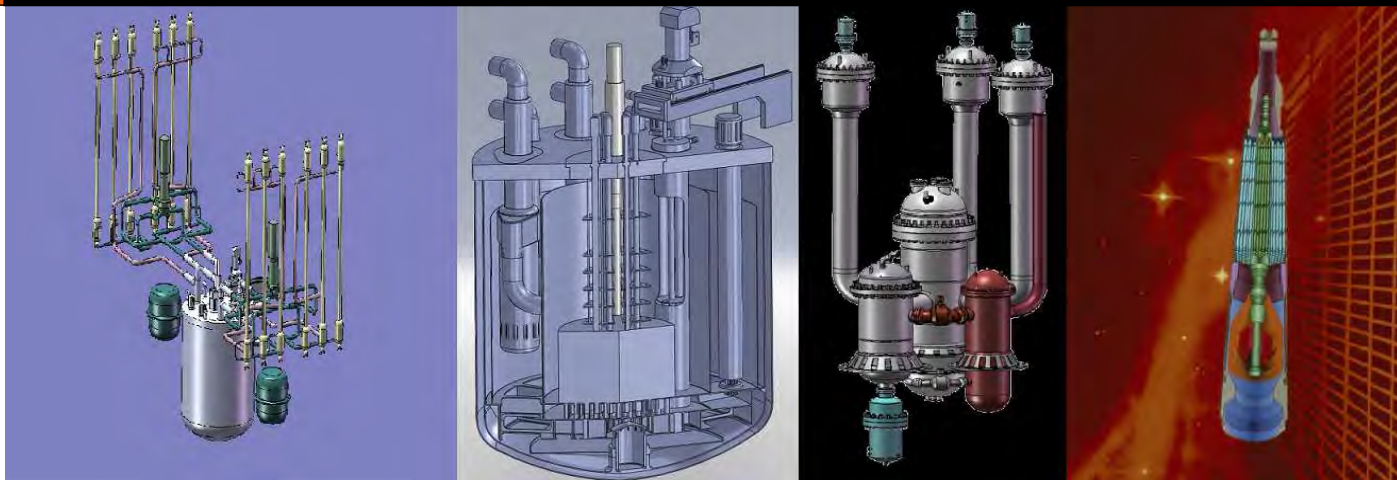


DOSSIER DE PRESSE



Quatrième génération : vers un nucléaire durable

31 mars 2010

CONTACT PRESSE : CEA / Service Information-Média

Marie VANDERMERSCH Tél. : 01 64 50 17 16 - marie.vandermersch@cea.fr

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

Sommaire :

3 Introduction

4 Les grands enjeux de la quatrième génération

- 4 Un impératif : préserver les ressources
- 6 Les réacteurs à neutrons rapides : une utilisation optimale de la ressource
- 9 Un projet nucléaire pour drainer les meilleures compétences scientifiques et techniques

10 Astrid : construire le premier réacteur prototype de quatrième génération

- 11 La filière RNR sodium : l'option la plus réaliste pour un déploiement en 2040
- 11 Astrid : un réacteur en rupture pour 2020
- 15 Allegro : un RNR gaz construit au niveau européen
- 16 Les recherches sur le cycle du combustible associé

17 Annexes

- 18 Comment s'articuleront les réacteurs de 3^e et de 4^e génération ?
- 20 Ce que font les pays étrangers dans les réacteurs à neutrons rapides sodium
- 21 Le Forum Génération IV : un cadre de R&D international
- 23 Emprunt national : un milliard d'euros consacré au nucléaire de demain



Illustrations page précédente :

De gauche à droite

- Images 1&2 : Le prototype Astrid : une image possible - © CEA

- Image 3 : Le concept de référence actuel pour le réacteur à neutrons rapides gaz © CEA

- Image 4 : dispositif expérimental pour les études sur la transmutation des actinides mineurs. © CEA-Faugère

Introduction :

Vers un nucléaire durable

Pour faire face aux besoins croissants en énergie, à l'épuisement progressif des ressources fossiles et à la logique de réduction des émissions de gaz à effet de serre, de plus en plus de pays souhaitent se tourner vers l'énergie nucléaire. Aujourd'hui, elle assure 16% de la production mondiale d'électricité, avec plus de 400 réacteurs en fonctionnement. A l'horizon 2030, l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA) prévoit une augmentation de 20 à 80% de la puissance nucléaire installée dans le monde. 45 réacteurs électronucléaires sont en construction dans le monde et de l'ordre de 130 autres sont prévus, principalement en Chine, en Inde, au Japon, aux Etats-Unis et dans la Fédération de Russie. En outre, certains pays qui ne comptent pas encore de réacteurs de puissance dans leur parc électrique ont décidé d'opter pour le nucléaire, notamment au Moyen Orient et en Asie.

Le nucléaire est-il en mesure de satisfaire sur le long terme une demande d'énergie qui ne cesse d'augmenter ? Les ressources en uranium ne sont pas inépuisables et le marché pourrait se tendre vers le milieu du XXI^e siècle. Inscrire le nucléaire dans une perspective de développement durable suppose de développer une nouvelle génération de réacteurs capable de préserver ces ressources. Exploiter l'ensemble du minerai d'uranium, multirecycler le plutonium, transformer en combustible une partie des déchets radioactifs en assurant un fonctionnement qui réponde aux critères de sûreté les plus exigeants : tels sont les enjeux de ce que l'on appelle "la quatrième génération". Un forum international, le Forum Génération IV, est né de cette volonté collective de créer un cadre de R&D international en mesure de catalyser les efforts de recherche menés par les différents pays. Durables, compétitifs, sûrs et fiables, résistants à la prolifération et aux agressions : tels sont les critères auxquels ces réacteurs du futur devront répondre pour pouvoir prétendre au titre de "réacteur de quatrième génération". Six systèmes susceptibles d'y répondre ont été sélectionnés au sein du forum ; cinq d'entre eux font appel à des neutrons rapides.

Consciente des enjeux, la France a décidé de faire porter ses efforts sur deux d'entre eux et s'est engagée à construire à l'horizon 2020 un prototype de réacteur à neutrons rapides qui réponde à ce cahier des charges. Après une première phase de R&D, le coup d'envoi de la phase technique du projet vient d'être donné, avec les 650 millions d'euros alloués au CEA, dans le cadre de l'Emprunt national, pour la réalisation d'un prototype de réacteur à neutrons rapides (RNR) refroidi au sodium baptisé Astrid. A côté de ce démonstrateur, la France travaille également sur la filière des RNR refroidis au gaz dans le cadre d'une collaboration européenne qui doit déboucher sur la construction, dans un autre pays que la France, d'un réacteur expérimental de petite taille, Allegro.

Intervenants :

Christophe Béhar, Directeur de l'énergie nucléaire

François Gauché, Chef du programme "Réacteurs de 4^e génération"

Les grands enjeux de la quatrième génération

"La population croît et s'enrichit. Nous aurons besoin de 40% d'énergie en plus d'ici 2030", rappelait le Président de la République dans son allocution d'ouverture de la conférence de l'OCDE sur le nucléaire civil du 8 mars¹.

Les prochaines décennies risquent d'être traversées par des crises énergétiques de plus en plus fréquentes. Toutes les sources d'énergie alternatives aux énergies fossiles devront être mises à contribution pour répondre à la situation et le nucléaire, aux côtés des énergies renouvelables, devrait jouer un rôle fondamental 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.

Conscients de ces atouts, de nombreux pays souhaitent investir dans le nucléaire. Cette "renaissance du nucléaire" devrait engendrer une pression plus forte sur le minerai d'uranium. Aussi cette renaissance doit-elle impérativement s'accompagner d'une politique de préservation des ressources. C'est l'un des grands enjeux de la quatrième génération, qui apparaît dès lors comme la clé de voute sur laquelle pourra s'édifier durablement le nucléaire de demain.

La France, l'un des grands pays de référence en matière de nucléaire, a tout intérêt à **maintenir sa compétitivité sur ce secteur hautement stratégique**. Le développement des réacteurs de quatrième génération est un processus très long qu'il convient d'anticiper si l'on veut rester dans le peloton de tête.

Un impératif : préserver les ressources

L'échéance de 2040, régulièrement évoquée pour le déploiement des réacteurs de quatrième génération, n'est pas simplement dictée par les avancées de la R&D. Certes, il s'agit d'un délai nécessaire pour acquérir la maturité souhaitée pour un déploiement industriel de réacteurs innovants. Mais cette date est aussi et surtout celle **à laquelle il est nécessaire de se tenir prêt** compte tenu des enjeux climatiques et énergétiques. L'uranium est en effet une ressource limitée. Vers la fin du XXI^e siècle, l'intégralité des ressources conventionnelles en uranium connues à ce jour pourraient être épuisées. D'après les prévisions, le marché de l'uranium pourrait commencer à se tendre vers le milieu du siècle. D'où la mobilisation de nombreux pays sur ces réacteurs de quatrième génération, plus économes, qui **constituent une indispensable assurance vis-à-vis de ce risque de pénurie**.

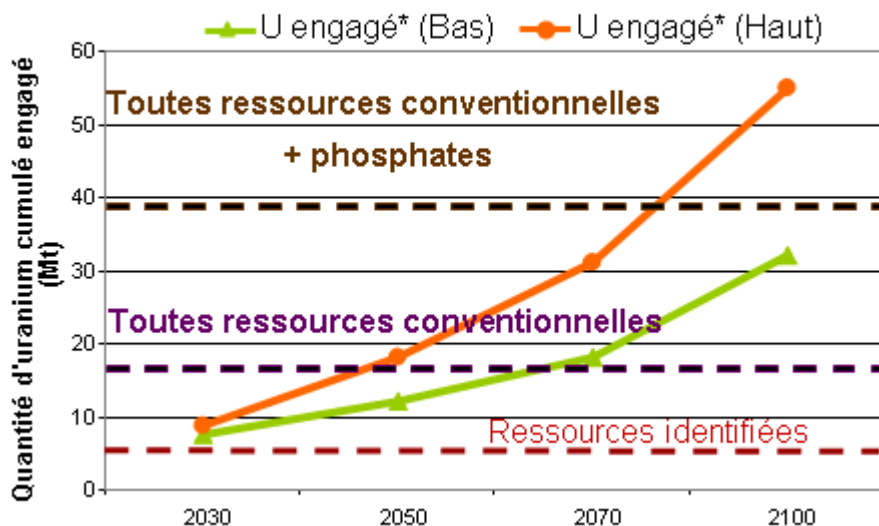
Aujourd'hui, avec les technologies de réacteurs à eau pressurisée (REP actuels et de troisième génération de type EPR), la production d'1 GWe (Gigawatt électrique) sur une année suppose d'extraire de la mine 200 tonnes d'uranium naturel. Selon l'AIEA et l'AEN², les réserves mondiales d'uranium identifiées

¹ Ce chiffre est celui du scénario de référence du World Energy Outlook 2009, édité par l'Agence internationale de l'énergie (AIE). "La croissance de la demande est plus lente que dans le WEO-2008, en raison surtout de l'impact de la crise sur les premières années de la période considérée, ainsi que des nouvelles politiques adoptées l'an dernier par les gouvernements", note l'AIE.

² Chiffres de 2008

s'élèvent à 5,5 millions de tonnes. A ces ressources identifiées, peuvent être ajoutées 10,5 millions de tonnes d'uranium qui resteraient à découvrir et environ 22 millions de tonnes d'uranium non conventionnelles, qui seraient extraites de minerais de phosphates, pour un coût plus élevé. Dès 2050, les réacteurs devraient être amenés à utiliser des réserves d'uranium fortement spéculatives.

Utilisation des ressources en uranium avec REP seuls pour 2 scénarios (Haut et Bas)



L'uranium engagé à une date donnée correspond à la totalité de la consommation de l'ensemble du parc à cette date (réacteurs arrêtés, en exploitation et en construction), en prenant en compte la consommation depuis leur mise en service jusqu'à leur fin de vie. Cette quantité permet d'estimer les tensions éventuelles sur le marché de l'uranium, en fonction d'un niveau de parc, pour toute la durée d'exploitation de ce parc. On constate ainsi que vers le milieu du siècle, l'ensemble des réserves conventionnelles aura déjà été "préempté" par les réacteurs construits à cette date, dans le scénario haut.



Répartition des sources d'uranium identifiées
Source : AIEA/OCDE 2008

Les réacteurs à neutrons rapides : une utilisation optimale de la ressource

Les réacteurs de quatrième génération à neutrons rapides³ permettent d'élargir le spectre d'utilisation des combustibles potentiels : uranium naturel, uranium appauvri, uranium de retraitement, plutonium, mais aussi actinides mineurs pourront fissionner dans leur cœur pour produire de l'électricité. Les réacteurs à neutrons rapides ont donc un rôle essentiel à jouer dans la préservation des ressources et sont à même d'inscrire le nucléaire dans une perspective "durable".

Boucler complètement le cycle du plutonium (Pu)

L'irradiation du combustible à l'oxyde d'uranium, qui alimente les centrales actuelles, conduit à la formation de plutonium. En France, ce plutonium n'est pas considéré comme un déchet mais comme une matière à haut potentiel énergétique en raison de ses caractéristiques fissiles.

Actuellement, à la sortie du cœur du réacteur, le combustible usé est composé à 1% de plutonium. Plusieurs isotopes⁴ sont présents, le plus abondant étant de loin le Plutonium 239.

Aujourd'hui, une partie de ce plutonium est mélangée à de l'oxyde d'uranium afin d'être transformée en combustible Mox. Ce combustible est à son tour réinjecté dans certaines centrales du parc nucléaire en proportions variables, en fonction des caractéristiques du cœur du réacteur⁵. Mais **le recyclage du plutonium dans les réacteurs à eau pressurisée est limité à un cycle** : après irradiation, la composition isotopique du Pu a été modifiée de telle sorte qu'il ne peut être réexploité une seconde fois : la proportion d'isotopes pairs du Pu, non fissiles par des neutrons lents, a en effet augmenté.

Ces mêmes isotopes pairs s'avèrent être d'**excellents combustibles pour les réacteurs à neutrons rapides**, en mesure de brûler tous les types de plutonium. **Ces systèmes permettent donc d'utiliser l'ensemble des stocks de plutonium et de le recycler de façon récurrente**, préservant ainsi les ressources en uranium.

³ Par opposition aux réacteurs actuels, EPR compris, qui sont à neutrons thermiques ou neutrons lents. Dans un réacteur à eau pressurisée (REP), les neutrons sont ralentis dans le cœur du réacteur par un "modérateur" (l'eau en l'occurrence), ce qui n'est pas le cas dans un réacteur à neutrons rapides.

⁴ Un même élément chimique a plusieurs isotopes, qui possèdent le même nombre de protons mais un nombre de neutrons différent. Les isotopes d'un même élément ont les mêmes propriétés chimiques, mais leurs propriétés sont différentes à l'échelle du noyau.

⁵ Sur le parc de centrales EDF existant, 22 tranches utilisent du combustible MOX à hauteur de 30%. Dans un réacteur EPR, cette proportion de MOX pourra monter à 100%.

Produire de 50 à 100 fois plus d'électricité avec la même quantité d'uranium

Capables de boucler le cycle du plutonium, les réacteurs de quatrième génération permettront également d'utiliser la totalité du minerai d'uranium et non simplement l'infime partie composée d'uranium fissile en neutrons lents, comme c'est le cas dans les réacteurs à eau pressurisée actuels.

L'uranium naturel est en effet principalement composé de deux isotopes : l'uranium 238, qui représente plus de 99% du minerai d'uranium, et l'uranium 235, qui représente moins de 1% de ce minerai (0,7% exactement). Dans les réacteurs actuellement en service dans le monde, la réaction en chaîne est entretenue par des neutrons thermiques (ou neutrons lents) et l'énergie produite résulte essentiellement de la fission de noyaux d'uranium 235, seul isotope directement fissile de l'uranium⁶. C'est donc une infime partie de la ressource en uranium qui est utilisée au final. Cet isotope étant extrêmement minoritaire dans le minerai à l'état naturel, l'uranium est enrichi de façon à être concentré à hauteur de 3 à 5 % en U235. Le combustible UOX (pour Oxyde d'uranium) ainsi obtenu reste donc composé à hauteur de 95 à 97 % par de l'U238, non fissile.

Or, l'uranium 238 n'est pas sans intérêt : à défaut d'être fissile, il peut se transmuter en plutonium 239, à son tour fissile. Mais dans les réacteurs actuels, seuls quelques neutrons lents parviennent à transmuter cet U238 en Pu239 pour produire de l'énergie. **Dans les réacteurs de quatrième génération, sous l'action des neutrons rapides, c'est l'ensemble de l'uranium 238 qui pourra être transmuté en Pu239 et servir à la production d'électricité.** Par ce biais, il devient possible d'exploiter non plus 0,7% mais l'ensemble du minerai d'uranium à des fins électrogènes. La disponibilité mondiale en ressources fissiles primaires peut ainsi être multipliée par 100.

Dans un premier temps, les réacteurs à neutrons rapides permettront d'exploiter l'uranium "appauvri" issu des opérations d'enrichissement, composé à 99,7% d'U238, mais aussi l'ensemble de l'uranium de traitement (URT) issu du retraitement des combustibles usés actuels.

Avec la technologie des réacteurs à neutrons rapides, les seuls stocks français d'uranium issus de ces opérations d'enrichissement et de retraitement, qui s'élèvent aujourd'hui à 250 000 tonnes⁷, sont a priori suffisants pour alimenter une production nucléaire au niveau actuel pendant 5000 ans.

Réduire la radiotoxicité intrinsèque des déchets ultimes

L'un des grands enjeux des réacteurs de quatrième génération est également de faciliter la gestion des déchets radioactifs en réduisant le volume et la radiotoxicité intrinsèque à long terme des déchets ultimes. Ces réacteurs pourraient en effet être en mesure de brûler une part déterminante des éléments radioactifs à vie longue qui composent les déchets, les actinides mineurs

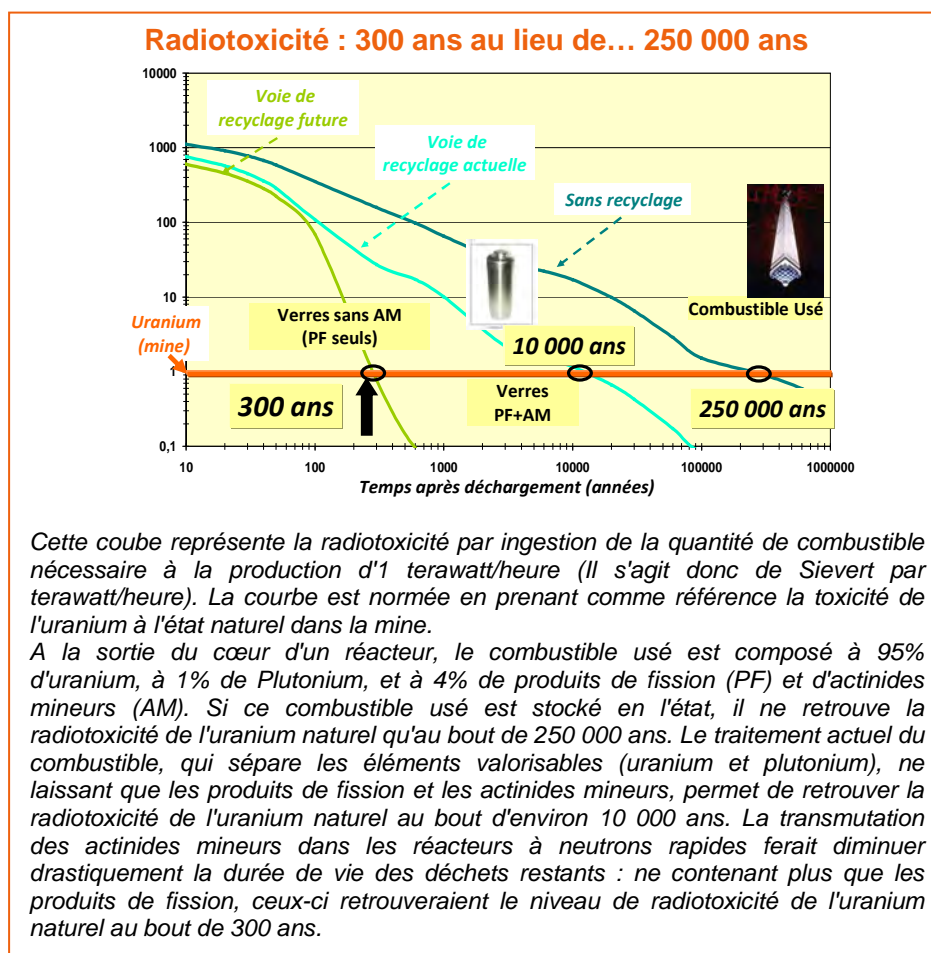
⁶ En physique, se dit d'un noyau d'atome pouvant être cassé par un neutron.

⁷ Chiffre de fin 2007, issu de l'Inventaire National de l'Andra, édition 2009.

(américium, neptunium, curium...). Les déchets ultimes se limiteraient alors aux produits de fission (soit actuellement 4% du combustible utilisé). Ces produits de fission, débarrassés des actinides mineurs, seraient plus aisément stockables et retrouveraient le niveau de radioactivité de l'uranium naturel non plus au bout d'une dizaine de milliers d'années, mais au bout de 300 ans environ.

La démonstration de la faisabilité de la transmutation des actinides mineurs a été faite dans le réacteur à neutrons rapides Phénix. Pour autant, la R&D dans ce domaine doit se poursuivre car **la viabilité du procédé à l'échelle industrielle n'est pas encore acquise**. La manipulation des actinides mineurs est complexe et peut s'avérer coûteuse et c'est l'un des grands enjeux des recherches à venir. De plus, la transmutation suppose en amont une phase de séparation des actinides mineurs et modifie donc de manière importante le cycle du combustible.

Aujourd'hui, les décisions en la matière ne sont pas prises. Ces recherches ont été inscrites dans la loi de 2006 relative à la gestion des déchets⁸. L'objectif fixé par la loi est de disposer, en 2012, d'une évaluation des perspectives industrielles de ces filières.



⁸ Loi de programme 2006-739 relative à la gestion durable des matières et des déchets radioactifs adoptée le 28 juin 2006.

Un projet nucléaire pour drainer les meilleures compétences scientifiques et techniques

Une forte convergence de la filière française sur ce sujet

La France a la volonté d'aboutir et d'être l'un des premiers pays, si ce n'est le premier, à exploiter un réacteur de quatrième génération. Le CEA, qui pilote la R&D sur le sujet, a mobilisé les meilleures compétences autour de la construction d'un prototype à l'horizon 2020, Astrid. Ce projet ambitieux, qui permet d'attirer les chercheurs et ingénieurs au meilleur niveau et de structurer les activités de recherche, fédère autour de lui l'ensemble de la filière nucléaire française. EDF est impliqué dans la R&D ; Areva, de son côté, fait à la fois porter ses efforts sur la R&D et la partie ingénierie. GDF-Suez devrait prochainement se joindre au programme.

Des partenariats à l'international

Soucieuse de confronter sa R&D à celle des meilleures équipes sur la scène internationale, la France a engagé de nombreuses collaborations avec d'autres pays membres du Forum international Génération IV (GIF)⁹. Les technologies sur lesquelles elle a décidé de faire porter ses efforts (RNR sodium et RNR gaz) font d'ailleurs l'objet d'un consensus au sein de ce forum qui regroupe 12 pays (Afrique du Sud, Argentine, Brésil, Canada, Chine, Corée du Sud, France, Japon, Royaume-Uni, Russie, Suisse, USA) ainsi que l'Union Européenne. La France n'avance donc pas seule, et les priorités qu'elle s'est données sont le fruit de réflexions partagées qui débouchent sur un certain nombre de collaborations.

Plusieurs degrés de collaboration sont mis en place :

- **le partage d'installations de R&D**, car il est inutile et coûteux de dupliquer ce type d'installations ;
- **le partage de résultats**, comme ce fut par exemple le cas dans le réacteur Phénix où plusieurs programmes communs sur la transmutation des actinides mineurs ont été menés avec les Japonais, les Américains et nos partenaires européens. Actuellement, la France mène avec les Américains, les Japonais et l'Europe le programme Gacid (Global actinide incineration demonstration) sur le réacteur de Monju au Japon. Autre exemple, la France travaille de concert avec le Japon, les Etats-Unis et la Corée du Sud sur le développement d'un système de conversion d'énergie fonctionnant au CO₂ supercritique.
- **Le développement de composants en commun** (dessin, dimensionnement et tests).

Parallèlement à la R&D à proprement parler, définir des règles de sûreté communes à l'échelle internationale est également de la plus grande importance.

⁹ Cf. Annexe 3 p. 21

Astrid : construire le premier réacteur prototype de quatrième génération

L'emprunt national lancé par le gouvernement en début d'année a alloué 1 milliard d'euros à la recherche dans le nucléaire civil. Sur cette somme, 650 millions d'euros sont destinés, sur la période 2010-2017, au développement du prototype de quatrième génération que la France s'est engagée à mettre en service à l'horizon 2020¹⁰, Astrid¹¹. Ce projet s'inscrit dans chacun des trois défis de l'Emprunt national : "l'économie de la connaissance", la "compétitivité des entreprises" et les "équipements industriels innovants".

Le CEA travaille en parallèle sur deux des six filières retenues dans le cadre du Forum Generation IV¹². Ces deux filières font appel à la technologie des neutrons rapides (RNR) avec cycle du combustible fermé¹³. Il s'agit des filières RNR sodium (ou SFR pour Sodium-cooled Fast Reactor) et RNR gaz (ou GFR pour Gas-cooled Fast Reactor), sur lesquelles le CEA fait porter respectivement 80% et 20% de ses efforts. Plus mature, la filière RNR sodium peut répondre plus facilement au cahier des charges extrêmement exigeant de la quatrième génération. Elle apparaît comme la seule raisonnablement compatible avec l'échéance de 2040. D'où la priorité plus forte qui lui est accordée. C'est cette filière qui servira de référence au prototype français Astrid qui doit être mis en service à l'horizon 2020.

Mais le développement d'une filière de référence ne doit pas exclure la R&D sur d'autres concepts et des recherches menées sur le RNR Gaz se poursuivront dans le cadre d'une collaboration européenne qui devrait se concrétiser autour du réacteur expérimental Allegro. Il s'agit d'un réacteur de petite taille, non producteur d'électricité, qui permettra de réaliser la première étape de validation du concept.

¹⁰ Lors de ses vœux à la nation en 2006, le Président de la République Jacques Chirac avait annoncé la décision de lancer la conception, au sein du CEA, d'un prototype de réacteur de 4^e génération pour une mise en service en 2020. Cette décision est entérinée par la Loi de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs du 28 juin 2006.

¹¹ Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration

¹² 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.

¹³ Le cycle fermé consiste à traiter les combustibles usés de façon à recycler les matières encore valorisables après les avoir séparées des déchets ultimes.

La filière RNR sodium : l'option la plus réaliste pour un déploiement en 2040

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.

Tandis qu'aucun RNR Gaz à haute température n'a été construit à ce jour, plusieurs RNR sodium ont pu être exploités dans le monde. Aucun ne répondait aux critères de la quatrième génération, mais cette expérience accumulée a permis d'identifier les points forts et les points faibles, et d'orienter la R&D nécessaire pour atteindre les critères de la 4^{ème} génération.

Astrid : un réacteur en rupture pour 2020

Astrid est l'acronyme d'Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration. Ce démonstrateur industriel électrogène de 600 mégawatts électriques (MWe) pourrait précéder la tête de série d'un futur réacteur commercial.

Moins puissant qu'une tête de série, mais suffisamment puissant pour permettre de valider les options de sûreté de cette filière, **il devra d'ores et déjà répondre aux critères de la 4^e génération** (économie des ressources et respect de l'environnement ; sûreté, compétitivité ; résistance à la prolifération) et permettre de

- tester certaines options innovantes, notamment en termes de sûreté et d'opérabilité.
- démontrer la faisabilité, **sur des quantités significatives**, de la transmutation des actinides mineurs, technique qui permet de réduire le volume et la dangerosité des déchets ultimes tout en produisant de l'électricité.

La France a d'ores et déjà construit deux RNR sodium électrogènes : Phénix et Superphénix. Mais la conception d'Astrid ne part absolument pas du même point. Avec quarante années de décalage, **Astrid sera un réacteur en rupture forte par rapport à ces deux installations**. Sa conception, qui intègre le retour d'expérience très riche des deux réacteurs, se nourrit des outils du XXI^e siècle en termes de conception, de modélisation et de méthodes analytiques (codes de calculs de sûreté, optimisation probabiliste de la disponibilité, analyse des coûts sur le cycle de vie...).

Astrid s'appuiera sur les dernières recherches et innovations en matière de vieillissement des matériaux et intégrera des options de maintenance adaptées à une longue durée de vie (remplacement à demi-vie de certains éléments). Il répondra également aux dernières exigences en matière de sûreté et de sécurité.

Astrid : les innovations attendues

Pour pouvoir prétendre au titre de premier réacteur de quatrième génération, le démonstrateur industriel Astrid doit corriger les faiblesses identifiées sur ses prédécesseurs et intégrer les dernières innovations. Cela se traduira par :

- **une sûreté améliorée**, au moins identique à celle d'un réacteur de 3^e génération de type EPR et prenant en compte les spécificités des neutrons rapides et du sodium.
 - Prévention des risques d'accident de fusion du cœur : conception d'un cœur optimisé permettant d'éviter une augmentation de la réaction en chaîne en cas de baisse du niveau du sodium ou en cas d'entrée d'air. Un cœur innovant est à l'étude sur Astrid ;
 - Ajout de dispositifs complémentaires de sûreté équivalents à un 3^e niveau d'arrêt permettant d'atteindre un état sûr du réacteur, même en cas de problème de chute de barre de contrôle¹⁴.
 - Elimination des possibilités d'interaction entre le sodium et l'air ou l'eau¹⁵. Plusieurs solutions innovantes sont envisagées 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.
 - Résistance aux séismes et aux agressions externes renforcée
- **Une disponibilité aux standards de l'industrie**

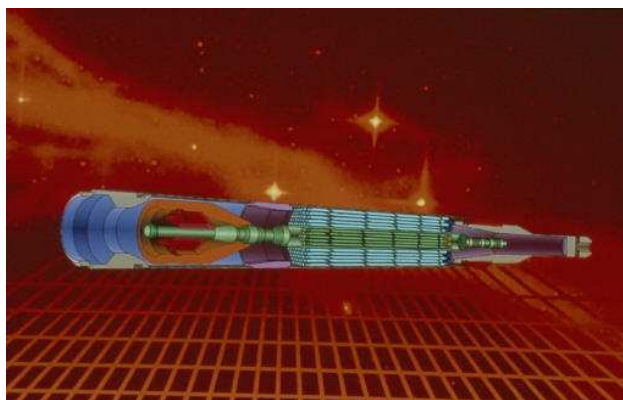
Astrid devra démontrer au bout de quelques années d'exploitation un taux de disponibilité comparable à celui du parc actuel de réacteurs en exploitation, soit autour de 80%. Le réacteur offrira de meilleures conditions d'exploitation à même de garantir une disponibilité maximum. Les conditions d'inspection en service, de maintenance et de réparation seront notablement améliorées (ex : facilitation des manœuvres de recharge du combustible, instrumentation renforcée pour détecter et localiser d'éventuelles fuites, grande accessibilité des composants et structures pour réduire le temps et les coûts de maintenance et faciliter les contrôles et inspections).

- **Une capacité à transmuter à une échelle significative**

Phénix a permis de tester à l'échelle expérimentale la faisabilité de la transmutation d'actinides mineurs, ce qui permet de réduire fortement la radiotoxicité et la durée de vie des déchets radioactifs ultimes. Astrid, après quelques années d'exploitation, pourrait avoir la capacité de brûler autant d'actinides mineurs qu'il en produit.

¹⁴ Pour contrôler la réaction en chaîne dans un réacteur et donc piloter celui-ci, on utilise des barres contenant un absorbant énergétique de neutrons. En introduisant rapidement ces barres de contrôle, on étouffe en quelques instants la réaction en chaîne et l'on réduit le dégagement de chaleur dans le cœur. En cas d'anomalie, ces barres de contrôle chutent automatiquement.

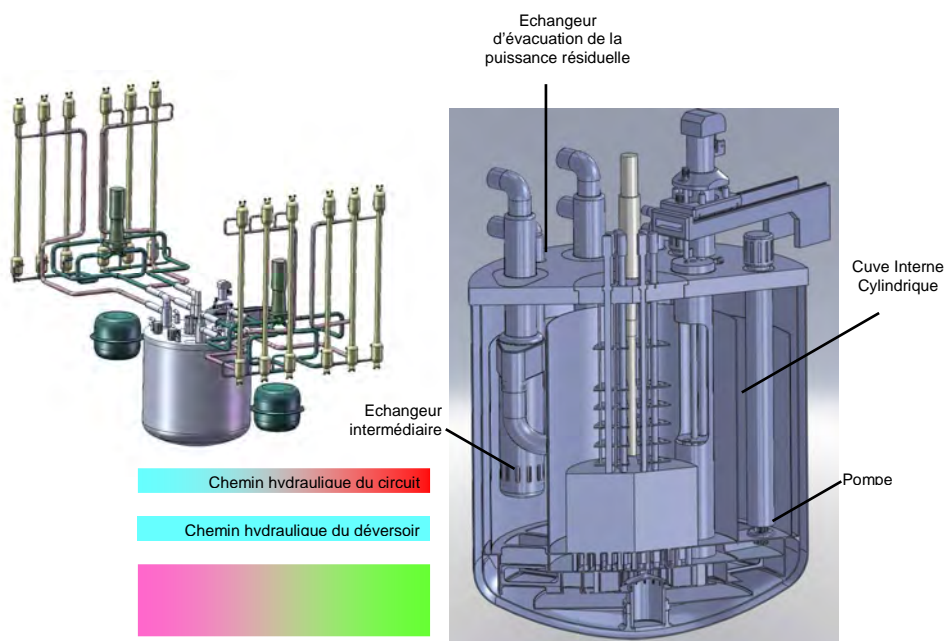
¹⁵ Le sodium liquide a l'inconvénient de s'enflammer spontanément au contact de l'air au dessus de 120° et de réagir instantanément avec l'eau.



Dispositif expérimental pour les études sur la transmutation des actinides mineurs. © CEA-Faugère

- **Une réduction du coût d'investissement**

Démonstrateur industriel, Astrid doit tirer l'innovation. Néanmoins, un effort particulier sera fait pour contenir au maximum les coûts d'investissements. La participation d'industriels au projet sera une garantie dans ce domaine.



Une image possible d'Astrid © CEA

Le calendrier d'Astrid

Le programme Astrid est constitué de la réalisation du réacteur proprement dit et de la qualification des composants qui le constituent sur de grandes installations technologiques. Est aussi associée au projet la construction d'un Atelier de Fabrication du combustible des Cœurs (AFC). Le réacteur doit être opérationnel à l'horizon 2020.

La première échéance fixée par la loi du 28 juin 2006 se situe fin 2012, date à laquelle les pouvoirs publics devront pouvoir disposer de premiers éléments budgétaires (notamment en termes d'investissements, coûts de fonctionnement et partenaires définis), mais aussi techniques, pour une prise de décision de construction du prototype. Aussi, le CEA prévoit-il de réaliser un Avant Projet Sommaire (APS) pour une première évaluation du coût d'investissement à cette échéance, la définition des options techniques innovantes et des options de sûreté, ainsi que du planning de déploiement.

L'objectif est une construction d'Astrid à partir de 2017 pour un chargement du cœur en combustible à l'horizon 2020.

Ce calendrier ambitieux sera soumis à chaque étape clé à une revue critique de changement de phase.

Un projet qui s'inscrit dans un processus démocratique

La construction du prototype est inscrite dans la Loi de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs du 28 juin 2006.

Le projet fait l'objet d'évaluations régulières par les pouvoirs publics. La Commission nationale d'évaluation des recherches sur la gestion des déchets radioactifs, prévue dans la Loi du 28 juin 2006, évalue chaque année les recherches menées dans ce domaine. Cette évaluation fait l'objet d'un rapport annuel transmis aux parlementaires et rendu public.

La Loi de 2006 prévoit une échéance déterminante fin 2012 : les parlementaires devront disposer des premiers éléments budgétaires, mais aussi techniques, pour une prise de décision de construction du prototype.

Collaborations avec les industriels

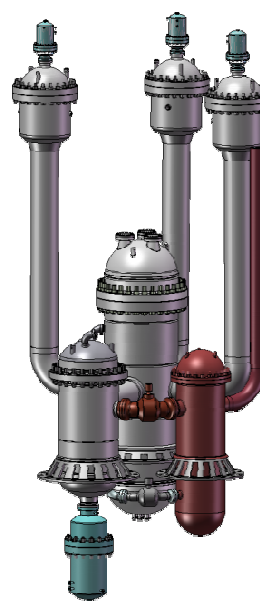
Comme son nom l'indique, Astrid (Advanced Sodium Technological reactor For Industrial Demonstration) doit être en mesure de démontrer la viabilité de la filière RNR sodium à l'échelle industrielle. Il est donc essentiel pour le CEA d'intégrer le plus en amont possible les industriels, dont les compétences en matière d'ingénierie, de construction et d'exploitation nucléaire sont d'un apport précieux. Ainsi, le projet Astrid fait converger autour de lui l'ensemble des acteurs du nucléaire français. EDF et Areva sont impliqués dans la R&D du projet ; Areva, qui a su garder des compétences précieuses dans le domaine des réacteurs à neutrons rapides sodium, fait également porter ses efforts sur la partie ingénierie d'Astrid. Des discussions sont en cours avec GDF Suez également, qui devraient se concrétiser en 2010. A l'international, la piste de partenariats est explorée.

Allegro : un RNR gaz construit au niveau européen

Les réacteurs à neutrons rapides refroidis au gaz procèdent d'un concept totalement innovant. Le CEA a développé une R&D de haut niveau sur la filière qui a la particularité d'associer neutrons rapides et haute température. Il fait porter 20% de ses efforts en matière de réacteurs de 4^e génération sur cette filière et développe une collaboration avec la Hongrie, la République tchèque et la Slovaquie afin de construire dans l'un de ces trois pays un réacteur expérimental baptisé Allegro. Contrairement à Astrid, il ne s'agit pas d'un démonstrateur industriel, les recherches n'étant pas encore assez avancées. La filière RNR gaz en est à ses débuts et en l'absence de retour d'expérience, le réacteur sera de moindre puissance puisqu'il fournira moins de 100 MW thermiques (pour rappel, Astrid sera couplé au réseau pour une puissance électrique de 600 MWe, soit 1500 MW thermiques).

Le gaz étant un mauvais caloporteur, il est nécessaire de monter en température (850°C) pour obtenir des rendements satisfaisants. Or à ces températures, les métaux classiques ne conviennent plus. Il devient nécessaire de se tourner vers d'autres matériaux pour mettre au point les éléments de structure du réacteur et du combustible. Aussi, 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.
- Sécurité : analyse des scénarii d'accidents graves sur ce type de réacteur ; étude de la tenue des matériaux de structure et du combustible à haute température.



Le concept de référence actuel pour le rapide gaz © CEA

Les recherches sur le cycle du combustible associé

Fabrication du combustible

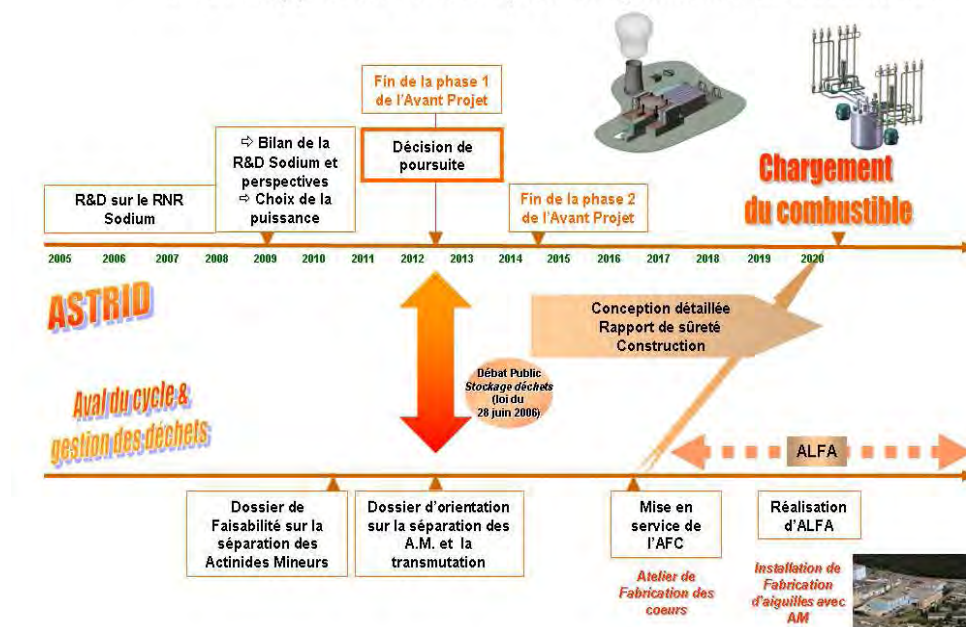
Le programme Astrid prévoit la construction de deux ateliers industriels destinés à fabriquer le combustible qui sera utilisé dans le réacteur (combustible Mox-RNR (uranium- plutonium) et combustible avancé intégrant des actinides mineurs).

Traitement du combustible usé

Qu'il s'agisse de l'une ou de l'autre filière (sodium et gaz), 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.

Il s'agit de mettre au point les procédés avancés pour le recyclage de l'uranium et du plutonium et d'évaluer les options de séparation-transmutation de radioéléments à vie longue, en réponse aux attentes exprimées dans la loi de 2006 avec un recyclage, au moins de l'uranium et du plutonium, et optionnellement de tous les 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.

Un développement cohérent pour les systèmes nucléaires du futur



Annexes

Annexe 1 - Comment s'articuleront les réacteurs de troisième et de quatrième génération ?

Annexe 2 - Ce que font les pays étrangers dans les réacteurs à neutrons rapides sodium

Annexe 3 - Le Forum Génération IV : un cadre de R&D international

Annexe 4 – Emprunt national : un milliard d'euros consacré au nucléaire de demain

Annexe 1

Comment s'articuleront les réacteurs de troisième et de quatrième génération ?

Les 3^e et 4^e générations vont-elles se succéder? Cohabiter?

Les réacteurs de troisième génération (Réacteurs à eau pressurisée avancés, tels EPR) sont actuellement en construction en Finlande et en France. Ils seront exploités dès 2013 en France (Flamanville). Ils sont amenés à se développer tout au long du XXI^e siècle, ces réacteurs étant conçus pour une durée de fonctionnement de 60 ans.

Les réacteurs de quatrième génération n'existent pas encore. On travaille à leur conception, et la France est un des pays les plus avancés en ce domaine, avec le projet de prototype prévu à l'horizon 2020 (inscrit dans la loi du 28 juin 2006 sur les déchets).

Leur déploiement industriel est prévu dans les années **2040**.

NB: il existe des réacteurs à neutrons rapides au sodium (Japon, Russie), cependant leur conception fait qu'ils ne satisfont pas aux critères du Forum International GEN IV, et ne peuvent donc être qualifiés de "4^e génération".

Les réacteurs de troisième et de quatrième génération devraient donc cohabiter à partir de 2040.

Pourquoi garder des réacteurs de 3^e génération à partir de 2040 ?

Les réacteurs de 3^e génération (type EPR) sont des réacteurs évolutionnaires par rapport à la génération actuelle qui apportent des avancées en matière de sûreté. Lorsque la quatrième génération sera déployée, ils seront encore jeunes puisqu'ils sont conçus pour fonctionner pendant 60 ans.

De plus troisième et quatrième génération sont en fait **complémentaires en termes de combustibles**

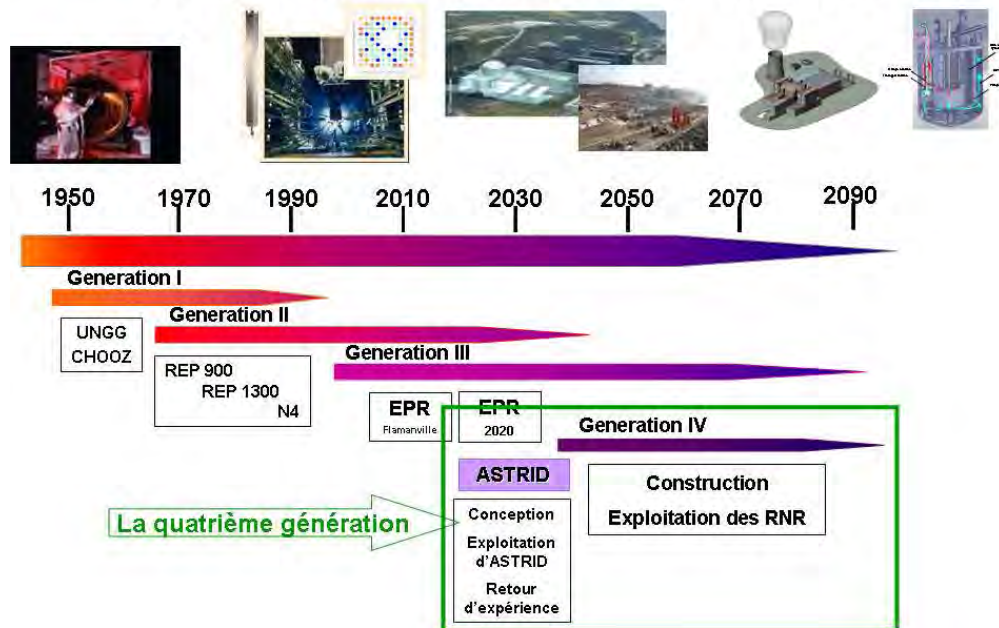
GEN III produit le Pu nécessaire à GEN IV¹⁶
GEN IV brûle le plutonium et les déchets de GEN III (actinides mineurs).

En effet un réacteur à neutrons rapides a besoin de plutonium dans son combustible au démarrage : Le rythme d'émergence de la filière RNR est donc lié à la disponibilité de plutonium. Et le plutonium est issu du traitement des combustibles usés de 3^e génération.

Ensuite, lors de leur fonctionnement "de croisière", les réacteurs de 4^e génération se passent de l'apport en Pu.

¹⁶ C'est parce que la France a la maîtrise du traitement du combustible usé que cette opération est envisageable à l'échelle industrielle. Et c'est un des atouts de la "filiale nucléaire française".

Les Systèmes Industriels Nucléaires du Futur



Annexe 2

Ce que font les pays étrangers dans les réacteurs à neutrons rapides sodium

Actuellement : 5 réacteurs en service

BOR-60	RUSSIE	60MWe	RECHERCHE 1968
BN 600	RUSSIE	600MWe	INDUSTRIEL 1980
JOYO	JAPON	50MWe	RECHERCHE 1977
MONJU	JAPON	280MWe	PROTO 1992
FBTR	INDE	40MWe	RECHERCHE 1985

Seuls BN 600 et MONJU (aujourd'hui à l'arrêt, redivergence prévue en 2010) sont des réacteurs au sodium avec une production d'électricité significative. Les 3 autres sont des réacteurs expérimentaux destinés aux irradiations.

En projet : 3 réacteurs dont 2 de taille industrielle

Chine	CEFR	20 MWe	2010
Inde	PBFR	470MWe	2010 ou 2011
Russie	BN800	750 MWe	

Construction commencée en 1987, divergence prévue vers 2012

La Russie, en mai 2009 a annoncé la construction de deux réacteurs BN-800 en Chine.

Quel niveau de technologie par rapport à Astrid ?

- **Aucun des RNR sodium en service aujourd'hui ne peut prétendre à la qualification de 3^e, et encore moins de 4^e génération.**

- Les conceptions des réacteurs BN800 (Russie) et PBFR (Inde) sont d'un très bon niveau. Néanmoins, nous estimons qu'Astrid répondra à des critères de sûreté plus exigeants et sera le **premier prototype de réacteur de quatrième génération**

Annexe 3

Le Forum Génération IV : un cadre 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 nucléaires¹⁷.

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.

¹⁷ 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. Cinq d'entre eux font appel aux neutrons rapides.

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.

Annexe 4

Emprunt National :

1 milliard d'euros consacré au nucléaire de demain

L'emprunt national, dont le montant a été fixé à 35 milliards d'euros, est destiné à financer des investissements publics ciblés sur des projets à fort potentiel de croissance.

Parmi les cinq priorités nationales définies par le chef de l'Etat, plusieurs concernent directement ou indirectement le CEA, permettant ainsi de conforter la dynamique de nos recherches.

Dans le chapitre Développement durable, un milliard d'euros est alloué au nucléaire de demain¹⁸ :

- réacteurs de 4^{ème} génération,
- réacteur Jules Horowitz dans sa composante production de radio-isotopes à finalités médicales
- et gestion des déchets nucléaires.

1) Astrid

650 millions d'euros seront utilisés en grande partie pour le réacteur de démonstration à neutrons rapides refroidis au sodium baptisé Astrid, dont la mise en service est prévu vers 2020.

Astrid s'inscrit dans chacun des trois défis que relève l'emprunt national, à savoir

- l'économie de la connaissance ;
- la compétitivité des entreprises ;
- les équipements industriels innovants.

Fort de son expérience sur la filière sodium, le CEA apporte par ses travaux de R&D des résultats en rupture technologique pour la réalisation d'un démonstrateur industriel.

→ **Ceci permettra à la France d'acquérir la maîtrise des procédés industriels et de se doter du premier réacteur de 4^e génération au monde.**

2) Le réacteur Jules Horowitz

250 millions d'euros seront affectés au réacteur Jules Horowitz (RJH) qui est actuellement en cours de construction sur le site de Cadarache.

L'objectif principal du RJH est d'offrir une capacité d'irradiations expérimentales pour étudier le comportement des matériaux et combustibles.

¹⁸ Deux milliards et demi d'euros seront consacrés aux énergies renouvelables et décarbonées, notamment à l'amélioration de la performance des panneaux photovoltaïques, au stockage de l'énergie.

Mais l'autre objectif important pour le RJH est la sécurisation de la production de radio-isotopes à usage médical, répondant ainsi à un enjeu de santé public majeur. Le RJH est à ce jour le seul réacteur en cours de construction offrant la possibilité d'un renouvellement de cette capacité de production¹⁹ :

→ Ce réacteur, qui devrait être opérationnel en 2014, permettra de couvrir 25% des besoins européens voire jusqu'à 50% de façon temporaire.

3) Traitement des déchets

La centaine de millions d'euros restants sont fléchés pour un meilleur traitement des déchets qui est un élément-clé de la filière nucléaire : cette somme contribuera au développement, piloté par l'Andra, de technologies innovantes pour le traitement de déchets nucléaires spécifiques.

¹⁹ En effet, les trois réacteurs de recherche contribuant le plus aux besoins mondiaux ont tous plus que 45 ans d'âge et sont programmés, comme OSIRIS, pour être mis à l'arrêt définitif au cours de la décennie 2010-2020.