

La R&D sur les filières nucléaires actuelles et futures : enjeux et perspectives

ENJEUX D'AVENIR
DE L'INDUSTRIE NUCLÉAIRE

Indépendance énergétique et défense, impératifs économiques et exigences renforcées en matière de sûreté, adaptation aux critères du développement durable enfin : l'évolution technologique des filières nucléaires a été dictée par le contexte politique, économique et sociétal. Aujourd'hui, la R&D nucléaire répond à deux types d'objectifs : optimiser le fonctionnement et la durée de vie des centrales de 2^e génération et mener les études nécessaires au développement des réacteurs à eau de 3^e génération pour les vingt à trente prochaines années ; pour le plus long terme, élaborer les systèmes nucléaires de 4^e génération qui répondront mieux aux exigences d'un développement durable à l'horizon 2040. L'un des principaux enjeux : garder à notre industrie nucléaire sa place de *leader* sur la scène internationale, ce qui appelle à optimiser la coopération entre partenaires français de la recherche et de l'industrie comme à démultiplier l'effort national par la coopération internationale.

Par **Philippe PRADEL**, Directeur de l'Énergie nucléaire, Commissariat à l'énergie atomique

L'évolution des filières nucléaires depuis la fin des années 1940 a été déterminée par des impératifs politiques – indépendance énergétique, défense. Elle a été aussi marquée par l'évolution des attentes de la société, intégrant d'abord des impératifs d'économie (dans le passage de la filière graphite-gaz à celle des réacteurs à eau légère) puis, après Tchernobyl en 1986, des exigences renforcées en matière de sûreté. Enfin, on note aujourd'hui dans les objectifs de la R&D sur la « 4^e génération » une meilleure adaptation aux critères du développement durable, notamment une utilisation optimisée des ressources – produire 50 fois

plus d'électricité avec la même quantité d'uranium – et une réduction de la quantité et de la toxicité des déchets ultimes.

Parallèlement au nucléaire de fission sont menées des recherches sur la fusion thermonucléaire, notamment avec le projet international ITER qui sera accueilli sur le centre de Cadarache. Ces recherches sur la fusion sont à un stade de développement encore très éloigné du prototype industriel et de la production d'électricité et peuvent être considérées davantage comme de la recherche fondamentale que comme de la recherche et développement sur une filière.

A l'heure actuelle, sur le plan industriel, coexistent trois «générations» de réacteurs de fission (voir la figure 1 présentant le calendrier des générations nucléaires). Les réacteurs de première génération sont pour l'essentiel arrêtés, et leur démantèlement tel que pratiqué en France est une exigence de la renaissance du nucléaire. Les réacteurs à eau composent la 2^e génération – réacteurs à eau pressurisée, réacteurs à eau bouillante, réacteurs à eau lourde et une dizaine de «RBMK» de conception soviétique encore en activité en Russie. Quelques réacteurs de génération 3 sont actuellement en construction (EPR ou *European Pressurized Reactor*, en construction en Finlande sur le site d'Olkiluoto et en France à Flamanville, avec une technologie dite «évolutionnaire» par rapport à la 2^e génération, intégrant notamment des dispositifs de sûreté encore renforcés). Ils formeront, à terme, la plus grande part du parc mondial. S'y ajoutent, enfin, quelques réacteurs rapides prototypes refroidis au sodium : Phenix en France, BOR 60 et BN 600 en Russie, Monju et Joyo au Japon.

OPTIMISER LE FONCTIONNEMENT DES FILIÈRES EXISTANTES ET DÉVELOPPER LE NUCLÉAIRE DU FUTUR

La R&D nucléaire aujourd'hui répond à deux types d'objectifs.

Il s'agit, d'une part, à court et moyen termes, d'optimiser le fonctionnement et la durée de vie des centrales de 2^e génération composant l'essentiel du parc existant, et de mener les études nécessaires au développement des réacteurs à eau de 3^e génération qui vont se construire dans les vingt à trente prochaines années.

Il s'agit, d'autre part, pour le plus long terme, d'élaborer les systèmes nucléaires de 4^e génération dont l'horizon d'industrialisation se situe autour de 2040 et qui répondront mieux aux exigences d'un développement durable. En effet, la satisfaction du cahier des charges pour de tels systèmes nucléaires, qui a été élaboré par le Forum International Génération IV lancé en 2000 par les Etats-Unis et auquel la France est associée ainsi que douze autres grands pays nucléaires, suppose de lever certains verrous technologiques, notamment relatifs aux matériaux et aux combustibles, et cela ne semble pas envisageable avant ces échéances. Il y a donc place entre aujourd'hui et 2040/2050 pour le développement de réacteurs de 3^e génération qui se situent en continuité par rapport aux réacteurs actuels mais incorporent de sensibles améliorations en matière de sûreté et d'économie.

Les recherches d'innovation sur les réacteurs à eau

L'utilisation de réacteurs à eau devrait rester majoritaire sur le XXI^e siècle, ce qui justifie la poursuite d'un effort

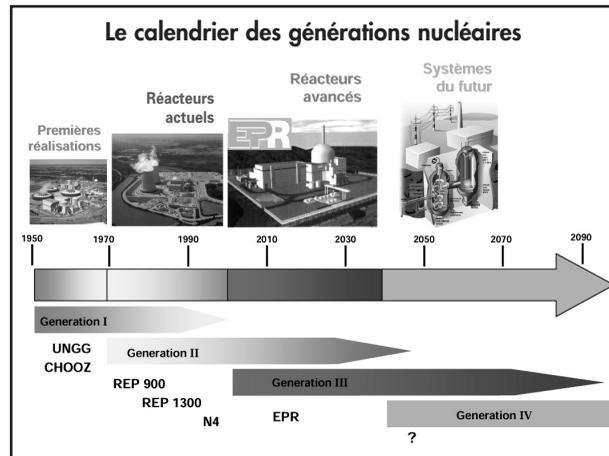


Figure 1 – Schéma des quatre générations de réacteurs.

de R&D pour en améliorer les performances dans un contexte de déploiement dynamique pouvant conduire à 1 500 GWe installés en 2050. En effet, les réacteurs de 3^e génération introduits dans les prochaines décennies et conçus pour une durée de vie de 60 ans devraient rester en exploitation jusqu'à la fin du siècle. Les études et recherches d'innovation sur ces réacteurs ont donc pour objet de continuer à en améliorer la compétitivité économique et l'utilisation du combustible, ainsi que d'étudier les modes de recyclage des matières nucléaires produites par ces réacteurs dans les réacteurs de 4^e génération à neutrons rapides lorsqu'ils seront déployés à échelle industrielle.

La compétitivité des réacteurs à eau légère repose à la fois sur la maîtrise de leurs coûts d'investissement et d'exploitation, ainsi que sur leur disponibilité. Les principaux objectifs d'innovation qui en résultent portent sur :

- l'amélioration des marges d'exploitation des combustibles actuels ;
- l'augmentation des taux de combustion à court terme (> 60 GWj/t) ;
- une meilleure utilisation de l'uranium et une disponibilité accrue du réacteur ;
- une amélioration de la robustesse du combustible en situation accidentelle.

Les recherches portent également sur des évolutions de l'architecture des chaudières de réacteurs à eau pressurisée ou bouillante (REP ou REB) susceptibles de réduire leurs coûts d'investissement et de maintenance, voire d'améliorer aussi leur rendement et leur disponibilité.

Cette R&D sur les réacteurs à eau est menée en partenariat étroit avec les industriels et l'exploitant électrique.

UN EFFORT INTERNATIONAL VERS UNE QUATRIÈME GÉNÉRATION DE RÉACTEURS NUCLÉAIRES

Compte tenu de la contribution décisive que peut apporter l'énergie nucléaire dans le contexte planétaire,

au titre duquel comptent tout particulièrement les choix faits en faveur de cette énergie par la Chine et l'Inde, qui représentent 30 % de la population mondiale, plusieurs cadres de réflexion ont entrepris de définir les systèmes nucléaires qui pourraient être déployés dans le monde vers 2040 et contribuer à une couverture significative des besoins en énergie. Parmi ceux-ci, le cadre le plus dynamique s'est révélé être le Forum international Génération IV qui a été lancé en 2000 par le ministère américain de l'Énergie (DOE). Ce forum comprend aujourd'hui douze pays membres plus Euratom, et la France y apporte depuis le début une contribution très active.

A l'issue de la première phase de ses travaux (2000-2002), le Forum Génération IV a publié un rapport d'orientation sur les technologies jugées les plus prometteuses pour les prochaines décennies. Ce rapport a souligné en premier lieu le caractère essentiel du recyclage du combustible dans une stratégie de déploiement de réacteurs à neutrons rapides de 4^e génération, dans la mesure où il permet de tirer pleinement parti de leurs potentialités d'utilisation optimale des matières fertiles (uranium) et fissiles (plutonium) pour la production d'énergie. Il ouvre également la voie à un recyclage associant également les actinides mineurs (neptunium, américium, curium) pour les brûler et les soustraire ainsi au conditionnement des déchets ultimes dont ils constituent actuellement l'essentiel de la radiotoxicité et de la chaleur à long terme. Il a, en cohérence avec cette orientation, retenu six systèmes nucléaires comme porteurs d'avancées notables en matière de compétitivité économique, de sûreté, de réduction des déchets radioactifs à vie longue, d'économie des ressources en uranium, ainsi que de résistance à la prolifération et à la malveillance :

- **SFR** (*Sodium-Cooled Fast Reactor System*) : réacteur rapide refroidi au sodium avec recyclage du combustible ;
- **GFR** (*Gas-Cooled Fast Reactor System*) : réacteur rapide refroidi au gaz avec recyclage du combustible ;
- **VHTR** (*Very High Temperature Reactor System*) : réacteur à neutrons thermiques et à très haute température (950 à 1 000°C) refroidi à l'hélium, dédié à la production d'hydrogène, et envisagé initialement sans recyclage du combustible ;
- **SCWR** (*Supercritical Water-Cooled Reactor System*) : réacteur refroidi à l'eau supercritique, à spectre neutronique thermique ou rapide, et recyclage du combustible ;
- **LFR** (*Lead-Cooled Fast Reactor System*) : réacteur rapide refroidi au plomb ou au plomb-bismuth avec recyclage du combustible ;
- **MSR** (*Molten Salt Reactor System*) : réacteur à neutrons thermiques à sels fondus avec recyclage du combustible.

La stratégie française de recherche et développement sur les systèmes nucléaires du futur s'inscrit à la fois dans une perspective de renouvellement du parc électronucléaire français et d'accompagnement de la straté-

gie d'Areva en matière de développement de filière spécifique pour le marché de la chaleur industrielle à haute température et la production d'hydrogène. Elle se structure selon deux axes :

- une recherche prioritaire sur les systèmes à neutrons rapides avec recyclage du combustible (réacteurs rapides à caloporteur sodium ou gaz) ;
- une recherche à un niveau inférieur, mais significatif, pour développer, en coopération étroite avec les partenaires industriels, les technologies clés pour la fourniture de chaleur à très haute température pour l'industrie et la production nucléaire d'hydrogène (réacteurs à gaz à très haute température à neutrons thermiques ou rapides, et procédés de décomposition de l'eau).

Les systèmes à neutrons rapides : Sodium Fast Reactor, Gas Fast Reactor

Le *système à neutrons rapides refroidi au sodium* (*Sodium Fast Reactor, SFR*) bénéficie pour le réacteur d'une expérience industrielle importante avec le retour d'expérience de Phenix et de Superphenix. 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 2015/2020.

Dans ce cadre, la priorité est donnée :

- aux études de conception pour simplifier le système et réduire son coût d'investissement ;
- 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.

Les différents types de réacteur de troisième génération...

- **Réacteurs avancés à eau pressurisée**
AP 600, AP 1000, APR1400, APWR+, EPR
- **Réacteurs avancés à eau bouillante**
ABWR II, ESBWR, HC-BWR, SWR-1000
- **Réacteur avancé à eau lourde**
ACR-700 (Advanced CANDU Reactor 700)
- **Réacteurs intégrés de petites et moyennes puissances**
CAREM, IMR, IRSI, SMART
- **Réacteurs modulaires, haute température, à gaz**
GT-MHR, PBMR

Figure 2 – Les différents types de réacteurs de 3^e génération.

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 transuraniens, 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.

Le *système à neutrons rapides refroidi au gaz (Gas Fast Reactor, GFR)* est en revanche 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, matériaux de gainage...);
- le développement de matériaux de structure pour le cœur résistant à la fois à la haute température et aux dommages par les neutrons rapides;
- une gestion robuste 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, un volet de R&D comportant un tronc commun important avec celle des cycles pour les autres systèmes à neutrons rapides du Forum Génération IV (SFR, LFR et SCWR);

Ils concernent également, en tronc commun avec la R&D pour le réacteur à très haute température (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).

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

Le combustible GFR, tant pour sa technologie que pour les procédés de fabrication, fait l'objet d'une coopération active dans le cadre du Laboratoire des composites thermostrostructuraux (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 (*Very High Temperature Reactor*) – 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.

Les systèmes à très haute température (*Very High Temperature Reactor*)

La production d'hydrogène par électrolyse à haute température ou cycle thermo-chimique (iode/soufre ou hybride soufre/électrolyse), de même que la fourniture de chaleur à très haute température pour l'industrie, constituent un second axe de R&D pour satisfaire les besoins en énergie autres que la production d'électricité. Cet objectif est celui des réacteurs à très haute température (VHTR) avec caloporteur hélium qui visent une température en sortie du cœur d'au moins 950°C. 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 XXI^e siècle.

LA R&D SUR LE CYCLE : VERS UN RECYCLAGE INTÉGRAL DES ACTINIDES

La R&D sur le traitement-recyclage menée en France et industrialisée avec le procédé mis en œuvre à La Hague permet d'ores et déjà de recycler 96 % du combustible usé, de réaliser une économie de 30 % sur les ressources naturelles, de diviser par cinq le volume des déchets et par dix leur radiotoxicité. Les Etats-Unis, qui avaient fait le choix du cycle ouvert, ont d'ailleurs reconnu, début 2006, l'intérêt du cycle fermé dans une perspective de développement important de l'énergie nucléaire. Certains pays développent aujourd'hui activement leur parc et pourraient souhaiter disposer à terme de la technologie de traitement-recyclage. Pour

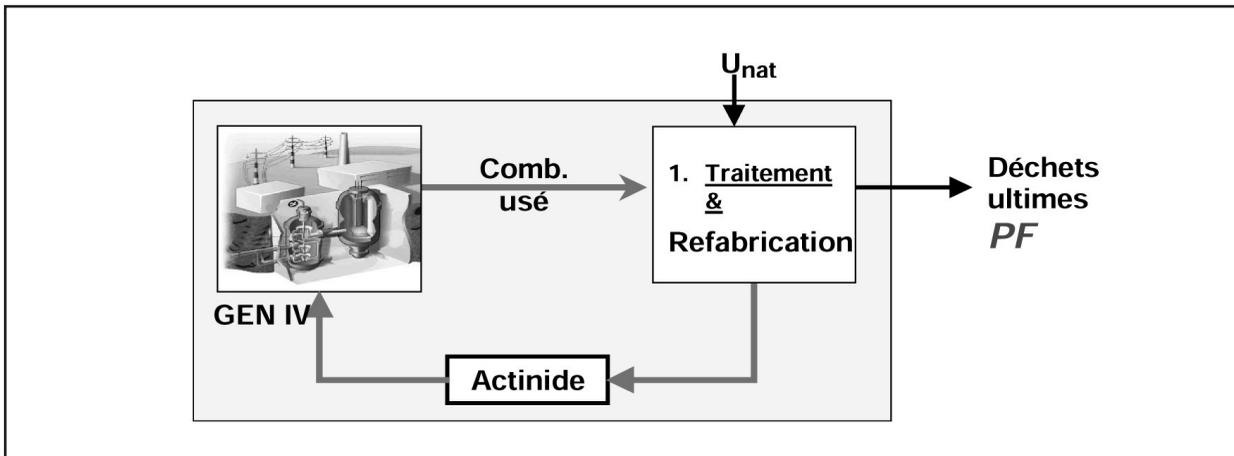


Figure 3 – Le cycle du combustible des systèmes à neutrons rapides de 4^e génération.

permettre à la France d'être présente sur de tels marchés le moment venu, des études sont menées, dans le cadre d'une coopération CEA-AREVA, pour adapter le procédé PUREX, aujourd'hui exploité à La Hague, et concevoir un nouveau procédé dit de troisième génération. Il permettrait en particulier de ne pas conduire à l'extraction de plutonium séparé, pour répondre à de nouveaux standards en matière de non-prolifération. Le procédé en question (COEX) vise ainsi à maintenir le plutonium en mélange avec l'uranium à toutes les étapes du procédé de traitement (séparation des produits de fission, conversion en oxyde, refabrication du combustible) et à améliorer la compétitivité économique du traitement recyclage.

Les recherches sur ce procédé ont démarré en 2006 par l'établissement d'un schéma de référence à l'aide des codes de simulation développés par le CEA et aux premières vérifications expérimentales en laboratoire. En 2007, un essai de démonstration sur combustible réel sera conduit dans l'installation Atalante du CEA à Marcoule. En parallèle, des développements spécifiques d'appareillages ont été lancés pour s'adapter aux capacités futures qui seront requises. Le programme comprend également l'évaluation de l'impact de ce nouveau procédé sur le combustible MOX pour vérifier qu'il ne modifie pas les conditions de fonctionnement en réacteur vis-à-vis des critères fixés par les Autorités de sûreté.

Si la faisabilité scientifique du procédé est acquise, il reste encore des développements technologiques à réaliser, l'objectif étant d'avoir, à l'horizon 2008-2010, un dossier démontrant sa faisabilité industrielle.

Au-delà des recherches sur ce retraitement de troisième génération, l'option future de recyclage intégral de tous les actinides – traitement de 4^e génération – dans les systèmes à neutrons rapides, décrit en figure 3 (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.

Des démonstrations à trois (France, Japon, Etats-Unis) constitueront une plate-forme internationale d'expéri-

mentation de tous les procédés impliqués dans le recyclage intégral du combustible dans les RNR sodium (avec un large tronc commun de ces démonstrations valable également pour d'autres systèmes à neutrons rapides). Cette plate-forme devrait également contribuer à harmoniser la vision, au plan international, d'une gestion globale et optimisée des actinides, ainsi que des procédés à mettre en œuvre. Elle servira également à sélectionner les procédés de séparation et de conversion qui seront mis en œuvre dans l'usine de traitement des combustibles usés qui succédera vers 2040 à l'usine actuelle de La Hague.

La disponibilité en France vers 2040 à la fois de réacteurs à neutrons rapides (conforme au choix de technologie fait vers 2015/2020) et d'un procédé de traitement des combustibles usés permettant de séparer les actinides mineurs permet d'envisager la mise en œuvre d'une stratégie de transmutation industrielle adossée au renouvellement des installations industrielles pour la production électronucléaire : réacteurs à neutrons rapides et renouvellement de l'usine de traitement de La Hague. Cette approche permet à la fois d'optimiser l'utilisation des installations actuelles et de tirer parti de leur remplacement pour changer de procédés et de technologies.

Un scénario de référence, présenté en figure 4, prévoit simultanément vers 2040 le déploiement de systèmes à neutrons rapides dans le parc français (à caloporteur sodium ou gaz) et la mise en service d'une nouvelle usine de traitement des combustibles usés remplaçant l'usine de La Hague. Ce scénario laisse ouvertes les options d'un recyclage de l'uranium et du plutonium seuls ou d'un recyclage intégral des actinides (U-Pu-AM), selon les objectifs de progrès visés sur la qualité des déchets ultimes et l'optimisation technico-économique globale de l'aval du cycle.

Les résultats scientifiques et techniques obtenus dans le cadre des recherches sur la séparation et la transmutation, et les opportunités offertes par le renouvellement des installations nucléaires permettent d'envisager une stratégie de transmutation progressive, adaptable aux conditions de déploiement de systèmes à neutrons

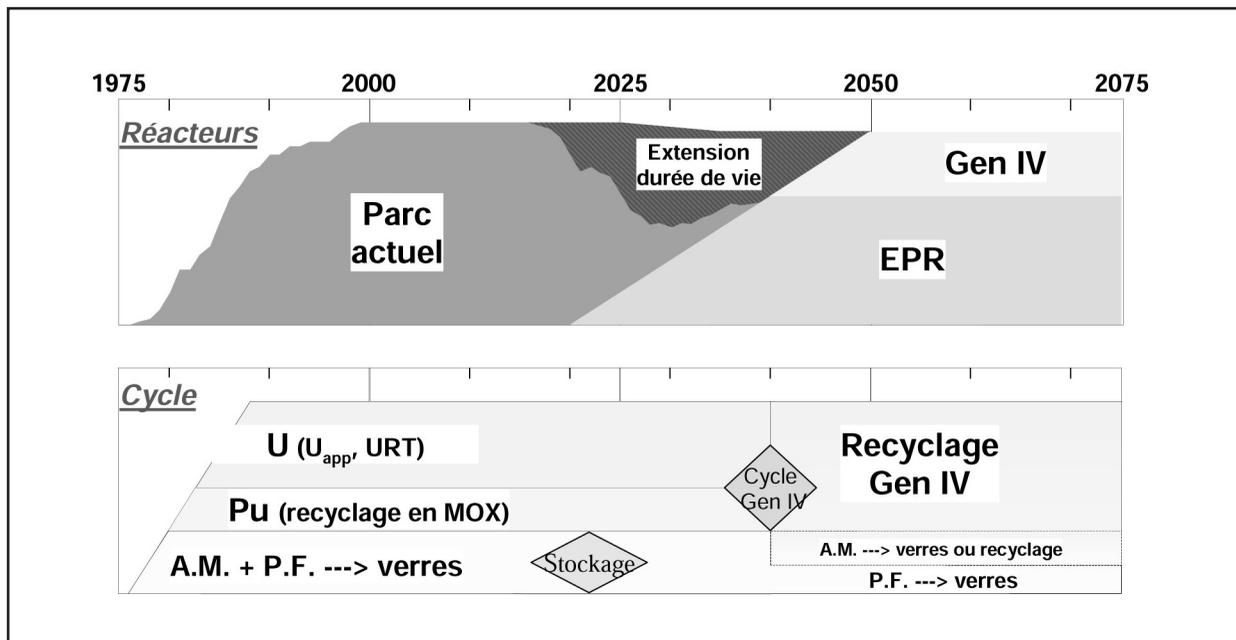


Figure 4 – Scénario de renouvellement du parc électronucléaire français et de l'usine de traitement de La Hague.

rapides dans le parc français, et préservant la possibilité, si elle est compatible avec l'optimisation technico-économique globale du cycle, d'un recyclage intégral des actinides capable de réduire radicalement la radio-toxicité potentielle et la thermique des déchets ultimes, ainsi que de rendre le cycle du combustible plus résistant aux risques de prolifération.

POUR LE TRÈS LONG TERME, LA RECHERCHE SUR LA FUSION NUCLÉAIRE CONTRÔLÉE : LE PROJET ITER

L'énergie de fusion est potentiellement une des sources d'énergie primaire les plus intéressantes : elle ne pose pas de problèmes de réserves, ne produit pas de déchets radioactifs de longue durée et hautement actifs ; comme la fission elle ne produit pas de CO₂, et, enfin, un réacteur de fusion est intrinsèquement sûr. Mais la réalisation de prototypes industriels de réacteurs de fusion est encore confrontée à des défis technologiques majeurs qui nécessiteront une R&D intensive avant d'arriver au stade de construction d'installations de production d'électricité.

Le projet international ITER de réacteur expérimental de fusion nucléaire a pour but de faire la démonstration scientifique et technique qu'il est possible d'utiliser la fusion pour produire de l'énergie. Les partenaires engagés dans ce projet sont l'Union européenne, les États-Unis, la Russie, le Japon, la Chine, l'Inde et la Corée du Sud.

L'installation qui sera construite sur le site CEA de Cadarache sera de type « tokamak ». Elle permettra d'effectuer en configuration réaliste la recherche encore nécessaire sur les matériaux et le fonctionnement d'un réacteur de fusion.

Le réacteur ITER, dont le coût d'investissement prévisionnel a été évalué à 4,6 milliards d'euros de l'année 2000, aura une durée de construction de douze ans et devrait être exploité une vingtaine d'années.

Si les résultats engrangés et les études de matériaux menées en parallèle confirment les possibilités scientifique et technologique d'utiliser la fusion nucléaire pour la production d'énergie, un prototype industriel de réacteur de production, étudié en parallèle à l'exploitation d'ITER, pourrait ensuite être construit.

Dans un contexte de forte croissance de la demande d'énergies non émettrices de CO₂, les réacteurs de fusion éventuels (à partir de la fin du XXI^e siècle) ne rendraient pas caducs ceux de fission mais en seraient un complément.

LA DIMENSION EUROPÉENNE

En matière de production électronucléaire, l'Europe (élargie à la Roumanie et la Bulgarie) exploite aujourd'hui 164 réacteurs représentant 137 GWe installés et contribuant pour 30 % à la production électrique. Le nucléaire industriel a progressivement pris une dimension européenne avec la fusion de Framatome et de Siemens qui a conduit à la création de *Nuclear Power International* (NPI devenu FANP) en 1991, puis avec la publication en 1995 des spécifications des électriciens européens pour les nouveaux réacteurs (*European Utilities Requirements*) et le rapprochement entre Autorités de sûreté française et allemande pour certifier l'EPR, voire entre Autorités de sûreté européennes pour harmoniser les pratiques sur les réacteurs en exploitation et les objectifs de sûreté pour les réacteurs en projet. Le réacteur d'irradiation « Jules Horowitz » et les laboratoires chauds consacrés à la R&D sur les combus-

tibles transuraniens (LEFCA à Cadarache, ITU à Karlsruhe) et les procédés du cycle (Atalante à Marcoule) figurent en bonne place parmi les infrastructures européennes de recherche sur la fission.

Les enjeux d'une coopération active en Europe sur les systèmes nucléaires du futur 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 équilibrée avec de grands partenaires tels que les États-Unis et le Japon.

En Europe, l'entrée des pays signataires du traité Euratom comme 11^e membre du Forum Génération IV, en septembre 2003, a induit plusieurs initiatives pour inscrire dans le 7^e PCRD un programme à part entière sur les systèmes du futur, doté d'au moins 50 M€ (part de la Commission). Dès le 6^e PCRD le volet de programme européen sur les systèmes du futur a été organisé de façon à faciliter la correspondance avec les systèmes du Forum Génération IV, et donc les possibilités de coopération *via* le programme européen ou des contributions directes. La proposition d'une plateforme technologique « fission », structurée selon les trois axes de R&D du programme français, est en passe d'être adoptée pour le 7^e PCRD :

- systèmes à neutrons rapides et recyclage pour la relève des réacteurs à eau vers 2040 ;
- systèmes à haute température pour la production d'hydrogène, de carburants de synthèse et de chaleur pour les procédés industriels ;

• R&D stratégique pour étendre la durée de vie des réacteurs actuels et continuer à optimiser les performances des réacteurs de 3^e génération (combustibles, facteur de conversion, chaudière...).

Ces trois axes sous-tendent des besoins en compétences et en infrastructures de recherche dont le renouvellement s'envisage d'emblée à l'échelle européenne (réacteur Jules Horowitz pour les essais de matériaux, laboratoires chauds pour le développement de combustibles transuraniens ou de procédés de traitement des combustibles usés, bancs et boucles d'essais pour la technologie des circuits d'hélium à haute température, procédés et pilotes de production d'hydrogène...). Chacun des axes de R&D de cette plate-forme technologique qui associe des partenaires de la recherche et de l'industrie peut en principe conduire à la réalisation d'un démonstrateur européen (réacteur à neutrons rapides et/ou réacteur à très haute température pour la cogénération d'hydrogène ou de chaleur industrielle) en tirant le meilleur parti de l'expérience acquise sur les prototypes de filières comparables dans les années 1960 à 1980.

POUR UN DÉVELOPPEMENT DES COOPÉRATIONS

Les prévisions de croissance des besoins en énergie à l'échelle mondiale amènent à développer, en coopération internationale, un nucléaire de 4^e génération à même de satisfaire durablement ces besoins. Au-delà

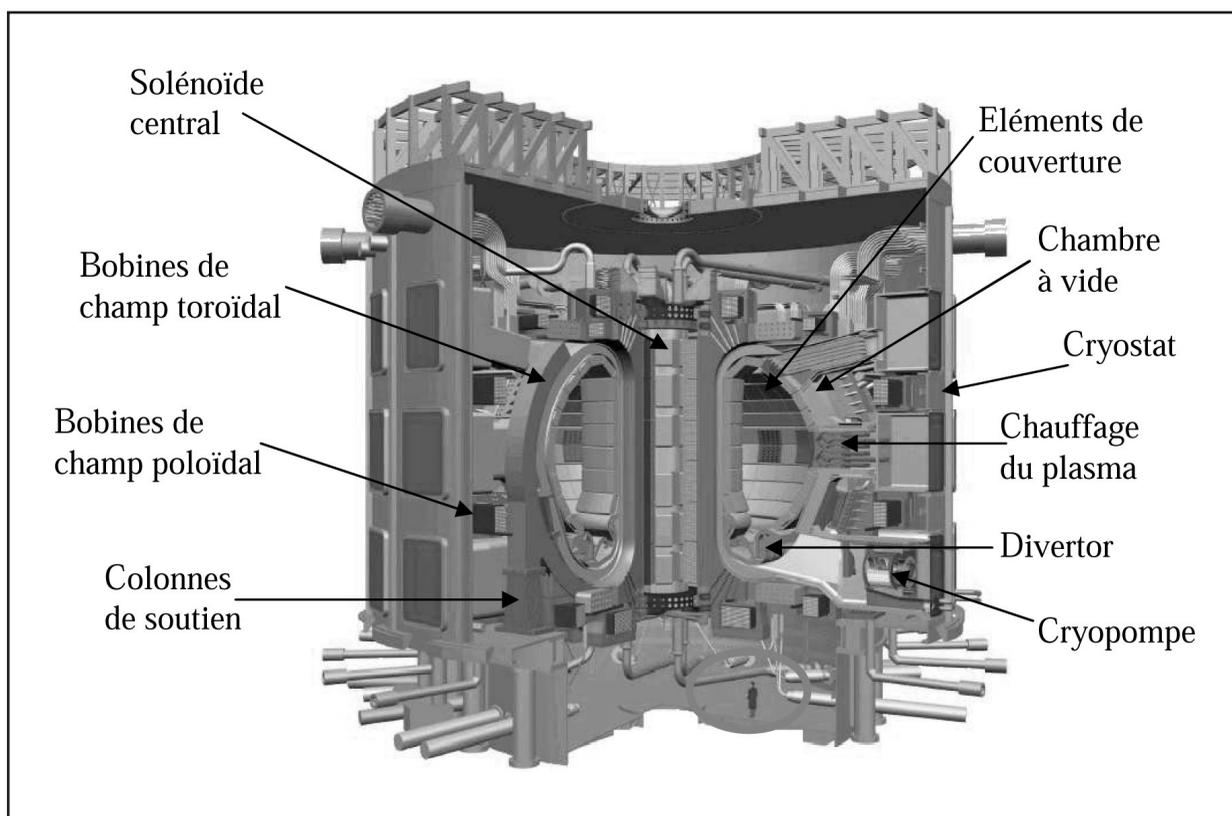


Figure 5 – Schéma de l'installation ITER.

des progrès en continuité avec les générations précédentes en matière de sûreté et de compétitivité économique, les systèmes nucléaires de 4^e génération visent à utiliser de manière optimale leur combustible et minimiser leur production de déchets radioactifs à vie longue. Ils devraient aussi contribuer à répondre à d'autres besoins que la production d'électricité, tels que la production de carburants pour le transport (hydrogène ou hydrocarbures de synthèse), ou la fourniture de chaleur à très haute température pour des procédés industriels (ce qui amène à s'intéresser à des réacteurs à caloporteur hélium avec des températures de 850 à 1 000°C).

L'un des principaux enjeux est de parvenir à investir dans la R&D sur les systèmes nucléaires du futur des

moyens suffisants pour garder à notre industrie nucléaire sa place de *leader* sur la scène internationale. A cette fin, il s'agit à la fois de valoriser l'expérience acquise dans de nouvelles technologies (RNR sodium, procédés pour le cycle du combustible...) et de contribuer largement à leur mise au point pour garder notre avance.

Cet enjeu appelle à optimiser la coopération entre partenaires français de la recherche (CNRS, universités...) et de l'industrie (Areva, EDF...) pour développer les technologies et procédés du futur. Il invite aussi à démultiplier l'effort national par la coopération internationale pour partager les coûts de l'innovation et pour cofinancer des prototypes en France ou en Europe.