



Patrice BERNARD (ECP 74)

Direction du développement et de l'innovation nucléaires
Commissariat à l'énergie atomique



Franck CARRÉ (ECP 74)

Direction du développement et de l'innovation nucléaires
Commissariat à l'énergie atomique

Le programme de coopération internationale Generation IV

Introduction

Lancé en 2000 par le Department of Energy américain (US/DOE), l'initiative Generation IV regroupe une dizaine de pays et vise le développement de systèmes nucléaires innovants (réacteurs et cycles du combustible de 4^{ème} génération) à l'échéance de 2030. Une centaine d'ingénieurs et chercheurs ont participé à la première phase qui a abouti à la publication, en octobre 2002, d'un plan de développement des technologies jugées les plus prometteuses (Technology Roadmap - <http://gif.inel.gov/roadmap/>). Six systèmes nucléaires ont été sélectionnés. Ils permettent des avancées notables en matière de compétitivité économique, de sûreté, d'économie des ressources en uranium et réduction de production de déchets radioactifs à vie longue. Cette "Roadmap" technologique est préparée à la demande du Congrès américain et doit servir de base au partage de l'effort de R&D entre les pays participants. La Commission Européenne deviendra membre de l'initiative dans le courant de 2003. D'autres pays ou instances internationales pourraient, à terme, rejoindre cet effort de recherche, et notamment, la Fédération de Russie.

La 4^{ème} génération de réacteurs nucléaires

De manière schématique, on estime que les réacteurs nucléaires peuvent se répartir en quatre générations successives :

- la génération I qui comprend les premiers réacteurs prototypes (Shippingport, Magnox, Fermi I...) qui ont été opérationnels avant 1970,
- la génération II qui correspond aux premiers réacteurs commerciaux des années 1970 à 1995 dans les différentes filières REP, REB, Candu, VVER et RBMK,
- la génération III qui correspond aux réacteurs avancés ABWR, Système 80+, AP600, EPR, AP1000 ou encore le GT-MHR. Les réacteurs de cette génération sont susceptibles d'être opérationnels avant 2010-2015,
- la génération IV est celle des systèmes du futur,

qu'il reste à concevoir et qui seront construits au plus tard en 2030.

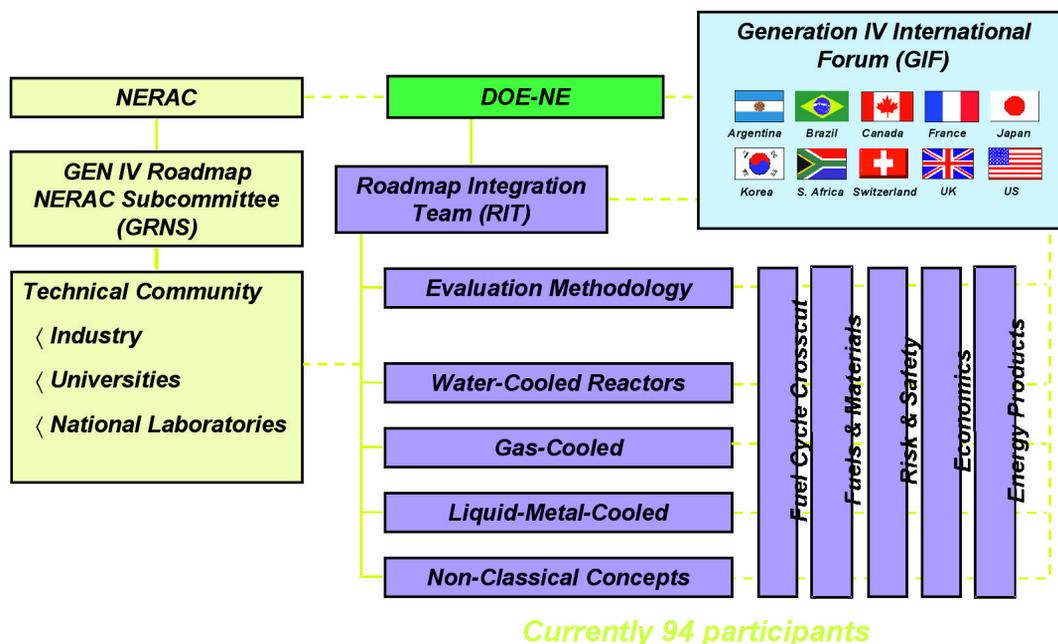
Le contexte américain et le Forum International Generation IV

Considérant qu'un risque de pénurie énergétique existait à court terme, le Department of Energy (DOE) s'est engagé dans un effort de relance des moyens de production en électricité aux Etats-Unis. Dans le domaine de l'énergie nucléaire cela s'est traduit par deux actions complémentaires :

- La première purement américaine est destinée à faciliter la construction de nouveaux réacteurs aux Etats-Unis, à court terme (avant 2010) ; c'est le programme Nuclear Power 2010 (NP 2010). Un groupe ad-hoc, le Near Term Deployment Group (NTDG) a été chargé d'évaluer les réacteurs susceptibles d'être construits dans ce cadre, d'identifier les problèmes éventuels tant au niveau technique que réglementaire ou administratif et de proposer des actions facilitant le déploiement à court terme de ces réacteurs nucléaires de troisième génération.
- La seconde est le Forum International Generation IV (Gen IV). Son principe fondateur est la reconnaissance par les dix pays qui en sont membres¹ des atouts de l'énergie nucléaire pour satisfaire les besoins croissants en énergie dans le monde, dans une perspective de développement durable et de prévention des risques de changement climatique. Ce principe est inscrit dans la charte du Forum et se concrétise par une volonté commune de créer un cadre de R&D international pour définir, développer et permettre le déploiement de systèmes nucléaires de 4^{ème} génération au plus tard en 2030.

Les activités du Forum se réalisent sous la responsabilité du Generation IV International Forum (GIF). Cette entité rassemble aujourd'hui des représentants de haut niveau des 10 pays intéressés. Au travers de son Policy Group notamment, elle supervise l'ensemble des travaux Gen IV et les oriente suivant sa vision politique.

Overall Roadmap Organization



Les différentes étapes du Forum International Generation IV

La première étape a été de définir les objectifs d'un système de 4^{ème} génération. Dans ce contexte, le terme système indique non seulement le réacteur, mais également le cycle du combustible qui lui est associé.

Quatre objectifs principaux ("goal areas") ont ainsi été définis pour caractériser l'énergie dont on souhaite disposer, et les moyens pour la produire. Ils doivent être à la fois :

- **durables**, cet objectif signifie à la fois qu'il faut être économe des ressources naturelles, mais également que le cycle du combustible doit être respectueux de l'environnement (minimisation des déchets en terme de masse, radioactivité, puissance résiduelle, etc...),
- **économiques**, l'aspect économique concerne à la fois le coût de production par kWh qui doit être faible et attractif par rapport aux autres sources d'énergie, mais aussi le coût d'investissement par kWe installé, qui est une des faiblesses des réacteurs de forte puissance actuels,
- **sûrs et fiables**, sous ces deux aspects, il est impensable que les réacteurs du futur puissent être moins performants que les réacteurs actuels. Un effort particulier est demandé pour éliminer autant que possible les besoins d'évacuation de personnes exté-

rieures au site, quelle que soit 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.**

Les systèmes les plus prometteurs vis-à-vis des objectifs décrits ci-dessus ont été sélectionnés. Les besoins de R&D nécessaires pour les amener au niveau de développement nécessaire à leur déploiement industriel ont été identifiés.

Cette étape commencée en octobre 2000 s'est achevée en octobre 2002 avec la publication du Technology Roadmap. Ce document définit les travaux de R&D à mener pour les prochaines décennies. Deux phases principales y sont identifiées ; la première dite de " faisabilité " s'efforcera de lever les verrous technologiques à caractère réhibitoire, la deuxième, qualifiée de "phase de performances" visera l'optimisation des projets qui auront franchi la première phase. Les organismes de R&D y joueront évidemment le rôle essentiel mais il est prévu une participation importante des universités et des industriels. Pour les systèmes qui auront franchi ces deux premières étapes, la suivante, celle du déploiement, sera prise en charge par les industriels.

La Roadmap étant disponible, les travaux en cours du Forum International Generation IV concernent l'organisation, la mise en place et le suivi de cette R&D qui sera répartie entre différents pays. Pour cette étape, il

reste à définir les mécanismes de répartition des tâches, de financement et de gestion de la propriété industrielle. Il reste aussi à examiner comment associer des pays qui pourraient rejoindre le Forum à ce stade des travaux.

La sélection Generation IV

Les six concepts retenus dans la sélection finale Gen IV sont les suivants :

- **GFR (Gas-Cooled Fast Reactor System)** : réacteur rapide refroidi au gaz (hélium),
- **LFR (Lead-Cooled Fast Reactor System)** : réacteur rapide refroidi au plomb ou au plomb-bismuth,
- **MSR (Molten Salt Reactor System)** : réacteur aux sels fondus,
- **SFR (Sodium-Cooled Fast Reactor System)** : réacteur rapide refroidi au sodium,
- **SCWR (Supercritical Water-Cooled Reactor System)** : réacteur refroidi à l'eau supercritique,
- **VHTR (Very High Temperature Reactor System)** : réacteur à très haute température (1000°C / 1200°C) refroidi à l'hélium.

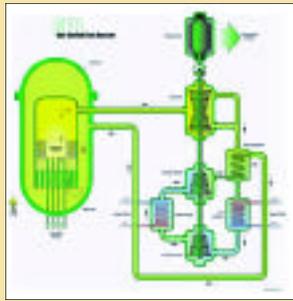
Des six concepts sélectionnés, trois sont des concepts à spectre rapide. Le SCWR a été retenu dans ses deux versions, à spectre thermique ou à spectre rapide. Deux concepts (GFR et VHTR) de la "gamme gaz" figurent dans la sélection, le deuxième fortement orienté vers la production d'hydrogène. Le SCWR est le seul représentant

ANNEXE

LA CARTE D'IDENTITÉ DES SYSTEMES SELECTIONNES

GFR : "du gaz rapide"

Le GFR est un concept à spectre rapide permettant le recyclage homogène des actinides tout en conservant un gain de régénération supérieur à 1. Le concept de référence est un réacteur de 600 MWth, refroidi à l'hélium en cycle direct avec un rendement élevé (48%). L'évacuation de la puissance résiduelle en cas de dépressurisation met en oeuvre la convection naturelle. La puissance volumique dans le cœur est déterminée de façon à limiter la température du combustible à 1600°C en transitoire. Le combustible, innovant, est conçu pour retenir les produits de fission (pour une température inférieure à la limite de 1600°C) et éviter leur relâchement en situations accidentelles. Le recyclage du combustible irradié est envisagé sur le site même du réacteur soit par un procédé pyrochimique, soit par un procédé hydro-métallurgique. Le GFR est le concept le plus performant en termes d'utilisation des ressources naturelles et de minimisation des déchets à vie longue. Il se situe dans la ligne technologique gaz, en complément des concepts à spectre thermique GT-MHR², PBMR³ et VHTR.



SFR : "sodium, le come back ?"

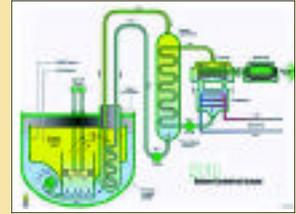
Ce concept de réacteur à spectre rapide est associé à un cycle fermé permettant le recyclage de l'ensemble des actinides et la régénération du Plutonium.

Deux options principales sont envisagées :

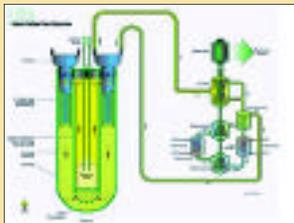
- la première, associée à un retraitement de combustible métallique (Zr), conduit à un réacteur de puissance unitaire intermédiaire de 150-500 MWe (concept de type PRISM ou IFR).
- la deuxième, caractérisée par un retraitement de combustible mixte d'oxyde (MOX), correspond à un réacteur de puissance unitaire élevée, entre 500 et 1200 MWe (réacteur de type EFR associé au retraitement PUREX).

Le SFR présente de très bonnes propriétés d'utilisation des ressources naturelles et de gestion des actinides. Il a été évalué comme ayant des caractéristiques de sûreté relativement bonnes.

Le concept à combustible oxyde pourrait être prêt pour un déploiement industriel dès 2015.



LFR : "un concept en plomb"



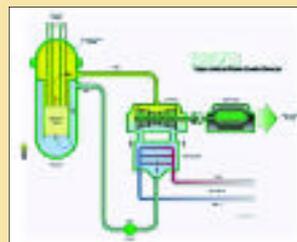
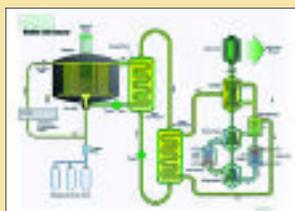
Ce concept de réacteur à neutrons rapides est associé à un cycle fermé du combustible permettant une utilisation optimale de l'uranium.

Plusieurs concepts de référence ont été conservés dans la sélection. Les puissances unitaires vont de 50-100 MWe, pour les concepts dits "battery", jusqu'à 1200 MWe, incluant les concepts modulaires de 300-400 MWe. Les concepts "battery" ont une gestion du combustible à longue durée (10 à 30 ans). Les combustibles peuvent être soit métalliques, soit de type nitride, et permettent le recyclage de l'ensemble des actinides.

Plusieurs concepts de référence ont été conservés dans la sélection. Les puissances unitaires vont de 50-100 MWe, pour les concepts dits "battery", jusqu'à 1200 MWe, incluant les concepts modulaires de 300-400 MWe. Les concepts "battery" ont une gestion du combustible à longue durée (10 à 30 ans). Les combustibles peuvent être soit métalliques, soit de type nitride, et permettent le recyclage de l'ensemble des actinides.

MSR : "un système 2 en 1"

Le MSR est un concept à spectre épithermique dont la grande originalité est la mise en oeuvre d'une solution de sels fondus servant à la fois de combustible (liquide) et de caloporteur. Le MSR intègre donc dans sa conception un recyclage en ligne du combustible et offre ainsi l'opportunité de regrouper sur le même site un réacteur producteur d'électricité et son usine de retraitement. Le sel retenu pour le concept de référence (puissance unitaire de 1000 MWe) est un fluorure de sodium, zirconium et d'actinides. La modulation de spectre est obtenue dans le cœur par la présence de blocs de graphite traversés par le sel combustible. Le MSR comprend un circuit intermédiaire en sels fluorure et un circuit tertiaire à eau ou hélium pour la production d'électricité. Le concept a été évalué comme ayant des caractéristiques de sûreté et de non-prolifération relativement bonnes.



SCWR : "de l'eau, mais supercritique"

Deux types de cycles de combustible sont envisagés pour le SCWR, ce qui correspond à deux versions différentes du concept : un réacteur à spectre thermique associé à un cycle du combustible

ouvert et un concept à spectre rapide associé à un cycle fermé pour un recyclage de l'ensemble des actinides. Les deux options ont un point de fonctionnement en eau supercritique identique : pression de 25 MPa et température de sortie du cœur de 550°C permettant un rendement thermodynamique de 44%. La puissance unitaire du concept de référence est de 1700 MWe. Le SCWR a été évalué comme ayant un potentiel élevé de compétitivité économique.

VHTR : "faire de l'hydrogène avec de l'hélium ?"

Le VHTR est un concept à caloporteur gaz associé à un cœur à spectre thermique et à un cycle du combustible ouvert. La particularité du VHTR est son fonctionnement à un niveau température lui permettant de répondre aux besoins de procédés nécessitant des températures très élevées (au-delà de 1000°C), notamment la production d'hydrogène par décomposition thermo-chimique par le procédé Iode/soufre. Le VHTR leur est spécifiquement dédié.

Le concept de référence a une puissance unitaire de 600 MWth et utilise l'hélium comme caloporteur. Le cœur est constitué de blocs prismatiques ou de boulets.



de la filière à eau pour la 4^{ème} génération. Parmi les “non classiques”, seul le MSR reste en lice.

L'annexe résume les caractéristiques essentielles des six systèmes.

Les motivations françaises pour participer au Forum Generation IV

Les besoins et les problèmes d'accès à l'énergie sont mondiaux ; la création d'AREVA premier groupe mondial dans son domaine, l'ouverture d'EDF à l'international font que les choix stratégiques et en particulier ceux des axes de R&D ne peuvent plus se faire dans le seul cadre français mais doivent se nourrir des différentes sensibilités nationales auxquelles Gen IV donne l'occasion de s'exprimer.

Par ailleurs, la France a visé trois objectifs à travers sa participation active au Forum :

- promouvoir des objectifs ambitieux en matière d'aptitude au développement durable (économie des ressources, minimisation des déchets),
- défendre les axes de recherche qu'elle s'est choisie sur les systèmes nucléaires du futur (une gamme évolutive de systèmes à caloporteur gaz, et un maintien au meilleur niveau de son expertise sur les réacteurs à neutrons rapides à sodium),
- et rechercher des partenaires intéressés par la même vision des systèmes du futur, à travers sa participation aux groupes de travail du Forum.

Enfin, les échanges très libres qui ont cours et les analyses techniques approfondies permettent de rapprocher les points de vue. On peut ainsi noter que, depuis le début du Forum, la position des participants américains sur le retraitement a fortement évolué devant l'objectif de faire du nucléaire une énergie durable : il n'y a plus de tabou sur le traitement des combustibles usés et le recyclage est clairement perçu comme une technologie indispensable pour brûler tout l'uranium et les déchets radioactifs à vie longue.

Les programmes NP 2010 et Generation IV contribuent fortement à relancer l'option nucléaire. Le vote favorable du sénat américain pour le déploiement du site de stockage de Yucca Mountain est venu confirmer la volonté de responsables politiques pour s'engager dans cette voie.

Si le programme NP 2010 est clairement le domaine des industriels, le Forum Generation IV en constitue le contrepoint pour les aspects R&D. Dans ce domaine,

beaucoup est à faire et c'est une opportunité unique que de pouvoir partager des efforts de R&D importants pour développer des projets répondant aux besoins du marché international à l'horizon 2030. C'est par exemple le cas du système à caloporteur gaz avec un spectre rapide et cycle intégré - retenu parmi les concepts Generation IV - pour lequel boucles hélium, réacteur d'étude et de développement technologique, données de base sur les matériaux dans des gammes de température de 800 à 1100 °C sous irradiation etc... pourront être partagés entre les partenaires se reconnaissant un intérêt pour ce concept. Bien entendu, plus l'on se rapprochera de produits industriels et moins les résultats seront ouverts : on retrouvera alors des accords de collaboration directe entre industriels et organismes de R&D sur les points stratégiques et sensibles.

Réflexions sur la sélection

→ Dans le choix retenu, c'est l'aspect nucléaire durable qui semble avoir été le plus discriminant, l'éventail des évaluations sur les aspects économie et sûreté ayant été beaucoup plus resserré.

→ Les concepts les plus innovants - traités dans le groupe de travail “ technologies non classiques ” - se sont trouvés pénalisés par les incertitudes importantes sur leur définition et sur la possibilité de lever les difficultés technologiques pour leur réalisation. Dans cette classe de systèmes nucléaires, le choix final s'est porté sur le réacteur à sels fondus, notamment pour ses caractéristiques intéressantes vis à vis de la gestion des actinides.

→ La notion de regroupement en familles de réacteurs - homogènes du point de vue des performances et des besoins en R&D - s'est avérée importante car elle a permis de prendre en compte les troncs communs de R&D et de structurer les recommandations autour de grands axes fédérateurs. A titre d'exemple, la famille évolutive de réacteurs à caloporteur gaz (RCG), comporte un tronc commun de recherches important sur les matériaux à hautes températures, les circuits hélium, la conversion par turbine à gaz... qui concerne différentes variantes spécialisées pour des niches de marché différentes : réacteurs à très hautes températures pour la production massive d'hydrogène, réacteurs spécialisés pour brûler les actinides, et version à spectre neutronique rapide et recyclage intégral pour un développement énergétique durable.

→ Le bon positionnement des réacteurs à gaz et donc la reconnaissance de l'intérêt de ce concept par le Forum International conforte la décision prise fin 2000 par le CEA de centrer ses recherches sur les systèmes nucléaires du futur sur une gamme évolutive de systèmes fondés sur cette technologie : d'abord, le développement d'un projet de réacteur modulaire en partenariat avec Framatome-ANP (2010/15), puis celui de versions spécialisées de ce projet pour la production d'hydrogène à très haute température (> 950 °C) ou la transmutation des actinides (2020), et à plus long terme (2030) le développement de systèmes à neutrons rapides et recyclage intégral pour un développement énergétique durable.

Les autres programmes internationaux

Parmi les différentes initiatives destinées à promouvoir les systèmes du futur, le Forum International Generation IV est la principale à créer une véritable dynamique.

L'initiative INPRO, qui se déroule en parallèle dans le cadre de l'AIEA, avec une participation active de la Russie, centre son effort sur l'analyse des spécifications socio-économiques (requirements) pour les systèmes nucléaires des cinquante prochaines années. En ce sens, elle se veut complémentaire du Forum Generation IV qui peut être vu comme une offre de technologies susceptibles de satisfaire ces spécifications.

En complément des deux initiatives précédentes à l'échelle mondiale, le réseau d'experts Michelangelo (“MICANET”), anime au sein du 5^{ème} PCRD une réflexion sur la vision des systèmes nucléaires du futur en Europe et l'identification d'actions à inscrire sur ce thème dans le 6^{ème} programme cadre de R&D. Cette animation est d'autant plus importante qu'elle contribue à maintenir une expertise de haut niveau sur les questions nucléaires malgré la diversité des sensibilités sur ce sujet des pays de l'Union européenne, et qu'elle prépare la possibilité de coopérations entre réseaux européens et acteurs du Forum Generation IV sur des développements technologiques d'intérêt commun.

¹ L'Afrique du Sud, l'Argentine, le Brésil, le Canada, la Corée du Sud, les Etats-Unis, la France, le Japon, le Royaume-Uni et la Suisse

² GT-MHR : Gas-Turbine Modular High Temperature Reactor

³ PBMR : Pebble Bed Modular Reactor