

PAR PHILIPPE PRADEL (75)



directeur de l'énergie nucléaire au CEA

Préparer le **futur** dans la **durée**

Dans un contexte de fort développement, il convient plus que jamais de « penser » le nucléaire du futur en termes durables : avec une optimisation de la ressource « uranium », avec une gestion responsable des déchets et avec une sûreté toujours garantie. Ces impératifs sont au cœur de la stratégie française qui se traduit par un programme de recherche et développement à la fois global et cohérent.

REPÈRES

Le parc nucléaire existant (systèmes dits de 2^e génération, construits à la suite du premier choc pétrolier) concourt à la production de plus de 15 % de l'électricité mondiale, pourcentage qui devra s'accroître encore dans le futur.

Les grandes étapes du xx^e siècle sont donc pour le nucléaire de fission :

- une recherche d'optimisation du fonctionnement des réacteurs existants, à travers des combustibles plus performants, une plus grande disponibilité et une extension de la durée de vie des unités,
- un large déploiement des systèmes de 3^e génération (type EPR) de par le monde,
- une introduction des systèmes de 4^e génération, à partir de 2040 lorsque les technologies correspondantes seront à maturité.

Quant à la voie de la fusion contrôlée par confinement magnétique, l'échéance majeure est la mise en exploitation du réacteur ITER en 2017 à Cadarache (Bouches-du-Rhône). Ce réacteur ITER sera exploité pendant vingt ans, et un démonstrateur industriel devrait ensuite lui succéder.

Une des caractéristiques majeures de la recherche et du développement dans le domaine nucléaire est son internationalisation. C'est pourquoi la France participe activement au Forum « Génération IV » depuis sa création en 2000. Ce forum rassemble désormais plus d'une douzaine de pays (dont les États-Unis, le

Japon, la Chine, la Russie) pour une réflexion partagée et une mise en commun de moyens pour le développement des systèmes nucléaires du futur.

En 2002, ce Forum a sélectionné six concepts regroupant un type de réacteur et un cycle du combustible associé sur la base de critères de développement durable. C'est ainsi que la conception des réacteurs nucléaires de quatrième génération doit répondre à plusieurs objectifs :

- réduire le volume et la radiotoxicité des déchets produits ;
- mieux utiliser la ressource uranium (les réacteurs de 4^e génération pourront produire cinquante fois plus d'électricité à partir de la même quantité d'uranium, résolvant par là même le problème lié à la ressource et également celui de la sécurité d'approvisionnement) ;
- améliorer encore la sûreté et la sécurité des réacteurs ;
- réduire les risques de prolifération.

Six systèmes répondant à ces critères ont été sélectionnés, qui pourront également faire face aux nouveaux besoins issus de l'industrie et des transports (production d'hydrogène pour biocarburants de synthèse et pour piles à combustible, désalinisation).

Réacteurs pilotes, outils partagés et partenariats

Aujourd'hui la question des matières premières et de leur cycle est indissociable de celle des réacteurs. Le nucléaire du futur s'appréhende alors en termes de systèmes englobant ces deux aspects. Les recherches destinées à l'émergence des réacteurs de 4^e génération s'accompagnent en France de recherches pour faciliter cette même transition vers le futur au niveau du cycle du combustible, afin de passer progressivement de la situation actuelle, associée au fonctionnement de réacteurs à eau légère, à un recyclage plus global pouvant

inclure également les actinides mineurs, contributeurs principaux à la toxicité des déchets ultimes.

Concernant plus spécifiquement les réacteurs de 4^e génération, la France est aujourd'hui face au choix de la technologie à sélectionner de manière à pouvoir se doter d'un prototype, dont la construction à l'horizon 2020, préfigurant un déploiement industriel, a été annoncée par le président Chirac en 2005. En la matière, les réflexions françaises, qui visent à maintenir ouvertes différentes options technologiques, s'engagent aujourd'hui sur deux des six filières retenues par le Forum Génération IV. Toutes deux sont sur la base d'un spectre de neutrons rapides et d'un cycle fermé : il s'agit d'un prototype de réacteur rapide au sodium et d'un réacteur rapide refroidi au gaz, le prototype au sodium apparaissant aujourd'hui comme la solution de référence.

• **La solution de référence avec Astrid**

Cette voie apparaît raisonnablement comme la plus compatible avec l'échéance de 2040. L'objectif de préparer le déploiement industriel d'un type de réacteur rapide dans le parc français à l'horizon 2040 conduit à donner une priorité forte aux recherches d'innovations sur le réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium (RNR sodium) dans l'intention de sélectionner en 2012 les options les plus prometteuses pour la filière que le prototype français contribuera à valider dès 2020.

Ces réflexions définissent un calendrier précis pour l'objectif fixé d'une construction de ce prototype en 2020 : une période de six années, ouverte en 2006, doit permettre de rassembler les éléments techniques nécessaires à préparer cette réalisation en proposant les spécifications correspondantes, avec une première phase jusqu'en 2009 largement consacrée à l'examen des innovations potentielles, qui sera suivie par trois années destinées à la consolidation de ces études. Les réflexions couvrent également le projet de construction d'un pilote de fabrication de combustibles pour ces réacteurs rapides du futur.

• **Une alternative fortement innovante avec Allegro**

En ce qui concerne la filière RNR gaz, alternative à la filière RNR sodium, les résultats acquis et les relations nouées dans le cadre européen devraient permettre l'engagement d'un

Astrid préfigure le futur

De nombreux progrès sont attendus de ce prototype. Ils visent :

- une sûreté performante prenant en compte les spécificités des neutrons rapides et du sodium, les études devant 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 maximale, 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 multirecyclage du plutonium ;
- la possibilité d'incinérer les actinides mineurs.

projet de réacteur démonstrateur à l'échelle européenne, projet auquel la France participerait. 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 ;
- 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.

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 1 000 °C...).

• **Des outils expérimentaux partagés : l'exemple du réacteur Jules Horowitz**

La collaboration internationale est essentielle à la fois pour partager les efforts de recherche et accélérer les développements technologiques en optimisant l'utilisation des équipements, des ressources humaines et financières, et pour participer à l'élaboration de standards internationaux en matière de sûreté et de non-prolifération qui s'imposeront aux réacteurs et aux procédés de recyclage.

De manière concrète, l'ensemble de ces travaux de R & D nécessitera bien sûr la réalisation de nombreuses installations expérimentales. La France, à travers le CEA, se dotera en conséquence à l'horizon 2014 d'un réacteur

La question des matières premières et de leur cycle est indissociable de celle des réacteurs

expérimental pour les irradiations par exemple. Ce nouveau réacteur, le Réacteur Jules Horowitz ou RJH, qui associera étroitement les industriels et s'ouvre d'ores et déjà largement aux participations internationales (Belgique, Finlande, Suède, République tchèque, Espagne, Japon, Inde...), dont la construction a été lancée en mars 2007, permettra la mise au point et l'étude de nouveaux combustibles et matériaux, à la fois dans la perspective d'un soutien aux réacteurs existants mais aussi en préparation du développement des machines de 4^e génération.

De grands partenaires comme États-Unis et Japon

Après une première phase de partage de la R & D amont pour l'ensemble des pays membres du Forum GEN IV, l'internationalisation de la recherche sur les systèmes nucléaires du futur est entrée dans une deuxième phase, celle de la définition des prototypes. Cette phase, plus proche de l'étape industrielle, se caractérise par l'établissement de partenariats plus étroits, entre pays porteurs des différentes technologies. On peut citer l'exemple récent d'un *Memorandum of Understanding* tripartite signé entre le CEA, le DOE américain et la Japanese Atomic Energy Authority (JAEA) en vue de l'harmonisation des prototypes de réacteurs rapides au sodium que le Japon, les États-Unis et la France entendent chacun développer dans les années à venir.

La collaboration internationale est essentielle

Le cycle du combustible, clé pour une renaissance durable du nucléaire

La vision de plus en plus largement partagée du rôle de l'énergie nucléaire au XXI^e siècle aura nécessairement pour conséquence un accroissement du parc électronucléaire mondial, et cette renaissance du nucléaire doit s'accompagner pour être durable d'une gestion responsable du cycle, afin d'éviter l'accumulation des combustibles usés de par le monde.

Le domaine du traitement-recyclage fait aujourd'hui l'objet de nombreux développements attestant là encore d'un renouveau du nucléaire au niveau mondial, avec, comme dans le domaine des réacteurs, un renforcement de la collaboration internationale, voire de la compétition. Il faut souligner notamment la mise en service de l'usine de Rokkasho-

Mura, fruit du transfert de technologie de l'usine française de La Hague à Japan Nuclear Fuel Limited (JNFL). La Chine étudie avec la France la fourniture d'une usine de traitement recyclage dans le cadre d'un accord intergouvernemental. L'Inde développe les réacteurs à neutrons rapides et entend se doter d'une industrie civile du traitement recyclage. Aux États-Unis, l'initiative GNEP (Global Nuclear Energy Partnership), destinée à faire partager les bénéfices d'un développement sûr de l'énergie nucléaire tout en réduisant le risque de prolifération, marque un revirement de la politique nucléaire de ce pays, avec le choix du cycle fermé et l'offre de traitement-recyclage associée.

La France a fait, dès le lancement de son programme électronucléaire, le choix du cycle fermé, recyclant l'uranium et le plutonium présents dans les combustibles usés et permettant de faire ainsi face efficacement à la problématique de la gestion des déchets de l'industrie nucléaire. Elle dispose en conséquence aujourd'hui d'une industrie du traitement-recyclage mature, bénéficiant d'un retour d'expérience sans égal, de vingt-cinq ans d'exploitation industrielle dans des installations de pointe, ce qui en fait le leader mondial en la matière. Ces technologies démontrent aujourd'hui leur capacité à s'adapter aux différents systèmes et permettront de mettre en œuvre pour les systèmes futurs des procédés présentant une résistance accrue vis-à-vis des risques de prolifération.

Le procédé COEXTM, développé au CEA en partenariat avec Areva NC, est une évolution du procédé PUREX, destiné à produire un mélange uranium-plutonium sans production de plutonium séparé. À partir des mêmes unités de traitement, un recyclage intégral des actinides est à l'étude pour la 4^e génération avec une extraction groupée des actinides (majeurs et mineurs) grâce au procédé GANEX.

Coopération européenne sur la fission nucléaire durable

La France s'est fortement impliquée dans la création de la SNETP, plate-forme technologique européenne, et s'en est vu confier, au travers du CEA, la présidence pour les deux prochaines années. En effet, après la publication d'un Livre blanc sur l'énergie en 2007, la Commission européenne a décidé de se doter d'une structure communautaire dédiée, une « plate-forme



© CEA

Vue de la chaîne blindée de l'installation Atalante (CEA Marcoule) dans laquelle sont réalisées les expériences de séparation des actinides.

Deux dates-clés en France : 2012 et 2020

En France, la loi du 28 juin 2006 traduit la cohérence entre R & D sur les réacteurs du futur et sur le cycle. Cette approche progressive est un programme de recherches et de travaux, assorti d'un calendrier, pour mettre en œuvre ce plan. En parallèle des domaines confiés à l'ANDRA (entreposage et stockage en couches géologiques profondes), les études sur la séparation et la transmutation sont menées au CEA en liaison avec la conception et le développement des réacteurs du futur : le calendrier précise deux dates-clés avec en 2012 l'évaluation des perspectives industrielles pour la transmutation des actinides mineurs, et en 2020 la mise en exploitation d'un prototype de réacteurs à neutrons rapides.

technologique sur la fission nucléaire durable», destinée à développer la concertation et les synergies entre les acteurs européens sur le sujet, et ce de manière à maintenir la compétitivité de l'Union dans le domaine du nucléaire de fission. Cette plate-forme, mise en place en septembre 2007, réunit plus de 60 partenaires (organismes de R & D, industriels, représentants de réseaux européens et de la Commission elle-même) et a pour première mission l'élaboration, en 2008, d'un agenda de recherche stratégique (SRA) fixant des objectifs partagés et une feuille de route établissant les jalons importants à atteindre en la matière avec un calendrier associé et l'identification d'infrastructures expérimentales à mettre en œuvre dans cette perspective. Pour la recherche et l'industrie nucléaire fran-

çaise, la voie du futur est clairement tracée. Le nouveau développement de l'électronucléaire devient ainsi une source de grands défis pour une nouvelle génération d'ingénieurs. Et la France, qui s'est engagée de longue date en ce domaine, possède des atouts scientifiques et industriels, qui la mettent naturellement en très bonne place mondiale pour faire face à ces nouveaux défis.

Devant ce regain d'intérêt, la synergie entre R & D et industriels, atout majeur pour la pérennisation du *leadership* français dans l'électro-nucléaire de demain, doit rester forte. Elle doit également inspirer les actions à poursuivre au niveau de l'Europe. Premier électricien nucléaire dans le monde (avec 31 % d'électricité d'origine nucléaire), l'Europe doit jouer dans ce renouveau mondial un rôle d'acteur majeur sur le plan énergétique. C'est un de ses atouts importants de développement économique. ■

L'Agence France nucléaire international

Cette agence a été créée au sein du CEA par décret du 9 mai 2008 pour répondre à la demande croissante de nombreux pays, notamment émergents, et accompagner ces derniers dans le développement de l'énergie nucléaire civile, dans le respect des normes de sécurité les plus strictes. L'agence intégrée au CEA, sous contrôle d'un comité interministériel, est constituée d'une équipe permanente restreinte, chargée d'organiser et de coordonner l'action de différentes équipes projets. Ces dernières seront mises en place pour chaque pays concerné et feront appel aux expertises présentes chez les différents opérateurs français.

La synergie entre R & D et industriels doit rester forte