

STRATEGIE ET PROGRAMMES DES RECHERCHES

sur la gestion des déchets radioactifs
de haute activité et à vie longue

Les perspectives de recherches après 2006

Direction de la technologie

Edition 2005

Avis au lecteur

Ce document a été préparé par la Direction de la Technologie du Ministère délégué à l'Enseignement Supérieur et à la Recherche, avec le soutien des organismes chargés des recherches sur la gestion des déchets nucléaires, dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991 dont les dispositions ont été reprises dans l'article L 542 du code de l'environnement.

Ce document a été discuté au sein du Comité de Suivi des Recherches sur l'Aval du Cycle, sous la présidence du Directeur de la Technologie, qui rassemble :

- *les organismes de recherches et d'expertise Andra, CEA , CNRS et IRSN,*
- *les industriels Framatome - ANP, EDF et COGEMA,*
- *les représentants des administrations centrales concernées DGEMP et DGSNR.*

Bien que constituant un document cohérent à lui seul, cet ouvrage peut être considéré comme le second tome du document « Stratégie et programmes de recherches – Edition 2004 ».

Sommaire

Avant-propos	3
L'énergie nucléaire et la problématique des déchets nucléaires.....	5
Enjeux et contexte international	5
La spécificité française	7
<i>La production d'énergie nucléaire.....</i>	<i>7</i>
<i>La gestion de l'aval du cycle et des combustibles usés</i>	<i>7</i>
Quels scénarios possibles de production des déchets nucléaires en France ?.....	9
Les scénarios sans renouvellement du parc nucléaire	9
Les scénarios de renouvellement du parc nucléaire	10
<i>Le scénario Génération III.....</i>	<i>10</i>
<i>Le scénario Génération III et Génération IV.....</i>	<i>11</i>
<i>Le scénario Génération III-Génération IV et la gestion du plutonium.....</i>	<i>13</i>
<i>Le scénario Génération IV et la gestion des actinides mineurs</i>	<i>13</i>
Les acquis de la recherche	15
Les recherches après 2006	18
Recherches pendant la période 2006 – 2015	19
<i>Un programme "Stockage géologique, entreposage, conditionnement"</i>	<i>20</i>
<i>Un programme "Gestion de la ressource plutonium".....</i>	<i>22</i>
<i>Un programme "Transmutation et gestion des actinides mineurs".....</i>	<i>23</i>
La recherche après 2015.....	27
<i>L'étape de 2015</i>	<i>27</i>
<i>Au-delà de 2015.....</i>	<i>28</i>
Recherche amont et interdisciplinaire	28
<i>Recherches exploratoires et contribution de la recherche académique</i>	<i>28</i>
<i>Les recherches concernant la radiobiologie et la radioécologie ou en appui à l'évaluation</i>	<i>29</i>
Conclusions	30

Ce document a pour objet de porter un regard prospectif sur les recherches après 2006 concernant les options de gestion des déchets nucléaires, en s'appuyant sur différentes hypothèses parmi celles que l'on peut considérer aujourd'hui comme envisageables pour le programme nucléaire français. Les options ici considérées tiennent compte des déchets nucléaires existants et engagés au sens du parc actuel, et des perspectives d'évolution concernant les cycles de combustibles nucléaires et les réacteurs nucléaires du futur. Ces options ont été exprimées dans des scénarios qui ont fait l'objet d'analyses multicritères conduites par le ministère en charge de l'industrie.

Une première vision prospective des programmes de recherche peut être établie dès maintenant. En effet, le développement de nombreuses technologies de base est commun aux différentes voies de gestion. Les options de gestion des déchets existants ou engagés, devront s'appuyer sur les performances des outils industriels, en prenant en compte la dimension économique.

Les initiateurs de la loi avaient à juste titre souligné que l'acceptation sociale d'une solution de gestion des déchets exigeait qu'aucun des trois axes ne soit arbitrairement privilégié. La recherche conduite dans le cadre de la loi de 1991 a été très ouverte tout au long des années écoulées et une large palette de solutions a été explorée ; ce qui constituait un préalable indispensable à toute approche décisionnelle. Après quinze ans de recherche, des progrès considérables ont été accomplis sur chacune des thématiques étudiées. Aussi, les recherches sur les déchets nucléaires après 2006 pourront elles s'appuyer sur une moisson de résultats importants.

Le temps a construit un nouvel édifice de connaissances qui conduit à proposer, pour l'après 2006, une stratégie de recherche structurée en « programmes ciblés » associés à des objectifs définis dans le temps et assortis de jalons.

Les actions à mettre en œuvre seront décidées par les pouvoirs publics en 2006, en s'appuyant sur les techniques qui auront montré leur faisabilité industrielle. Elles concernent les déchets produits par la génération actuelle de réacteurs et d'usines du cycle. La recherche concernant les déchets produits par les systèmes du futur, aura pour objectif de s'inscrire dans une cohérence globale et durable, intégrant non seulement la production d'énergie, mais aussi les aspects économiques, industriels et environnementaux du cycle. Ces recherches auront par nature une orientation plus "amont" que celles axées sur le court terme. L'histoire du système nucléaire français, avec des installations construites pour leur quasi totalité dans les années 80 et 90, situe l'objectif temporel pour disposer des nouvelles générations de réacteurs à maturité, à l'horizon 2040, qui correspond à l'horizon de renouvellement du système industriel actuel.

Les recherches et développements devraient se structurer naturellement selon des scénarios associant des réacteurs, des combustibles, des procédés, ou par grands défis technologiques susceptibles d'ouvrir de nouvelles filières. Les recherches après 2006 devraient de plus être conçues afin de favoriser l'articulation entre les diverses voies explorées dans une perspective d'optimisation, selon les orientations de référence que retiendront les pouvoirs publics. Cela impliquera la focalisation des recherches en cours au sein d'une approche plus finalisée, tout en conservant des recherches amont et de veille technologique.

Dans la perspective d'une mise en œuvre industrielle, la ou les solutions concrètes explorées viseront, à chaque période, la meilleure solution atteignable en fonction des résultats acquis en matière de sûreté et des réalités technico-économiques. Les enjeux industriels auront une place importante à jouer dans le choix des solutions post-2006, en parallèle avec la recherche de progrès techniques et de solutions optimales. Parallèlement, la nécessité d'expliquer les choix et de promouvoir leur acceptation sociale restera entière.

Le processus de décision s'inscrira dans une logique de progrès par étapes. A court terme, les étapes devraient être définies pour aboutir à des résultats permettant la mise en œuvre, en temps utile, des solutions techniques retenues, en cohérence avec les options décidées par les pouvoirs publics. A plus long terme, le programme de recherche et développement se présentera comme plus ouvert, avec des projets comportant des jalons, où les résultats des projets sont évalués en regard des objectifs et de la conjoncture. La démarche proposée aux pouvoirs publics s'entend donc comme une succession temporelle de points décisionnels correspondant à ces étapes.

L'énergie nucléaire et la problématique des déchets nucléaires

Enjeux et contexte international

Si, à court terme, la gestion des déchets nucléaires est un sujet fortement lié à un contexte national, les politiques de gestion des déchets d'ici trois ou cinq décennies, temps court vis-à-vis des constantes de temps de gestion des déchets, se situeront dans un contexte énergétique international qui pourra être très différent de celui d'aujourd'hui et marqué par le développement de futurs réacteurs et usines du cycle, selon l'état du marché mondial de l'uranium, et par les normes internationales de sauvegarde de l'environnement et de non-prolifération. D'où la pertinence d'évoquer ici les perspectives de l'énergie nucléaire au 21^{ème} siècle.

Au cours de ce siècle, la croissance de la population mondiale et la poursuite du développement de pays émergents (Chine, Inde, ...) pèseront fortement sur la demande mondiale en énergie, notamment en électricité. La satisfaction de cette demande par les énergies fossiles carbonées se heurtera à la baisse prévue des réserves en hydrocarbures, et à la crainte d'une dérive climatique résultant des émissions de gaz à effet de serre. Deux voies de substitution complémentaires s'ouvrent :

- L'utilisation des énergies renouvelables est une solution séduisante, compatible avec une gestion durable de l'environnement. Elle se heurte malheureusement à la limitation des ressources naturelles (surfaces cultivables, cours d'eau aménageables...) et au caractère intermittent et dilué de ces ressources qui concourt au coût élevé de l'énergie produite et les rend mal adaptées aux zones à forte densité de population.
- L'autre source d'énergie qui n'émet pas de gaz à effet de serre est l'énergie nucléaire. Elle fait appel à une ressource, l'uranium, qui, au regard des besoins industriels connus, ne connaît pas encore les mêmes limites de disponibilité que le pétrole ou le gaz. De plus, la valorisation de la majeure partie de l'uranium grâce à de nouveaux réacteurs rapides surgénérateurs serait capable de fournir des réserves de combustibles à très long terme.

La relative disponibilité actuelle de l'uranium s'explique par la modeste contribution de l'énergie nucléaire à la production d'énergie primaire du monde (0,6 Gtep, soit 6,5 %).

Les scénarios des instituts de prospective sur les sources d'énergie à l'horizon de 2050 offrent un large éventail de contributions possibles de l'énergie nucléaire :

- un **abandon** progressif de certains pays conduisant à un plafonnement de la production,
- le **statu quo** correspondant à un développement modéré (1,2 Gtep soit 10 % en 2050) qui aurait lieu dans les pays dépourvus de ressources énergétiques (France, Japon, Corée) et dans les pays émergents soucieux de diversification (Chine, Inde, Brésil, Russie).
- le **développement** avec une relance du parc nucléaire domestique américain, ainsi qu'en Chine et en Inde et la reprise du rôle de l'industrie américaine. Une production entre 2,5 et 4 Gtep soit 15 à 20 % de la demande d'énergie primaire en 2050, pourrait être atteinte.

Entre les deux extrêmes, se trouve une zone où apparaîtrait inévitablement une tension sur le marché de l'uranium¹. Cette tension peut induire une augmentation significative du prix du minerai d'uranium et donc du coût de l'accès à la ressource uranium 235.

¹ Les ressources accessibles ultimes sont évaluées aujourd'hui à 15Mt, équivalent à la quantité engagée à l'horizon 2050 avec un développement du nucléaire

Aussi, les producteurs d'électricité et les constructeurs de systèmes nucléaires envisagent-ils l'émergence d'un scénario de développement qui conduirait à des options permettant de mieux valoriser le combustible nucléaire et la ressource uranium. La voie qu'ils considèrent comme la plus efficace est le recyclage intégral des combustibles usés, qui permet d'extraire l'énergie de la totalité de l'uranium naturel. Elle met en oeuvre le cycle uranium-plutonium dans des réacteurs à neutrons rapides.

Ce recyclage implique d'avoir recours au traitement des combustibles usés, dans la perspective d'un développement du nucléaire au plan mondial, tout en continuant de mettre en oeuvre des technologies reconnues comme robustes vis-à-vis des risques de prolifération. Dans cet esprit, une réflexion internationale est en cours sur une quatrième génération de réacteurs nucléaires, qui pourrait apporter des réponses optimisées à ces questions.

Comment la prise en compte de cette perspective intervient-elle dans la politique de gestion à court et moyen terme des produits de l'aval du cycle électronucléaire ?

Si, à court terme, la prise en compte de cette perspective ne joue que très peu sur la gestion des déchets existants, elle intervient de façon forte dans la définition des programmes de recherches et de la stratégie de gestion des déchets radioactifs futurs :

- *à moyen terme*, elle implique de gérer les combustibles usés dans la perspective de maintenir ouverte cette option de développement du nucléaire et donc de préserver la possibilité d'utilisation du plutonium dans des générateurs rapides de 4^{ème} génération ;
- *à long terme*, elle place les études sur les possibilités de gestion optimisée des déchets dans un cadre élargi au système nucléaire dans son ensemble.

Les réacteurs qui seraient développés dans le cadre de cette 4^{ème} génération bénéficieraient ainsi, pour leur permettre de tirer le meilleur parti de l'uranium naturel, des possibilités nouvelles de fission du plutonium et éventuellement des actinides mineurs. Ils pourraient ainsi fournir une énergie nucléaire renouvelable, recyclant ses produits de fin de cycle pour valoriser durablement la ressource uranium-plutonium et permettant aussi d'optimiser la gestion des déchets ultimes.

Dans un tel contexte, il est vraisemblable qu'il faudra pouvoir aussi traiter les combustibles usés issus des réacteurs à eau sous pression, afin d'exploiter pleinement l'inventaire de matières valorisables qu'ils contiennent, notamment le plutonium concentré dans les combustibles MOX usés entreposés.

Pour la France, et dans l'hypothèse de la poursuite de l'exploitation à long terme de l'énergie nucléaire, la possibilité de tensions relatives au contexte énergétique et à l'approvisionnement en uranium justifie les recherches sur les réacteurs de 4^{ème} génération et des cycles de combustible associés. Il y a là une grande opportunité pour tirer partie de l'inventaire d'uranium appauvri ou séparé par le traitement, et du plutonium contenu dans les combustibles usés entreposés (i.e. concentré notamment dans les MOX usés), et ouvrir une possibilité nouvelle de transmutation des actinides mineurs, si cela est jugé efficace et bénéfique.

La spécificité française

La production d'énergie nucléaire

La France a tiré profit de l'utilisation de l'énergie nucléaire, qui assure 78 % de sa production d'électricité. Cela lui permet notamment :

- de disposer d'une électricité qui est actuellement l'une des plus compétitives d'Europe ;
- d'atteindre un taux d'indépendance énergétique voisin de 50 %, tout en préservant les ressources à long terme ;
- d'assurer une production électrique à l'origine de seulement 10 % des émissions nationales de gaz à effet de serre contre 40 % au niveau mondial ;
- de maîtriser la production des déchets associés à la production d'énergie électrique, conditionnés par vitrification sous des faibles volumes selon des standards reconnus internationalement.

La France n'a pas un besoin immédiat de croissance quantitative dans ce domaine, mais pour continuer à bénéficier de ces avantages, elle doit inscrire sa politique nucléaire dans un concept de développement durable compatible avec les différents scénarios mondiaux :

- Donner une solution à la gestion à long terme des déchets nucléaires ultimes, c'est-à-dire mettre en œuvre sur le plan technique et industriel les résultats des recherches et réflexions menées dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991.
- Poursuivre les développements visant à minimiser la production des déchets de haute et moyenne activité à vie longue.
- Améliorer l'utilisation de la matière première nucléaire pour faire face à une possible tension sur les ressources en uranium liée à une éventuelle relance du nucléaire au plan mondial, comme il vient d'être exposé.
- Maintenir un haut niveau de sûreté de ses installations nucléaires, en particulier des réacteurs de nouvelle génération, qui succéderont éventuellement au parc actuel de réacteurs et d'usines. Dès à présent, le projet de réacteur EPR s'inscrit dans cette perspective.
- S'associer aux recherches de développement des réacteurs de 4^{ème} génération pour lesquels des cahiers des charges exigeants, notamment sur les plans de la sûreté, de l'économie et de la résistance à la prolifération, ont été établis, et qui permettront à l'industrie française d'être présente en bonne place sur le marché mondial.

La gestion de l'aval du cycle et des combustibles usés

Ce rapport concerne évidemment la gestion des déchets radioactifs, mais celle-ci ne peut pas être séparée des recherches et développements concernant le cycle du combustible et les réacteurs futurs. Dès les années 60, des programmes de R&D ont été lancés pour conditionner les déchets radioactifs. En 2004, soit près de quarante ans plus tard, 13 000 colis de déchets vitrifiés environ ont été fabriqués en France (en comptant les services pour des clients étrangers), selon les standards de qualité définis par le CEA, bailleur de procédé, et l'exploitant industriel, et la production annuelle à La Hague est d'environ 600 colis (ou 120 m³). Ces colis sont des déchets ultimes destinés après leur entreposage à une solution de gestion pérenne. Ils apportent une garantie de tenue à très long terme, de quelques centaines de milliers d'années, sous un volume réduit et sont aptes à être stockés dans des conditions optimales.

La France dispose d'un important acquis technologique en matière de réacteurs nucléaires et de cycle du combustible, notamment la maîtrise industrielle du traitement des combustibles usés qui est la

pièce angulaire de toute stratégie de minimisation des déchets ultimes et d'utilisation durable des matières énergétiques. La France s'est engagée dans cette voie depuis le début du développement de l'énergie nucléaire et se place clairement en tête des autres pays dans ce domaine.

La génération actuelle de réacteurs à l'uranium enrichi et modérés et refroidis à l'eau sous pression a été mise en œuvre essentiellement durant les décennies 80 et 90. A ces réacteurs sont associées des usines du cycle, depuis l'enrichissement et la fabrication des combustibles jusqu'au traitement et au recyclage du plutonium sous forme de combustible MOX, qui ont atteint leur maturité industrielle et sont valorisables dans la durée.

Les déchets de haute et moyenne activité à vie longue qui sont produits à ce jour et le seront dans les prochaines décennies auront ainsi bénéficié des technologies industrielles à haut niveau de performances (minimisation de la radioactivité et du volume, confinement très performant sous forme vitrifiée). De même, les déchets anciens non conditionnés feront l'objet d'un traitement approprié pour les amener aux standards de confinement adaptés.

Parmi les matières produites dans les réacteurs et séparées dans l'industrie de l'aval du cycle, le plutonium est un contributeur majeur à la radioactivité à long terme, mais sous réserve de disposer de réacteurs nucléaires adaptés, c'est aussi une matière énergétique valorisable pouvant être recyclée et non mêlée aux déchets ultimes. Une première valorisation du plutonium a été mise en œuvre par l'utilisation en réacteur à eau sous pression de combustibles mixtes uranium et plutonium (MOX), dans un contexte marqué par le report de la filière rapide (arrêt de Superphénix).

Le traitement du combustible MOX utilisé est possible et le multirecyclage du plutonium dans les REP a été étudié sous la forme de combustible mixte plutonium et uranium enrichi (MIX ou MOX UE). Cependant l'efficacité et le gain sur l'inventaire radioactif de cette solution sont modestes, parce que la fission du plutonium s'accompagne d'une production accrue d'américium et de curium. Si cette solution était mise en œuvre, elle exigerait une modification coûteuse de l'outil industriel et induirait des pénalités en termes d'exploitation.

Par ailleurs, le plutonium constitue la matière énergétique de référence des réacteurs rapides de la future génération. On a choisi en France de maintenir l'inventaire de plutonium concentré dans les MOX utilisés, afin de préserver la possibilité de le réutiliser dans des conditions industrielles, en vue du lancement d'un parc de réacteurs à neutrons rapides de quatrième génération qui utilisent efficacement le plutonium.

Les combustibles MOX utilisés sont ainsi entreposés dans l'attente d'un traitement et d'un recyclage supplémentaire, selon les besoins futurs de plutonium nécessaire pour démarrer de futurs réacteurs rapides dans l'option d'une poursuite durable de l'énergie nucléaire. La quantité de plutonium séparé est maintenue à un niveau stable. L'inventaire cumulé de plutonium dans les combustibles utilisés se trouve ainsi réduit d'environ 30 %, et le plutonium résiduel est concentré in fine dans sept fois moins d'assemblages utilisés (MOX), sous un volume limité et en utilisant les capacités des piscines d'entreposage existantes. Cependant les combustibles MOX utilisés ont une émission thermique significativement plus élevée que celle des combustibles UOX utilisés (2 850 W au lieu de 1 220 W après 5 ans, 1 000 W au lieu de 200 W après 100 ans). Cette thermique plus active conduit à des durées d'entreposage sous eau des combustibles MOX utilisés après déchargement et avant traitement de 5 à 10 ans.

Quels scénarios possibles de production des déchets nucléaires en France ?

Compte tenu de l'expérience acquise et des résultats des recherches menées dans le cadre de la loi de 1991, plusieurs possibilités s'offrent pour l'avenir de l'énergie nucléaire en France. Les scénarios qui vont être présentés sont proches de ceux soumis à l'analyse multicritère menée sous l'égide du ministère en charge de l'industrie. Ce chapitre n'est pas un exercice de prospective de l'énergie nucléaire en France. Son objectif est de considérer différents scénarios qui ont une influence sur la gestion des combustibles usés et les possibilités de transmutation de certains déchets. Les perspectives de recherche sont en effet fonction des possibilités de mise en œuvre à des horizons raisonnables des résultats de ces recherches. Pour le contenu des recherches à venir, il s'agira de conforter les bases techniques permettant d'infléchir et d'optimiser la gestion des déchets et des matières selon des objectifs environnementaux.

Les scénarios sans renouvellement du parc nucléaire

Cette option est considérée ici à titre de cas d'école pour être complet dans l'étude des scénarios de gestion des déchets radioactifs. Les décisions éventuelles peuvent bien entendu concerner le parc actuel tout comme les parcs futurs. Dans tous les cas, il s'agit d'un arrêt « à l'allemande », c'est-à-dire que le parc existant à la date de la décision serait exploité jusqu'à une fin de vie conventionnelle des réacteurs.

Dans une hypothèse conventionnelle d'arrêt à 40 ans, la puissance du parc existant, qui est actuellement supérieure à 60 GW, tomberait ainsi sans renouvellement à 50 GW en 2020 et 10 GW en 2030 pour s'annuler en 2040. Les produits de l'aval du cycle (combustibles usés et déchets de moyenne activité) resteraient similaires à ceux actuellement produits, avec la vitrification des déchets HAVL et éventuellement des progrès technologiques dans le conditionnement.

Si les déchets vitrifiés et les déchets de moyenne activité sont logiquement destinés à une solution de gestion pérenne, le devenir des combustibles usés pose question, notamment au regard de leur éventuel traitement : en effet ce scénario de non renouvellement du parc remettrait en cause la politique nationale de gestion du plutonium, puisque le plutonium serait alors déclassé de matière première énergétique en déchet.

Il faut noter toutefois que les durées d'entreposage des combustibles usés imposées par la décroissance thermique avant stockage (plusieurs décennies pour les UOX et les MOX) laisse un temps de réflexion pour définir un stockage ou recréer une filière nucléaire. Que l'on considère le plutonium comme problématique à cause de sa toxicité potentielle ou comme une opportunité énergétique à cause de son aptitude à permettre le démarrage d'un parc de réacteurs à neutrons rapides (cycle uranium-plutonium), il reste que l'entreposage renfermera à terme un inventaire de plusieurs centaines de tonnes de plutonium au sein des combustibles usés.

Que faire des combustibles usés entreposés dans ce scénario de non-renouvellement du parc ?

Une première hypothèse serait le stockage direct des combustibles usés. Cette option est retenue actuellement par les Etats-Unis et la Suède. A ce titre, les études de stockage entreprises en France au titre de la loi de 1991 (axe 2) incluent, à titre conservatoire, des hypothèses en termes d'inventaires de combustibles usés (UOX et MOX) qui feraient l'objet d'un stockage direct.

Une autre hypothèse consisterait à résorber une partie du plutonium, soit par recyclage dans les REP avec des combustibles spéciaux, soit en développant et exploitant des réacteurs spécialement conçus

pour consommer le plutonium et éventuellement les actinides mineurs. Ce scénario exigerait des développements nouveaux et des investissements qui ne seraient pas cohérents avec une sortie du nucléaire. Il semble donc peu réaliste. D'autres modes de conditionnement peuvent être étudiés dans un tel scénario (par exemple traitement des combustibles usés, avec conditionnement du plutonium sous des formes adaptées).

Il est clair que les recherches et développements engagés dans le cadre de la loi de 1991 sur l'entreposage et le stockage des combustibles usés UOX et MOX font référence essentiellement aux scénarios sans renouvellement du parc nucléaire, ces combustibles constituant alors les matières finales. Il faut toutefois remarquer que dans les diverses options, le traitement et le conditionnement de ces matières, sans recyclage, pourrait garder un sens pour faciliter la gestion des déchets.

Les scénarios de renouvellement du parc nucléaire

Ces scénarios s'inscrivent dans une perspective de nucléaire ouvert. Ils impliquent à terme plus ou moins lointain, à quelques décennies près, une part accrue de production nucléaire et l'émergence d'ici la fin du siècle d'un parc de réacteurs à neutrons rapides aptes à valoriser plus complètement la ressource en uranium via le cycle uranium-plutonium. Dans ce cadre, ils peuvent permettre également d'inscrire la gestion des déchets dans une logique de progrès.

Le maintien de cette option énergétique confère un statut de ressource potentielle à l'inventaire de plutonium contenu dans les combustibles UOX et MOX usés, à hauteur des quantités qui seraient à mobiliser dans l'hypothèse de la mise en service d'un parc de RNR d'ici la fin du siècle (les études montrent que dans les deux scénarios évoqués ci après - mise en oeuvre des RNR Génération IV pour moitié du parc à partir de 2035/2040, ou à partir de 2080 - l'inventaire en Pu des combustibles usés, MOX en particulier, peut être utilisé, sans surplus, pour démarrer ces réacteurs).

Le premier scénario de maintien de l'option nucléaire en France prévoit le remplacement des réacteurs actuels par des réacteurs à eau sous pression dits de troisième génération.

Le scénario Génération III

Le remplacement des réacteurs du parc actuel permettra, à terme, de maintenir la production d'électricité nucléaire. Compte tenu des hypothèses actuelles de durée de vie des réacteurs existants, EDF envisage de commencer à renouveler son parc de réacteurs à l'horizon 2020 et souhaite étaler sur 30 ans ce renouvellement pour limiter les besoins annuels d'investissement et lisser la charge de construction.

Dans les conditions de maturité technologique et économique présentes, il n'est pas raisonnable, dans le contexte actuel, d'envisager de recourir à des réacteurs de génération IV avant 2035, et de disposer d'une série avant 2045. Le renouvellement à l'horizon 2020 des réacteurs actuels sera assuré par des réacteurs de génération III, comme EPR ou AP1000, qui présentent, de surcroît, des progrès significatifs en termes de compétitivité et de sûreté. Ces réacteurs à eau utilisent les mêmes combustibles que les réacteurs actuels, avec des taux de combustion et des possibilités de "moxage" accrues. Les usines aval et amont restent donc les mêmes, éventuellement adaptées. La date de lancement de la série industrielle et le rythme de mise en service seront déterminés par la durée de vie réelle du parc existant et la puissance du parc nucléaire à maintenir ou à développer.

Dans un tel scénario envisagé par EDF (maintien d'un parc de puissance équivalente), le calendrier serait le suivant : construction d'un prototype d'EPR qui sera mis en service en 2012, décision d'engagement de la série vers 2015 et mise en service industrielle possible vers 2020-2025. L'introduction aurait lieu au rythme de 2 GW par an, accompagnant l'arrêt progressif des réacteurs actuels sur une durée de 30 ans. Le remplacement des réacteurs actuels se terminerait vers 2050, leur

durée de vie moyenne escomptée atteignant environ 48 ans. La mise en service des réacteurs Génération III s'arrêterait, soit par la sortie du nucléaire (déjà évoquée), soit quand le déploiement des réacteurs de la génération suivante deviendrait justifié, soit après remplacement du parc actuel et atteinte du niveau de puissance adapté. Cette hypothèse basée sur un remplacement du parc actuel par des réacteurs de 3^{ème} génération (EPR ou AP1000) constitue un scénario du type Génération III.

Dans ce scénario, les produits de l'aval du cycle resteront peu différents de ceux du parc actuel et les usines de traitement resteront dans la continuité des usines actuelles (jouvence, adaptations nécessaires éventuelles, prise en compte des progrès technologiques). En particulier, la poursuite de la stratégie de traitement-recyclage permet de limiter l'accroissement de la quantité de combustibles usés en attente, de procéder à la vitrification des déchets HAVL, avec une quantité qui reste limitée de combustibles MOX usés en attente (environ 5000 à 6000 tML à l'horizon 2050/60, à situer par rapport aux capacités d'entreposage sous eau disponibles de l'ordre de 18000 tML). Le plutonium contenu reste disponible pour un démarrage d'un parc de réacteurs rapides à l'horizon 2080, sans surplus, selon le rythme de mise en service de réacteurs RNR souhaité (et sachant que ces réacteurs RNR sont capables également de consommer et réguler la quantité de plutonium nécessaire une fois en exploitation ainsi que de consommer de l'américium s'il est séparé lors du traitement des combustibles).

Sous réserve d'une adaptation éventuelle de la capacité d'entreposage sous eau des MOX usés, ce scénario qui envisagerait un déploiement de réacteurs rapides à l'horizon 2080 s'inscrit naturellement dans la poursuite de la stratégie actuelle, avec mise en service progressive de réacteurs de type EPR, maintien dans la durée des usines du cycle (jouvence...) et entreposage puis stockage des déchets vitrifiés HAVL. Les problématiques ne diffèrent pas fondamentalement du scénario suivant de développement mixte Génération III - Génération IV d'ici à 2050.

Une variante de ce scénario serait aussi d'envisager la mise en œuvre de la séparation de l'américium, afin de l'incinérer dans des réacteurs types ADS (Accelerator Driven Systems), si cela était jugé faisable et intéressant.

Le scénario Génération III et Génération IV

Ce scénario fondé sur l'émergence d'ici 2050 de réacteurs de génération IV comporte des incertitudes, puisque les diverses technologies envisagées ne sont pas encore toutes accessibles. Aussi la mise en service des réacteurs de génération IV ne pourrait pas avoir lieu avant 2035-2045. Ceci impose donc une première phase transitoire utilisant des réacteurs de génération III. Comme le précédent, ce scénario correspond à un accroissement de la production nucléaire mondiale dans la deuxième moitié du siècle. L'engagement de la filière Génération IV est fonction de différents facteurs :

- Tension sur le marché de l'uranium à un horizon inférieur à la durée de vie des centrales de génération III (50 ou 60 ans), ce qui appelle la mise en service progressive de réacteurs valorisant plus complètement l'uranium : réacteurs à taux de combustion élevé (voire à taux de conversion accru) ou iso ou sur-générateurs à neutrons rapides basés sur le cycle uranium-plutonium.
- Volonté de réduire les quantités d'actinides mineurs à mettre au stockage pour réduire l'activité à long terme des déchets, si cela est jugé efficace et intéressant. Ces deux facteurs peuvent intervenir dans la sureté, l'architecture, l'emprise et le coût d'investissement du stockage géologique.

Il est évident que la génération IV ne sera pas mise en œuvre si ces réacteurs ne sont pas économiquement compétitifs dans le contexte de prix de l'énergie à cette époque. On remarque la difficulté de la prise de décision qui implique l'appréciation de données économiques (prix de l'uranium et prix de l'énergie) sur toute la durée de vie des réacteurs.

Un exemple de scénario Génération III-Génération IV envisagé par EDF

Le scénario type envisagé par EDF prévoit le maintien pendant tout le siècle d'un parc de production nucléaire équivalent à la puissance actuelle de 60 Gigawatts.

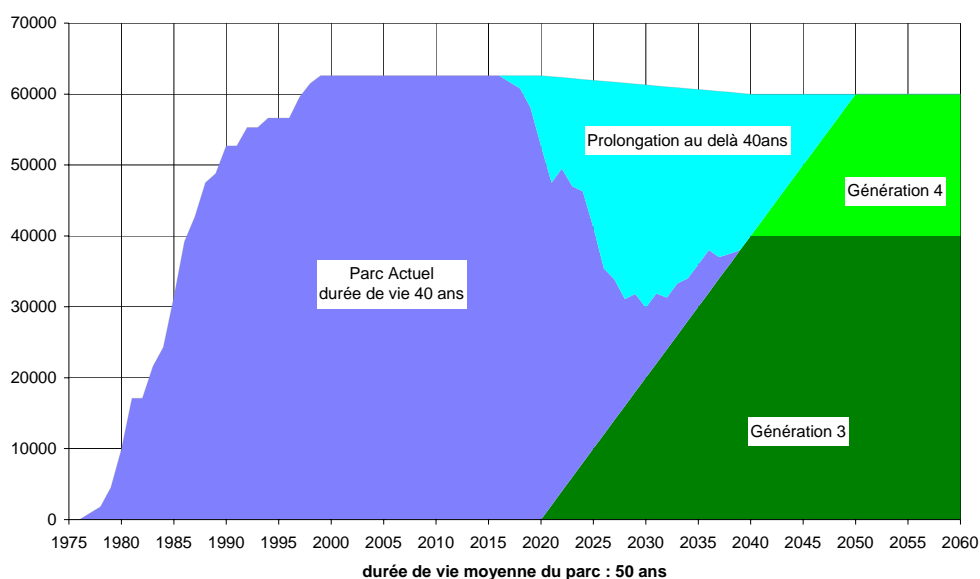
Comme indiqué précédemment, dans ce scénario, la mise en service industrielle des réacteurs de génération III pourrait avoir lieu à partir de 2020-2025 au rythme de 2 GW par an, accompagnant l'arrêt progressif des réacteurs actuels.

Les réacteurs de génération IV seraient mis en service à compter de leur émergence vers 2040 en remplacement progressif des réacteurs actuels. EDF a aussi considéré des mises en œuvre plus tardives résultant de raisons techniques ou économiques (cf. premier scénario ci dessus: tension sur le marché de l'uranium et émergence de réacteurs Génération IV à l'horizon 2080). Dans tous les cas, ces scénarios font apparaître un besoin de plutonium pour démarrer un parc rapide équivalent au parc actuel.

Les réacteurs de génération III arriveraient en fin de vie à compter de 2080 (durée de vie de 60 ans) et seraient eux aussi remplacés par des réacteurs de génération IV. Le parc serait composé complètement de réacteurs de génération IV à l'horizon 2100.

Exemple de scénario possible de renouvellement

Figure 1
Renouvellement à 60000MW étalé sur 30 ans (2020-2050)
Rythme de construction nucléaire: 2000MW/an



Conséquences du scénario mixte Génération III-Génération IV sur la gestion des déchets

Dans ce scénario, les réacteurs actuels et les réacteurs de génération III vont générer les produits de l'aval du cycle qui ont déjà été évoqués. Les réacteurs de génération IV vont appeler le développement d'un cycle de combustible spécifique selon les options qui seront retenues : un procédé identique à l'existant (Purex) s'il s'agit de recycler le plutonium (les usines actuelles pouvant être utilisées pour des combustibles associés à des réacteurs du type RNR à sodium), ou un procédé innovant pour permettre en plus une séparation des actinides mineurs, associée à leur transmutation.

L'intérêt de ce scénario pour la gestion des déchets résulte de son potentiel pour une gestion efficace du plutonium (cycle uranium-plutonium) d'une part, et pour une gestion optimisée des actinides mineurs, d'autre part.

Les spectres de neutrons rapides sont mieux adaptés que les spectres de neutrons thermiques à la transmutation des actinides mineurs. La transmutation des actinides mineurs dans les réacteurs à eau, bien que peu efficace apparaît néanmoins réalisable en principe sous certaines conditions. L'une d'entre elles est un sur enrichissement du combustible pour compenser l'effet « poison » des actinides mineurs. Les conséquences radiologiques d'un recyclage des actinides mineurs peuvent par ailleurs être importantes et doivent être évaluées de manière détaillée au regard d'une pratique industrielle.

La conclusion des recherches est que l'utilisation des réacteurs à eau pour la transmutation des actinides mineurs, ou au moins de certains d'entre eux, si elle est envisageable dans son principe, ne peut constituer une solution efficace pérenne. Les réacteurs à neutrons rapides offrent une plus grande souplesse d'utilisation et autorisent des performances de transmutation supérieures. Ils peuvent constituer la solution recherchée de consommation nette des actinides mineurs et de stabilisation de leur inventaire.

Le scénario Génération III-Génération IV et la gestion du plutonium

Comme il a été dit, un choix majeur de la politique nucléaire française est de maintenir l'option nucléaire ouverte à long terme et en conséquence, dans le cadre de la stratégie de traitement-recyclage, de considérer le plutonium présent dans les combustibles usés comme une réserve de matières premières fissiles ; ceci conduit à entreposer des combustibles usés en attente (UOX en attente de traitement et MOX usés), ainsi que l'uranium appauvri et de l'uranium de traitement.

Le développement au sein de la génération IV de réacteurs consommateurs ou iso-générateurs de plutonium va permettre de tirer profit de ces inventaires de plutonium contenus dans les combustibles usés. La politique de traitement-monorecyclage, avec entreposage de combustibles usés en attente et entreposage des déchets HAVL vitrifiés avant stockage, pourra se poursuivre pendant la phase initiale de ce scénario.

Après traitement des combustibles usés, le plutonium sera consommé par les réacteurs de génération IV, notamment pour réaliser leur chargement initial. L'inventaire de plutonium résiduel produit par les réacteurs REP serait nécessaire et juste suffisant pour la mise en service d'un parc de réacteurs Génération IV équivalent au parc actuel, dans toutes les hypothèses de calendrier de déploiement (2045 ou 2080), moyennant certaines contraintes ou délais imposés.

Par la suite, le caractère iso-générateur de plutonium de ces réacteurs devrait permettre une production permanente d'électricité en ne consommant que de l'uranium « fertile » : uranium appauvri, uranium de traitement, extraits de l'entreposage, et ultérieurement uranium naturel.

Par ailleurs, à des horizons de temps de l'ordre du siècle ou plus, d'autres filières économisant les ressources et produisant moins d'éléments transuraniens, comme celles fondées sur le cycle $^{232}\text{Th}/^{233}\text{U}$, pourront être envisagées.

Le scénario Génération IV et la gestion des actinides mineurs

Le scénario de séparation poussée répond à une demande visant à optimiser la gestion des actinides mineurs. La transmutation des actinides mineurs aurait ainsi pour objectif de réduire l'activité à long terme et la thermicité des déchets ultimes, si cela est jugé intéressant. Ces deux facteurs peuvent en effet avoir un impact important vis-à-vis de la sûreté, de la conception et du coût du stockage géologique.

Ce scénario peut soit venir en option d'une filière intégrée cycle du combustible et réacteurs à neutrons rapides de génération IV, soit faire appel à des réacteurs dédiés ADS avec leur cycle du combustible. La mise en service de ce scénario est contrainte par la durée de développement des procédés du cycle, mais aussi par l'émergence, à terme, des réacteurs Génération IV ou des ADS susceptibles d'accepter les actinides produits et de les transmuter avec une efficacité suffisante.

Un scénario de traitement poussé peut être attaché au scénario type de réacteurs futurs présenté par EDF, dans l'hypothèse où ces réacteurs électrogènes de génération IV seraient à neutrons rapides et pourraient intégrer une option de transmutation. Le traitement des combustibles MOX entreposés pourrait débuter vers 2030 pour produire le plutonium nécessaire au démarrage de ces réacteurs. La séparation poussée des actinides mineurs, qui permet d'éviter un contenu accru en américium dans les déchets issus des MOX, voire même la production de colis de déchets vitrifiés "allégés", serait alors entreprise soit simultanément (ce qui implique leur conditionnement, leur entreposage intermédiaire et leur reprise pour traitement et fabrication de combustibles), soit ultérieurement, lorsque les réacteurs rapides permettant la transmutation des actinides mineurs ainsi séparés seraient effectivement disponibles, en s'intégrant en flux dans le cycle industriel adapté.

Après une phase de transition de plusieurs décennies, on pourrait arriver à un système nucléaire stabilisé : les systèmes de 4^{ème} génération à neutrons rapides, après avoir résorbé le stock des actinides mineurs séparés lors du traitement des MOX usés, permettraient un recyclage permanent de ces actinides, assurant ainsi une gestion bouclée d'une partie des déchets à vie longue de l'aval du cycle. Cela permettrait, en supposant une efficacité maximale, de réduire à quelques milliers d'années le temps nécessaire pour que la radio-toxicité des déchets vitrifiés redevienne comparable à celle du minerai d'uranium initial utilisé.

Une telle option, qui peut présenter par ailleurs des impacts significatifs sur les installations du cycle (séparation poussée, fabrication du combustible, réacteurs...) devra faire l'objet d'une évaluation globale afin d'en peser l'efficacité réelle, les avantages apportés (optimisation du stockage), et les inconvénients générés (bilan coût bénéfice).

Les autres scénarios avec poursuite de la production nucléaire comportent des variantes dans le choix des réacteurs Génération IV et dans leur calendrier d'introduction. On peut citer l'introduction plus tardive des réacteurs Génération IV, le choix éventuel d'un système « double strate » associant REP et RNR, ou REP et ADS, le développement de nouveaux procédés de traitement, tel la pyrométallurgie. Ces scénarios sont neutres vis-à-vis des modes de stockage et de l'entreposage, tant que le plutonium conserve son statut d'option de matière première énergétique.

Les premiers résultats de l'étude du ministère de l'industrie montrent qu'il n'y a pas d'intérêt à mettre en œuvre la séparation poussée en 2020 en avance sur la disponibilité des réacteurs incinérateurs pour la transmutation. L'évaluation du bénéfice de la transmutation des actinides mineurs pour la sûreté et l'économie du stockage géologique, ainsi que celle du coût et des contraintes de ces procédés méritent d'être approfondies.

Il est enfin important de noter que, parmi les scénarios réalistes envisageables, il n'apparaît jamais de situation où la réduction de la quantité et de la radio-toxicité à long terme des déchets issus de la production d'énergie nucléaire par la voie de fission, serait si performante qu'on pourrait faire l'économie d'un stockage géologique des déchets ultimes. Un stockage géologique profond apparaît donc comme le complément de toute solution avec ou sans tri et recyclage des déchets permettant de gérer la longue durée en bénéficiant des échelles de temps de confinement géologique.

Les acquis de la recherche

En France, les recherches sur la gestion des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue ont été menées essentiellement par l'Andra et le CEA, COGEMA, Framatome - ANP, EDF, le CNRS et les Universités. L'ensemble de ces organismes regroupe les producteurs et les gestionnaires de déchets, les industriels et les organismes de recherche.

Les déchets de haute activité (produits de fission et actinides mineurs) sont conditionnés par vitrification. Cette technique est issue de programmes de R&D ayant plus de 20 ans, puisqu'ils ont débuté avant la loi de 1991, et offre un confinement sûr à long terme. Toutefois, à cette date, les premiers ateliers industriels venaient juste de démarrer, avec des objectifs très ambitieux en terme de minimisation des volumes. Les programmes menés à bien dans le cadre de la loi ont permis d'atteindre ces objectifs, et même de les dépasser, en intégrant un accroissement de 50 % des taux de combustion des combustibles et en vitrifiant les flux d'effluents autrefois bitumés.

Historiquement, les déchets de moyenne activité, directement liés à l'électronucléaire, étaient produits sous un grand nombre de formes (plusieurs dizaines). Actuellement, dans la suite des travaux menés dans le cadre de la loi de 1991, les déchets de la génération présente ne concernent plus que les éléments de structure des combustibles (gainages, grilles et embouts), qui sont compactés à haute pression, et des flux minoritaires de déchets technologiques (compactés ou cimentés). Cette réduction du volume des déchets rapportés à l'énergie électrique produite est très significative, atteignant un facteur compris entre 5 et 10 par rapport aux prévisions initiales et à la génération précédente. Elle est largement à porter au crédit des actions "Puretex" engagées dans le cadre de la loi de 1991.

Tous les déchets existants, conditionnés ou après conditionnement, sont destinés après leur entreposage à une solution de gestion pérenne. Ceci résulte tant de l'absence d'intérêt d'éventuelles opérations de récupération des matières, que de la qualité de leur confinement qui permet d'envisager leur stockage en toute sûreté.

Un inventaire national des déchets a été établi par l'Andra. Il donne une description précise des déchets et de leur nature.

Les résultats obtenus après quinze années de recherches permettent de tirer des conclusions importantes :

Pour les déchets ultimes issus du parc actuel (produits de fission et actinides mineurs vitrifiés notamment), il s'est établi un consensus international des experts au cours des quinze années de recherche de la loi de 1991 pour noter que **le stockage géologique** constitue une solution sûre. Les recherches sur l'argile de l'est du bassin parisien ont porté leurs fruits avec la construction d'un laboratoire souterrain. D'après les études scientifiques menées par l'Andra dans des laboratoires souterrains étrangers et sur le site de Bure, travaux qui ont notamment fait l'objet d'une évaluation internationale (OCDE/NEA), il ressort que l'argile se présente comme un milieu favorable. La couche épaisse trouvée sur le site étudié présente, sur une surface de 200 km², des propriétés sismologiques, hydrogéologiques et géochimiques très intéressantes qui la rend favorable pour confiner la radioactivité. Après l'étude de la faisabilité de principe, une nouvelle phase consacrée à qualifier un site et à définir un projet industriel optimisé pourrait aboutir en 2015. A terme, l'ouverture d'un site industriel serait envisageable à un horizon au-delà de 2025.

L'Andra a fondé son programme de recherche sur les possibilités de stockage dans le granite sur des collaborations avec ses homologues étrangers disposant de laboratoires dans cette roche. En l'absence de données détaillées se référant à un site déterminé en France, le dossier remis en 2005 évalue l'intérêt général du milieu granitique, sans se prononcer sur la faisabilité du stockage sur un site

donné. Néanmoins, les travaux conduits ces dernières années ont permis de proposer des architectures adaptées au contexte granitique, et d'évaluer les différentes méthodes de caractérisation et de modélisation du granite et de sa fracturation, méthodes qu'il s'agirait de mobiliser dans le cadre de la reconnaissance d'un site. Les dossiers correspondants seront soumis, comme pour l'argile, à une évaluation sous le double point de vue scientifique et de la sûreté. Compte tenu des connaissances acquises aujourd'hui, on peut penser que le granite français ne présente pas, vis-à-vis du stockage, d'avantage déterminant par rapport à l'argile.

L'**entreposage** sûr des déchets est une réalité industrielle bien établie. La possibilité d'entreposer de façon sûre et robuste dans la durée les matières radioactives est acquise et apporte un élément utile de flexibilité dans la mise en œuvre des stratégies de gestion de l'aval du cycle. L'entreposage bénéficie du retour d'expérience considérable déjà acquis avec les entrepôts industriels opérationnels en France et à l'étranger qui assurent d'ores et déjà cette fonction de flexibilité. Les progrès, obtenus pendant la période de la loi de 91, dans la conception des entrepôts de dernière génération permettent d'atteindre des durées de vie techniques de cinquante à cent ans. Si, au terme de la loi, une décision de gestion en entreposage de longue durée devait être prise, les différentes voies possibles : entreposage industriel classique renouvelable, entreposage de durée séculaire, site d'entreposage en surface ou en sub-surface seraient toutes techniquement faisables. Ces choix devront prendre en compte, le moment venu, les besoins des industriels, notamment par rapport aux capacités existantes et aux échéanciers correspondants. Les conditions de mise en entreposage des matières devraient certainement être assorties des garanties techniques, calendaires et financières concernant leur reprise, dans une organisation à définir. Cependant, l'entreposage de longue durée, parce qu'il impose des contraintes de surveillance et de maintenance aux générations futures, n'apporte pas les garanties d'une solution robuste de confinement des déchets ultimes sans besoin d'une intervention humaine.

Des résultats ont été obtenus sur le comportement à long terme des colis en vue de l'entreposage ou du stockage. Il est acquis notamment que les colis de déchets vitrifiés apportent une garantie de tenue à très long terme, de quelques centaines de milliers d'années, qui contribue à la sûreté de leur entreposage et permet d'envisager leur stockage dans de bonnes conditions.

Enfin, des programmes très importants ont conduit à montrer la possibilité à plus long terme de réduire la quantité et la toxicité radioactive des déchets à vie longue par **séparation poussée puis transmutation des actinides mineurs** dans de futurs réacteurs rapides. En particulier, la faisabilité scientifique de la transmutation de l'américium (avec des combustibles oxydes) a été démontrée en RNR sodium. Les compléments de R&D en cours viendront enrichir et consolider ces résultats. Dans la perspective de systèmes futurs "réacteurs et cycle", il y aura lieu notamment d'évaluer les éléments concernant la faisabilité industrielle et l'efficacité de telles options de transmutation (rendements, coûts, perspectives temporelles de mise en œuvre...), l'impact sur les installations industrielles du cycle (usines et réacteurs) et leur gestion, et les valeurs ajoutées apportées, en particulier sur la conception du stockage (emprise, thermique long terme...). Sur ces bases, on peut considérer qu'il y aura lieu de compléter ces axes de recherches sur la période 2006-2015 de façon à disposer à terme de suffisamment de données techniques et économiques pour être à même d'évaluer les décisions à prendre sur les modes de gestion optimisée des déchets à vie longue et sur la façon de mieux évaluer l'intérêt et l'efficacité réelle de telles options (bilan coût-bénéfice).

En particulier, pour aller plus loin dans les possibilités de réduction de la toxicité à long terme des déchets, il serait nécessaire d'entreprendre une séparation poussée c'est-à-dire de retirer un ou plusieurs autres actinides (américium, curium et neptunium) des déchets du traitement des combustibles usés. Des avantages pourraient être liés à la réduction de l'inventaire radiotoxique ou à des raisons d'optimisation d'un éventuel stockage. Les colis de déchets vitrifiés « allégés » ainsi produits pourraient devenir dans le futur les nouveaux déchets ultimes destinés au stockage géologique. Les résultats acquis ont montré la faisabilité scientifique (et bientôt technique) de cette séparation poussée en prolongement du procédé PUREX, mis en œuvre actuellement à La Hague.

Que faire des actinides mineurs qui seraient ainsi séparés?

Le multirecyclage des actinides mineurs par dilution dans les combustibles des REP apparaît à la fois, non approprié techniquement, peu efficace et peu réaliste : il aurait des impacts lourds sur le cycle (radioprotection notamment) et nécessiterait des modifications importantes de l'outil industriel actuel ; de plus, il ne permettrait pas de stabiliser globalement leur inventaire dans le cycle. Le recyclage est par contre possible dans les systèmes à neutrons rapides développés dans le cadre de la coopération internationale Génération IV, selon une option dans laquelle les actinides mineurs entreposés après séparation (et après un éventuel entreposage temporaire) seraient recyclés avec le plutonium dans ces systèmes de 4^{ème} génération. Il en résulte que la mise en œuvre nécessairement conjointe de la séparation poussée et de la transmutation est subordonnée à la disponibilité des réacteurs à neutrons rapides qui, comme on l'a vu, pourraient émerger au plus tôt autour de 2040. Dans le cadre d'une filière spécifique de combustibles à développer pour la génération IV, le traitement de ces combustibles, au-delà du procédé Purex, pourra inclure une option de séparer les actinides (à recycler pour transmutation) des produits de fission (à vitrifier et à stocker), tout en continuant à présenter des caractéristiques de résistance au risque de prolifération.

Les études ont aussi porté sur les réacteurs spécialisés pour la transmutation. Notamment, le réacteur hybride composé d'un réacteur sous-critique activé par un accélérateur de protons à haute énergie (dit ADS), conviendrait pour traiter des fortes charges d'actinides mineurs, avec la caractéristique que ces matières ainsi traitées pourraient ainsi sortir du cycle électrogène. Les études de faisabilité de ces systèmes nécessiteront d'être poursuivies.

Les recherches après 2006

Les décisions qui seront prises en 2006 par les pouvoirs publics conduiront à des choix sur les recherches à poursuivre ou entreprendre en priorité pour accompagner leur mise en oeuvre industrielle, dont la programmation devra être alors détaillée. Dans l'état actuel, il n'est pas possible de préjuger de ces choix. Toutefois, comme il a été dit, des recherches ou des développements sont incontournables, soit qu'ils concernent la gestion des déchets existants ou engagés, soit qu'ils portent sur des technologies de base communes à toutes les voies de gestion qui pourront être décidées. Il est donc possible de présenter des grandes lignes assez réalistes sur les recherches à mener dans la décennie suivant les décisions de 2006 et la mise en place des outils réglementaires pour leur mise en oeuvre.

Sans préjuger de ces choix, quelques conclusions fortes peuvent être tirées dès à présent à partir des résultats des recherches de la loi de 1991.

Ce programme de recherche a obtenu des résultats à la hauteur des enjeux qui lui étaient assignés. Certains sont remarquables et cités en exemple par de nombreux pays étrangers qui portent un vif intérêt aux choix que la France fera en 2006. Ces résultats montrent que des solutions de gestion existent et doivent permettre d'aboutir au choix d'une solution de référence et à l'engagement de sa mise en oeuvre.

En conséquence, le passage en phase industrielle de certaines des solutions étudiées est possible dès 2006, tout d'abord en ce qui concerne les déchets existants.

L'entreposage de longue durée est techniquement faisable. Il pose toutefois deux questions spécifiques. D'une part, le besoin industriel de disposer d'entrepôts conçus d'emblée pour la longue durée n'est pas avéré. D'autre part, la gestion par la société de tels entrepôts, sur des durées longues, supposerait de parier sur le maintien des infrastructures techniques, et sur la stabilité des organisations sociales et réglementaires sur ces durées.

Pour ce qui concerne les déchets du futur, la logique par axe de la loi de 91 doit être reconsidérée pour faire place à une approche par systèmes nucléaires complets. On constate en particulier que ni la séparation – transmutation, ni l'entreposage de longue durée ne peuvent constituer à eux seuls une solution de gestion des déchets à long terme. Si ces modalités de gestion étaient retenues, il faudrait en tout état de cause les associer à un stockage (à un terme à décider) et optimiser l'ensemble en prenant en compte les performances et les contraintes des systèmes futurs.

Si les questions de faisabilité des solutions possibles ont nettement progressé, il reste à mener des évaluations d'ensemble (bilans) des techniques qui pourraient être mises en oeuvre ou des stratégies complètes envisageables. Ces bilans devraient notamment être menés à bien pour s'assurer que les programmes jugés indispensables à terme (par exemple le stockage) vont vers une optimisation industrielle. A plus long terme, ils concernent au premier chef les orientations associées à la séparation-transmutation des actinides mineurs.

Stricto sensu, la loi n'appelle que des décisions concernant la gestion des déchets existants ou engagés. Cependant les recherches doivent en outre préparer les étapes suivantes de développement des systèmes nucléaires, susceptibles de répondre aux défis issus de la conjoncture mondiale.

La première étape des recherches après 2006 sera de conforter dans la durée le bien-fondé des options de gestion des déchets de haute activité et à vie longue engagées aujourd'hui, avec les outils de la génération actuelle et les progrès déjà apportés.

Une deuxième étape devrait porter donc sur les évolutions des outils industriels - réacteurs et cycle de la génération future - et sur les possibilités supplémentaires d'optimisation globale qu'ils pourront apporter, avec une évaluation raisonnée de leurs avantages et inconvénients (bilan coût-bénéfice).

Recherches pendant la période 2006 – 2015

Les résultats des recherches dans le cadre de la Loi du 30 décembre 1991 permettent de proposer aux pouvoirs publics les grandes lignes suivantes de politique scientifique et technique pour la poursuite des recherches et développements :

- La démonstration scientifique de la faisabilité du stockage géologique dans l'argile paraissant acquise, le principe du stockage géologique serait proposé comme une option de référence aux pouvoirs publics, pour compléter le dispositif industriel existant.
- Une veille a été maintenue sur l'étude du stockage dans le granite. L'étude du stockage dans d'autres milieux géologiques (dont le granite) devrait être poursuivie à l'état de veille technologique, au moins jusqu'en 2010, pour disposer d'éléments d'appréciation complémentaire en parallèle des travaux sur l'argile.
- Les recherches et développements concernant l'entreposage de longue durée ont débouché sur la faisabilité de plusieurs modalités techniques : construction d'entrepôts industriels conçus d'emblée pour la longue durée, reconstruction à l'identique de concepts "classiques". Par ailleurs, la conception des entrepôts récents a profité d'une démarche de progrès continu et les entrepôts industriels de dernière génération, reconductibles dans le temps sous surveillance, ont montré leur grande durabilité. Ces travaux n'ont toutefois pas apporté d'arguments nouveaux concernant l'incertitude sociétale de ce mode de gestion pour des durées au-delà du siècle. L'intérêt industriel de l'ELD n'est lui non plus pas avéré. Ainsi, à ce jour, l'entreposage demeure un moyen de gestion industrielle de transition entre les opérations du cycle du combustible. Demain, en fonction des décisions, il permettra d'assurer le refroidissement des déchets thermiques avant un éventuel stockage géologique. Les recherches dans ce domaine doivent être considérées comme globalement achevées et ne seront donc pas poursuivies après 2006. En effet, si une décision était prise, elle concernerait un projet et relèverait du domaine de l'ingénierie.
- Les filières séparation – transmutation ne peuvent pas être mises en œuvre en dehors de l'usage de nouvelles générations de réacteurs, soit réacteurs électrogènes à neutrons rapides, soit réacteurs dédiés type ADS, dont l'exploitation ne pourra pas avoir lieu avant 2040. Des résultats remarquables ont été obtenus sur la séparation des actinides. La poursuite des travaux sur ces filières doit être coordonnée avec le développement des réacteurs qui pourraient assurer la transmutation des actinides et des installations du cycle correspondantes, au-delà de la génération d'usines actuelles et en examinant l'ensemble des impacts technico-économiques de telles options. Les recherches sur la séparation poussée et la transmutation des produits de fission peuvent être ramenées au rang de veille technique, du fait des difficultés ou impossibilités techniques à les séparer en quantité significative, produire des cibles et transmuter ces éléments, et bien qu'il s'agisse là, pour certains d'entre eux, des éléments les plus mobiles à long terme en conditions de stockage.
- De même, dans le cadre de l'option de maintien du nucléaire ouvert, les questions concernant l'approvisionnement futur à long terme en uranium conduisent à garder ouverte l'option de réacteurs électrogènes futurs à neutrons rapides, donc à poursuivre la politique de gestion de l'inventaire du plutonium, concentré dans les combustibles MOX usés entreposés en attente, en tant qu'option de ressource énergétique. Cependant la possibilité d'un scénario d'arrêt progressif du nucléaire (non renouvellement du parc), ou la possibilité d'options différentes, conduirait à poursuivre, en seconde priorité, un approfondissement des connaissances et technologies concernant l'entreposage et le stockage géologique direct des combustibles usés (UOX et MOX) pour : (i) l'obtention d'une bonne

connaissance de leur comportement de long terme ; (ii) la faisabilité de principe de leur prise en charge dans un stockage en couches géologiques profondes et les conditions associées. Notons que dans un scénario d'arrêt du nucléaire, cette voie ne serait pas la seule gestion possible : un traitement avec conditionnement des matières pouvant aussi être envisagé pour bénéficier de colis aux standards de confinement comparables à ceux de la stratégie actuelle.

Ces diverses considérations amènent à suggérer une structuration en grands programmes qui pourraient sous-tendre l'effort de recherche des années à venir. Ils sont présentés dans la suite du texte.

Un programme "Stockage géologique, entreposage, et conditionnement"

Ce programme de développement répond au tronc commun de tous les scénarios, qu'ils soient d'abandon ou de poursuite des activités nucléaires.

Il serait orienté vers le choix d'un site et la conception et la réalisation industrielle d'un stockage géologique capable de recevoir les déchets à vie longue qui ne sont pas susceptibles d'être stockés en surface ou en subsurface. Il devrait donner la priorité aux déchets à haute activité vitrifiés et aux déchets de moyenne activité. Au sein de ce programme, les études sur « le stockage géologique et l'entreposage », « le stockage des combustibles usés », ainsi que « le conditionnement des déchets et leur comportements à long terme », pourraient faire l'objet de sous-programmes de recherche distincts.

- La poursuite du développement du stockage géologique dans l'argile serait le cœur du programme de recherches durant cette période. Les travaux, à vocation de soutien à un projet industriel, porteront sur :

- *Dans une première période*, une phase de développement, d'optimisation et d'études détaillées du stockage dans l'argile conduirait à un avant-projet. Cette phase devrait notamment se terminer par une proposition de site d'implantation vers 2010. Cette phase porterait notamment sur l'optimisation de la conception et du dimensionnement du stockage. Il s'agirait notamment de réaliser des démonstrateurs technologiques permettant de tester les différents procédés à mettre en œuvre. Dans ce cadre les études d'ingénierie sur l'exploitation du stockage prendraient une part importante. De même, pour asseoir certains choix conceptuels, il est nécessaire de mieux comprendre le comportement à long terme de la roche (fluage, évolution de la zone affectée par le creusement, ...) ainsi que celui des géomatériaux introduits dans le stockage ou l'effet des gaz de corrosion. Ces travaux porteraient aussi sur la modélisation des phénomènes et la fiabilisation des données ; en particulier les données à acquérir à partir des expérimentations in situ permettraient de retenir des hypothèses moins prudentes, voire pessimistes, que celles actuellement prises en compte. Par ailleurs, le programme de simulation numérique devrait être poursuivi afin de disposer d'un outil performant et adapté à la conception détaillée et au suivi d'une installation de stockage, capable d'intégrer les phénomènes couplés thermo-hydro-mécaniques et chimiques à mesure de leur compréhension.

- *Dans une seconde période*, après approbation de l'avant-projet par les pouvoirs publics, la poursuite des études détaillées et la rédaction des dossiers de sûreté devraient aboutir vers 2015 au projet final. L'articulation entre l'entreposage puis la mise en stockage des déchets B et des déchets C, sans oublier les phases de démonstrations préalables pour ces différentes catégories de colis, nécessiterait une analyse approfondie prenant en compte les aspects non seulement scientifiques et techniques, mais aussi économiques (coûts de construction et d'exploitation).

- L'étude du stockage dans d'autres horizons géologiques (dont le granite) devrait être poursuivie à l'état de veille technologique, au moins jusqu'en 2010 pour les motifs évoqués précédemment.

- Les études d'optimisation technique et économique du mode de gestion des déchets : choix des durées d'entreposage avant stockage, etc.

L'entreposage est positionné comme une étape permettant d'optimiser la date de mise en stockage des déchets et le rythme de prise en charge des déchets. Il s'agit ici notamment de rechercher l'optimum technique, économique et environnemental entre les contenus et la durée d'entreposage, qui influe sur la thermique de certains déchets ultimes, et le concept de stockage. Comme indiqué plus haut, les études sur les entrepôts visant d'emblée la longue durée (ELD) ont été menées à bien et seraient arrêtées.

- Les études sur le conditionnement des déchets et sur le comportement à long terme des colis de déchets doivent être poursuivies après 2006 pour accompagner l'industriel qui conditionne les déchets, tant dans les programmes en cours, qu'en ce qui concerne les progrès à accomplir à moyen terme. Après 2006, en bénéficiant de l'acquis des études de faisabilité du stockage, il sera nécessaire de conduire des études en lien direct avec les besoins exprimés pour l'entreposage et le stockage. Il ne s'agira plus alors seulement de garantir un niveau de sûreté adéquat, que les travaux menés dans le cadre de la loi de 91 auront permis d'atteindre, mais de s'articuler avec des besoins opérationnels concrets du gestionnaire des déchets.

Globalement, les études de R&D dans le domaine du **conditionnement des déchets à moyen terme** pourraient porter sur :

- la conception des colis de déchets ultimes qui peuvent être envisagés à moyen et long terme, par exemple en intégrant les résultats d'actions de diminution de l'inventaire radiotoxique contenu dans ces déchets (séparation poussée, mise en œuvre des systèmes de Génération IV, ADS...) ;
- d'éventuels compléments d'investigation, au-delà des résultats actuellement établis, sur le modèle de comportement des déchets en visant l'amélioration de la compréhension et de la modélisation des mécanismes de base ;
- le soutien aux industriels pour l'optimisation des programmes de reprise et conditionnement des déchets anciens et de démantèlement des installations ;
- aussi bien pour les déchets anciens qui restent à conditionner que pour les déchets futurs, ces études devront permettre de poursuivre les progrès acquis depuis 1991 dans la réduction des volumes de déchets et également de définir les meilleurs choix technico-économiques pour le traitement et le conditionnement des déchets compte-tenu de leur mode de gestion à long terme.

Pour les déchets produits dans le futur avec le système nucléaire actuel, et pour ce qui concerne les déchets de haute activité, la recherche accompagnera l'industriel, comme elle l'accompagne aujourd'hui pour permettre la prise en compte de l'évolution progressive des taux de combustion dans les installations actuelles du cycle (traitement, fabrication des combustibles, déchets générés). Pour les déchets de moyenne activité à vie longue, les enjeux et l'apport du conditionnement sous la forme d'une matrice minérale vitreuse pourront être étudiés.

Concernant un futur plus lointain, les études portant sur les déchets qui seraient produits par des nouveaux systèmes (Génération IV, ...) seront à mener, lorsque les progrès dans la conception de ces systèmes le permettront, et inversement, pour contribuer de façon itérative aux cahiers des charges de ces réacteurs. En effet, c'est le cycle du combustible dans son ensemble qui est à redéfinir, ainsi que la gestion des déchets associés (avec les centres de stockage et les modes de conditionnement actuels ou plus vraisemblablement avec de nouveaux concepts). D'une manière générale, le couple gestion du cycle-stockage sera globalement à optimiser d'un point de vue technico-économique, avec l'avènement de ces nouveaux réacteurs.

La référence des procédés de traitements futurs sera probablement un procédé hydrométallurgique avancé qui bénéficiera du retour d'expérience considérable accumulé jusqu'à aujourd'hui. Toutefois, l'utilisation éventuelle de procédés pyrochimiques, à la place ou en complément des procédés hydro-

métallurgiques, peut avoir des avantages spécifiques pour certains types de combustibles. Ces procédés modifieraient la nature des déchets (chlorures ou fluorures) à gérer. La gestion de ces déchets serait examinée en regard des filières existantes afin de montrer leur compatibilité ou de définir les évolutions nécessaires des filières (compatibilité avec les spécifications du stockage, gestion des éléments volatils, nouveaux procédés de conditionnement, conséquences sur l'emprise du stockage...).

Quel que soit le système du futur retenu, il restera en final des déchets (produits de fission, matrice du combustible, déchets technologiques dépendant du fluide caloporteur,...) pour lesquels le confinement vitreux sera étudié en priorité et conforté par les études et développements nécessaires associés. Des expérimentations à échelle significative seront conduites sur ces nouveaux déchets en liaison avec les démonstrations préalables au déploiement industriel des systèmes du futur.

Comme cité plus haut, les études de R&D porteront également sur l'amélioration des connaissances du **comportement à long terme des colis** actuels et futurs, avec pour objectifs principaux :

- de mieux intégrer l'environnement de l'entreposage et du stockage dans les modélisations ;
- d'améliorer, en tant que de besoin, la prise en compte des différents radionucléides dans les phénomènes de relâchement et les modèles de comportement, et plus particulièrement ceux qui sont susceptibles de contribuer à l'impact éventuel aux exutoires ;
- de réduire les incertitudes des modèles et de les préciser en fonction des horizons temporels par la poursuite de l'amélioration des connaissances sur les déchets et les environnements à considérer ;
- de poursuivre le développement des modèles opérationnels et leur intégration dans la plateforme ALLIANCES utilisée pour les évaluations de performance et de sûreté du stockage.

- Un sous-programme concernant le stockage des combustibles usés serait poursuivi en seconde priorité. Ce programme porte sur les combustibles usés (UOX et MOX) et vise à étudier les conditions de leur stockage direct, en particulier dans le cas de scénarios d'arrêt du nucléaire comme indiqué plus haut, ou autres scénarios à considérer à titre conservatoire. Il étudie leur évolution intrinsèque à long terme, leur conditionnement et leur insertion dans le stockage, en fonction notamment de leur charge thermique (conteneurage, délais de refroidissement, emprises respectives, optimisation entreposage-stockage...). Des progrès sont encore nécessaires pour évaluer précisément le comportement à long terme du combustible. Les possibilités de coopération internationale devront être exploitées au mieux.

Un programme "Gestion de la ressource plutonium"

Il s'agit de compléter les bases techniques, disponibles ou à venir, associées aux scénarios de "gestion du plutonium" prévoyant un entreposage sous eau des combustibles usés (MOX en particulier, qui concentrent le plutonium résiduel), plus ou moins long selon les hypothèses retenues, et puis leur traitement afin de valoriser l'inventaire de plutonium dans l'optique d'une option de nucléaire ouvert pour de futurs réacteurs rapides qui, prenant le relais de réacteurs à eau sous pression actuels, seraient déployés au plus tôt vers 2040. Il s'agit là d'un enjeu important pour la gestion de la ressource plutonium, puisque l'éventail des options ouvertes pour l'approvisionnement énergétique futur en dépend directement.

Dans cette optique, il y aura lieu de préciser les conditions d'entreposage, de traitement et de gestion des déchets ultimes résultants (teneur accrue en actinides mineurs) et leurs conséquences sur le stockage, selon les hypothèses de déploiement de futurs réacteurs rapides. La capacité de reprise des assemblages usés après entreposage sous eau prolongé, ou éventuellement à sec, devra être vérifiée pour les futurs combustibles à taux de combustion accru ; les hypothèses concernant les besoins de plutonium et les modalités de traitement selon les scénarios de déploiement des RNR devront être précisées ; les conditions de traitement (taux de dilution, teneur en actinides mineurs et impact sur les colis de déchets vitrifiés) et l'articulation avec la gestion industrielle à long terme (impact sur la thermique de l'entreposage et du stockage...) seront optimisées.

Il s'agit donc d'aboutir à la présentation d'une synthèse quant à la gestion des combustibles usés, notamment des combustibles MOX : (i) conditions de leur entreposage sur plusieurs dizaines d'années ; (ii) modalités de traitement des combustibles MOX usés et conséquences quant à la quantité et à la nature des déchets ultimes en résultant ; (iii) conditions et limites éventuelles de leur prise en charge dans les installations actuelles de la Hague.

De nombreux éléments de connaissance existent déjà, en particulier l'existence d'un retour d'expérience concernant le traitement des MOX usés et leur entreposage sur plusieurs décennies. Une grande partie des actions citées relèvent de fait d'actions de développement industriel, pour partie déjà engagées, moyennant l'obtention de résultats de R&D en cours (évolution des teneurs alpha des colis de déchets vitrifiés....).

Un programme "Transmutation et gestion des actinides mineurs"

Une solution de gestion pérenne des déchets existants ou qui seront produits par le parc actuel devrait être définie au terme du processus actuel. Les axes 2 et 3 offrent des solutions solides sans qu'il soit nécessairement utile de recourir à ce stade aux procédés de séparation poussée et de transmutation des actinides mineurs à vie longue. Pour autant, dans une logique de progrès continu et d'accompagnement de la filière électronucléaire, les travaux engagés dans le cadre de l'axe 1 de la loi de 1991 pourraient apporter des possibilités d'optimisation de la conception et de l'utilisation d'un stockage géologique. Des calculs théoriques à l'équilibre de scénarios basés sur l'utilisation de réacteurs à spectre de neutrons rapides indiquent que, par rapport à la politique actuelle de l'aval du cycle, une réduction supplémentaire de la radiotoxicité des déchets pourrait être ainsi obtenue, entraînant par là même une simplification de leur gestion à long terme.

La poursuite des programmes de recherche sur la séparation et la transmutation serait centrée sur les actinides mineurs (avec une simple veille sur les produits de fission). Elle conduit à se placer dans la perspective du maintien de l'option nucléaire et de la génération suivante de réacteurs et des usines du cycle qui l'accompagnent. Les recherches concernant la séparation et la transmutation s'inscrivent donc dans les programmes pour le développement des systèmes de 4^{ème} génération associés, pour la plupart, à des spectres neutroniques rapides, en recherchant une optimisation technico-économique à la fois du cycle du combustible et de la gestion des déchets ultimes, par rapport aux systèmes industriels de la génération actuelle.

Les études liées à la mise en œuvre de la séparation poussée-transmutation devraient notamment être menées avec l'objectif *in fine* de contribuer à améliorer les conditions d'exploitation et l'optimisation à long terme du stockage ; elles devraient rassembler les éléments permettant d'établir un bilan des avantages possibles et des inconvénients (coûts, complexité industrielle, impact sur les réacteurs et installations du cycle).

Ainsi, dans le souci d'optimiser les concepts de stockage, des recherches pourraient être entreprises en vue de réduire l'inventaire radiotoxique des déchets et de réduire la charge thermique associée à l'activité à long terme des colis de déchets vitrifiés dans le dépôt. L'objectif des recherches pourrait être d'aboutir à la fabrication de colis de déchets vitrifiés dits « allégés », c'est-à-dire ne contenant principalement que les produits de fission, les actinides mineurs issus de la séparation poussée étant destinés à être incinérés dans des réacteurs appropriés. Un bilan coût – avantages complet et précis devrait étayer l'apport éventuel d'une telle stratégie, avant d'engager des dépenses industrielles lourdes.

Les études sur la séparation-transmutation devraient se poursuivre en liaison étroite avec celles concernant les réacteurs Génération IV et les ADS. L'objectif est de proposer pour 2015 des solutions couplées de cycles du combustible et de réacteurs dont il serait possible d'établir un bilan complet à la fois dans leur fonction électrogène, dans leur impact sur la gestion des déchets ultimes, leur efficacité

et les bénéfices réels à en attendre pour l'optimisation technique d'un stockage déjà dit juste au dessous ainsi que sur les installations du cycle du combustible, leurs coûts et leur résistance à la prolifération (bilan coût/bénéfice). Les possibilités de coopération internationale devront être exploitées au mieux. Les éléments de ce bilan avantages / inconvénients seront nécessaires avant toute décision d'engagement d'un investissement dans une installation prototype. Si, d'ici 2040, il apparaissait que les échéances de mise en service des réacteurs rapides étaient repoussées, il conviendrait alors de réfléchir à la stratégie de multirecyclage qui serait mise en œuvre dans les réacteurs.

On peut envisager plusieurs sous-programmes de recherches :

Filière séparation poussée et transmutation en réacteurs électrogènes à neutrons rapides

Ce sous-programme sous-tend le scénario industriel de référence. Il comporte la poursuite des travaux actuels, avec plusieurs volets.

-En ce qui concerne la séparation :

- poursuite des validations de faisabilité technique de séparation des actinides mineurs selon le schéma de référence de l'axe 1, dans l'installation Atalante de Marcoule
- étude du procédé de séparation dite groupée qui séparerait en un seul passage les actinides, y compris le plutonium, et les produits de fission susceptibles d'être conditionnés sous forme de colis de déchets vitrifiés allégés. Cette filière peut apparaître séduisante car le plutonium n'est pas isolé, mais elle impose la manipulation de combustibles très radioactifs et peut avoir des impacts sur la conception des réacteurs (importance des couvertures, efficacité neutronique, maintien du caractère iso-générateur...), par rapport à des réacteurs électrogènes iso-générateurs optimisés pour des combustibles au plutonium.

Au-delà de la faisabilité technique, un développement industriel de la séparation des actinides mineurs nécessitera d'énoncer l'objectif industriel, pour permettre de cibler les actions de recherches et développement en précisant les jalons souhaités. Performances requises, capacité, pureté et forme chimique des éléments séparés, coûts objectifs,..., devront en constituer le cahier des charges. Le procédé de séparation devra être ajusté pour correspondre, aux conditions particulières du recyclage offert par les réacteurs du futur.

Dans la phase de démonstration d'une faisabilité industrielle, des recherches complémentaires sont nécessaires pour accompagner la mise en œuvre de la séparation qui pourrait s'inscrire dans le cadre du renouvellement de l'usine de La Hague.

La démonstration technologique réalisée à l'échelle de 15 kg de combustible usé est une première étape. Avant la mise en œuvre industrielle si une décision était prise, il faudrait optimiser en fonction de l'objectif industriel les procédés constituant la référence actuelle. D'autres étapes seraient à franchir pour permettre l'industrialisation des procédés de séparation : calculs de schémas de procédé d'extraction et de gestion des déchets secondaires, tests hydrodynamiques d'appareillages, essais prototypes du procédé, définition des procédures de recyclage des réactifs, mise au point des technologies de conversion des éléments séparés en un solide stable et compatible avec l'étape de gestion suivante prévue pour ces éléments (par exemple, fabrication de combustibles ou de cibles pour la transmutation).

Une étude économique détaillée devra être réalisée en accompagnement de l'évaluation de la faisabilité industrielle. Elle devra préciser les coûts nouveaux mais également les gains nets qui pourraient en résulter, ailleurs dans le cycle du combustible, comme par exemple au niveau du stockage. Ce travail nécessite la participation de nombreux acteurs.

Dans l'hypothèse d'une décision de mise en œuvre de la séparation, la recherche accompagnera l'industriel au cours des différentes étapes nécessaires, les études d'ingénierie et les avant-projets sommaire et détaillé.

C'est parallèlement à cette phase de faisabilité industrielle que la politique industrielle de déploiement devra être précisée en examinant son économie et son planning de réalisation. Compte tenu de l'expérience acquise lors de la réalisation des usines de La Hague (UP2-800 et UP3), ou de l'ajout d'ateliers sur les usines actuelles, il faudra compter au moins une dizaine d'années de développement pouvant nécessiter la mise en place de pilotes dépassant la taille du laboratoire pour progresser de la faisabilité technologique au début de construction de l'atelier. La mise en œuvre industrielle d'un tel procédé pourrait suivre dans les cinq ans. Ces durées purement indicatives sont à moduler en fonction des cahiers des charges et des choix industriels. Ces choix seront évoqués dans les paragraphes suivants concernant les systèmes du futur. Ils devront prendre en compte la disponibilité d'installation de transmutation et la durée de vie de l'usine actuelle de La Hague. Une mise en œuvre vers 2040 paraît envisageable, si décidée.

-En ce qui concerne la transmutation en réacteurs à neutrons rapides :

- poursuite des essais de transmutation avec le réacteur Phénix jusqu'en 2008 ;
- études de transmutation en réacteur rapide dans des cadres internationaux. Ainsi, le réacteur japonais Monju pourrait notamment être le fédérateur d'un important programme débutant vers 2012 et s'étalant même au-delà de 2015 ;
- études de fabrications de combustibles et cibles pour transmutation ;
- études des réacteurs à neutrons rapides de 4^{ème} génération dans la perspective de l'articulation de la séparation poussée et de la transmutation des actinides séparés dans ces réacteurs.

Le CEA et le CNRS seront particulièrement impliqués dans ces recherches avec d'autres acteurs français et internationaux. A la demande des pouvoirs publics, le CEA est chargé de rassembler et coordonner les efforts de recherches menées dans le cadre du forum Generation IV par les organismes de recherche français en partenariat avec les industriels.

Pour ces réacteurs, la faisabilité technologique passe d'ici 2015 par la définition des combustibles et cibles à utiliser, ainsi que par l'étude détaillée du cycle associé. Les irradiations expérimentales de combustibles et de cibles dans Phénix sont planifiées jusqu'en 2008 et jusqu'en 2010 pour ce qui est des examens post-irradiatoires. Les expériences sont destinées à compléter la qualification des données neutroniques, notamment pour les produits de fission à vie longue, tester des matrices d'irradiation optimisées, étudier le comportement sous irradiation de combustibles spécifiques à base d'américium ou d'autres éléments à vie longue et tester des concepts avancés de combustibles pour les réacteurs de 4^{ème} génération. Ces irradiations dans Phénix sont à l'échelle de quelques grammes d'actinides mineurs.

Les résultats obtenus avant 2008 peuvent justifier la qualification d'une cible d'irradiation optimisée (matrice, teneur en actinides, mode de fabrication, ...) et, par voie de conséquence, un nouvel essai d'irradiation dans un réacteur rapide comme JOYO au Japon ou BOR 60 en Russie. Cette irradiation ne met en jeu que quelques grammes d'actinides mineurs. L'obtention de tels résultats est recherchée pour 2010.

Une démonstration de transmutation à une échelle plus significative (quelques kilogrammes d'actinides mineurs séparés) s'avère nécessaire avant l'étape d'industrialisation. Cet essai (horizon 2012) ne peut s'envisager que dans un réacteur rapide, comme Monju au Japon, et dans le cadre d'une large collaboration internationale. La mise en œuvre dans plusieurs cibles de quantités d'américium plus importantes nécessitera alors de disposer d'installations pilotes blindées adaptées à la fabrication et au traitement des cibles et assemblages. Ces équipements permettront également de procéder à la qualification des procédés employés. Cette expérimentation prototype servira à démontrer le recyclage des actinides dans les réacteurs RNR à spectre rapide.

Une autre démonstration prototype suivra, consacrée à la démonstration du recyclage homogène et intégral des actinides dans les systèmes de génération IV, à l'équilibre des flux matières, en utilisant les combustibles spécifiques de ces nouveaux systèmes. En effet, les résultats de l'irradiation Futurix (combustibles pour Génération IV et cibles à haute teneur en actinides mineurs) prévue dans Phénix en 2007-2008 seront connus. Les études de recherche et de développement concernant les combustibles et cycles associés à ces systèmes auront alors progressé.

Dans le cadre des études sur les systèmes du futur, le traitement de leurs combustibles sera examiné, avec notamment un recyclage intégral des actinides dans des installations couplées avec la fabrication des combustibles et cibles ou dans une installation insérée dans la future génération d'usines de traitement et qui sera également capable de traiter les combustibles REP. Ce recyclage pourrait faire appel à des procédés pyrochimiques afin de traiter des combustibles, dès leur sortie du réacteur. Le développement de ces procédés tient compte des avancées obtenues à l'échéance de la loi et concerne les combustibles pour la 4^{ème} génération de réacteur.

La nature et le volume des déchets produits par ces systèmes sont examinés en regard des filières de gestion existantes afin de montrer leur compatibilité ou de définir les évolutions nécessaires des filières.

Ainsi, il sera possible de disposer d'une évaluation technique, économique et environnementale d'une filière associée à un système du futur vers 2015 permettant de statuer quant à l'évaluation globale de différents scénarios industriels de séparation et transmutation. Cela nécessite de disposer d'une première sélection des options de conception en 2010.

Filière séparation poussée et transmutation en réacteurs dédiés

Les objectifs des recherches qui seront menées dans ces domaines sont :

- de lever les verrous technologiques associés au développement de ces systèmes (pilotage et sûreté du réacteur, fiabilité de l'accélérateur, définition des combustibles, tenue de la cible et de la fenêtre), notamment en terminant les expérimentations engagées ;
- de disposer en 2009-2010 d'un dossier décisionnel complet sur la faisabilité technique d'un démonstrateur européen d'ADS ;
- d'accompagner la réalisation industrielle d'un tel démonstrateur notamment du point de vue des installations du cycle à lui adjoindre.

Les études de systèmes hybrides (ADS) dédiés à la transmutation se poursuivent jusqu'en 2008 dans le cadre d'un projet européen (EUROTRANS). Pendant cette période, les expérimentations MEGAPIE pour la cible de spallation, IPHI pour l'accélérateur et l'irradiation FUTURIX/FTA dans Phénix pour les cibles à forte teneur en américium, auront produit leurs résultats.

Vers 2009-2010, un dossier de faisabilité d'un démonstrateur de puissance d'un système hybride sera disponible. Il devra définir les étapes suivantes de réalisation concernant cette machine .

La poursuite du développement d'un ADS passerait par la construction d'un démonstrateur afin de réaliser une expérimentation significative avec son cycle (transmutation de l'ordre de quelques kilogrammes d'actinides mineurs par an) à l'horizon 2020. La disponibilité des installations pour la fabrication et le traitement des cibles doit faire l'objet d'une recherche et est à définir.

Au-delà des études cycle, les recherches sur le réacteur ADS doivent s'accompagner d'études sur l'insertion des ADS dans un parc de réacteurs, en notant qu'ils ne peuvent intervenir en tant qu'outil de base dans une stratégie de renouvellement du parc. Les recherches devraient être orientées en priorité vers la validation des différents sous-ensembles qui composent les ADS (accélérateur haute intensité, cible de spallation à haut dépôt de puissance, réacteur sous critique,...), vers les études du couplage

entre ces différents éléments (couplage accélérateur-cible notamment), ainsi que vers l'élaboration d'un bilan technico-économique dont l'objectif serait de statuer sur la poursuite des études dans ce domaine.

Les résultats de l'étude comparée de différents parcs de réacteurs nucléaires faisant appel à l'ADS devraient être joints au dossier de faisabilité, pour apporter des éléments techniques et économiques de décision sur la poursuite de cette filière au-delà de 2010.

Filière à neutrons thermiques thorium/uranium

Dans un cadre prospectif au delà de l'horizon 2040-2050, les études concernant des systèmes très innovants comme les réacteurs à sels fondus utilisant d'autres cycles de combustibles nucléaires, mériteraient d'être poursuivies, avec des moyens cohérents avec le caractère amont de ces programmes et l'objectif de veille stratégique recherché.

Si le cycle uranium/plutonium en spectre de neutrons rapides RNR-Na présente l'avantage de la continuité de la filière de traitement actuelle basée sur des procédés hydrométallurgiques, la filière à neutrons thermiques thorium/uranium utilisant un concept de réacteur à sels fondus présente des avantages théoriques du point de vue de la minimisation des déchets. Les recherches, aujourd'hui principalement conduites par le CNRS, devraient permettre de valider expérimentalement ce concept, qui est l'un des six concepts Génération IV, à la fois sur le plan neutronique et sur le plan de la chimie et des matériaux. Cela nécessiterait aussi d'examiner comment se ferait la transition du parc actuel vers un parc faisant appel à une strate de réacteurs à sel fondu.

Conception des usines de l'amont et de l'aval du cycle

Ainsi qu'il a été mentionné, les programmes de recherche sur les systèmes de 4^{ème} génération doivent comprendre les études sur les procédés qui devraient être mis en œuvre pour l'amont et pour l'aval du cycle. L'échéance associée aux choix à faire pour le renouvellement des usines du cycle se situe de fait à des horizons similaires à ceux des réacteurs (vers 2040). Ces choix devront être préparés et faits en cohérence avec les choix de réacteurs (combustibles, gestion du plutonium et des actinides mineurs...)

La recherche après 2015

L'étape de 2015

La vision prospective partagée par l'ensemble des acteurs de l'énergie nucléaire montre que 2015 sera une étape clé pour le programme nucléaire futur. C'est notamment à cette époque que devrait être définie la programmation de la série industrielle des réacteurs de 3^{ème} génération (EPR), selon les hypothèses de durée de vie du parc actuel, des marchés et des besoins énergétiques. Ce lancement s'inscrirait dans l'option de poursuite du programme nucléaire national sur la plus grande partie du siècle.

Les décisions relatives à la gestion des déchets, à prendre à cette date, pourraient notamment concerner :

la construction d'un centre de stockage géologique, qui pourrait entrer en service vers 2025 en accueillant dans un premier temps les déchets de moyenne activité à vie longue, et les déchets vitrifiés "froids" ;

la décision de poursuite des développements sur la séparation-transmutation et les réacteurs de génération IV ou dédiés pour la transmutation. A ce stade, la construction de prototypes concernant le traitement des combustibles, la fabrication de nouveaux combustibles et les nouveaux réacteurs serait à examiner.

Au-delà de 2015

Accompagnant la réalisation du stockage géologique, s'il était décidé, les recherches se poursuivraient sur les modes d'exploitation de ce stockage.

A cette époque, selon les évaluations qui auront été faites, une décision devra être prise sur la priorité à donner aux développements sur un procédé de séparation et les modalités de transmutation dans des réacteurs de génération IV ou dédiés pour la transmutation, si l'intérêt en est validé. Il sera nécessaire d'y associer les questions de comportement des colis et de leur conditionnement.

La décision positive de continuer dans la voie de la poursuite à long terme du nucléaire entraînerait logiquement la poursuite de la politique actuelle de gestion du plutonium.

Recherche amont et interdisciplinaire

A côté des recherches et développements ciblés sur des projets précis, il faut noter la nécessité de soutenir des recherches génériques portant sur des connaissances d'intérêt commun à différents projets, ou en amont des développements en cours, ou explorant des applications de mise en œuvre plus lointaine. Il faut citer :

Recherches exploratoires et contribution de la recherche académique

Ces recherches sont menées en lien avec de nombreux acteurs du monde académique ou universitaire ou par les organismes de recherche. Le CNRS, via son programme interdisciplinaire PACE (cinq GDR), a élargi et approfondi sa contribution dans de nombreux domaines de la science nucléaire, grâce à la participation active de ses diverses communautés ; son engagement peut être maintenu et approfondi dans les différentes disciplines :

- en Physique et en sciences des matériaux : les travaux récents sur les accélérateurs et la neutronique vont permettre de reprendre les études sur le comportement des systèmes sous-critiques, de boucler, avec le projet EUROTRANS, le dossier d'évaluation des réacteurs hybrides et de participer de façon coordonnée aux travaux sur les réacteurs du futur,
- en Chimie: la création de l'Institut de Chimie séparative à Marcoule sera l'occasion, pour les chercheurs du monde académique, de ne plus limiter leurs travaux à des modélisations théoriques de la séparation, et d'approfondir les comportements des actinides et de leurs complexes en solution ; pour le stockage et l'entreposage, les mêmes concepts et les mêmes méthodes expérimentales peuvent conduire à une appréciation (restée encore au niveau des modèles) de la réactivité des solides, de leur interaction avec les ions des éléments actinides, fondée sur la physico-chimie des transferts.
- en Sciences de la Terre: les circulations de fluides passées et actuelles, les propriétés physiques et chimiques des matériaux naturels et leur comportement, le développement de techniques d'auscultation des massifs rocheux et de datation des solides et des fluides trouveront leur place dans l'ensemble du programme d'expérimentation piloté par l'Andra, dans et autour du laboratoire souterrain de Bure,
- en Mathématiques: l'amélioration de techniques de simulation numérique et de modélisation, adaptées à l'approche de systèmes particulièrement complexes, est couplée à une compréhension rigoureuse de leur intérêt ou de leur efficacité. Cette communauté envisage également d'appliquer ses méthodes à des problèmes de neutronique.

Les recherches concernant la radiobiologie et la radioécologie ou en appui à l'évaluation

Les recherches concernant la radiobiologie, menées au CEA, à l'IRSN et au CNRS n'ont pas été intégrées dans le programme de recherche associé à la Loi de 1991, pour préserver l'indépendance des chercheurs et laboratoires étudiant l'impact des radioéléments sur la population humaine. L'étude de la biosphère reste l'une des clefs pour progresser vers une évaluation plus réaliste de l'impact éventuel d'un stockage de déchets. Le niveau de connaissance sur le comportement des différents radionucléides est très hétérogène, il dépend de l'intérêt suscité pour la protection humaine (cas de l'uranium et du plutonium) et des études sur la contamination de l'environnement. Certains radionucléides n'ont pratiquement pas été étudiés en détail (cas des lanthanides). L'interface entre les recherches en radiobiologie et les recherches sur le stockage est assurée par la règle fondamentale de sûreté et les données de radio-toxicité reconnues internationalement (CIPR).

Le CEA, en liaison avec d'autres organismes de recherche, mène des recherches en écophysiologie, écotoxicologie, radiobiologie, toxicologie,... en vue d'améliorer les connaissances scientifiques, tant au niveau des mécanismes d'action que de la quantification des effets. Dans ces domaines, l'étude des éléments naturels et anthropogéniques concerne : le comportement des éléments dans la biosphère, leurs mécanismes d'action au niveau des organismes vivants, l'analyse de leurs conséquences sur les organismes et leur descendance ainsi que sur l'estimation des risques, liés à leur toxicité radiologique et/ou chimique en fonction des concentrations et doses.

Dans la perspective de l'évaluation des dossiers de sûreté relatifs au programme « stockage géologique » qui seront présentés à la DGSNR, l'IRSN chargé de l'expertise indépendante dans le domaine de la sûreté de la gestion des déchets radioactifs, mènera les travaux de recherche nécessaires afin d'être en mesure de maintenir sa capacité d'expertise indispensable au rôle technique qu'il joue au sein du système de gestion des déchets en France. En particulier, ces travaux seront centrés sur la compréhension des risques de transfert des substances radioactives à travers les barrières composant le stockage, notamment le milieu géologique hôte.

Conclusions

La gestion des déchets nucléaires est une activité à long terme qui s'inscrit dans une logique d'optimisation continue. La politique de recherche et de développement technologique, qui l'oriente et la soutient, doit s'appuyer sur une volonté politique, axée sur la mise en œuvre de solutions concrètes et présentant une grande continuité dans le temps.

C'est ce constat qui a guidé les pouvoirs publics en 1991 en soumettant au Parlement la loi du 30 décembre 1991. Le programme de recherche édicté par cette loi aboutit en 2006 à des résultats concrets, dont beaucoup ont été salués au plan international, qui montrent aujourd'hui que des solutions pour la gestion à long terme des déchets existent. Ces résultats permettront ainsi aux pouvoirs publics en 2006 de s'appuyer sur une base solide pour décider de la voie à suivre.

Les décisions pourraient évidemment concerner, d'une part, le passage en phase industrielle de projets dont la faisabilité technique a été aujourd'hui démontrée, accompagnés de programmes de recherche et développement adaptés. D'autre part, elles devraient prendre acte de la nécessité d'une recherche de plus longue haleine pour accompagner le parc nucléaire et ses évolutions et poursuivre l'optimisation de la gestion des déchets, dans une logique de progrès continu, quel que soit l'avenir de ce parc.

Le ministère chargé de la recherche propose que ces recherches soient menées dans le cadre d'une nouvelle loi, dont le champ devra être précisé. Le ministère chargé de la recherche porte un intérêt particulier au séquençement des programmes de recherche. Il pense que les avancées obtenues dans le cadre de la loi de 1991 permettent maintenant d'envisager un horizon 2015 pour la prise de décisions de natures industrielles. Il privilégie une approche étape par étape fondée sur une série de jalons associés à des bilans d'avancement. La nouvelle loi pourrait préciser une organisation capable d'animer la progression du développement, de la mise en place et ensuite de l'évolution des modes de gestion des déchets de haute activité. Aussi, la responsabilité précise de chaque acteur dans le domaine de la gestion des déchets à long terme pourrait évoluer, afin d'en garantir la pérennité technique et institutionnelle.

Par ailleurs, une approche de même nature que celle de la loi actuelle pourrait être retenue pour l'évaluation, en y promouvant la dimension internationale, notamment en ce qui concerne l'existence d'une commission d'évaluation indépendante. La place du dialogue entre les scientifiques, les élus et la société civile devra trouver un cadre approprié à une compréhension partagée par tous.

Les futurs programmes de recherches devraient être centrés sur des sujets d'autant plus précis qu'ils concernent des programmes de développement industriels. Les acquis de la loi de 1991 permettent d'arrêter des recherches là où elles ont abouti et de poursuivre certaines d'entre elles.

Une conclusion importante est de quitter la logique par axe, en articulant les « briques de base » étudiées dans le cadre de la loi de 1991 (conditionnement, entreposage, stockage, traitement avec séparation poussée, transmutation...) et de considérer des systèmes nucléaires complets, notamment en ce qui concerne les solutions optimisées applicables au déchets du nucléaire futur.

Le stockage géologique offre une solution de gestion pérenne directement applicable aux déchets existants, après une période d'entreposage. Sa faisabilité de principe scientifique et technique a été établie.

La faisabilité technique de la séparation des actinides des combustibles usés en vue de leur transmutation, a été montrée. La transmutation qui lui est associée nécessiterait à terme des réacteurs à neutrons rapides de 4^{ème} génération ou des réacteurs spécialisés qui restent à développer, pour être économiquement praticable. La logique de progrès conduit à poursuivre les recherches sur les

systèmes du futur en incluant la problématique de l'optimisation de la gestion des déchets et en favorisant les collaborations internationales.

Il reste à réaliser une évaluation complète en terme d'efficacité, d'impact sur l'environnement et l'exploitation industrielle et en terme de bilan technico-économique. Ces bilans devraient notamment être menés à bien pour s'assurer que les programmes de recherche et développement des solutions pour les déchets du futur sont orientés au mieux de l'intérêt collectif.

Enfin, à côté des recherches et développements ciblés sur des projets précis, des recherches plus fondamentales, portant sur des connaissances d'intérêt commun à différents projets, ou très en amont des développements en cours, ou explorant des applications de mise en œuvre très lointaine, devraient être soutenues. Ainsi, la recherche menée dans les établissements publics a pour vocation d'éclairer le long terme, et aussi d'accompagner, dans le court terme, le développement industriel des solutions techniques retenues.