



**Jeudi 5 janvier 2006**

**« Les systèmes du futur »**



# Sommaire

## Les systèmes du futur

<b>Contexte énergétique et enjeux pour les systèmes du futur .....</b>	<b>3</b>
<b>Les différentes générations de réacteurs .....</b>	<b>4</b>
De la génération I à la génération IV .....	4
La R & D sur les réacteurs de 3 <sup>ème</sup> génération .....	7
<b>Un cadre international pour une nouvelle génération de systèmes nucléaires .....</b>	<b>9</b>
Le Forum international Generation IV et INPRO .....	9
La stratégie française .....	12
La dimension européenne (PCRD).....	18

Le contexte énergétique requiert aujourd'hui des adaptations indispensables aux nouvelles réalités socio-économiques et géostratégiques internationales. La croissance de la population mondiale qui doit passer de 6 milliards, en ce début de siècle, à près de 8 milliards d'individus dans les années 2020, pèsera fortement sur la demande mondiale en énergie et en électricité.

Au cours du XXI<sup>ème</sup> siècle devrait s'opérer un rééquilibrage des énergies dans le monde sous l'effet combiné de la baisse attendue des réserves en hydrocarbure, du besoin de tous à pouvoir accéder à une énergie économique - garantie du développement - et de l'attention croissante portée à la protection de l'environnement.

L'énergie nucléaire devrait trouver sa place dans ce rééquilibrage : son combustible (l'uranium) ne connaît pas les mêmes contraintes que le pétrole ou le gaz. Ses réserves sont plus importantes (250 années de consommation en réserve avec les systèmes utilisés actuellement et plusieurs milliers d'années avec de nouvelles technologies), et leur disponibilité n'est pas soumise aux mêmes aléas géopolitiques. Elle ne contribue pas au réchauffement climatique comme le charbon, le pétrole et le gaz, qui sont les principaux émetteurs de gaz à effet de serre. Les déchets qu'elle produit sont gérés avec les meilleures technologies disponibles aujourd'hui et des solutions techniques existent pour compléter le dispositif actuel, dont la mise en œuvre pourra être décidée dans les toutes prochaines années.

La communauté internationale est consciente des enjeux de l'énergie nucléaire à l'horizon 2020-2030. Pour relever ce défi, une dizaine de pays ont décidé de mettre en commun leurs efforts pour développer une nouvelle génération de systèmes<sup>1</sup> nucléaires capables de participer à une fourniture d'énergie en forte croissance pour répondre aux besoins énergétiques prévus d'ici une vingtaine d'années et au-delà. Le Forum international Generation IV est l'initiative la plus marquante dans ce sens.

Les réacteurs utilisés dans le monde pour produire de l'électricité ont connu des améliorations constantes et des ruptures technologiques depuis l'origine du nucléaire civil, dans les années 1950. On désigne ces ruptures en termes de « générations » de réacteurs : les installations aujourd'hui en exploitation sont des réacteurs de « deuxième génération ». Ce sont principalement des réacteurs à eau légère pressurisée (REP-PWR) ou bouillante (BWR) aux Etats-Unis, en Europe et au Japon, des VVER (analogues au REP) et des RBMK (eau bouillante dans des tubes de force) dans les pays de l'Est, et des Candu (réacteurs à eau lourde) au Canada et en Inde.

Une troisième génération de réacteurs est prête à prendre le relais d'ici 2015, voire avant pour certains (l'EPR franco-allemand, l'AP1000 et ESBWR américains...). La quatrième génération est celle des « systèmes du futur », qui restent à concevoir et visent un déploiement d'ici 2040. Les chercheurs du CEA travaillent, dans un contexte international, au développement ces nouveaux systèmes nucléaires caractérisés par un niveau de sûreté accrue, une meilleure compétitivité économique, et une aptitude à recycler tout le combustible afin de valoriser les matières fissiles (uranium, plutonium) et de minimiser par transmutation la production de déchets à vie longue (actinides mineurs).

Dans ce contexte, les recherches sur les systèmes nucléaires du futur sont menées :

- dans une perspective à court-moyen terme avec le développement d'innovations pour les réacteurs à eau sous pression (REP), et
- dans une perspective à moyen-long terme avec le développement de nouveaux systèmes dans un cadre international (essentiellement le Forum Generation IV).

---

<sup>1</sup> Par système, il faut entendre l'ensemble formé par les réacteurs et les cycles de combustible associés.

## Les différentes générations de réacteurs

Les potentialités de l'énergie nucléaire pour produire de l'électricité sont apparues dès l'après guerre. Au fil des ans, les concepts retenus de réacteurs utilisés pour satisfaire ces besoins ont bien sûr été dépendants des technologies disponibles à chaque époque, mais aussi fortement déterminés par les priorités et les contraintes imposées par le contexte du moment. Sur une échelle de temps de l'ordre du siècle, on peut ainsi distinguer quatre générations de réacteurs, déjà conçus et développés ou encore à concevoir, ceci dans des contextes qui ont fortement évolué au cours du temps.

### *De la génération I à la génération IV*

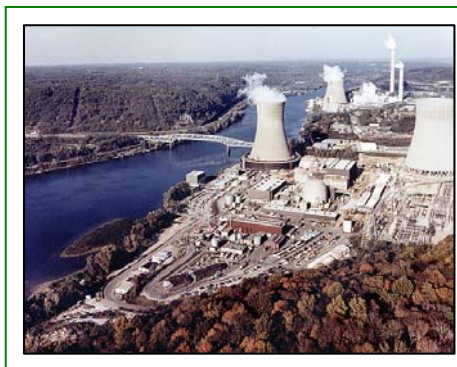
La génération I comprend les premiers réacteurs prototypes (UNGG, Shippingport, Magnox, Fermi I), qui ont été mis en service avant 1970.

La génération II correspond aux premiers réacteurs commerciaux des années 1970 à 1995 dans les différents filières REP, REB, VVER et Candu.

La génération III correspond aux réacteurs avancés ABWR, AP600, EPR, AP1000 ou encore HTR modulaire. Les réacteurs de cette génération sont susceptibles d'être opérationnels avant 2015.

La génération IV est celle des systèmes du futur : elle reste largement à concevoir, tant du point de vue du réacteur que du cycle du combustible, et devrait pouvoir être déployée vers 2040.

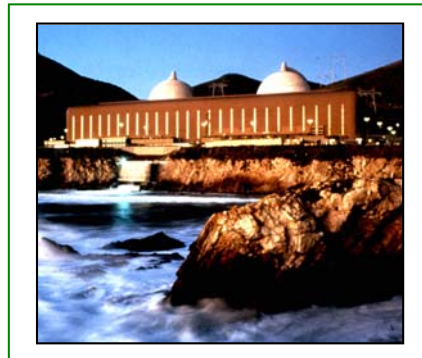
**La première génération de réacteurs** a été fortement influencée par les contraintes du cycle du combustible, notamment dans les années 50-60, d'une part à cause de l'absence de technologie industrielle d'enrichissement de l'uranium, et d'autre part avec la volonté de certains Etats de se doter d'un outil de dissuasion nucléaire nécessitant la production de matières fissiles. Dans ce contexte, les réacteurs devaient pouvoir fonctionner à l'uranium naturel (non enrichi) ; ils nécessitaient l'utilisation de modérateurs tels que le graphite ou l'eau lourde. C'est ainsi que la filière dite Uranium Naturel Graphite Gaz (UNGG) a été développée en France. Trois réacteurs, ayant vocation à produire du plutonium (G1, G2 et G3) ont été réalisés dans un premier temps, puis six autres à vocation électrogène (sur les sites de Saint Laurent, Bugey et Chinon). Le CEA a été très fortement impliqué dans le développement de cette filière, en tant que bailleur de procédé. Les réacteurs de type Magnox en Grande-Bretagne appartiennent à la même génération. En vue d'un développement à plus grande échelles, ces réacteurs présentaient des caractéristiques intéressantes (rendement thermodynamique, utilisation optimisée de l'uranium dans le cœur du réacteur, ...), mais aussi des limitations liées à la technologie : coût d'investissement plus important, difficulté d'amélioration de la sûreté et difficulté d'extrapolation à de plus grandes puissances, ce qui globalement a pénalisé leurs performances économiques par rapport à celles des réacteurs à eau (REP ou REB).



Dans cette première phase se développaient les préoccupations relatives au **cycle du combustible**, tant pour l'utilisation rationnelle et durable des ressources naturelles (recyclage des matières énergétiques,) que pour la gestion des déchets. Ceci a conduit à développer les procédés et les installations de l'aval du cycle du combustible pour le traitement des combustibles usés et le recyclage du plutonium (i.e. : séparation et recyclage dans les réacteurs). La France a ainsi adopté, dès le début, le cycle du combustible fondé sur le traitement – recyclage, permettant d'une part une meilleure utilisation des ressources, et d'autre part, une réduction de la quantité et de la nocivité à long terme des déchets ultimes. Ces derniers sont en effet conditionnés de façon à assurer un confinement sûr et durable des radionucléides. La première usine de retraitement UP1 à Marcoule, pour le retraitement des combustibles UNGG, a été mise en service en 1958, suivie par l'usine UP2 à La Hague en 1966, elle-même dotée en 1976 d'un nouvel atelier (HAO) pour le traitement des combustibles des réacteurs à eau pressurisée. Elles sont désormais remplacées par les deux usines UP3 (1989) et UP2-800 (1994) de La Hague. Les installations de fabrication de combustible MOX (Mixed Oxyde) ont de même été développées et mises en service : CFC à Cadarache (1968-2003), Dessel en Belgique (combustibles MOX produits à partir de 1986) et Melox à Marcoule (1995).

L'enjeu de préserver les ressources naturelles en combustible et d'optimiser leur utilisation sur le long terme s'est également traduit, dès les débuts, par le développement des réacteurs surgénérateurs à neutrons rapides, refroidis au sodium, notamment aux Etats-Unis (réacteur Enrico Fermi<sup>2</sup> en 1963), en Russie (BOR 60 en 1968, BN 350 en 1972 et BN 600 en 1980<sup>3</sup>), en France (Rapsodie en 1967)

**La deuxième génération de réacteurs**, qui constitue l'essentiel du parc électronucléaire mondial en exploitation aujourd'hui, est né de la nécessité dans les années 1970 de rendre l'énergie nucléaire plus compétitive et de diminuer la dépendance énergétique de certains pays au moment où des tensions importantes sur le marché des énergies fossiles se faisaient sentir.



La production de matières fissiles à des fins de défense n'était plus prioritaire et la technologie d'enrichissement de l'uranium par diffusion gazeuse était au point, prête à mettre en œuvre industriellement à grande échelle (Usine EURODIF en France). Cette période fut celle du déploiement des réacteurs à eau pressurisée REP et des réacteurs à eau bouillante REB, qui constituent plus de 85 % du parc électronucléaire mondial actuel (environ 450 réacteurs).

Le retour d'expérience industriel de ces dernières décennies a permis de démontrer les performances tant économiques qu'environnementales de la production d'énergie nucléaire, avec un coût du kWh nucléaire très compétitif par rapport à celui des énergies fossiles et des progrès constants sur le niveau des rejets, déjà très inférieurs aux limites autorisées. Le fonctionnement cumulé de plus de 10.000 années-réacteurs au niveau mondial prouve la maturité industrielle de cette technologie.

En partenariat avec EDF et Framatome-ANP, le CEA a été un acteur majeur de la francisation de la filière REP de Westinghouse. Ce sont ces réacteurs qui équipent la totalité du parc électronucléaire français. Avec EDF et Framatome-ANP, le CEA contribue depuis lors à la R&D en soutien au parc, notamment pour optimiser son exploitation en augmentant la

---

<sup>2</sup> 60 MWe

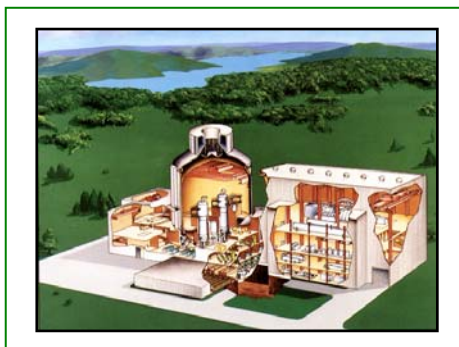
<sup>3</sup> BOR 60 : 12 Mwe.

disponibilité et la durée de vie des installations, et les taux de combustion des combustibles utilisés : UO<sub>2</sub> et Mox.

En parallèle à cet effort, la préservation des ressources naturelles a motivé la poursuite du développement des réacteurs surgénérateurs à neutrons rapides refroidis au sodium, notamment en Russie (BN 350 en 1972 et BN 600 en 1980<sup>4</sup>), en France (Phénix en 1973, Superphénix en 1985) et au Japon (Joyo en 1978 et Monju en 1994). Aujourd'hui l'Inde et la Chine développent aussi des démonstrateurs de ce concept.

Même si les prévisions d'un déploiement industriel rapide du nucléaire ne se sont pas réalisées sur la deuxième moitié du XX<sup>ème</sup> siècle, les atouts des neutrons rapides pour la régénération et la minimisation de la radio-toxicité à long terme des déchets gardent toute leur actualité pour une nouvelle génération de systèmes nucléaires contribuant à une politique énergétique durable. Ces objectifs font partie des spécifications des systèmes de 4<sup>ème</sup> génération, et à ce titre, le savoir-faire technologique et industriel acquis sur les installations Phénix et Superphénix reste essentiel pour le développement de systèmes nucléaires de quatrième génération.

Les recherches menées sur **les réacteurs de troisième génération** visent avant tout une optimisation des réacteurs à eau aux plans de l'économie et de la sûreté par rapport aux réacteurs actuellement en exploitation. Les principales innovations concernent l'architecture de sûreté avec, en particulier, un recours accru aux systèmes dits « passifs » et un renforcement du confinement.



Leur conception est optimisée à partir de l'expérience tirée de l'exploitation des réacteurs actuels ; elle vise des gains sensibles sur les postes suivants :

- la sûreté avec, par exemple, une enceinte double en béton avec peau d'étanchéité en métal, un récupérateur de corium sous le cœur du réacteur ;
- la compétitivité économique à travers une standardisation accrue et la simplification de l'architecture ;
- le cycle du combustible avec un meilleur taux de combustion et donc une meilleure utilisation du combustible ;
- la réduction de la quantité des déchets.

L'EPR (European pressurized water reactor), projet d'Areva/Framatome-ANP, fait partie des réacteurs de troisième génération ; il donne lieu au CEA à des recherches principalement sur l'optimisation des combustibles pour le multirecyclage du plutonium et la réduction de la production de déchets radioactifs.



Vue virtuelle des circuits du réacteur EPR (European Pressurized water Reactor).  
(Framatome-ANP)

<sup>4</sup> BN 350 = 350 Mwe. BN 600 = 600 Mwe.

A la fin des années 1990, plusieurs pays ont entrepris des réflexions sur de nouveaux types de réacteurs. Le Forum International Generation IV, lancé à l'initiative des Etats-Unis, a été la principale initiative pour fédérer ces efforts, avec en particulier la participation de la France, du Japon, du Royaume Uni, du Canada et de la Corée du Sud. Ce forum se donne pour objectif de sélectionner et de développer un petit nombre de systèmes nucléaires (réacteur et cycle du combustible associé), porteur des technologies les plus prometteuses pour répondre aux besoins du marché international à l'horizon 2040. Ces systèmes de **quatrième génération** visent non seulement la production d'électricité mais également d'autres applications telles que la production d'hydrogène à partir de l'eau, la production de carburants de synthèse pour les transports, la production de chaleur pour l'industrie, et le dessalement de l'eau de mer.

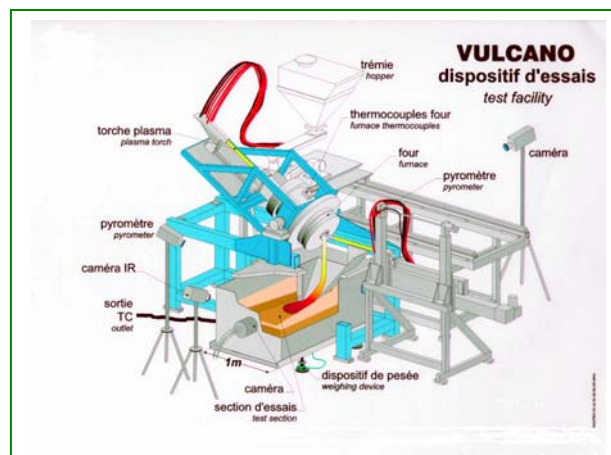
### La R & D sur les réacteurs de 3<sup>ème</sup> génération

Dans la conception des réacteurs de 3<sup>ème</sup> génération, la notion de sûreté est centrale. L'accident de Three Mile Island, survenu aux Etats-Unis en 1979, a provoqué une dégradation importante du cœur mais des conséquences radiologiques relativement minimes sur l'environnement. Tirant les leçons de cet accident, les chercheurs, partout dans le monde, ont travaillé à l'amélioration de la sûreté avec quatre grands objectifs, qui ont structuré leurs recherches :

- la minimisation des débits de dose en exploitation ;
- l'utilisation de systèmes passifs pour le retour à l'état sûr à partir des situations accidentelles ;
- la réduction de la probabilité de fusion du cœur :
  - en réduisant la probabilité d'occurrence des événements initiateurs,
  - en améliorant la fiabilité des systèmes de secours,
- la limitation des conséquences à l'extérieur du site en situation d'accident grave, notamment par un renforcement du confinement.

Pour améliorer la sûreté des réacteurs de troisième génération, les chercheurs du CEA étudient donc à la fois les initiateurs possibles et la phénoménologie des accidents les plus graves pouvant survenir, même si leur probabilité d'occurrence est très faible, voire hypothétique. Pour les REP, l'hypothèse retenue est celle d'une perte de refroidissement du cœur entraînant des températures susceptibles de dégrader l'élément combustible. Du « corium », mélange de combustible et de matériaux, pourrait alors se former, s'écouler à travers les structures internes vers le fond de la cuve, et éventuellement la traverser pour se répandre sur le sol du bâtiment réacteur.

Pour en étudier la phénoménologie et en limiter les conséquences, le CEA a entrepris un programme important de caractérisation du corium et de son comportement ; l'objectif ultime est de maîtriser, dans toutes les conditions, le refroidissement du corium pour en garantir le confinement à long terme. Pour ces études, les chercheurs utilisent des installations dédiées, notamment l'installation Vulcano, qui comporte un four pouvant atteindre 3000 °C.



Les chercheurs du CEA étudient également les meilleures solutions pour garantir l'intégrité du confinement des matières nucléaires et prévenir le relâchement de produits radioactifs dans l'atmosphère. Ces études portent sur la phénoménologie de production et transport de l'hydrogène, ainsi que sur les risques et conditions de déflagration. Les recherches conduisent à mettre en œuvre des recombineurs d'hydrogène et des systèmes d'aspersion dans l'enceinte, permettant de réduire la pression et éviter la perte d'intégrité.



## Un cadre international pour une nouvelle génération de systèmes nucléaires

### Le Forum international Generation IV et INPRO

Les objectifs visés pour les systèmes du futur, de même que le choix des technologies clef pour les atteindre, font l'objet d'échanges actifs à l'international, notamment dans le cadre du Forum Generation IV.

#### Genèse du Forum

Prenant conscience de risques de pénurie et de dépendance énergétique à moyen terme, le gouvernement américain, à travers le Department of Energy (DOE), s'est engagé dans un effort de relance des moyens de production en électricité. Dans le domaine de l'énergie nucléaire, cela s'est traduit par deux actions complémentaires :

- la première, purement américaine, est destinée à faciliter la construction de nouveaux réacteurs aux Etats-Unis, à court terme (2010) ; il s'agit du programme Nuclear power 2010 (NP 2010). Un groupe ad hoc, le Near Term Deployment Group (NTDG) a évalué les réacteurs susceptibles d'être construits d'ici 2010, a identifié les problèmes éventuels à résoudre tant au niveau technique que réglementaire ou administratif, et a proposé des actions facilitant le déploiement à court terme de ces réacteurs nucléaires de troisième génération.
- La seconde est le Forum international Generation IV. Son principe fondateur est la reconnaissance, par les dix pays qui en sont membres, des atouts de l'énergie nucléaire pour satisfaire les besoins croissants en énergie dans le monde, dans une perspective de développement durable et de prévention des risques de changements climatiques. Ce principe est inscrit dans la charte du forum et se concrétise par une volonté commune de créer un cadre de R&D international. La communauté des Etats membres d'Euratom a adhéré également à ce Forum. D'autres pays ou instances internationales pourraient également à terme rejoindre cet effort de recherche.

#### Méthodologie de choix d'orientations technologiques

Un Policy Group préside aux activités du Forum. Cette entité rassemble aujourd'hui des représentants de haut niveau des dix pays membres. Elle supervise l'ensemble des travaux et les oriente en fonction de sa vision politique. Les étapes suivantes ont déjà été franchies :

- l'évaluation, selon une méthodologie très codifiée, de concepts proposés par les pays participants (étape réalisée entre avril 2001 et avril 2002).
- la sélection d'un petit nombre de concepts porteurs de technologies jugées particulièrement prometteuses lors de l'évaluation (étape réalisée en mai 2002).
- l'élaboration d'un plan de développement de ces technologies, édité en octobre 2002, préparant une phase ultérieure de coopération internationale (objectif principal du Forum à partir de 2003).
- La signature d'accords-systèmes entre les principaux pays en 2005 définissant les règles de propriété intellectuelle applicables lors des développements ultérieurs.

D'emblée, une forte convergence s'est affirmée sur les grands objectifs du programme Generation IV et sur la démarche, chaque pays demeurant par ailleurs libre de ses choix d'options et de programmes pour les systèmes du futur. Quatre objectifs principaux (« goal areas ») ont été définis pour caractériser les systèmes du futur. Ils doivent être à la fois :

- durables : c'est à dire économes des ressources naturelles et respectueux de l'environnement (en minimisant la production de déchets en termes de radio-toxicité, masse, puissance résiduelle, etc.) ;

- économiques : aux plans du coût d'investissement par kWe installé, du coût du combustible, du coût d'exploitation de l'installation et, par voie de conséquence, du coût de production par kWh qui doit être compétitif par rapport à celui d'autres sources d'énergies ;
- sûrs et fiables : avec une recherche de progrès par rapport aux réacteurs actuels, et en éliminant autant que possible les besoins d'évacuation de population à l'extérieur du site, quelles que soient la cause et la gravité de l'accident ;
- résistants vis à vis de la prolifération et susceptibles d'être aisément protégés contre des agressions externes.

Une centaine d'ingénieurs et de chercheurs ont participé à la première phase des travaux du Forum qui a abouti à la publication, en octobre 2002, d'un plan de développement des technologies jugées les plus prometteuses, appelées à servir de base à la coopération internationale entre pays membres du Forum, et au-delà.

Des groupes techniques ont été chargés, pour chaque filière considérée (réacteurs à eau, à gaz, à métal liquide,...) de l'évaluation des différents concepts proposés au regard des objectifs et critères retenus, et de l'élaboration des plans de R&D pour les concepts finalement sélectionnés. La méthodologie d'évaluation a été élaborée et affinée par un groupe de travail spécifique qui a décliné en une trentaine de critères élémentaires les quatre grands objectifs de progrès évoqués ci-dessus. Un groupe de coordination a animé l'ensemble de l'activité des groupes techniques et a assuré l'intégration des résultats dans les documents d'étape et la synthèse finale.

### Les choix réalisés au sein du Forum

La sélection des concepts les plus prometteurs pour les systèmes du futur a été finalisée lors d'une réunion du Policy Group en mai 2002, à Paris.

**Six systèmes nucléaires ont été sélectionnés**, qui peuvent permettre des avancées notables en matière de développement énergétique durable, de compétitivité économique, de sûreté et fiabilité, ainsi que de résistance à la prolifération et aux agressions externes. Ces systèmes permettent également d'autres applications que la production d'électricité, telles la production d'hydrogène ou le dessalement de l'eau de mer.

La diversité des besoins à couvrir et des contextes internationaux explique que l'on n'aboutisse pas à un unique système Generation IV, mais à un éventail de solutions sur lesquelles se concentrent désormais les efforts de R&D des pays membres du Forum.

### ⇒ Les six systèmes sélectionnés

- VHTR (very high temperature reactor system) - Réacteur à très haute température (1000°C/1200°C), refroidi à l'hélium, dédié à la production d'hydrogène ou à la cogénération hydrogène/électricité ;
- GFR (Gas-cooled fast reactor system) - Réacteur rapide à caloporteur hélium ;
- SFR (Sodium-cooled fast reactor system) - Réacteur rapide à caloporteur sodium ;
- LFR (Lead-cooled fast reactor system) - Réacteur rapide à caloporteur alliage de plomb ;
- SCWR (Supercritical water-cooled reactor system) - Réacteur à eau supercritique ;
- MSR (Molten salt reactor system) - Réacteur à sels fondus.

Dans le cadre du Forum international Generation IV, la France a exprimé un intérêt prioritaire pour les systèmes avancés à caloporteur gaz à très haute température (VHTR) ou à neutrons rapides avec recyclage intégral des actinides (GFR), pour les réacteurs à neutrons rapides et caloporteur sodium (SFR) et un intérêt moindre, traduisant une volonté d'engagement plus réduite, sur le système à eau supercritique (SCWR) et le système à réacteurs à sels fondus (MSR).

## INPRO

L'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) a lancé en 2000 le projet **INPRO** (International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles), qui vise à promouvoir le développement de systèmes nucléaires innovants permettant de satisfaire les besoins énergétiques futurs tout en respectant des objectifs de compétitivité économique, de sûreté, de respect de l'environnement, de résistance à la prolifération, et d'acceptation par le public.

L'intérêt de ce projet est d'accompagner et de compléter les développements technologiques, comme ceux conduits dans le cadre de Génération IV, là où l'AIEA peut avoir un apport spécifique, par exemple en permettant la participation de nombreux pays, notamment des pays en développement n'utilisant pas encore l'énergie nucléaire mais intéressés à en bénéficier, ou grâce à ses compétences en non-prolifération et contrôles internationaux.

*Dans un premier temps (phase 1)*, les objectifs techniques du projet sont de :

- déterminer, sur une base très large, les besoins et objectifs des pays compte tenu de la diversité de leur situation, et de préciser comment les systèmes nucléaires innovants peuvent contribuer à les satisfaire ;
- définir des critères et des méthodologies pour l'analyse et la comparaison des divers concepts de réacteurs innovants.

*Dans un second temps (phase 2)*, il est envisagé par l'Agence que le projet puisse approfondir la définition des critères et de la méthodologie d'évaluation des nouveaux concepts ou projets de réacteurs et cycles du combustible pour aider les pays membres de l'Agence dans leur propre analyse des systèmes nucléaires répondant au mieux à leurs besoins. A la différence du Forum Génération IV, le projet n'a pas pour objet de mener des actions techniques de R&D ou de développement de réacteurs et de systèmes innovants.

Le projet rassemble 14 pays (Allemagne, Argentine, Brésil, Canada, Chine, Corée du Sud, Espagne, Etats-Unis, France, Inde, Pays-Bas, Russie, Suisse, Turquie, plus la Commission Européenne). Il est à ce jour financé par des contributions volontaires de ces pays et non pas sur le budget ordinaire de l'AIEA.

## Les coopérations bilatérales

Les actions de coopération bilatérale avec les Etats-Unis, le Japon et la Russie ont été redéfinies en 2001 dans le but de réserver une place croissante aux études et développements communs sur la technologie des réacteurs à neutrons rapides à caloporteur sodium sodium et gaz, les technologies nucléaires à haute température pour la cogénération d'hydrogène, et les procédés de traitement et de refabrication du combustible recyclé.

*La coopération avec les Etats-Unis* conduit depuis 2002 à travailler à quinze projets communs cofinancés sur ces thèmes (actions NERI-International dans le cadre de la coopération CEA-DOE). A terme, quatre de ces cinq projets pourraient intégrer la coopération Generation IV.

*La coopération avec le Japon* permet de partager avec l'agence JAEA la recherche et développement sur les réacteurs rapides à caloporteur sodium et gaz, certains développements technologiques (combustibles, matériaux) sur les réacteurs à haute, voire très haute température, la mise au point de certains procédés (production d'hydrogène), et les possibilités d'expérimentation sur le réacteur expérimental HTTR

## La stratégie française de R&D sur le nucléaire du futur

### Contexte

Plusieurs éléments de contexte propres à la France sont pris en considération dans les orientations stratégiques pour les systèmes nucléaires du futur, parmi lesquels, en allant du moyen au plus long terme :

- **Tirer le meilleur profit du potentiel de progrès des réacteurs à eau**, résultant à la fois :
  - d'avancées en économie, sûreté ou gestion du plutonium possibles dans EPR avec de nouveaux combustibles,
  - d'avancées dans de nouveaux projets susceptibles d'intéresser le marché international dans la gamme des faibles et moyennes puissances (300-600 MWe) ou des très fortes puissances (> 2000 MWe), ou
  - d'avancées pour une génération de réacteurs à eau postérieure à l'EPR capable d'amortir les conséquences d'un renchérissement de l'uranium naturel par une utilisation plus efficace de cette ressource,
- **Optimiser les opportunités offertes par le renouvellement des installations nucléaires en exploitation :**
  - Renouvellement du parc électronucléaire envisagé par EDF avec le remplacement d'au moins la moitié du parc actuel par des EPR à partir de 2020, et l'introduction possible d'une technologie de réacteur à neutrons rapides à partir de 2030-2040 pour compléter le renouvellement du parc,
  - Jouvence ou renouvellement de l'usine de retraitement de La Hague à partir de 2040,
- **Intégrer les conséquences de la mise en œuvre d'une stratégie de gestion optimisée des déchets radioactifs** sur la base des résultats des recherches menées en France dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991, en particulier dans la poursuite de la R&D sur la réduction de la quantité et de la nocivité des déchets ultimes.
- **La recherche pour le plus long terme de progrès nécessaires pour inscrire l'énergie nucléaire parmi les énergies capables de satisfaire durablement les besoins en énergie dans le respect de l'environnement**, progrès qui, au-delà d'améliorations continues en économie et en sûreté, visent deux objectifs en rupture par rapport aux réacteurs à eau :
  - L'économie des ressources naturelles et une production minimum de déchets radioactifs à vie longue, ce qui passe par les neutrons rapides et le recyclage du combustible,
  - L'élargissement des applications au-delà de la production d'électricité, et notamment à la production de carburants tels que l'hydrogène pour le transport, ce qui, sur la base des connaissances actuelles, fait appel à des procédés à très haute température (> 850 °C) pour décomposer efficacement l'eau par voie thermochimique ou électrochimique.

Ces objectifs à long terme rejoignent ceux du Forum International Génération IV, lancé en 2000, que la France, avec une participation du CEA sur une centaine d'experts internationaux, a activement contribué à orienter. Ces objectifs à long terme doivent également prendre en compte l'expérience acquise en France et en Europe sur les réacteurs rapides à sodium, et, dans une moindre mesure, les réacteurs à gaz à haute température.

La consolidation internationale des acteurs du nucléaire, de même que les moyens mobilisables par tous les pays en regard du coût de développement d'une nouvelle filière, rendent nécessaire d'intégrer toute stratégie nationale dans le contexte international.

## La stratégie française pour les systèmes du futur

Les études prospectives menées tant par le CEA que par ses partenaires industriels conduisent à proposer pour la France une stratégie de R&D sur les systèmes du futur équilibrée entre moyen et plus long termes (> 2040) visant trois objectifs complémentaires :

- Les recherches d'**innovations pour les réacteurs à eau**,
- Les **systèmes à neutrons rapides avec cycle du combustible fermé** pour soutenir un développement énergétique durable grâce à la surgénération à terme, et pour gérer éventuellement tous les actinides du parc français (*plutonium en réacteurs critiques, et optionnellement actinides mineurs en systèmes critiques ou sous-critiques (ADS)*),
- Les **technologies clés pour la production nucléaire d'hydrogène** ou la fourniture de chaleur à très haute température pour l'industrie (*réacteurs à très haute température à neutrons thermiques ou rapides, et procédés de décomposition de l'eau*).

Les deux derniers objectifs s'inscrivent clairement dans la perspective d'une participation du CEA et de ses partenaires industriels à la R&D internationale du Forum Génération IV sur des technologies en rupture par rapport aux réacteurs à eau, et d'une coopération bilatérale avec la Russie. Il s'agit de démultiplier l'effort de R&D français pour ces innovations et les possibilités de co-financement de grandes installations de recherche ou réacteurs prototypes en France ou en Europe.

La concentration des efforts sur ces trois thèmes résulte d'une part, d'une analyse stratégique et technique, compte tenu des éléments spécifiques du contexte français, et d'autre part, de la volonté d'acquiescer, pendant les phases de R&D, des droits de propriété intellectuelle maximum.

L'apport de la recherche de base est essentiel pour réaliser les avancées et ruptures recherchées dans les procédés et les technologies pour les systèmes nucléaires du futur, qu'il s'agisse des réacteurs, des combustibles ou du cycle du combustible. Le CNRS et les universités qui ont depuis 15 ans contribué à l'innovation et à l'analyse d'options prospectives pour la gestion des déchets radioactifs, apportent déjà des contributions significatives aux recherches pour les systèmes du futur présentées dans ce document. Au-delà des coopérations en place en physique des réacteurs, chimie séparative et matériaux pour le conditionnement des déchets (dans le cadre du programme PACE), le CEA avec ses partenaires industriels et le CNRS ont entrepris d'étendre le champ de leur coopération à d'autres domaines clés pour les systèmes nucléaires du futur tels que les matériaux résistants à très haute température, les utilisations des sels fondus, notamment comme caloporteurs, l'électrolyse à haute température, les transferts thermiques...

Les grands thèmes de R&D sous-tendus par les trois objectifs stratégiques sont présentés ci-après, ainsi que l'allocation de ressources financières et les principaux jalons et décisions à prendre.

### Stratégie de R & D par thème

La priorité est très clairement donnée aux **systèmes à neutrons rapides avec cycle du combustible fermé (SFR et GFR)**.

A un niveau inférieur, mais significatif, figurent les **systèmes à très haute température, capables de produire de l'hydrogène (VHTR)**.

Un effort adaptable à la hausse en fonction de la demande des partenaires industriels est maintenu sur les **innovations dans les réacteurs à eau**, et l'effort exploratoire sur les **réacteurs à sels fondus** sera poursuivi.

## Systèmes à neutrons rapides avec cycle du combustible fermé

### - Stratégie neutrons rapides

Dans un contexte caractérisé à la fois :

- par un retour d'expérience important sur les réacteurs rapides à caloporteur sodium (Phénix, Superphénix), dont les atouts et les difficultés résiduelles sont bien connus, et
- par l'intérêt confirmé, au cours de la phase d'orientation technologique du Forum Génération IV, du gaz comme autre caloporteur potentiel des réacteurs à neutrons rapides avec une technologie de combustible robuste,

le CEA et ses partenaires industriels se sont entendus pour concevoir un programme de R&D sur les neutrons rapides sur deux voies parallèles :

- des recherches d'innovations pour résoudre les difficultés technologiques résiduelles des **réacteurs rapides à caloporteur sodium**, et
- des développements de fond sur les verrous technologiques spécifiques du **système rapide à caloporteur gaz** (combustible principalement).

Cette stratégie permet :

- de participer, à la hauteur des moyens disponibles, au développement de technologies clés pour plusieurs systèmes, permettant notamment de reporter vers 2015 le choix d'une filière à neutrons rapides pour la 2<sup>e</sup> étape de renouvellement du parc français (plutôt que de devoir prendre position prématurément sur cette question), et
- de tirer pleinement parti du potentiel de R&D des membres du Forum Génération IV pendant les 10 à 15 années à venir, avant de devoir sélectionner une filière.

La stratégie de R&D mise en oeuvre sur les systèmes à neutrons rapides vise également à :

- Valoriser l'expertise acquise en France et en Europe sur les réacteurs rapides au sodium, notamment pour orienter les recherches d'innovation et préciser les objectifs d'un démonstrateur vers 2015-20,
- Lever les verrous technologiques des réacteurs rapides à caloporteur gaz en coopération avec des partenaires européens, américains et japonais, et faire de son démonstrateur technologique, le REDT, un projet international,
- Valoriser également l'expérience acquise dans la recherche sur la séparation poussée des actinides mineurs dans le développement de procédés permettant d'optimiser globalement la gestion des actinides et déchets ultimes dans le parc français, et vis-à-vis des risques de prolifération.

La R&D sur les systèmes de 4<sup>e</sup> génération à neutrons rapides comprend également le développement de nouveaux **procédés pour le traitement des combustibles usés** des systèmes concernés avec un recyclage, au moins de l'uranium et du plutonium, et optionnellement de tous les actinides (uranium, plutonium et actinides mineurs). Ce dernier objectif sous-tend le développement de combustibles porteurs d'actinides mineurs, ainsi que de procédés de séparation groupée et de cogestion des actinides mineurs (tels que le procédé Ganex dérivé des recherches en France sur la séparation poussée).

**L'application dédiée de systèmes à neutrons rapides (critiques ou sous-critiques) pour la transmutation** induit des besoins de R&D supplémentaires parmi lesquels :

- Des technologies de combustibles et/ou cibles à forte concentration en actinides mineurs,
- Des procédés de traitement adaptés de ces combustibles et/ou cibles, et
- Dans le cas des systèmes sous-critiques, le développement d'accélérateurs de protons de haute intensité et haute fiabilité et le développement de cibles de spallation pour la production de neutrons.

L'ensemble de ces besoins est couvert par plusieurs actions des 5<sup>e</sup> et 6<sup>e</sup> programme cadre européen de R&D (PCRD) avec des prolongements prévus dans le 7<sup>e</sup>.

### - **Système rapide refroidi au sodium (Sodium Fast Reactor (SFR))**

Le SFR bénéficie pour le réacteur d'une expérience industrielle importante. Les partenaires français visent à utiliser au mieux cette expérience et l'effort de R&D qu'ils peuvent mobiliser sur cet objectif pour orienter les recherches d'innovations et définir les objectifs d'un prototype international à l'horizon 2015-20.

Dans ce cadre, la priorité est donnée :

- **aux études de conception** pour simplifier le système et réduire son coût d'investissement,
- à la mise au point de **techniques d'inspection en service, maintenance et réparation** plus efficaces,
- à une meilleure **prévention des accidents graves et des risques de criticité associés**,
- au développement de **procédés du cycle** permettant la cogestion au moins de l'uranium et du plutonium pour une résistance accrue aux risques de prolifération, voire la cogestion de tous les actinides (U, Pu et actinides mineurs) pour un recyclage intégral de tous les actinides, ce qui suppose :
  - des **procédés de fabrication de combustible** « tous actinides » par téléopération en chaîne blindée,
  - un **traitement du combustible usé** avec une co-gestion de tous les actinides et une re-fabrication en chaîne blindée (R&D comportant un tronc commun important avec celle des cycles pour les autres systèmes à neutrons rapides du Forum Génération IV).

### - **Système à neutrons rapides refroidi au gaz (Gas Fast Reactor (GFR))**

Le GFR est un système très innovant qui associe neutrons rapides et haute température, pour lequel aucun démonstrateur n'a encore été construit. Sa faisabilité repose essentiellement sur la levée de quelques verrous technologiques et démonstrations de sûreté spécifiques dont les principaux concernent :

- **le combustible** dont la technologie vise à transposer aux neutrons rapides les fonctionnalités du concept de combustible HTR à particule (confinement des produits de fission, résistance aux très hautes températures, conduction de la chaleur ...),
- **le développement de matériaux de structure pour le cœur** résistant à la fois à la haute température et aux dommages par les neutrons rapides,
- **la gestion des situations accidentelles**, avec des systèmes actifs ou semi-passifs à court terme, et des systèmes passifs utilisant la convection naturelle à moyen terme,
- **le cycle du combustible** dont les procédés doivent permettre le recyclage au moins de l'uranium et du plutonium cogérés pour une résistance accrue aux risques de prolifération, voire un recyclage intégral de tous les actinides (uranium, plutonium et actinides mineurs) avec une gestion groupée. Ce volet de R&D comporte un tronc commun important avec celle des cycles pour les autres systèmes à neutrons rapides du Forum Génération IV et, en tronc commun avec la R&D pour le VHTR :
  - **la technologie des circuits d'hélium à très haute température** et des composants tels que les échangeurs (fabrication, performances et tenues en service...),
  - **la technologie du système de conversion** par turbine à gaz pour la production d'électricité (en cas de conversion en cycle direct).

La faisabilité du GFR repose également en partie sur un tronc commun de R&D important avec le VHTR pour ce qui est des matériaux et composants à haute température pour le circuit primaire, de la technologie des circuits hélium et du système de conversion. Les efforts de développement réalisés sur ces technologies bénéficieront à la fois au système VHTR, qui parviendra probablement le premier à maturité pour le marché international, et au GFR qui requiert d'autres innovations.

Une fois établie la faisabilité du combustible, le plan de développement du GFR prévoit de tester les principes et technologies spécifiques du système dans un **réacteur d'étude et de développement technologique (REDT)** de 30-50 MW appelé à démarrer vers 2017.

Le combustible GFR, tant pour sa technologie que pour les procédés de fabrication, fait l'objet d'une coopération active dans le cadre du Laboratoire des Composites Thermostructurés (*Unité mixte CNRS, CEA, Snecma et Université Bordeaux 1*). Une autre coopération se met en place entre le CEA et le CNRS sur le développement de matériaux résistants à haute température pour le combustible et les matériaux du cœur GFR, ainsi que sur des céramiques plastiques pour les structures (hors cœur) du GFR et du VHTR (dans le cadre de coopération bilatérale CEA/CNRS et dans celui du groupement de recherche Gedépéon).

Les travaux sur le GFR bénéficient également d'une action spécifique (GCFR) dans le cadre des 5<sup>e</sup> et 6<sup>e</sup> programmes de R&D européens. Ces travaux viennent renforcer la coopération sur le GFR dans le cadre du Forum Génération IV, principalement avec les Etats-Unis, le Japon et Euratom.

Le combustible développé pour le GFR pourrait se révéler un combustible robuste intéressant pour d'autres filières, en particulier pour les réacteurs à neutrons rapides à caloporteur sodium.

### **Production d'hydrogène et Système à neutrons thermiques refroidis au gaz à très haute température (Very High Temperature Reactor (VHTR))**

La production d'hydrogène avec les procédés de décomposition de l'eau pressentis aujourd'hui comme les plus efficaces, de même que la fourniture d'énergie à très haute température pour l'industrie, constituent un axe complémentaire de R&D pour satisfaire les besoins en énergie à l'échelle mondiale.

Cet objectif est celui des **réacteurs à très haute température** et caloporteur gaz qui visent une température de 1000 °C en sortie du cœur. Il présente un tronc commun de R&D important avec le programme de développement **Antares** d'Areva consacré aux réacteurs à haute température (850 – 950 °C).

Cet effort commun du CEA et de ses partenaires industriels vise à la fois à développer un projet de réacteur associé au programme Antares et à mettre les acteurs français du nucléaire en position de partenaires majeurs de la R&D sur la production nucléaire d'hydrogène, et en particulier sur les systèmes à très haute température du Forum Génération IV, ainsi que sur le projet américain NGNP qui devrait en être un premier démonstrateur vers 2017 au Laboratoire National d'Idaho.

Au-delà du développement de technologies clés pour étendre les applications du nucléaire à la production d'hydrogène, le CEA entend également tirer le meilleur parti de la R&D sur les réacteurs à très haute température à neutrons thermiques comme ressource en tronc commun pour les systèmes rapides à caloporteur gaz (notamment pour ce qui est des matériaux et de la technologie des circuits hélium, des systèmes de conversion et de production d'hydrogène, et du système de calcul), ce qui permet, dans un premier temps, de limiter la R&D spécifique de ces systèmes au développement du combustible qui en constitue le principal verrou technologique, ainsi qu'aux démonstrations de sûreté. En retour, les réacteurs rapides à caloporteur gaz, qui allient haute température et neutrons rapides, donnent une perspective durable aux applications du VHTR (dont la production d'hydrogène) au-delà du 21<sup>e</sup> siècle.

Le VHTR est dérivé des prototypes de réacteurs à haute température (HTR à 850-950°C) qui ont fonctionné en Europe et aux Etats-Unis dans les années 1960 à 1980. Les verrous technologiques importants pour la faisabilité d'un Système VHTR avec une température d'hélium de 1000°C en sortie du cœur sont les suivants :

- **les matériaux résistants à très haute température** (> 950 °C) pour le circuit primaire et ses composants (en particulier l'échangeur intermédiaire s'il y a lieu),

- **la technologie des circuits d'hélium à très haute température** et des composants tels que les échangeurs (fabrication, performances et tenues en service...),
- **le combustible à particule** pour lequel la recherche d'une marge supplémentaire d'au moins 200°C sur la température de fonctionnement conduit à remplacer l'enrobage d'étanchéité aux produits de fission en SiC par un enrobage en ZrC,

et, en tronc commun avec la R&D pour le GFR :

- **la technologie du système de conversion** par turbine à gaz pour la production d'électricité (en cas de conversion en cycle direct),
- **les procédés de production d'hydrogène** par décomposition thermochimique ou électrochimique de l'eau (*cycle Iode-Soufre, cycle hybride Soufre-électrolyse, et électrolyse à haute température*).

La recherche d'innovations pour améliorer les performances du combustible VHTR bénéficie d'une coopération active dans le cadre du Laboratoire des Composites Thermostructurés (*Unité mixte CNRS, CEA, Snecma et Université Bordeaux 1*). De nombreux industriels français et européens sont consultés et associés étroitement au développement d'aciers et superalliages résistants à haute température pour le circuit primaire, au développement de différentes technologies d'échangeurs de chaleur, et à celui de matériaux réfractaires composites (C/C, SiC/SiC) pour les structures internes du cœur (chemisage de barres de contrôle en particulier).

La R&D française sur le VHTR bénéficie d'un soutien européen depuis le 5<sup>e</sup> PCRD. En effet, c'est sur les technologies HTR, au développement desquelles nombre de pays européens ont participé dans les années 1960 à 1980, que se concentre depuis la fin des années 1990 le volet du PCRD consacré aux nouveaux concepts de systèmes nucléaires.

### Systèmes sous-critiques dédiés à la transmutation

Les besoins de R&D spécifiques pour les systèmes sous-critiques dédiés à la transmutation sont couverts par plusieurs actions des 5<sup>e</sup> et 6<sup>e</sup> programme cadre européen de R&D (PCRD) :

- Le programme MUSE mené par le CEA et le CNRS sur la maquette Masurca pour valider le calcul du transport des neutrons en milieu sous-critique,
- Le programme MEGAPIE qui consiste en la réalisation et l'essai auprès de l'accélérateur du PSI d'une cible de spallation refroidie à l'eutectique PbBi,
- Les programmes internationaux TRADE, RACE, SAD et MYRRHA.

Par ailleurs, la conception d'un démonstrateur d'ADS expérimental (XADS) a fait l'objet d'un avant-projet sommaire « PDS-XADS ». Enfin, le projet intégré EUROTRANS devrait permettre de rassembler en 2008 les éléments techniques et financiers permettant de juger de la viabilité d'un ADS de puissance pour la transmutation.

Ces travaux, comme ceux qui contribuent au développement d'un accélérateur de protons de forte intensité et fiabilité élevée, bénéficient d'une forte implication du CNRS.

### Autres systèmes nucléaires

Le CEA avec le CNRS et ses partenaires industriels mènent également une activité de recherche sur des filières plus prospectives telles que les **réacteurs à sel fondu**, les **réacteurs à caloporteur plomb**, et les **réacteurs à eau supercritique** avec l'objectif d'en actualiser l'évaluation tout en contribuant à certains volets de R&D spécifiques sur les points durs de la filière.

L'intérêt pour les **sels fondus**, outre leur usage dans les procédés pyrochimiques pour le traitement du combustible usé, porte essentiellement sur l'évaluation d'une filière innovante. Ces travaux s'inscrivent dans le très long terme compte tenu des verrous technologiques à lever.

Plus récemment, l'intérêt pour les sels fondus s'est étendu à leur utilisation comme caloporteur à haute température (> 600 °C) sans pression, en particulier pour le couplage entre systèmes nucléaires et certaines applications telles que la production d'hydrogène.

Les travaux sur les réacteurs à sel fondu, auxquels le CNRS contribue majoritairement, portent principalement sur tous les aspects permettant d'évaluer la possibilité d'atteindre effectivement la régénération du combustible fissile (conception neutronique, stratégie et procédés de traitement du sel...), et, en deuxième priorité, sur la technologie des circuits devant contenir le sel fondu (matériaux, corrosion). Ces études s'inscrivent dans un cadre européen depuis le 5<sup>e</sup> PCRD (action MOST), appelé à s'élargir au Forum Génération IV à travers des contributions au **Molten Salt Reactor (MSR)**.

Dans le prolongement de travaux réalisés en propre par le CEA dans les années 1990, l'activité actuelle sur les **réacteurs à caloporteur plomb** consiste essentiellement en un suivi des études russes sur le sujet. L'intérêt limité pour cette filière provient de la reconnaissance d'un handicap important du plomb comme caloporteur pour des réacteurs d'une puissance unitaire de l'ordre du GWe pour des raisons de poids, de corrosion, ainsi que de conditions de maintenance et d'inspection en service.

Les travaux sur les **réacteurs à eau supercritique** consistent essentiellement en des études de faisabilité et en évaluations des performances (rendement de conversion à 550 °C, facteur de conversion en cycle uranium/plutonium) de différents concepts de réacteurs à eau supercritique à neutrons thermiques ou rapides, avec cuve ou tubes de force. Ces études sont complétées par des essais de corrosion sur des matériaux considérés pour les structures internes du cœur qui doivent résister à l'eau supercritique en présence d'hydrolyse. La Direction des sciences de la matière du CEA apporte son expertise sur le phénomène d'hydrolyse. Ces études s'inscrivent dans un cadre européen depuis le 5<sup>e</sup> PCRD (*action HPLWR*), appelé à s'élargir au Forum Génération IV à travers des contributions au **Super-Critical Water reactor (SCWR)**.

## La dimension européenne

En Europe, il faut noter la perspective d'un programme à part entière sur les systèmes du futur doté d'au moins 50 M€ (part de la Commission) dans le 7<sup>e</sup> PCRD. Cette perspective est la conséquence logique de l'entrée des pays signataires du traité Euratom comme 11<sup>e</sup> membre du Forum Génération IV. Dès le 6<sup>e</sup> PCRD les structures du projet intégré VHTR et du projet GCFR ont été rendues parallèles à celle des projets homologues dans le Forum Génération IV (VHTR et GFR). Le programme proposé dans le 7<sup>e</sup> PCRD est ouvert à des initiatives du type plates-formes technologiques pour les technologies réacteur (très haute température, neutrons rapides, fermeture du cycle) et leurs applications (production d'hydrogène). Les enjeux en sont à la fois une meilleure maîtrise des technologies stratégiques pour les systèmes nucléaires susceptibles d'intéresser les pays européens (qui ont exploité plusieurs prototypes de réacteurs à haute température et à neutrons rapides), et un gage de coopération plus équilibrée avec de grands partenaires tels que les Etats-Unis et le Japon.