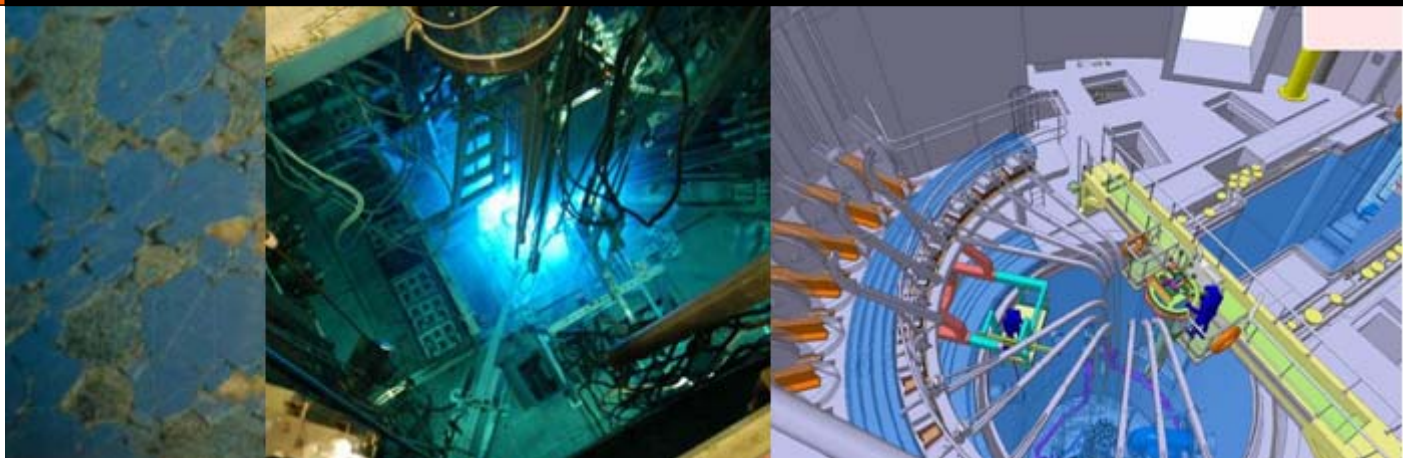


DOSSIER DE PRESSE



RJH et prototype 4^e génération : expérimenter les systèmes du futur

15 mars 2007

CONTACT PRESSE : CEA / Service Information-Média

Marie VANDERMERSCH Tél. : 01 64 50 27 53 - marie.vandermersch@cea.fr

CEA Saclay / Siège
Direction de la Communication
Service Information-Média
91191 Gif-sur-Yvette Cedex
Tél. : (33) 01 64 50 20 11
Fax : (33) 01 64 50 28 92
www.cea.fr/presse

Sommaire :

RJH et prototype 4^e génération : expérimenter les systèmes du futur

3 Introduction

- 3 Trouver l'énergie de demain...
- 3 ...en développant le nucléaire du futur
- 4 Le réacteur de recherche Jules Horowitz

5 Génération IV : un enjeu de R&D international

- 5 Quelles exigences pour les réacteurs du futur ?
- 6 Six technologies prometteuses
- 6 Inpro : un programme de soutien de l'AIEA
- 7 Les coopérations bilatérales

8 La Stratégie française de R&D sur les systèmes du futur

- 8 Le planning du prototype
- 9 De l'intérêt des neutrons rapides
- 11 Filière de référence : le RNR sodium
- 12 Filière alternative : le RNR gaz
- 12 Autres filières

14 Le RJH : contexte et enjeux

- 14 Maintenir et développer une capacité d'expertise au niveau européen
- 15 Couvrir les besoins d'expérimentation des filières présentes et à venir
- 16 Valorisation industrielle

18 Le RJH : une installation unique pour un large spectre d'expériences

- 18 L'installation de recherche
- 20 Les programmes menés au sein du RJH

22 Annexe

23 Les différentes générations de réacteurs



Illustrations page précédente :

Combustible à sûreté accrue
© CEA

*Cœur du réacteur de recherche
Osiris au CEA/Saclay*
© L.Godart/CEA

Vue de la piscine et de la cuve du RJH
© Areva

Introduction

Trouver l'énergie de demain ...

Dans les prochaines décennies, le contexte énergétique est voué à se tendre de plus en plus. D'un côté, la croissance démographique et le développement nécessaire des pays émergents supposent une consommation d'énergie accrue¹ ; de l'autre, la diminution des réserves d'énergies fossiles, les difficultés d'approvisionnement liées aux tensions géopolitiques et le réchauffement climatique imposent de trouver rapidement une alternative sûre et compétitive aux hydrocarbures.

S'il est manifeste que toutes les sources d'énergie devront être mises à contribution pour répondre à la situation, le nucléaire paraît incontournable dans le « bouquet énergétique » de demain. Fiable et compétitif, il ne produit pas de gaz à effet de serre et permet d'assurer une production d'électricité massive et régulière. La communauté internationale est consciente des enjeux de l'énergie nucléaire à l'horizon 2020-2030. Ainsi, une dizaine de pays ont décidé de mettre en commun leurs efforts pour développer une nouvelle génération de systèmes². Créé en 2000, le Forum international Génération IV est l'initiative la plus marquante dans ce sens.

... en développant le nucléaire du futur

En effet, le nucléaire a lui aussi des défis à relever. Bien que son combustible (l'uranium) ne connaisse pas les mêmes contraintes que le pétrole ou le gaz, ses réserves sont limitées à 250 années de consommation avec les systèmes utilisés actuellement. La technologie des réacteurs à neutrons rapides, au centre des recherches sur la génération IV, permettrait d'utiliser ces réserves sur plusieurs milliers d'années.

De même, si les déchets produits par les centrales sont actuellement gérés avec les meilleures technologies disponibles, il est démontré qu'il est possible de réduire encore leur volume et leur toxicité. C'est également l'un des objectifs assignés aux recherches sur les réacteurs du futur.

Enfin, améliorer toujours davantage la sûreté des installations de façon à réduire les risques et les conséquences potentielles d'un accident, augmenter encore la compétitivité, créer des systèmes résistant mieux à la prolifération nucléaire sont autant d'objectifs qui entrent dans le cahier des charges des réacteurs de la quatrième génération.

¹ Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), la demande d'énergie devrait augmenter de 63% entre 2002 et 2030 si les politiques gouvernementales ne changent pas. Un scénario alternatif, tablant sur la mise en place de politiques d'économie d'énergie et d'utilisation de technologies plus efficaces, prévoit une augmentation de 43% de la demande mondiale d'énergie sur cette même période. (Source : AIE World Energy Outlook 2004)

² Par système, il faut entendre l'ensemble formé par les réacteurs et les cycles du combustible associés.

Six filières de réacteurs ont été sélectionnées et vont faire l'objet de recherches par les différents partenaires du Forum GIV. La France, qui a pris en 2006 la présidence du Forum pour une durée de trois ans, s'engage à mener plus spécifiquement des recherches sur deux d'entre elles. Ainsi, un prototype de réacteur à neutrons rapides sera construit en 2020. La loi du 28 juin 2006, relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs, prévoit en effet la construction d'une installation de démonstration pour la transmutation des déchets ; la filière RNR Sodium est la mieux placée pour être retenue dans ce cadre en 2012. La deuxième filière choisie, le RNR refroidi au gaz, fera l'objet d'une collaboration européenne.

Mettre au point ces technologies suppose de développer de nouveaux matériaux et des combustibles innovants capables de résister à de très fortes sollicitations (flux de neutrons importants, températures pouvant atteindre 1000°C ...). Des expériences en réacteur de recherche devront nécessairement être menées pour tester la performance et la sûreté de ces concepts.

Le Réacteur de recherche Jules Horowitz (RJH)

Afin d'assurer cette mission, le CEA mettra en service dès 2014 un nouveau réacteur de recherche : le réacteur Jules Horowitz. Chargée d'assurer la relève de l'actuel réacteur de recherche Osiris, cette nouvelle installation sera plus performante et plus flexible et permettra de réaliser simultanément une vingtaine d'expériences. Capable de produire un flux très élevé de neutrons avec une forte composante de neutrons rapides, le RJH est un outil clé pour les recherches sur les réacteurs du futur mais sera également à même de tester le comportement des matériaux et combustibles de la génération actuelle et des réacteurs EPR. Cette installation à vocation internationale est d'autant plus stratégique que les réacteurs de recherche européens actuellement en service devraient progressivement être arrêtés dans la prochaine décennie. Le RJH assurera le renouvellement de ces outils indispensables à la poursuite des améliorations sur les réacteurs existants et au développement de la prochaine génération de réacteurs nucléaires.

Intervenants :

Alain Bugat, Administrateur général du CEA

Philippe Pradel, Directeur de l'énergie nucléaire

Daniel Iracane, Directeur du projet RJH

Génération IV : un enjeu de R&D international

Pour faire face aux besoins croissants en énergie, la communauté internationale est consciente des enjeux que représente l'énergie nucléaire à l'horizon 2020-2030. Le Forum international Génération IV (GIF), lancé en 2000 par le Department of Energy (DOE) américain, est né de cette volonté de créer un cadre de R&D international en mesure de catalyser les efforts de recherche menés par différents pays pour faire émerger plus rapidement les technologies les plus performantes. Douze pays (Afrique du Sud, Argentine, Brésil, Canada, Chine, Corée du Sud, France, Japon, Royaume-Uni, Russie, Suisse, USA) et l'Union Européenne ont fait le choix d'adhérer à ce forum et de mettre ainsi en commun leurs efforts pour développer une nouvelle génération de systèmes nucléaires³.

Quelles exigences pour les réacteurs du futur ?

D'emblée, une forte convergence s'est affirmée sur les grands objectifs du programme Génération IV, même si chaque pays demeure par ailleurs libre de ses choix d'options et de programmes pour les systèmes du futur.

Quatre objectifs principaux ont été définis pour caractériser les systèmes du futur qui 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**.

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

³ Pour chaque technologie retenue, la signature d'accords systèmes entre les pays permet de définir les règles de propriété intellectuelle applicables lors des développements ultérieurs.

Six technologies prometteuses

En 2002, 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. Quatre d'entre eux ont d'ores et déjà fait l'objet d'accords de coopération⁴. Ces systèmes ont l'avantage d'autoriser également d'autres applications que la production d'électricité, telles que la production d'hydrogène, de chaleur pour l'industrie ou le dessalement de l'eau de mer.

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) ou RNR gaz - Réacteur à neutrons rapides à caloporteur hélium ;
- **SFR** (Sodium-cooled fast reactor system) ou RNR Na - Réacteur à neutrons rapides à caloporteur sodium ;
- **LFR** (Lead-cooled fast reactor system) - Réacteur à neutrons rapides à caloporteur alliage de plomb ;
- **SCWR** (Supercritical water-cooled reactor system) - Réacteur à eau supercritique ;
- **MSR** (Molten salt reactor system) - Réacteur à sels fondus.

Inpro : un programme de soutien de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA)

Parallèlement au Forum Génération IV, 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 porte lui-aussi sur 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.

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. Son objectif 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 désireux de bénéficier de ses avantages, ou grâce à ses compétences en non-prolifération et contrôles internationaux.

⁴ Ces accords portent sur le réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium (SFR), le réacteur rapide refroidi à l'hélium (GFR), le réacteur à très haute température refroidi à l'hélium (VHTR) et le réacteur à eau supercritique (SCWR).

Dans un premier temps, le projet Inpro vise à :

- déterminer, sur une base très large, les besoins et objectifs des pays compte tenu de la diversité de leurs situations, 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, Inpro approfondira la définition d'une méthodologie d'évaluation des nouveaux concepts ou projets de réacteurs de façon à aider les pays membres de l'Agence à évaluer les systèmes nucléaires en fonction de leurs besoins.

Aujourd'hui, le projet rassemble 14 pays (Allemagne, Argentine, Brésil, Canada, Chine, Corée du Sud, Espagne, Etats-Unis, France, Inde, Pays-Bas, Russie, Suisse, Turquie, ainsi que 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

La France mène enfin des actions de coopération bilatérale avec les Etats-Unis, le Japon et la Russie. Celles-ci 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 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 sur 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 Génération IV.

La coopération avec le Japon permet de partager avec l'agence JAEA la R&D 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.

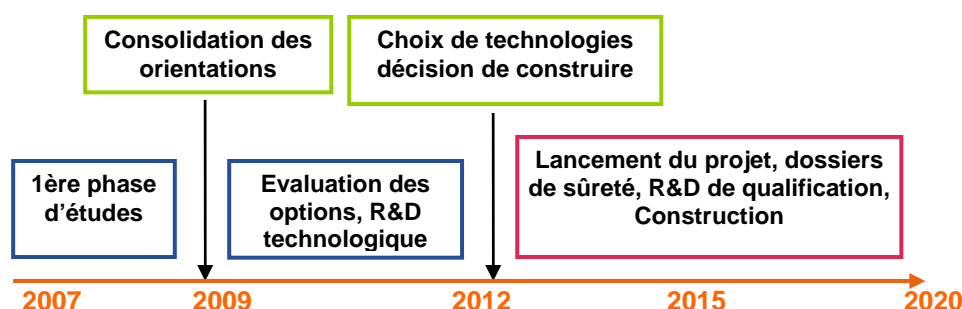
La Stratégie française de R&D sur les systèmes du futur

Six filières de « systèmes nucléaires du futur » ont été retenues par le Forum international Génération IV. Tout en contribuant à l'ensemble de la réflexion, le CEA a choisi de faire porter principalement ses efforts sur deux systèmes de réacteurs à neutrons rapides : le réacteur rapide refroidi au sodium (RNR-Na) et le réacteur rapide refroidi au gaz (RNR-G) – l'hélium en l'occurrence.

Le 6 janvier 2006, lors de la cérémonie des vœux du Président de la République, la France s'est engagée à mettre en service à l'horizon 2020 un réacteur prototype de l'une de ces deux filières. Dès à présent, les activités de R&D menées au CEA visent à réunir tous les éléments techniques et technico-économiques qui permettront en 2012 de décider de la nature et du cahier des charges du prototype.

D'ores et déjà, la filière RNR sodium apparaît raisonnablement comme la plus compatible avec l'échéance de 2040⁵. Une priorité forte est donc accordée aux recherches d'innovations sur ce type de réacteur et c'est cette filière qui devrait servir de référence au prototype français qui doit être mis en service en 2020. Mais il ne s'agit pas pour autant de figer dès cette date toutes les options du système destiné à être déployé à partir de 2040 et les recherches menées sur le RNR-G seront menées en parallèle dans le cadre d'une collaboration européenne de façon à laisser toutes les options ouvertes aussi longtemps que possible.

Le planning du prototype



⁵ Les réacteurs de quatrième génération sont étudiés en vue d'un déploiement industriel vers 2040

La R&D sur les réacteurs de 4^e génération : quelques dates clés

17 mars 2005 : lors de la réunion du Comité à l'énergie atomique, les ministres recommandent que la priorité des recherches en France soit donnée à deux types de réacteurs :

- les réacteurs rapides à caloporteur sodium ;
- les réacteurs rapides à caloporteur utilisant un gaz neutre

Janvier 2006 : lors de ses vœux à la nation, le Président de la République annonce la décision de lancer la conception, au sein du CEA, d'un prototype de réacteur de 4^{ème} génération, qui devra entrer en service en 2020.

28 juin 2006 : Loi de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs

Article 3 :

1°) La séparation et la transmutation des éléments radioactifs à vie longue. Les études et recherches correspondantes sont conduites en relation avec celles menées sur les nouvelles générations de réacteurs nucléaires mentionnés à l'article 5 de la loi du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique (...) afin de disposer en 2012, d'une évaluation des perspectives industrielles de ces filières et de mettre en exploitation un prototype d'installation avant le 31 décembre 2020.

20 décembre 2006 : lors de la 596^{ème} réunion du Comité à l'énergie atomique, le choix des filières et le planning du prototype ont été actés.

De l'intérêt des neutrons rapides

Les deux filières retenues par le CEA font appel à la technologie des neutrons rapides avec cycle du combustible fermé⁶. Au vu des objectifs que se sont fixés les pays adhérant au forum Génération IV, cette technologie comporte de nombreux atouts.

Préservation des ressources naturelles

Produire cinquante à cent fois plus d'électricité avec la même quantité d'uranium que dans les réacteurs actuels : tel est l'objectif que permettraient d'atteindre les réacteurs rapides de quatrième génération. Les réacteurs actuels, où la réaction en chaîne est entretenue par des neutrons thermiques, ne produisent de l'énergie qu'à partir de la fission de noyaux d'uranium 235, seul isotope fissile⁷ de l'uranium. Or cet isotope est extrêmement minoritaire dans le minerai naturel d'uranium (0,7%), composé à hauteur de 99,3%

⁶ Le cycle fermé consiste à traiter les combustibles usés de façon à recycler les matières encore valorisables après les avoir séparées des déchets ultimes.

⁷ En physique, se dit d'un noyau d'atome pouvant être cassé par un neutron.

d'uranium 238 qui lui n'est pas fissile en l'état. Les réacteurs à neutrons rapides devraient permettre de « brûler » par fission non seulement l'isotope 235 de l'uranium, mais également l'uranium 238 en le convertissant en plutonium 239 (Pu239) qui, lui, est fissile. L'U238 pourrait ainsi être consommé dans le réacteur à des fins électrogènes. Cette technologie permettrait de multiplier par 100 la disponibilité mondiale en ressources fissiles primaires. Dans un premier temps, elle utiliserait également l'U238 issu du retraitement des combustibles usés actuels et de l'uranium appauvri, sous produit de l'enrichissement composé à 99,7% d'U238. En France, ce dernier constitue un stock de 200 000 tonnes a priori suffisant pour alimenter une production nucléaire au niveau actuel pendant 5000 ans avec des réacteurs à neutrons rapides.

Réduction des déchets

Les réacteurs de ce type sont incinérateurs d'une partie de leurs propres déchets (les plus critiques). En effet, la plupart des noyaux lourds formés dans les réacteurs nucléaires présents et futurs, et aujourd'hui considérés comme déchets à vie longue, sont plus facilement fissiles dans un réacteur à neutrons rapides. Les actinides mineurs pourraient ainsi être recyclés, ce qui permettrait de réduire le volume et la radio-toxicité à long terme des déchets ultimes qui seraient alors limités aux produits de fission. Les recherches sur la quatrième génération rejoignent ainsi les préoccupations de la loi du 28 juin 2006, relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs : au titre de l'article 3 de cette loi, le prototype qui verra le jour en France en 2020 aura vocation à participer aux démonstrations de faisabilité de la transmutation des déchets.

Non prolifération

L'essor prévisible de l'énergie nucléaire au cours du XXI^{ème} siècle amène à attacher une importance encore plus grande aux risques de prolifération. A côté de l'amélioration des mesures de sauvegarde extrinsèques basées sur la surveillance et le contrôle des instances internationales, on envisage également des mesures intrinsèques pour diminuer l'attractivité, pour les pays ou les groupes mal intentionnés, des matières manipulées dans le cycle du combustible. Par exemple, une solution envisagée consiste à interdire l'accès direct au plutonium tout au long du cycle du combustible. Le plutonium, non séparé des autres éléments, sera mélangé aux actinides mineurs (très radioactifs), ce qui le rendra beaucoup plus difficile à manipuler et donc à détourner.

Cogénération et production d'hydrogène

Les deux filières à neutrons rapides retenues par la France ont l'avantage d'utiliser des caloporteurs⁸ (sodium ou hélium) qui auront une température de sortie plus haute que celle à laquelle peut être portée l'eau des réacteurs à eau sous pression (REP) actuels. Grâce à ces hautes températures, il est envisageable de convertir de la chaleur en électricité avec un bien meilleur rendement ou d'envisager des applications nouvelles comme la production d'hydrogène à haute température.

⁸ Fluide (gaz ou liquide) utilisé dans les réacteurs nucléaires pour véhiculer la chaleur produite par les fissions.

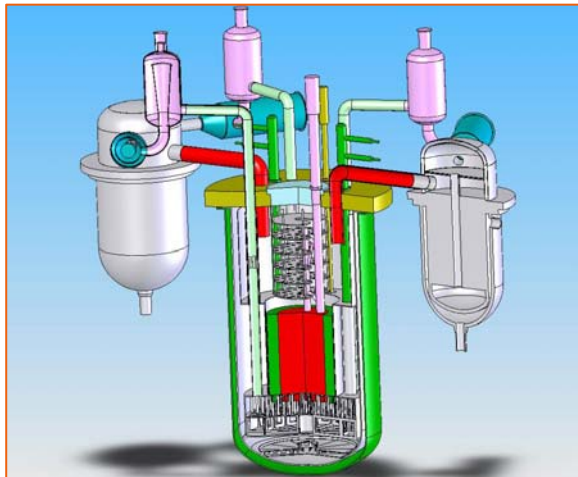
Filière de référence : le RNR sodium (ou SFR pour Sodium-cooled Fast Reactor)

Les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium font l'objet de recherches et développements dans tous les grands pays nucléaires car la faisabilité technique de cette filière est déjà acquise. La France dispose d'une expérience précieuse en la matière grâce aux réacteurs prototypes Phénix, en service depuis 1973, et Superphénix, exploité entre 1986 et 1997. On attend des progrès déterminants par rapport à ces réacteurs.

Les objectifs de la R&D

Les progrès attendus visent :

- une sûreté améliorée, au moins égale à celle des REP de troisième génération et prenant en compte les spécificités des neutrons rapides et du sodium⁹. Les études doivent accroître la résistance du réacteur aux accidents graves et aux agressions externes ;
- une réduction du coût d'investissement ;
- de meilleures conditions d'exploitation permettant une disponibilité maximum, notamment en améliorant les conditions d'inspection en service, de maintenance et de réparation ;
- la gestion optimisée des matières nucléaires :
- un cycle fermé permettant le multi recyclage du plutonium ;
- l'incinération des actinides mineurs.



Concept rapide-sodium actuellement à l'étude ©CEA

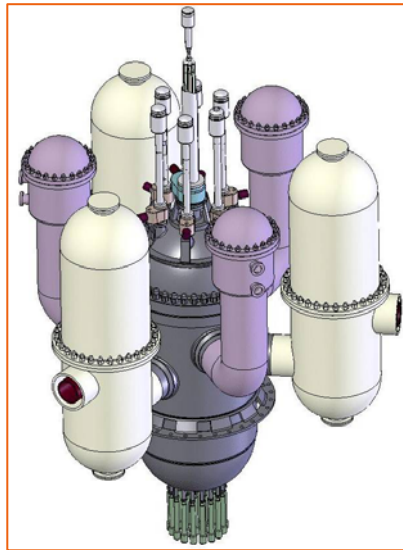
⁹ Le sodium liquide est un excellent caloporteur : il permet d'évacuer rapidement la chaleur produite par les réactions de fission au sein du cœur du réacteur. Mais ce métal a l'inconvénient de s'enflammer spontanément au contact de l'air ou de l'eau. Des solutions originales sont étudiées pour se prémunir de ce risque : générateur de vapeur à double paroi ; remplacement du circuit vapeur par un circuit gaz ; réalisation d'un circuit intermédiaire utilisant un fluide présentant une faible réactivité à la fois avec l'eau et le sodium ; etc.

Filière alternative : le RNR gaz (ou GFR pour Gas-cooled Fast Reactor)

Les réacteurs à neutrons rapides refroidis au gaz procèdent d'un concept totalement innovant qui associe neutrons rapides et haute température. L'objectif des recherches est de rassembler d'ici 2012 assez d'éléments convaincants sur la faisabilité et les performances potentielles du RNR gaz pour pouvoir prendre à cette échéance la décision de progresser vers la réalisation en Europe d'un réacteur expérimental qui en valide les technologies et les principes clés.

La faisabilité de la filière repose essentiellement sur la levée des verrous technologiques suivants :

- mise au point d'un combustible qui assure le confinement des produits de fission et capable de résister aux très hautes températures. La robustesse du combustible développé pour ce réacteur pourrait intéresser d'autres filières, en particulier les RNR sodium ;
- développement de matériaux de structure pour le cœur résistant à la fois à de hautes températures et à un flux de neutrons élevé ;
- gestion des situations accidentelles.

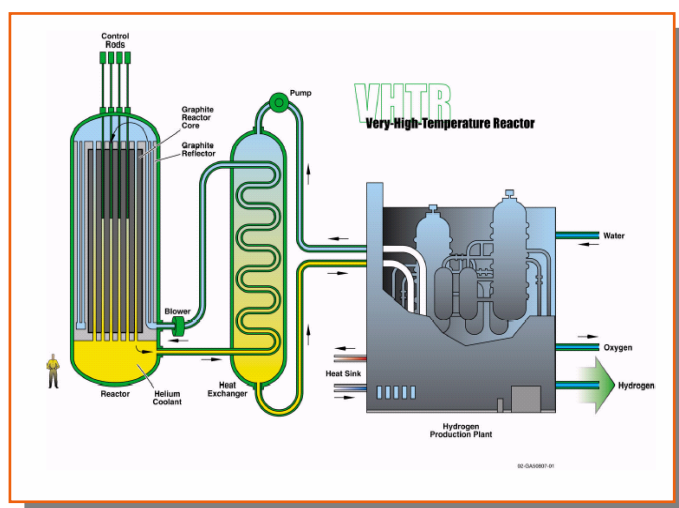


Le concept de référence actuel pour le rapide gaz ©CEA

Qu'il s'agisse de l'une ou de l'autre filière, la R&D sur les systèmes 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, et de procédés de séparation groupée et de cogestion des actinides mineurs.

Autres filières

Le CEA est également impliqué dans les études sur les réacteurs à très haute température (VHTR pour Very High Temperature Reactor), autre filière sélectionnée par le Forum Génération IV. Il contribue au projet de réacteur à haute température Antares, développé par Areva, lequel permettrait de produire en plus de l'électricité, de l'hydrogène, des carburants de synthèse, de la chaleur, etc. Au-delà de la phase de faisabilité, le développement du RNR gaz pourrait tirer partie d'un tronc commun de R&D avec le VHTR.



Le CEA, avec le CNRS et ses partenaires industriels, mène 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.

Le RJH : contexte et enjeux

Maintenir et développer une capacité d'expertise au niveau européen

Dans un contexte énergétique tendu, les recherches pour améliorer encore les performances et la sûreté de la filière nucléaire, l'une des énergies non génératrices de gaz à effet de serre, constituent un enjeu majeur. Or, en Europe, les réacteurs de recherche nécessaires à ce type d'étude, parmi lesquels le réacteur Osiris du CEA à Saclay, datent des années 60. La plupart d'entre eux seront progressivement mis à l'arrêt à partir de la prochaine décennie. La disponibilité d'un outil de recherche moderne, permettant de maintenir un haut niveau d'expertise en France et en Europe, apparaît comme un besoin croissant dans le domaine de l'énergie nucléaire.

Le réacteur de recherche Jules Horowitz (RJH) répond à cet enjeu scientifique et technologique.

Réacteurs de recherche européens

Pays	Réacteurs de recherche	Age en 2015 (ans)	Puissance (MWth)
Belgique	BR2 à Mol	52	60
Hollande	HRF à Petten	54	45
Norvège	HRP à Halden	55	19
France	Osiris à Saclay	49	70
Suède	R2 à Studsvik	Mis à l'arrêt en 2005	50
République tchèque	LVR15 à Řež	58	10

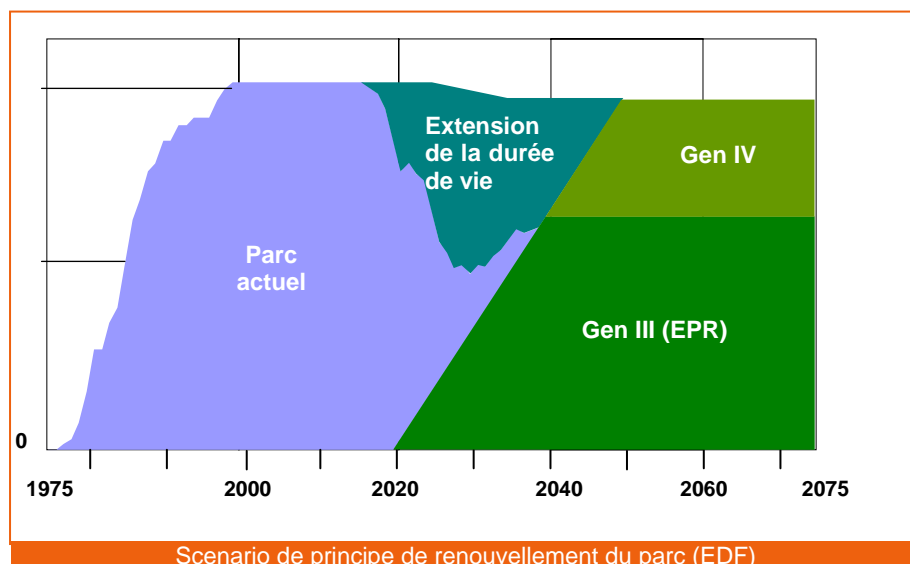
Le projet Jules Horowitz dépasse donc largement le cadre national. Il rassemble d'ores et déjà huit partenaires européens : le CEA, les instituts de recherche belge, tchèque, néerlandais et finlandais, EDF, le groupe Areva et le Centre Commun de Recherche au titre de la Commission Européenne. Des discussions sont en cours pour élargir la participation à d'autres partenaires européens et internationaux.



Physicien, ancien directeur des réacteurs nucléaires et de la recherche fondamentale du CEA, Jules Horowitz s'est spécialisé dans l'étude des réacteurs de recherche dès 1946. Ce physicien de renommée internationale est l'un des pères de la filière uranium-graphite-gaz.

Couvrir les besoins d'expérimentation des filières présentes et à venir

Avec le RJH, les besoins d'expérimentation sur les nouveaux matériaux et combustibles devraient être couverts durant les cinq prochaines décennies. En effet, l'un des atouts majeurs de cette installation est la flexibilité de son « plateau d'expérimentation » qui lui permettra de recréer les environnements physiques et chimiques de toutes les filières de réacteurs, présentes ou projetées.



Etudes sur les réacteurs existants (REP, EPR)

Cette installation accompagnera les futures évolutions du combustible des réacteurs de deuxième et de troisième génération¹⁰. Elle permettra d'améliorer la performance du combustible en augmentant sa durée de vie et sa résistance. L'enjeu est de taille car les résultats des recherches qui ont déjà été réalisées permettent aujourd'hui de produire deux fois plus d'énergie qu'il y a 20 ans avec la même quantité de combustible, ce qui permet d'optimiser la productivité des réacteurs et de réduire le volume de matière à retraiter ou à entreposer après usage, tout en garantissant un haut niveau de sûreté.

Recherches sur les réacteurs de quatrième génération

Bénéficier d'une telle installation sera particulièrement décisif pour mener les recherches sur les réacteurs de quatrième génération. La mise au point des

¹⁰ La troisième génération est appelée à prendre le relais de la génération actuellement en fonctionnement. Outre l'EPR, développé par Framatome-NP, et dont les deux premiers exemplaires devraient être mis en service respectivement en 2009 en Finlande et en 2012 en France, elle comporte aussi les modèles SWR 1000 (réacteur européen à eau bouillante développé par Framatome-ANP), les réacteurs AP 600 et AP 1000 développés par Westinghouse, le réacteur ABWR 1300 déjà développé au Japon ou encore le modèle APR 1400 de la société coréenne KHNP.

réacteurs à neutrons rapides du futur suppose de développer de nouveaux matériaux et de nouveaux combustibles innovants capables de résister à de très fortes sollicitations. La performance et la sûreté de ces concepts nécessitent des expériences en réacteur de recherche pour sélectionner les solutions les plus prometteuses et tester leurs limites de comportement.

- Des combustibles innovants, capables de résister à des températures élevées et à des flux de neutrons importants seront testés au sein du RJH. Ces nouveaux combustibles nécessiteront également de développer de nouveaux procédés de retraitement.
- Le RJH accompagnera la mise au point de nouveaux matériaux résistants à de hautes températures mais également à une irradiation accrue liée au flux neutronique plus intense des réacteurs à neutrons rapides. Grâce aux expériences réalisées au sein de l'installation Jules Horowitz, il sera possible de prévoir le comportement des matériaux et l'évolution de leurs propriétés mécaniques sous l'influence des phénomènes d'irradiation. Ces expériences fourniront les données nécessaires à la modélisation numérique de ces phénomènes de vieillissement.

Au-delà de la fission, la fusion

Au-delà de la fission, le RJH contribuera aussi aux développements et aux tests des matériaux qui seront utilisés dans le cadre des recherches sur la fusion nucléaire : les contraintes qu'ont à subir ces matériaux sont en effet assez proches de celles auxquelles sont soumis les matériaux des réacteurs de quatrième génération.

Valorisation industrielle

Approvisionner les hôpitaux en radioéléments à vie courte

Outre les enjeux en termes de recherche sur l'énergie nucléaire, le RJH sera mis au service de la médecine nucléaire : il permettra d'approvisionner les hôpitaux en radioéléments à vie courte, utilisés par les services d'imagerie médicale à des fins thérapeutiques et diagnostiques. Ces radioéléments, tels que le technétium 99m, ont une durée de vie limitée à quelques heures ; ils nécessitent donc une production permanente. Le RJH fiabilisera la fourniture de ces radioéléments et contribuera pour 25% à la production européenne, voire, si besoin, jusqu'à 50%. Il s'agit là d'un enjeu important de santé publique. Actuellement, le technétium 99^m est produit notamment par les réacteurs de recherche HFR à Petten aux Pays-Bas, BR2 en Belgique et Osiris en France.

Produire du silicium de haute performance

Les fonctions de l'installation de recherche pourront également être valorisées à travers des applications industrielles non nucléaires. Pour l'industrie automobile par exemple, le RJH fournira du silicium de haute performance utilisé dans les systèmes électroniques de puissance tels que ceux placés dans les véhicules hybrides.

Le réacteur de recherche Jules Horowitz en quelques chiffres

Chronologie

2003-2005 : études de définition destinées à fixer les solutions techniques pour les différents systèmes constituant le réacteur de recherche

2005 : concertation locale

2006 : enquête publique

2006-2007 : Etudes détaillées

2007 : premiers travaux de construction

2014 : mise en service

Financement

La construction du réacteur Jules Horowitz représente un investissement de 500 millions d'euros. Le financement du projet sera assuré à 50% par le CEA, à 20% par les partenaires européens et internationaux, à 20% par EDF, et à 10% par Areva.

Impact socio-économique

La phase de construction de l'installation (2007-2014) générera en moyenne de 100 à 300 emplois directs et de 300 à 1000 emplois indirects selon les phases du chantier.

En phase d'exploitation (2015-2065), près de 150 personnes travailleront sur l'installation Jules Horowitz.

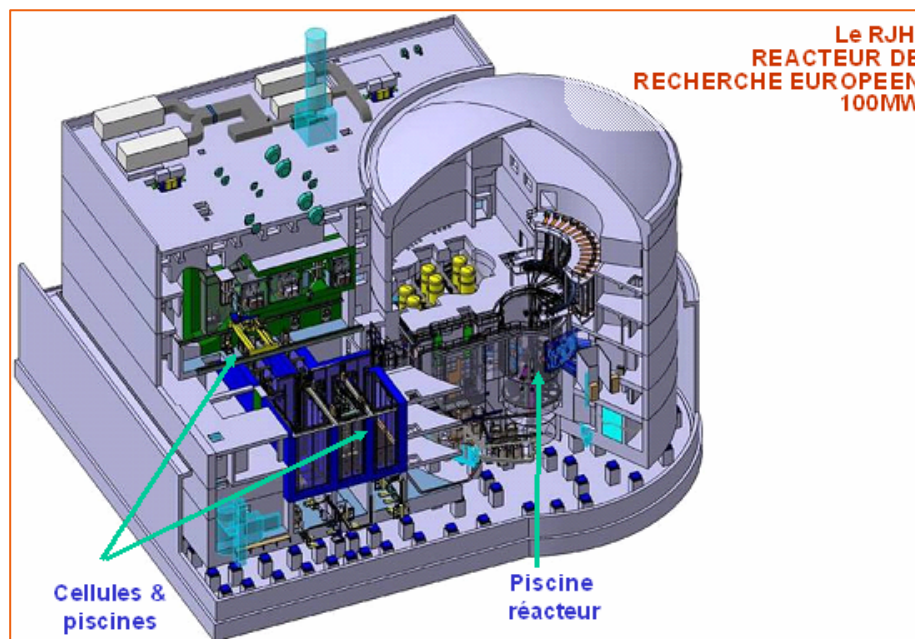
Au cœur d'une proposition de pôle de compétitivité régional pour les énergies non génératrices de gaz à effet de serre, ce projet permettra de dynamiser et de valoriser les collaborations scientifiques régionales sur le plan européen et international.

Le RJH : une installation unique pour un large spectre d'expériences

Puissant, polyvalent et modulable, le RJH est conçu pour réaliser simultanément une vingtaine d'expériences. Il disposera d'un « spectre neutronique à deux bosses », capable de produire des flux intenses de neutrons, tant dans le domaine thermique (applications pour les recherches sur les réacteurs classiques actuels) que dans le domaine rapide (applications pour les réacteurs à neutrons rapides de la quatrième génération). Les capacités d'expérimentation du RJH seront deux à trois fois plus importantes que celles des réacteurs de recherche existants, ce qui permettra de diminuer de manière significative la durée des expériences.

L'installation de recherche

Implanté sur une zone de 6 hectares sur le centre du CEA/Cadarache, le réacteur de recherche Jules Horowitz comprendra deux bâtiments principaux : le bâtiment réacteur et le bâtiment des annexes nucléaires.



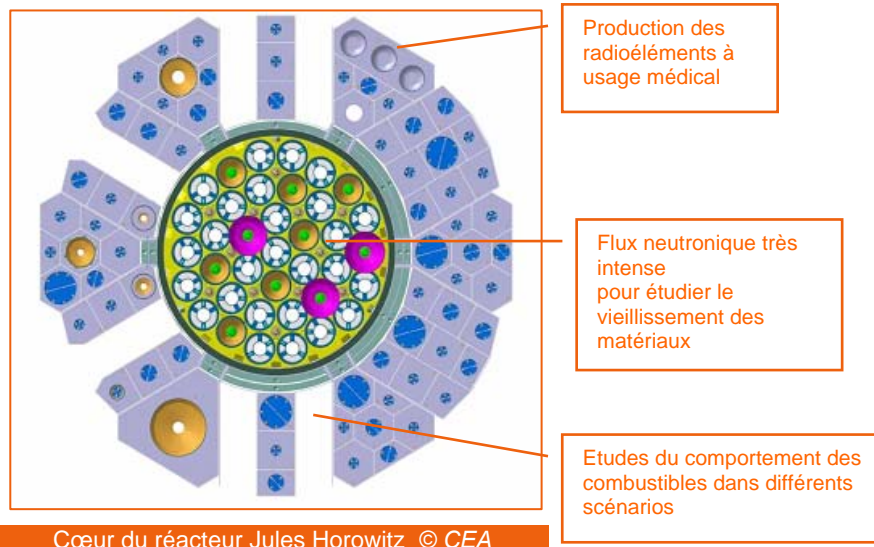
Le bâtiment réacteur

Il abritera le réacteur nucléaire, les équipements nécessaires à son exploitation et au suivi des expérimentations.

Le cœur du réacteur de recherche, d'une puissance de 100 MW thermiques, sera contenu dans un caisson, fermé et immergé dans une piscine. Il comprendra jusqu'à trente-sept assemblages combustible.

Une vingtaine d'emplacements sont prévus pour l'implantation de dispositifs

expérimentaux ainsi que pour les dispositifs de production de radioéléments pour la médecine nucléaire. Ces emplacements se situent au sein du cœur pour les expérimentations sur les échantillons de matériaux, ou en périphérie pour les expérimentations sur les combustibles. Certains dispositifs expérimentaux seront équipés, individuellement, de systèmes qui permettront de faire varier les conditions de l'expérimentation : possibilité de faire circuler de l'eau, du gaz ou un alliage de sodium et potassium, de faire varier la température, la pression.



Le refroidissement du cœur du réacteur de recherche sera assuré par trois circuits d'eau indépendants les uns des autres :

- le circuit primaire, fermé et situé à l'intérieur du bâtiment réacteur, chargé de refroidir le cœur ;
- le circuit secondaire, qui refroidira le circuit primaire grâce à des échangeurs de chaleur placés entre les deux circuits dans le bâtiment réacteur ;
- le circuit externe, qui refroidira le circuit secondaire à travers d'autres échangeurs de chaleur placés dans un autre bâtiment de l'installation (le bâtiment réfrigérant).

L'eau du circuit de refroidissement du cœur et l'eau du circuit externe ne seront ainsi jamais en contact.

Le bâtiment des annexes nucléaires

Le bâtiment des annexes nucléaires comportera les cellules pour la préparation, le conditionnement et l'examen des « échantillons » ainsi que trois piscines d'entreposage destinées respectivement aux combustibles irradiés du réacteur de recherche, aux dispositifs expérimentaux et à l'entreposage des composants du cœur et de l'outillage pour la manutention et le démantèlement.

Les programmes menés au sein du RJH

Cette installation de recherche sera dotée de moyens d'expérimentation permettant :

- d'analyser le comportement des matériaux et combustibles dans des expériences simulant des situations normales ainsi que des situations incidentelles et accidentelles ;
- de pouvoir utiliser des dispositifs d'essai capables de tester des échantillons dans des conditions de fonctionnement multiples (flux de neutrons, température, pression...), qu'il s'agisse de la filière des réacteurs à eau sous pression, à eau bouillante ou des réacteurs à neutrons rapides refroidis au gaz ou encore au sodium...

Les limites de fonctionnement des combustibles et des matériaux pourront également être étudiées.

Les études sur les matériaux

Dans une centrale nucléaire, les fissions nucléaires libèrent un grand nombre de neutrons dont certains vont déplacer les atomes constituant les matériaux de structure. Lorsqu'un neutron vient frapper le métal, un premier atome est éjecté de son emplacement et déplace à son tour les atomes les plus proches. Tout comme dans une partie de billard, un seul impact suffit à déplacer plusieurs milliers d'atomes, dont la plupart retrouve une position d'équilibre. Il s'agit donc d'étudier les conséquences de ces déplacements sur les propriétés mécaniques des matériaux. Pour prédire les effets sur le vieillissement des matériaux et des combustibles, il est nécessaire de les soumettre à un flux de neutrons plus intense que celui subi habituellement dans une centrale nucléaire.

D'une puissance thermique de 100 MW et d'une grande disponibilité de fonctionnement (plus de 250 jours par an), le RJH permettra de reproduire et d'accélérer ces phénomènes de vieillissement, en toute sûreté. Ses capacités d'irradiation et d'expérimentation permettront en effet d'obtenir des « déplacements par atomes » (dpa) deux fois plus importants que ceux obtenus avec les réacteurs de recherche existants (12 à 15 dpa contre 5 à 6 dpa). Les informations seront recueillies en temps réel grâce aux multiples capteurs disposés au sein des dispositifs expérimentaux contenant les échantillons de matériaux ou de combustibles. Ces études permettront de prévoir l'influence de l'irradiation sur les changements des propriétés mécaniques des matériaux. Elles constituent un enjeu majeur pour la sûreté, la compétitivité et la maîtrise de la durée de vie des centrales nucléaires.

Les études sur le combustible nucléaire

Le matériau constituant les assemblages combustible est soumis à une forte évolution due à l'irradiation : lors du fonctionnement du réacteur, certains atomes d'uranium disparaissent (ils se « fissionnent ») en produisant deux atomes de masse atomique plus faible appelés produits de fission.

Le RJH permettra d'acquérir de nouvelles données sur :

- la production des gaz de fission produits au sein du combustible : la mesure du relâchement des gaz de fission pendant l'irradiation est fondamentale pour déterminer la capacité de confinement de ces gaz à l'intérieur de la gaine qui contient le combustible et, plus généralement, pour suivre en temps réel les mécanismes d'évolution du combustible ;

- le comportement du combustible soumis à de fortes sollicitations au sein du cœur du réacteur. Les expériences porteront sur le comportement du combustible en situation incidentelle lorsqu'il y a déséquilibre entre la production et l'évacuation de la puissance fournie par le combustible pouvant conduire à une éventuelle rupture de la gaine contenant le combustible.
- Le développement de combustibles innovants capables de résister à de très fortes sollicitations (températures pouvant atteindre 1000°C, flux de neutrons très importants...). A titre d'exemple, les matériaux, particulièrement les céramiques du futur réacteur à neutrons rapides refroidi au gaz (RNR-G), n'ont jamais encore été utilisés dans un environnement nucléaire et nécessitent des expériences d'irradiations en réacteur de recherche pour déterminer l'évolution de leurs caractéristiques.

Le choix du site d'implantation

L'implantation de l'installation Jules Horowitz s'inscrit naturellement dans la vocation du centre de Cadarache, plate-forme de recherche énergétique majeure en Europe. Le centre de recherche dispose à la fois des infrastructures et des équipes de recherche ayant acquis un haut niveau d'expertise dans le domaine des combustibles et des réacteurs nucléaires pour accueillir ce projet.

La plupart des échantillons qui seront placés dans le cœur du réacteur Jules Horowitz seront préparés et analysés dans les laboratoires d'étude des combustibles du CEA/Cadarache, situés à proximité du site d'implantation du RJH.



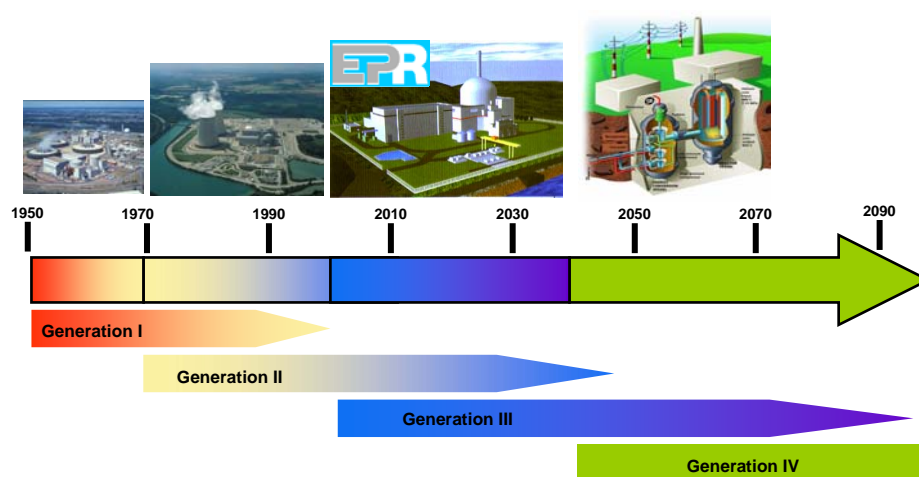
Le futur site du RJH à Cadarache avec le bâtiment (simulation) ©CEA/DEN

Annexe

Les différentes générations de réacteurs : de la génération I à la génération IV

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.

- La génération I comprend les premiers réacteurs prototypes et les premiers réacteurs électrogènes (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 (réacteurs à eau pressurisée), REB (réacteurs à eau bouillante), VVER (réacteurs à eau pressurisé russe) 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 est en cours de conception, 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 échelle, ces réacteurs présentaient des caractéristiques intéressantes (rendement thermodynamique, utilisation optimisée de l'uranium dans le cœur du réacteur, ...), mais aussi des limites 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, appelé cycle fermé, 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 Fermi¹¹ en 1963), en Russie (BOR 60 en 1968, BN 350 en 1972 et BN 600 en 1980¹²), en France (Rapsodie en 1967).

La deuxième génération de réacteurs, qui constitue l'essentiel du parc électronucléaire mondial en exploitation aujourd'hui, est née 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).

¹¹ 60 MWe

¹² BOR 60 : 12 Mwe.

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 disponibilité et la durée de vie des installations, et les taux de combustion des combustibles utilisés : UO₂ 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 1980¹³), 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.

Ces objectifs font partie des spécifications des systèmes de 4^{ème} 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 pressurised water reactor), projet d'Areva-NP, fait partie des réacteurs de troisième génération ; il donne lieu au CEA à des recherches principalement sur l'optimisation des combustibles pour le multi recyclage du plutonium et la réduction de la production de déchets radioactifs.

A la fin des années 1990, plusieurs pays ont entrepris des réflexions sur de nouveaux types de réacteurs. Le Forum International Génération 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

¹³ BN 350 = 350 Mwe. BN 600 = 600 Mwe.

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), porteurs 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.