie nucléaire présente encore certains défauts auxquels va s'attaquer GENE IV, (déchets du combustible par exemple).

Cette énergie présente par contre des qualités qui retiennent de plus en plus l'attention des gouvernements :

- 1) Indépendance énergétique (le combustible représente 5 à 10% du prix)
- 2) Pas de production de CO<sub>2</sub>.
- 3) Prix du kWh raisonnable, encore amélioré par une durée de vie plus longue et un rendement amélioré.
- 4) Retraitement partiel des déchets dans le cycle propre du combustible (point fort du programme GENE IV)
- 5) L'échéance d'approvisionnement (dans le cas de la fission) peut encore être reportée par l'utilisation de réacteurs surgénérateurs, de réacteurs utilisant le thorium comme combustible, en attendant la mise au point, en cours d'étude, de réacteurs à fusion.

Concernant le point 4), plusieurs idées – force ont été évoquées. Elles représentent les grandes lignes des programmes de R&D dans la génération IV décrite ici, à savoir le recyclage en bloc de tous les actinides, la minimisation des effluents et déchets technologiques, la mise en œuvre de procédés compacts.

Deux axes principaux semblent se dégager :

- d'une part, les procédés hydrométallurgiques (dissolution des combustibles à recycler, gestion groupée des actinides) qui ont démontré leur capacité à délivrer de remarquables performances de récupération, tout en limitant les déchets technologiques générés,
- d'autre part, les procédés pyrochimiques (mise en solution des éléments dans un bain de sels fondus à haute température, récupération sélective des éléments par techniques de génie chimique) déjà expérimentés aux USA et en Russie.

Les recherches engagées par le CEA, dans le domaine du cycle du combustible, portent sur ces 2 axes.

## 5. FORUM INTERNATIONAL " GENERATION IV " :

Devant les besoins énergétiques croissants, le coût et/ou les difficultés d'approvisionnement des combustibles fossiles et le coût du CO<sub>2</sub> produit qu'il faudra faire disparaître, dix pays (Argentine, Brésil, Canada, France, Japon, Corée du Sud, Afrique du Sud, Suisse, Royaume-Uni et Etats-Unis), sur l'initiative en 2000 du DOE américain, se sont donc associés pour étudier les systèmes nucléaires de quatrième génération susceptibles d'être déployés vers 2030.

Dès octobre 2002, après l'étude d'une première phase, une sélection de six systèmes nucléaires a été publiée. Ils permettent des avancées notables en matière de compétitivité économique, de sûreté, d'économie des ressources en uranium, et de réduction de la production de déchets radioactifs à vie longue.

Les six concepts retenus dans la sélection finale, "GENE IV", sont :

### 5.1. CONCEPT DE REACTEUR RAPIDE A CALOPORTEUR GAZ :

#### GFR – (Gas-cooled Fast Reactor System)

Le réacteur rapide à caloporteur gaz (projet RCG-R du CEA) contient dans son cahier des charges les caractéristiques fondamentales des réacteurs nucléaires du futur. Combinant le spectre rapide et un cycle de combustible fermé, il offre la perspective d'une rentabilité maximale de l'uranium naturel, tout en minimisant les déchets ultimes et le risque de prolifération. Opérant à hautes températures, il ouvre la voie à la production d'hydrogène ou au cycle de conversion direct à haut rendement thermodynamique.

Le réacteur proposé s'appuiera sur la technologie hélium développée par ailleurs pour les projets HTR. Ses spécificités sont le combustible et son cycle, le système et sa sûreté. Le cycle du combustible est en rupture avec l'existant, puisqu'on propose de ne pas séparer U et Pu, de ne pas séparer les actinides majeurs (U, Pu) des actinides mineurs (Np, Am, Cm). La conception du cœur (sans couverture fertile) visera l'homogénéité de la production du plutonium et un cycle entretenu par apport d'uranium appauvri. Les premières études ont déjà porté sur le combustible qui devra être dispersé et tenir à haute température (70% de carbures d'uranium et de plutonium, dans une matrice 30% en carbure de silicium). On vise comme conditions de fonctionnement pour l'hélium à l'entrée de turbine : 70 bars et 850°C. Le rendement attendu serait de 70%.

## 5.2. CONCEPTS DE REACTEURS A METAUX LIQUIDES :

### SFR – (Sodium-cooled Fast Reactor System)

### LFR – (Lead-cooled Fast Reactor System)

Les concepts à métaux liquides, du fait de leur spectre rapide, présentent un fort intérêt dans le contexte du développement durable.

Les réacteurs SFR au sodium bénéficient d'un retour d'expérience considérable et d'un travail important sur des projets visant la diminution des coûts et l'augmentation de la sûreté (EFR, JSFR). L'engagement du Japon comme leader de ce concept et le soutien apporté par la France permettent d'envisager un déploiement industriel dès 2015.

Les réacteurs LFR au plomb présentent certains avantages dans le domaine de la sûreté, mais nécessitent par ailleurs une R&D très importante. Les aléas associés à cette R&D ainsi que l'absence d'un pays leader de premier plan, hypothèquent les perspectives de déploiement de ce concept.

## 5.3. CONCEPT DE REACTEUR A SELS FONDUS :

### MSR – (Molten Salt Reactor System)

C'est un concept aux caractéristiques inhabituelles, donc mal connues. Le combustible se présente sous la forme d'un mélange liquide de UF<sub>4</sub>, de ThF<sub>4</sub>, de fluorure de lithium, de béryllium (éventuellement de sodium et de zirconium), dans lequel les actinides sont dissous.

Dans le schéma proposé par le laboratoire d' OAK RIDGE (ORNL), à l'origine du concept, ce sel combustible pénètre par le bas du cœur à une température d'environ 550°C, le traverse de bas en haut en circulant dans des canaux de graphite, dont l'effet modérateur permet d'obtenir la criticité et la production d'énergie de fission. Le sel joue en même temps le rôle de caloporteur et ressort du cœur à environ 700°C, avant de passer à travers des échangeurs de chaleur. L'énergie thermique est ainsi transférée à un sel caloporteur secondaire, puis via un générateur de vapeur supercritique jusqu'au système de conversion d'énergie, avec un rendement assez élevé (44%).

La circulation d'un combustible liquide offre l'avantage de permettre un retraitement en ligne, ou presque en ligne, extraction des produits de fission et rajout de combustible frais si nécessaire.

Pour la sûreté : un système non pressurisé avec une grande marge avant l'ébullition, absence de réserve de réactivité grâce au traitement en continu, piégeage des produits de fission. En cas d'incident, il est possible de vider le réacteur par simple gravité dans plusieurs réservoirs, où il devient très sous-critique en l'absence de modération par le graphite.

Enfin ce concept paraît optimal pour assurer la surgénération en cycle thorium, dont le bilan neutronique est très serré.

## 5.4. CONCEPT DE REACTEUR A EAU A PRESSION SUPERCRITIQUE :

### SCWR – (Supercritical Water-cooled Reactor System)

L'eau est utilisée comme caloporteur et modérateur dans la grande majorité des centrales nucléaires actuellement en fonctionnement.

Dans les Réacteurs à Eau Bouillante (REB), l'eau est vaporisée au niveau du combustible nucléaire dans le cœur du réacteur, on parle alors de cycle direct.

Dans les Réacteurs à Eau Pressurisée (REP), le caloporteur est utilisé pour vaporiser l'eau du circuit secondaire à l'aide de générateurs de vapeur, on parle alors de cycle indirect.

Ces deux types de réacteurs fonctionnent en dessous du point critique de l'eau (221 bars, 374°C), ce qui limite le rendement théorique de Carnot, et donc aussi le rendement net (actuellement 33%).

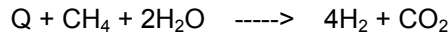
On peut augmenter ce rendement en dépassant ce point critique : dans ce cas, on ne peut plus distinguer la vapeur du liquide. Les crises d'ébullition qui limitent la puissance spécifique des REB ou des REP n'existent plus. Les propriétés physiques de l'eau, en particulier la chaleur spécifique, qui subissent de fortes variations au voisinage du point critique, permettent d'avoir aussi des réacteurs plus compacts à puissance donnée.

Le CEA participe à une veille active depuis 1999 : il s'est intéressé à un réacteur nucléaire à spectre thermique fonctionnant à 250 bars. Dans les prochaines années, le CEA poursuivra son effort limité de R&D en privilégiant l'étude des versions à spectre rapide. Dans le cadre de GENERATION IV, un plan de R&D a été proposé.

## 5.5. CONCEPT DE REACTEUR A GAZ A HAUTE TEMPERATURE :

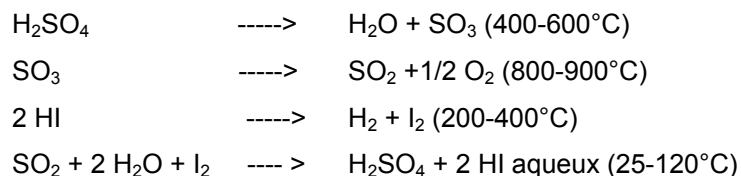
### VHTR – (Very High Temperature Reactor System)

La motivation principale pour le VHTR est la production d'hydrogène par un moyen non polluant, donc à partir de l'eau, car produire de l'hydrogène, à partir de gaz naturel par reformage, est polluant :



Aux USA, ce procédé (95%) consomme 5% du gaz naturel et produit 74 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>.

La solution idéale consiste à séparer la molécule d'eau en H<sub>2</sub> et O<sub>2</sub> par un procédé thermochimique qui requiert 900°C (procédé S-I, soufre-iode) :



Le réacteur VHTR doit produire la chaleur à 1000°C : un VHTR de 600 MWth produirait environ 60 000 t/an de H<sub>2</sub> sans émission de gaz à effet de serre.

Les défis à relever du côté nucléaire sont :

- Au niveau des matériaux pour l'échangeur intermédiaire et pour une longévité raisonnable, les matériaux classiques, y compris les superalliages à base de nickel (Hastelloy X) semblent insuffisants. Les candidats de remplacement seraient des céramiques, ODS (oxyde dispersion strengthened alloys). Concernant les éléments du réacteur, les points à examiner sont les gaines des barres de contrôle, le supportage du cœur, l'enveloppe du cœur, la cuve du réacteur, etc.
- Pour le combustible, il faut essayer de garder une température de fonctionnement inférieure à 1250°C pour du SiC, évoluer vers un enrobage de ZrC permettant des températures plus élevées de 200°C, et viser probablement une combinaison de ces approches.

## 6. CONCLUSION

L'expérience acquise par l'exploitation de plus de 450 installations nucléaires dans le monde, pendant trente ans, a permis de démontrer la qualité des réacteurs électronucléaires de la filière REP.

L'accident de Tchernobyl, réacteur de type très différent des REP, est dû à un grave défaut de conception et à une succession d'erreurs humaines. Il ne remet absolument pas en cause les acquis industriels.

L'EPR valorise tout le retour d'expérience et améliore notamment la sûreté et le rendement de la filière.

### Il reste à franchir de nouvelles étapes :

- meilleure utilisation de l'énergie contenue dans l'uranium (actuellement 98 % reste disponible),
- réduction des déchets ultimes du cycle du combustible,
- diversification des formes de production d'énergie.

**Le niveau du challenge de la Génération IV doit être haut placé pour répondre aux besoins en énergie de nos générations futures.**