



LES SYSTEMES NUCLEAIRES DU FUTUR – GENERATION IV

PROPOSITIONS D'ORIENTATIONS STRATEGIQUES
POUR LES SYSTEMES NUCLEAIRES DU FUTUR

1 – Contexte

Plusieurs éléments de contexte propres à la France doivent être 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 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 dans trois directions :
 - Minimiser la quantité et la nocivité des déchets, en combinant séparation et transmutation des actinides mineurs,
 - Le stockage géologique,
 - Le conditionnement et l'entreposage de longue durée en surface ou en sub-surface, stratégie qui pourra en particulier bénéficier du potentiel de transmutation des réacteurs rapides introduits dans le parc, ou reposer sur la mise en œuvre de systèmes dédiés à la transmutation tels que des systèmes sous-critiques assistés par accélérateur (ADS),
- **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 de 12 représentants du CEA, d'Areva et d'EDF, sur une centaine d'experts internationaux, a activement contribué à orienter [1]. 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 présenté par ailleurs.

2 – Éléments de stratégie pour les systèmes du futur

Les études prospectives menées tant par le CEA que par ses partenaires industriels [2] 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'acquérir, 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.

3 – 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.

3.1 - Systèmes à neutrons rapides avec cycle du combustible fermé

3.1.1 – Stratégie neutrons rapides

Comme cela a été mentionné précédemment, l'analyse prospective menée par EDF [2] conduit à prévoir la possibilité de déployer industriellement une première série de réacteurs à neutrons rapides dans le parc français à l'horizon 2040.

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).

L'intention est de mener ces travaux en parallèle et de les organiser de façon à permettre, vers 2015, le choix d'une filière à développer industriellement pour pouvoir être déployée dans le parc français à l'horizon 2040. Cette approche duale vise à permettre le choix en temps utile de la technologie la mieux adaptée au contexte français entre une filière mature dont certaines difficultés peuvent certainement être résolues par des innovations de technologies ou de systèmes, et une filière radicalement nouvelle par son combustible présentant des atouts intéressants par rapport aux sujétions des caloporteurs métalliques, mais devant faire la preuve de sa robustesse en cas d'accident de refroidissement.

Par rapport à une simple actualisation du projet *European Fast Reactor (EFR)* de 1998, 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^e 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.

En plus d'être robuste vis-à-vis d'un choix de filière à faire vers 2015, la stratégie de R&D proposée 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 dans le parc français, et vis-à-vis des risques de prolifération.

La R&D sur les systèmes de 4^e 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). Un projet international de démonstration de gestion globale des actinides selon ces principes, qui comprendrait l'essai de combustibles « tous actinides » dans le réacteur Monju, est en cours de négociation entre la France, le Japon et les Etats-Unis.

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^e et 6^e programme cadre européen de R&D (PCRD) avec des prolongements prévus dans le 7^e.

Les objectifs de R&D sur les réacteurs rapides à caloporteur sodium et gaz sont rappelés aux § 3.1.2 et 3.1.3. Les objectifs spécifiques des systèmes sous-critiques dédiés à la transmutation sont résumés dans le § 3.1.6, et ceux des procédés avancés du cycle du combustible dans le § 3.1.7.

L'état de maturité très différent des deux systèmes, et la nature de la R&D qu'ils sous-tendent (R&D focalisée pour les réacteurs rapides à sodium, et R&D de fond pour le combustible du réacteur rapide à caloporteur gaz) conduit à estimer à 30% et 50% la part de la subvention consacrée aux systèmes nucléaires du futur (environ 30 M€) à leur allouer respectivement (à ajuster évidemment en fonction de la réévaluation périodique des potentialités de ces deux filières).

3.1.2 - 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 démonstrateur 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, notamment avec le recours à une architecture du circuit primaire à boucles, la suppression des boucles intermédiaires, l'utilisation de nouveaux matériaux de structure... et le remplacement de la turbine à vapeur par d'autres systèmes de conversion (turbine à CO₂ supercritique par exemple pour éliminer les risques de réaction sodium-eau),
- 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 télé-opération 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 (GFR, le LFR et le SCWR)).

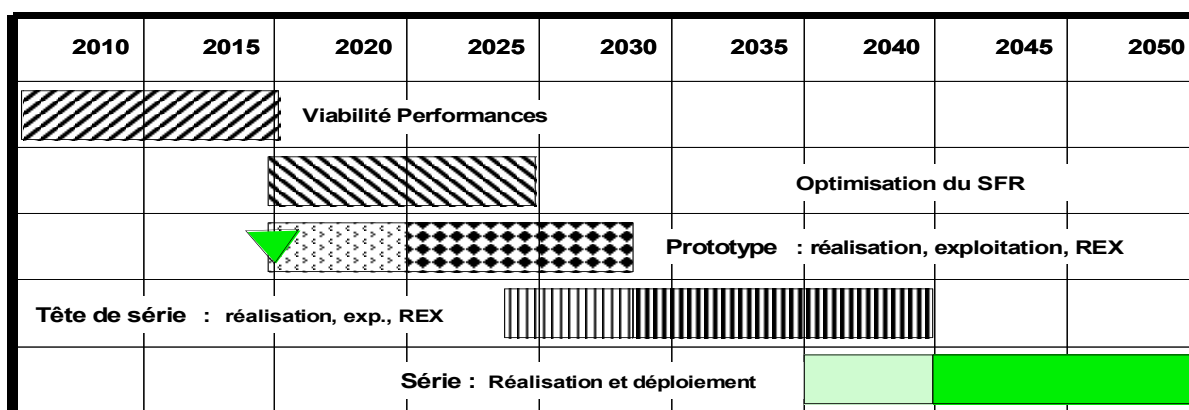
Jalons :

- 2009 - Bilan des développements technologiques et des études de conception pour asseoir la faisabilité du nouveau SFR.
- 2015 - Confirmation des performances,
 - Décision sur l'opportunité de relancer un développement technologique en France sur le combustible et les matériaux de structure,
 - Décision sur la construction en France ou la participation à la construction d'un démonstrateur prototype.

Moyens financiers d'ici 2015 :

L'objectif est de consacrer au réacteur rapide refroidi au sodium environ 30 % de la subvention consacrée aux Systèmes du Futur, auxquels s'ajouteront les participations des industriels et aides incitatives directes. Cet objectif correspond à un budget de l'ordre de 9 M€ en 2005.

Principaux jalons du plan de développement du réacteur rapide à caloporteur sodium (SFR)



Remarques sur les collaborations

Une coopération bilatérale active avec la Russie vient renforcer les échanges sur ces thèmes dans le cadre du Forum Génération IV, principalement avec le Japon, les Etats-Unis et la Corée du Sud.

Les besoins en irradiation aux neutrons rapides pour les matériaux et combustibles, en particulier pour le développement des combustibles « tous actinides », ne pourront être satisfaits, après l'arrêt du réacteur Phénix en 2009, que par l'utilisation des réacteurs Joyo et Monju au Japon, ou Bor-60 et BN-600 en Russie. Ceci conduira à mettre en place des moyens supplémentaires tant humains que financiers pour mettre en œuvre ces coopérations. Dans l'hypothèse où la disponibilité de ces outils ne se confirmerait pas, il conviendrait de réexaminer de manière urgente une solution nationale.

3.1.3 - 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**, et en particulier de l'accident de dépressurisation, 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 (SFR, LFR et SCWR),

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).

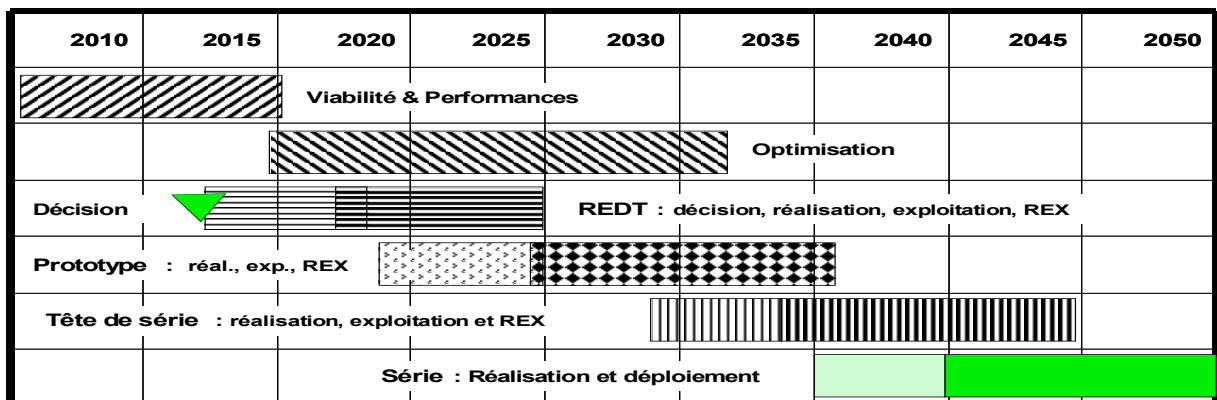
La faisabilité du GFR repose également en partie sur un tronc commun de R&D important avec le VHTR pour ce qui est des matériaux et composants à haute température pour le circuit primaire, de la technologie des circuits hélium et du système de conversion. Les efforts de développement réalisés sur ces 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.

Jalons :

- 2005 - Choix des matériaux de référence du combustible,
- Choix d'une technologie de référence pour le cycle du combustible,
- Sélection du concept GFR de référence.
- 2007 - Dossier de faisabilité préliminaire du concept de référence.
- 2008 - Choix d'une démonstration de la séparation groupée des actinides.
- 2009 - Choix d'un élément combustible de référence.
- 2012 - Démonstration d'un cycle complet de retraitement et de refabrication,
- Prise de décision de réaliser le REDT.
- 2017 - Premier assemblage expérimental dans le REDT.
- 2020 - Dossier global sur la faisabilité et les performances du GFR,
- Décision sur la construction en France ou la participation à la réalisation d'un démonstrateur prototype.

Principaux jalons du plan de développement du réacteur rapide à caloporteur gaz (GFR)



Moyens financiers d'ici 2015 :

L'objectif est de consacrer au réacteur rapide refroidi au gaz environ 50 % de la subvention consacrée aux Systèmes du Futur, auxquels s'ajouteront les participations des industriels et aides incitatives directes. Cet objectif correspond à un budget de l'ordre de 15 M€ en 2005.

Collaborations :

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^e et 6^e 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.

3.1.4 – Production d'hydrogène et Système à neutrons thermiques refroidi 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).

L'existence de ce tronc commun a amené le CEA à aborder ce domaine de R&D comme un soutien au programme Antares, ce qui l'a conduit à mettre en place depuis 2001, avec un co-financement des partenaires industriels, un programme de R&D complet sur la filière VHTR comprenant : la mise au point d'outils de calcul validés pour la conception, la fabrication de combustible à particule TRISO, la sélection de matériaux métalliques et graphite disponibles sur le marché, la construction de bancs et boucles d'essais sur la technologie hélium, des procédés de décomposition de l'eau pour la production d'hydrogène (*cycle thermochimique iode/soufre, cycle hybride soufre/électrolyse, électrolyse à haute température*).

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^e 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*).

Les principaux jalons à court terme du programme de R&D des partenaires français (CEA, Areva, EDF) pour le Système VHTR sont calés sur le planning du programme Antares d'Areva et le projet V/HTR qu'il sous-tend, ainsi que sur l'adaptation qui peut en être faite pour le projet NGNP en utilisant des technologies VHTR à un stade intermédiaire de développement.

Jalons :

- 2007 - Qualification d'un système de calculs validé pour les VHTR,
- Entrée en fonctionnement de la boucle hélium de 1 MW (Hélite).
- 2008 - Réalisation d'un pilote de 5 kW d'électrolyseur à haute température dans le cadre du programme européen de R&D.
- 2009 - Faisabilité du VHTR.
- 2010 - Qualification d'un combustible à particule fabriqué par Areva pour le NGNP,
- Faisabilité de procédés de traitement des déchets produits par le VHTR,
- Validation d'un procédé de production d'hydrogène thermochimique ou hybride (thermochimique / électrolyse).
- 2011 - Validation de matériaux pour la cuve, le circuit primaire, et le graphite,
- Qualification de maquettes de composants sur boucle d'essais en hélium.
- 2015 - Confirmation des performances du VHTR.

Moyens financiers d'ici 2015 :

L'objectif est de consacrer au réacteur à gaz à très haute température 20 % de la subvention consacrée aux Systèmes du Futur, auxquels s'ajouteront les participations des industriels et aides incitatives directes. Cet objectif correspond à un budget de l'ordre de 6 M€ en 2005.

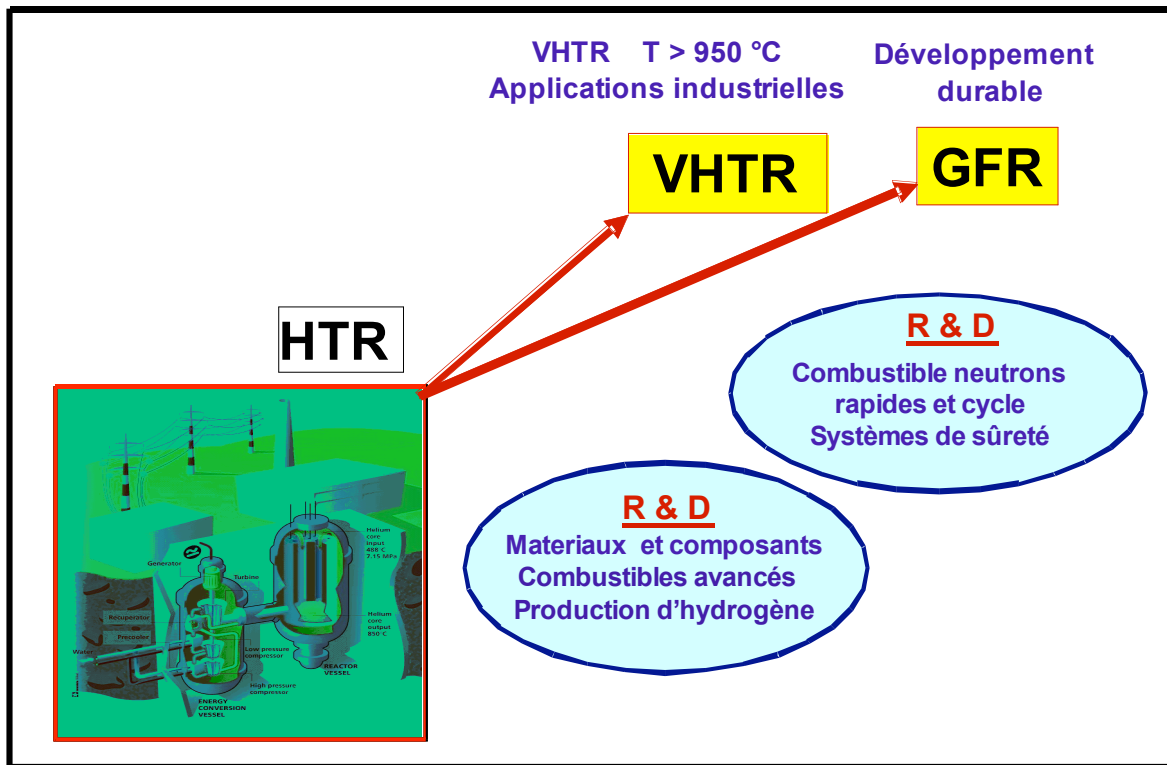
Collaborations :

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^e 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.

Une gamme technologique de systèmes à caloporteur gaz



3.1.5 – Recherches d'innovations pour les réacteurs à eau

Les recherches d'innovations pour les réacteurs à eau visent trois objectifs dont les deux premiers au moins sont prioritaires et font déjà l'objet de programmes cofinancés par les partenaires industriels :

- Des innovations sur les combustibles pour le palier EPR,
- Des innovations pour le marché international en dehors de la gamme de puissance 1000-1600 MWe,
- Des innovations pour d'éventuels projets de réacteurs postérieurs à l'EPR, à eau sous pression, à eau bouillante, ou à eau supercritique.

L'ensemble des recherches d'innovations sur les réacteurs à eau comprend un volet de R&D sur le combustible REP, et, par ailleurs, des études de systèmes ou de scénarios visant à identifier les technologies réacteur, combustible et cycle stratégiques pour le contexte français, afin de préparer leur développement en temps utile.

Pour les combustibles EPR, les recherches porteront sur l'amélioration des assemblages combustibles UO₂ et MOX en taux de combustion, qui permettent des gestions longues dans les réacteurs en exploitation et à terme dans EPR. Elles participent à l'effort constant de recherche d'économie sur le coût de production du kWh (à la fois par la réduction du coût du cycle et par l'amélioration de la disponibilité du réacteur). Cette ligne de R&D est appelée à se poursuivre sur la durée d'exploitation des EPR et constitue l'une des motivations pour le réacteur expérimental Jules Horowitz.

Au-delà de cette R&D d'optimisation des combustibles actuels, quelques innovations en rupture, visant des progrès substantiels en économie et en sûreté font l'objet d'études et de travaux de laboratoire :

- Combustibles capables d'intégrer des taux de combustion supérieurs à 100 GWj/t,
- Combustibles à température de fonctionnement réduite (*plaques au lieu de crayons*),
- Combustibles robustes réduisant radicalement la production d'hydrogène en cas d'accident grave,
- Combustibles à poison consommable erbium intégré à la gaine.

Cette R&D de fond, menée en coopération avec Areva et EDF, est également amenée à se poursuivre sur la durée d'exploitation de l'EPR.

Pour le marché international, le CEA poursuit, en liaison étroite avec ses partenaires industriels, l'évaluation d'innovations techniques pour des chaudières nucléaires susceptibles de compléter l'offre EPR et SBWR-1000 d'Areva.

Deux niveaux de puissance unitaire retiennent l'attention :

- Les réacteurs de petite et moyenne puissances (300-600 MWe) pour lesquels les enjeux sont à la fois :
 - de simplifier la conception pour préserver un coût d'investissement compétitif malgré l'effet d'échelle,
 - de comparer les caractéristiques économiques des réacteurs à eau dans cette gamme de puissance par rapport à celles des réacteurs à gaz à haute température,
- Les réacteurs de très forte puissance (> 2000 MWe) pour lesquels l'apport de technologies en rupture (notamment pour la cuve) est à évaluer.

Enfin, au-delà d'EPR, afin d'approfondir les conditions de transition entre réacteurs à eau et réacteurs à neutrons rapides, il est important d'apprécier le potentiel d'adaptation des réacteurs à eau (sous pression ou bouillante) à la tension sur les ressources en uranium naturel qui résulterait sur la 2^e moitié du 21^e siècle du scénario de développement (pourtant modéré) de l'énergie nucléaire considéré par EDF [2]. Des études préliminaires ont été menées en 2003 et 2004 en coopération avec Areva et EDF sur ce sujet.

Il est nécessaire d'approfondir ces études dans deux directions :

- Compléter ces études de scénarios, en particulier par des études de sensibilité, pour apprécier l'élasticité procurée sur la gestion des ressources naturelles par des facteurs de conversion de l'ordre de 0,8 (au lieu de 0,5 actuellement),
- Renforcer la veille technologique sur les réacteurs à eau à fort taux de conversion.

De ces analyses conjointes avec les partenaires industriels devrait ressortir le besoin éventuel d'études conceptuelles de réacteurs à eau (sous-pression, bouillante ou supercritique) à fort taux de conversion susceptibles de venir après l'EPR.

Jalons :

- 2005 - Bilan des études de réacteurs dans la gamme de puissance 300-600 MWe,
- 2006 - Bilan des études sur les combustibles à très haut taux de combustion, sur les assemblages à fort facteur de conversion, sur les combustibles innovants composites ou à gaines robustes, et sur les poisons consommables.
- 2007 - Bilan des études sur les chaudières de forte puissance, Bilan des études sur les combustibles innovants à très fort taux de combustion, et sur les combustibles à température de fonctionnement modérée (*plaques*).
- 2015-2020 - Qualification du combustible pour une utilisation en réacteur de puissance.

Moyens financiers d'ici 2015 :

Ce domaine de R&D mobilise actuellement de l'ordre de 2,5 M€ par an de subvention. Il pourrait, à la demande des partenaires industriels, croître jusqu'à 4-5 M€ / an.

3.1.6 – 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^e et 6^e 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.

Jalon :

2008 - Résultats d'EUROTRANS : viabilité d'un ADS de puissance pour la transmutation.

Moyens financiers d'ici 2015 :

Il est envisagé de maintenir jusqu'en 2008 un budget de l'ordre de 20 M€/an (dont environ la moitié pour des expérimentations de combustibles et cibles porteurs d'actinides mineurs dans Phénix) pour l'ensemble des études de faisabilité des ADS de puissance pour la transmutation. Au-delà, les moyens consacrés spécifiquement à ces travaux devront être réévalués en fonction de la place qui sera allouée aux ADS dans la stratégie française de gestion des déchets décidée en 2006, et des résultats du projet EUROTRANS en 2008.

3.1.7 - Procédés du cycle pour une gestion globale des actinides

Au-delà du recyclage de l'uranium et du plutonium, l'option de recyclage intégral de tous les actinides dans les systèmes à neutrons rapides (uranium, plutonium et actinides mineurs) fait appel à de **nouveaux procédés pour le traitement des combustibles usés** et la re-fabrication des combustibles à recycler, dont le développement passe par les grands jalons suivants :

- La réalisation en 2012 d'un atelier pilote auprès de l'usine de La Hague à même de procéder à des essais représentatifs de procédés de séparation poussée ou groupée (Ganex), et
- Un projet international de démonstration de gestion globale des actinides comprenant la séparation de quelques dizaines de kilogrammes d'actinides mineurs par l'atelier pilote de La Hague, la fabrication d'assemblages combustible « tous actinides » aux Etats-Unis (ORNL), et les essais de ce combustible à partir de 2015 dans le réacteur Monju exploité par JNC au Japon.

Ces recherches bénéficient de la coopération en place avec le CNRS sur les procédés de séparation et transmutation (Groupement de Recherche PARIS dans le cadre PACE).

Jalons :

2012 - Réalisation d'un atelier pilote pour séparation poussée ou groupée.

2015 - Essais d'assemblage de combustibles « tous actinides » dans le réacteur Monju.

Moyens financiers d'ici 2015 :

Il est prévu de faire passer de 4 à 6 M€/an le budget alloué au tronc commun de R&D sur les procédés du cycle sur la période 2005-2008 pour réaliser les investissements et conduire les expériences nécessaires à la première démonstration du procédé Ganex dans le laboratoire Atalante (2008). Au-delà, les dépenses de R&D liées aux démonstrations expérimentales de séparations poussée et groupée dans l'atelier pilote de La Hague (2012) seront de l'ordre de 5 M€/an.

3.1.8 - 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^e 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^e PCRD (*action HPLWR*), appelé à s'élargir au Forum Génération IV à travers des contributions au **Super-Critical Water reactor (SCWR)**.

Jalons :

Cette activité de recherche amont et de veille technologique sur ces filières prospectives n'est pas actuellement structurée par de grands jalons.

Moyens financiers d'ici 2015 :

Le budget consacré globalement aux recherches sur les systèmes à sels fondus, à caloporteur plomb et eau supercritique restera inférieur à 1 M€ / an.

4 - Partenaires et budgets

La répartition et la coordination de la R&D se mettent actuellement en place entre les différents pays membres du Forum en fonction de leur intérêt propre pour les systèmes sélectionnés. Quatre Comités directeurs de système provisoires (*System Steering Committees*) ont été mis en place en mars 2003 pour élaborer le plan de développement des systèmes VHTR, GFR, SFR et SCWR. Ces plans de développement sont aujourd'hui dans une forme presque finalisée, et certains Comités de gestion de projet de R&D (*Project Management Board*) provisoires ont entrepris d'élaborer des plans de collaboration et de préparer des Arrangements-projet de R&D correspondants. L'intérêt des Etats-Unis, du Japon et de la France se focalise sur les systèmes à caloporteur gaz (VHTR et GFR) et à sodium (SFR), avec des contributions de la Corée du Sud, du Royaume Uni, de la Suisse et de l'Afrique du Sud, ainsi que de l'Euratom. Les systèmes à eau supercritique (SCWR) sont portés par le Canada qui y voit une opportunité de valoriser la conception à tubes de force des réacteurs Candu, et

dans une moindre mesure par les Etats-Unis, le Japon et l'Euratom. Les systèmes à caloporteur plomb (LFR) sont considérés par les Etats-Unis essentiellement pour la fourniture sécurisée d'énergie dans la gamme des 100 MWe (concept de « Nuclear battery »). Les systèmes à sels fondus (MSR), dans leur diversité, retiennent l'attention de quelques pays plus intéressés à approfondir l'évaluation des potentialités de cette filière, ou des sels fondus comme caloporteurs, que par de réelles perspectives de développement industriel (France, Euratom et Etats-Unis principalement).

Aux Etats-Unis, le Département de l'énergie consacre au cours de l'année fiscale 2005 un budget de l'ordre de 100 M\$ aux systèmes Génération IV (*essentiellement VHTR, GFR, SFR et cycle du combustible*) répartis sur trois programmes :

- Generation IV Nuclear Energy Systems Initiative : 40 M\$ (*dont 25 M\$ pour le NGNP*),
- Advanced Fuel Cycle Initiative : 46 M\$,
- Nuclear Hydrogen Initiative : 9 M\$.

Ce budget est appelé à croître rapidement dès que le projet NGNP, auquel les Américains entendent consacrer les trois quarts de leur effort sur les systèmes Génération IV, sera lancé. Déjà doté globalement de 31 M\$ en 2005, ce projet devrait induire des dépenses totales de 1,8 G\$ (R&D, études et réalisation) jusqu'à sa mise en service en 2017.

Au Japon, le MEXT consacre au moins 300 M\$/an aux systèmes Génération IV (*essentiellement SFR, VHTR, GFR et cycle du combustible*) à travers des programmes menés par JNC (réacteurs à neutrons rapides et cycle) et JAERI (réacteur à très haute température et production d'hydrogène). Ce budget ne comprend pas l'exploitation des réacteurs Monju, Joyo et HTTR.

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^e PCRD. Cette perspective est la conséquence logique de l'entrée des pays signataires du traité Euratom comme 11^e membre du Forum Génération IV. Dès le 6^e 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^e 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.

En France, le plan stratégique du CEA prévoit actuellement un budget de l'ordre de 40 M€/an pour les systèmes Génération IV jusqu'en 2008 (*essentiellement GFR, SFR, VHTR et cycle du combustible*) avec un objectif de recettes extérieures au CEA de l'ordre de 10 M€/an. Ce niveau de financement, en regard du coût de développement d'une nouvelle filière (1 G€ de R&D + 1G€ de démonstrateur) rend nécessaire d'intégrer toute stratégie nationale dans un effort de développement international. Un niveau de dépenses constant de l'ordre de 50 M€/an (en comptant la part de recherche propre des partenaires industriels) représenterait une contribution de la France de l'ordre de 12 % de l'effort international globalement escompté dans le Forum Génération IV (qui prévoit une dépense de 6 G€ sur 15 ans environ, soit de l'ordre de 400 M€/an). Une participation de la France au niveau de 20 % de la R&D internationale sur les systèmes nucléaires du futur (soit 80 M€/an tous acteurs confondus) serait plus conforme à la part relative de son industrie nucléaire sur la scène internationale. Ce niveau de moyens correspond aussi aux efforts nécessaires en innovation et valorisation d'expertise antérieure pour qu'elle garde son leadership au niveau mondial. Les contributions apportées par les organismes de recherche français à ces objectifs, leur coordination et la coopération avec les industriels, sont essentielles pour que l'apport de la France au nucléaire du futur soit significatif, apport dont le niveau déterminera in fine les contreparties en termes de droits d'usage et de redevances.

Références

- [1] **A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems** (*Dec. 2002*) – GIF-002-00 – Issued by the U.S.DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum
- [2] **EDF et le nucléaire de long terme** – Synthèse (*Dec. 2004*) par Jean-Michel Delbecq, Jean-Loup Rouyer et al.