

COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

DES RECHERCHES SUR LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS

*Instituée par l'article L 542 du Code de l'environnement
issu de la loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991*

RAPPORT GLOBAL D'ÉVALUATION

des recherches conduites dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991

~~*~*~*~*~*~*~*~*~*~*~*~*~*~*~*

Le texte du rapport, ses conclusions et recommandations,
ainsi que ses annexes 1 et 2, ont été approuvés par la Commission,
à l'unanimité de ses membres, le 13 janvier 2006.

Sommaire

	Pages
Conclusions	4
Principales recommandations	6
Rapport global de la Commission nationale d'évaluation des recherches conduites dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991	7
Axe 1 - Séparation-Transmutation	9
1.1. Acquis des recherches	10
1.2. Recherches envisageables après 2006	12
1.3. Réflexions de la CNE	14
Axe 2 - Stockage en formation géologique profonde	16
2.1. Acquis des recherches	16
2.2. Recherches envisageables après 2006	20
2.3. Réflexions de la CNE	21
Axe 3 - Conditionnement - Entreposage de longue durée	23
3.1. Acquis des recherches	23
3.2. Recherches envisageables après 2006	25
3.3. Réflexions de la CNE	26
Conclusions générales	28
Principales recommandations	30
Annexe 1 : Réflexion sur les liens entre les axes de recherches	31
Annexe 2 : Experts consultés	33
Annexe 3 : Réflexions sur l'entreposage longue durée. Point de vue de Ghislain de Marsily	34
Liste des membres de la Commission nationale d'évaluation au 1^{er} janvier 2006	37



Le Ministre délégué à la recherche

Le Ministre délégué à l'industrie

Paris, le 24 MAR. 2005

Monsieur le Président,

Comme vous le savez, la loi du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur les déchets de haute activité à vie longue prévoit qu'à l'issue de quinze années de recherches, le Gouvernement transmettra au Parlement un projet de loi. Dans ce cadre, des travaux scientifiques importants ont été conduits, en particulier par l'ANDRA et le CEA, en collaboration étroite avec l'ensemble de la Communauté scientifique nationale et internationale. Nous considérons en conséquence que le respect du rendez-vous parlementaire de 2006 prévue par la loi est une priorité. Dans cette perspective, le Gouvernement souhaite que celui-ci puisse être organisé au plus tôt durant le premier semestre 2006.

La mise en place de la Commission nationale d'évaluation par la loi de 1991 permet aux Pouvoirs Publics et au Parlement de disposer d'une analyse étayée des programmes de recherche. A ce titre, il nous semble primordial que le Gouvernement et le Parlement puissent disposer de l'évaluation finale de la Commission dans un calendrier compatible avec l'élaboration du projet de loi et son examen afin que les orientations qui seront in fine retenues se fondent sur une analyse pertinente des résultats de recherche. Aussi, nous souhaiterions que vous puissiez transmettre votre rapport final d'évaluation sur les recherches menées dans le cadre de la loi de 1991 à fin janvier 2006.

Par ailleurs, il nous semble nécessaire de pouvoir continuer à disposer d'une capacité d'évaluation scientifique pour l'après 2006. L'évaluation indépendante des résultats de recherche participe en effet de manière très importante à la transparence et à la crédibilité du dispositif mis en place par la loi. Sur la base de l'expérience de la Commission dans ce domaine, nous souhaiterions que vous puissiez dégager des propositions d'orientation quant au futur envisageable de l'évaluation scientifique. Vous mènerez cette réflexion durant l'année 2006.

Nous vous prions d'agréer, Monsieur le Président, l'expression de nos salutations distinguées.

François d'AUBERT

Patrick DEVEDJIAN

Monsieur Bernard TISSOT
Président de la commission nationale d'évaluation
39/43, Quai André Citroën
75739 Paris Cedex 15

Conclusions

Quatorze années de travaux s'achèvent, qui ont été conduits en vue de définir une stratégie globale de gestion des déchets de haute activité et à vie longue, la loi ayant indiqué trois orientations de recherche à mener de front. Un grand nombre de connaissances ont été acquises, qui pourront être utilisées complémentaires dès lors que des voies cohérentes de gestion auront été dégagées.

L'ampleur des acquis est telle qu'il est maintenant possible d'opérer des choix stratégiques pertinents. Vouloir mener toutes les orientations de la loi de 1991 jusqu'à un développement industriel serait une lourde et longue charge de recherche car chaque domaine exigerait des moyens progressivement croissants. On doit, pour établir les grands programmes à venir, comparer les avancements dans chaque orientation en termes de maturité scientifique.

Les recherches sur la gestion des déchets nucléaires les plus avancées, en France, sont celles sur le stockage réversible en situation géologique profonde qui représente la voie de référence pour une gestion définitive de déchets ultimes que la France se doit d'étudier jusqu'au bout. L'utilisation simultanée des techniques minières et de celles de l'industrie pétrolière s'est révélée hautement profitable sur le site de Bure. Les données acquises sur ce site sont considérables. Elles placent ces travaux au meilleur niveau des recherches internationales. Le grand intérêt porté par de nombreux pays étrangers aux recherches menées en France dans ce sens (collaborations internationales) confirme ce point de vue. Le stockage dans une roche argileuse très régulière et homogène, dépourvue de failles conductrices d'eau, comme l'est la couche du Callovo-Oxfordien sur le site de Bure, peut être retenu comme une solution de référence.

Toutefois la CNE souligne que les conditions d'une éventuelle décision finale de réalisation d'un stockage ne sont pas encore réunies. Le laboratoire souterrain doit être exploité pendant une durée suffisante. Les propriétés géologiques favorables observées à Bure doivent maintenant être vérifiées dans une zone plus large où pourrait être implanté un stockage.

L'issue des recherches sur l'entreposage des déchets, en surface ou à faible profondeur avec intention de les reprendre, dépend de la durée visée. S'il s'agit de moins d'un siècle, ce qui est suffisant pour permettre aux déchets actuels HAVL de refroidir, l'entreposage industriel de La Hague existe et pourrait être étendu. Il en va de même pour les déchets MAVL. Si on désire les entreposer pour plus longtemps (par exemple 300 ans) il faut prendre en compte le problème de la durabilité des ouvrages d'entreposage à construire qui n'a pas encore reçu de réponse acceptable. Sans préjuger de la stabilité des sociétés sur le long terme, un entreposage de longue durée fait peser une lourde charge sur des générations futures qui devraient aussi assumer le devenir ultime des déchets.

Le conditionnement des déchets a fait l'objet d'importants développements, portant à la fois sur les colis industriels et sur de nouvelles matrices.

Des conteneurs adéquats constituent une barrière indépendante essentielle pour la sécurité vis-à-vis des déchets, tant pour l'entreposage que pour le stockage. Un premier effort a été mené et de premiers démonstrateurs ont été réalisés. Les conteneurs destinés aux colis de déchets et aux éventuels assemblages de combustible usé demandent encore beaucoup de recherches et de travaux. Leurs spécifications ne sont pas encore définies.

L'objectif principal de la séparation-transmutation est la réduction de l'inventaire de radiotoxicité (par ingestion) et du dégagement thermique dans les déchets HAVL destinés au stockage géologique. Il s'agit d'un processus long qui n'a de sens que dans le cas du recours à l'énergie nucléaire sur une durée au moins séculaire. Dans cette perspective, de nombreuses études de très haut niveau et des développements technologiques sont à poursuivre en prenant en compte le traitement complexe d'une matière hautement radioactive.

Les recherches sur la séparation et la transmutation doivent être conduites en prenant en compte les exigences des ensembles industriels des systèmes nucléaires du futur. À part les RNR refroidis au sodium, les autres réacteurs évoqués pour assurer la destruction de certains radionucléides à vie longue, n'existent pas aujourd'hui. Certains d'entre eux sont spécifiquement destinés à ce rôle (ADS), d'autres sont d'abord prévus pour produire de l'électricité (Génération IV). De plus, dans l'état actuel des recherches, la transmutation de certains

radionucléides, tel que l'iode, paraît particulièrement difficile, alors que celle d'autres radionucléides présentant moins de risques résiduels pourrait être obtenue. Un tel ensemble de recherche devrait être évalué en termes risque-bénéfice. Il ne pourrait être mené à son terme que dans le cadre de coopérations internationales. L'efficacité d'un programme pouvant conduire à une réalisation industrielle dépendra de l'intensité de la recherche (dont des outils d'irradiation et d'analyses) et des difficultés rencontrées. En revanche, un déploiement industriel dépendra de nombreux autres facteurs tels que le contexte énergétique, l'importance de l'option nucléaire et, en fin de compte, de la pertinence et de la viabilité économique de la séparation-transmutation.

Les pouvoirs publics ont désormais les moyens de construire une stratégie de gestion des déchets radioactifs à vie longue (HAVL et MAVL) et de fixer les objectifs, répartir les ressources et établir les calendriers.

Principales recommandations

1. Etablir une stratégie globale de gestion des déchets radioactifs à partir des acquis de la recherche menée depuis quinze ans.
2. Retenir le stockage en formation géologique profonde comme la voie de référence pour la gestion des déchets ultimes et l'étudier complètement.
3. Dans ce cadre, continuer les recherches dans le laboratoire souterrain et sur la région de Bure, avec un programme par étapes.
4. Etudier l'ensemble des problèmes liés à la mise en œuvre et à l'insertion dans le territoire d'un éventuel stockage souterrain : ingénierie minière, transports, emploi, impact industriel, économique et social régional.
5. Approfondir les recherches sur le conteneurage des déchets de différents types, tenant compte des étapes successives de gestion des colis de déchets.
6. Maintenir l'effort sur les études de comportement à long terme des matériaux naturels et artificiels.
7. Si l'entreposage de longue durée devait être retenu comme voie de gestion, choisir un site précis d'application pour y conduire les études nécessaires.
8. Développer des techniques de séparation en relation avec le devenir des produits séparés.
9. Réorienter, focaliser et coordonner la recherche sur la séparation-transmutation en relation avec les exigences des systèmes de « *Génération IV* ».
10. Conclure sur le rôle et le devenir des ADS à l'issue du programme EUROTRANS.

Rapport global de la Commission nationale d'évaluation des recherches conduites dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991

INTRODUCTION

La loi du 30 décembre 1991 qui concerne les déchets radioactifs à haute activité et à vie longue vient à échéance cette année. La loi dispose dans l'article 4 que des recherches doivent être conduites simultanément sur :

- la recherche de solutions permettant la séparation et la transmutation des éléments radioactifs à vie longue présents dans ces déchets ;
- l'étude des possibilités de stockage réversible ou irréversible dans les formations géologiques profondes notamment grâce à la réalisation de laboratoires souterrains ;
- l'étude des procédés de conditionnement et d'entreposage de longue durée en surface de ces déchets.

Le CEA et l'Andra ont été désignés par le Gouvernement pour piloter les recherches selon ces trois orientations, l'Andra étant en charge de celle concernant le stockage, le CEA des deux autres. Les recherches conduites depuis 1992 ont fortement mobilisé une large communauté scientifique pluridisciplinaire nationale, voire internationale. Des thèmes de recherche conformes aux orientations de la loi ont été choisis par les acteurs de la loi, puis développés. Les résultats obtenus sur ces thèmes sont nombreux et sont rattachés à « trois axes de recherches ». Cette façon de présenter les résultats ne doit pas masquer une certaine interdépendance entre les axes, comme cela est expliqué en annexe 1. L'ensemble des résultats est consigné dans les rapports établis par les pilotes des recherches et remis aux ministres le 30 juin 2005. Ces rapports ont été fournis à la CNE, ainsi que des compléments fin 2005.

L'acquisition des résultats, essentiellement depuis 1996, a été plus ou moins régulière selon les axes et les années en raison des difficultés scientifiques ou techniques rencontrées et des réorientations nécessaires au vu de l'avancée des connaissances,

des aléas et de la pression du calendrier. Conformément à la loi, la CNE a évalué en détail ces résultats tout au long de ses 11 rapports annuels, établis pour le Gouvernement et rendus publics, et elle a fait des recommandations. Cela a assuré, dans la transparence, le suivi scientifique d'un programme de recherche de grande ampleur, au regard du temps alloué. Conformément à l'article 4 de la loi, la CNE donne dans le présent rapport une évaluation de l'ensemble des recherches effectuées. Le dernier rapport annuel comportera l'évaluation des résultats les plus récents acquis en 2006.

Cette évaluation va à l'essentiel. Elle met les résultats en perspective avec l'objectif de la loi afin d'éclairer le législateur sur les possibilités de la science au regard de choix dans la gestion des déchets radioactifs de haute activité et à vie longue. Elle comporte pour chaque axe un bilan constitué d'une part, par les acquis des recherches et d'autre part, par une estimation des recherches qui seraient envisageables pour pouvoir décider de réalisations concrètes. Elle comporte aussi une présentation des réflexions que ce bilan inspire à la CNE, au regard des possibilités de gestion des déchets visés par la loi. Pour l'axe 1, elle évalue les recherches conduisant aux faisabilités scientifique et technique de la séparation et de la transmutation. Pour l'axe 2, elle évalue les recherches conduites en vue d'examiner si la couche du Callovo-Oxfordien dans la région de Bure peut accueillir un éventuel stockage, ainsi que les études génériques sur les granites. Pour l'axe 3 enfin, elle évalue d'une part les recherches sur le conditionnement des déchets tant pour l'entreposage que pour le stockage et, d'autre part, les recherches relatives à la possibilité d'un entreposage de longue durée de colis de déchets ou d'assemblages du combustible usé.

Les conclusions de l'évaluation globale de la CNE résultent des évaluations continues qu'elle a faites depuis la promulgation de la loi et s'appuient sur des rapports d'experts internationaux qu'elle a sollicités. L'évaluation continue de 1994 à 2005 repose sur 119 auditions des travaux réalisés par

les acteurs de la loi et sur de nombreuses réunions de la Commission.

Avant d'en venir à l'évaluation proprement dite des résultats, la CNE souhaite rappeler quelques points généraux concernant la gestion des déchets radioactifs et les recherches sur cette gestion.

L'Andra a établi un inventaire prospectif des déchets renfermant des radionucléides à vie longue produits jusqu'en 2020. Cette longue durée de vie des déchets à gérer nécessite de considérer les résultats scientifiques dans la perspective de leur « pouvoir de prévision » sur de très longues périodes de temps, afin de répondre à l'objectif fixé par l'article premier de la loi : la protection de la santé de l'homme « du présent et du futur » ainsi que de l'environnement, tout en considérant les droits des générations à venir. Cet objectif englobe l'objectif plus immédiat de la protection des populations et des travailleurs.

La nature et la quantité des déchets dépendent de la stratégie suivie en matière d'énergie nucléaire et de l'utilisation, à une époque donnée, des ressources de la science et de la technologie. Aussi sérieuses que soient les dispositions prises pour réduire la nocivité des déchets à court mais surtout à long terme, des incertitudes scientifiques demeurent et augmentent à mesure que l'horizon temporel d'analyse de cette nocivité s'éloigne. En conséquence, pour le long terme, les principes et moyens de gestion doivent être choisis en considération du « principe de précaution » inscrit dans la charte de l'environnement de 2004. L'application de ce principe permet ainsi, si on réduit, autant que l'on peut, la nocivité intrinsèque des déchets, de se prémunir contre l'occurrence d'événements non examinés dans les scénarios d'évolution d'un entreposage de longue durée ou d'un stockage géologique qui sont utilisés, de pair avec les données scientifiques, pour prévoir la nocivité des radionucléides à vie longue.

La question scientifique centrale qui se pose dans la gestion des déchets considérés par la loi est de savoir jusqu'à quelle époque du futur et avec quelle

assurance la science permet de prévoir les phénomènes en cause. Pour le moyen terme (centaines d'années et plus) on utilise la science des matériaux naturels et artificiels ; pour le long terme (dizaines de milliers d'années et plus), on fait appel à la géologie, à la géochimie des éléments et la géochimie isotopique, et à la mécanique des roches, avec, bien entendu, des recouvrements dans le temps. Les recherches conduites dans le cadre de la loi ont fait avancer nos connaissances sur le vieillissement des matériaux utilisés (ou qu'il est prévu d'utiliser) pour gérer les déchets à vie longue. Elles permettent de prévoir raisonnablement leur comportement dans des conditions environnementales données et de les confronter à ceux d'analogues archéologiques ou naturels. La géochimie au sens large, la géologie et la paléoclimatologie permettent de retracer l'histoire de la terre et d'en prolonger l'évolution. Par conséquent, c'est sur des bases scientifiques solides que les études prévisionnelles de nocivité d'un stockage ont été conduites. Il n'en reste pas moins des incertitudes scientifiques car la prévision des phénomènes dans la gestion des déchets à vie longue est une tâche ardue, dont on n'a guère d'exemple, et qui soulève de difficiles problèmes de méthode. Il sera donc nécessaire de poursuivre activement les recherches qui ne peuvent encore être considérées, dans ce domaine, comme achevées. Pour un projet donné d'entreposage ou de stockage, les dispositions à prendre pour limiter les conséquences de ces incertitudes scientifiques relèvent de la conception du dépôt, dont l'efficacité est évaluée par des analyses de sûreté. Ce processus est itératif.

La CNE évalue la cohérence scientifique des données prises en compte, les fondements scientifiques, leur expression mathématique et les modèles utilisés dans la démarche de sûreté. L'évaluation des résultats des analyses de sûreté proprement dites est hors de son champ d'expertise et ne relève que des autorités compétentes en matière de sûreté et de radioprotection. Il en va de même des calculs des nocivités potentielles du combustible usé ou des colis de déchets ou bien de la nocivité des radionucléides introduits dans la biosphère, qui font appel à des données de radioprotection internationales.

Axe 1 - Séparation-Transmutation

L'objectif visé par les recherches de l'axe 1 est de réduire l'inventaire de radiotoxicité* dans les déchets HAVL du retraitement actuel, dû aux radionucléides à vie longue contenus dans le combustible usé. Tel qu'il est pratiqué aujourd'hui en France, le retraitement conduit au monorecyclage d'environ 80 % du plutonium produit dans tout le combustible UOX déchargé des réacteurs et au recyclage d'une partie de l'uranium de retraitement. Tous les autres éléments contenus dans le combustible usé UOX sont envoyés aux déchets HAVL. Le combustible MOX, après usage n'est, pour l'instant, pas retraité. L'uranium de retraitement non utilisé est mis en réserve.

La réduction de l'inventaire de radiotoxicité par séparation-transmutation nécessiterait une profonde modification de l'aval du cycle du combustible actuel afin d'envoyer aux déchets le minimum de radionucléides à vie longue. Il faudrait aller au-delà de la séparation du plutonium et de l'uranium du combustible usé en séparant en plus les actinides mineurs et certains produits de fission et transmuter les radionucléides à vie longue qu'ils renferment. L'enchaînement de la séparation et de la transmutation passe par une étape importante, la préparation de combustibles ou de cibles de transmutation. Afin d'obtenir des rendements de transmutation élevés justifiant l'intérêt de cette stratégie, il conviendrait de recycler les radionucléides non transmutés après leur passage en réacteur. Il est important de rappeler que la transmutation des éléments transuraniens s'effectue non seulement par fission de certains de leurs isotopes, mais aussi par captures successives de neutrons. Celles-ci conduisent à des actinides ayant des isotopes à vie courte. Certains d'entre eux émettent un intense rayonnement, notamment de neutrons. Le rapport entre les captures et les fissions dépend du spectre de neutrons.

* Par convention, l'inventaire de radiotoxicité d'une quantité de matière contenant des radionucléides est défini comme la somme des produits de l'activité (Bq) de chacun des radionucléides, supposés ingérés, par le facteur de dose correspondant (Sv/Bq).

Avant d'aboutir à la mise en œuvre industrielle de la stratégie de séparation-transmutation, plusieurs étapes de recherches de faisabilité – scientifique, technique et pré-industrielle – devraient être franchies. Parallèlement de nouveaux moyens industriels de séparation et de transmutation devraient être mis en place. La séparation-transmutation conduirait à des déchets différents de ceux d'aujourd'hui. Elle diminuerait la charge thermique à long terme des colis de déchets HAVL. Cet aspect complémentaire présenterait un intérêt pour le stockage géologique des colis de déchets résiduels ultimes.

Dans ce contexte et pour étudier les faisabilités scientifique et technique de la séparation-transmutation, le choix du CEA a rapidement convergé vers l'étude de la séparation de chaque actinide mineur : neptunium, américium et curium et de trois produits de fission à vie longue, technétium, iode et césium, en utilisant et en perfectionnant des techniques déjà éprouvées industriellement à La Hague. Pour la transmutation, les études ont porté sur les possibilités d'utiliser des réacteurs à neutrons thermiques ou des réacteurs à neutrons rapides critiques, du type Superphénix, ou bien des réacteurs à neutrons rapides sous-critiques, ces derniers devant alors être couplés à un accélérateur de protons pour produire, par spallation dans une cible, les neutrons nécessaires à leur fonctionnement (systèmes dits ADS). Ce sont essentiellement les combustibles et cibles à base d'oxydes d'actinides qui ont été étudiés pour la transmutation, composés du même type que ceux constituant le combustible UOX et MOX.

Les expériences d'irradiation en réacteur ont plusieurs objectifs, par exemple de mesurer des données neutroniques, de tester le comportement des matériaux et la tenue globale d'aiguilles où ces matériaux sont disposés. Ces objectifs ne sont pas tous atteints en même temps ni dans une même expérience. Les expériences intégrales allant jusqu'à l'analyse complète des transformations physico-chimiques d'aiguilles irradiées sont encore peu nombreuses.

Enfin des recherches d'ampleur limitée ont porté sur une nouvelle filière fondée sur l'utilisation du thorium dans des réacteurs à neutrons thermiques où le combustible serait un mélange de sels fondus. Dans ce cas, la très faible production de plutonium et d'actinides mineurs ne justifie pas une opération de transmutation. Cette filière conduirait à un inventaire de radiotoxicité des déchets HAVL inférieur, d'au moins un facteur dix, à celui du cycle actuel à l'uranium jusqu'à 10 000 ans.

1.1 - ACQUIS DES RECHERCHES

L'évaluation des résultats des recherches dont la CNE a eu connaissance est la suivante.

Séparation

La faisabilité scientifique de la séparation des deux actinides mineurs américium et curium, a été démontrée en 2001. Elle repose sur l'utilisation d'une nouvelle molécule particulièrement robuste (un diamide) qui permet de séparer chaque élément avec des performances élevées. Les expériences décisives ont porté sur des échantillons d'une centaine de grammes de combustible usé. La faisabilité scientifique de la séparation du césium a également été établie. Ces résultats ont nécessité un très long travail de recherche fondamentale. La séparation du neptunium, du technétium et de l'iode ne nécessitait que des modifications du procédé Purex, modifications qui ont été étudiées.

La démonstration de la faisabilité technique de la séparation des actinides mineurs a été entreprise au début de 2005 dans des installations homologues à celles de la Hague, installées dans Atalante, et elle est en cours. Les expériences portent sur 15 kilogrammes de combustible usé. Elles impliquent successivement trois étapes : Purex modifié (séparation du neptunium et du technétium), Diamex-Sanex (séparation des actinides mineurs et des lanthanides), Diamex-2 (séparation de l'américium du curium). La faisabilité technique de Purex modifié a été démontrée pour le neptunium courant 2005 ; l'étape Diamex-Sanex vient d'être menée. Les rendements de séparation donnés par le CEA atteignent 99,9 %.

S'agissant des produits de fission à vie longue, il n'y pas eu de démonstration de faisabilité technique de séparation pour le césium. Le technétium présent dans le combustible usé ne peut pas être

totallement récupéré dans le procédé actuel de retraitement (50 à 90 % selon les cas). La démonstration de la faisabilité technique de la séparation du technétium n'a pas été concluante. L'iode, en revanche, peut être récupéré à mieux que 97 % dans le retraitement actuel.

En résumé, les procédés de séparation actuels testés par le CEA dans Atalante permettraient d'extraire séparément les actinides mineurs (neptunium, américium, curium) à partir de la solution de haute activité issue du procédé de retraitement Purex, solution actuellement vitrifiée. Les recherches en séparation par voie hydrochimique qui ont été entreprises et conduites par le CEA n'ont pas encore toutes été portées au niveau de la faisabilité technique, mais sont en réserve pour des études ultérieures, selon nécessité.

Le CEA a aussi conduit des recherches fondamentales en séparation par voie pyrochimique. L'effort n'a pas dépassé le stade du laboratoire.

Transmutation

La démonstration de la faisabilité scientifique de la transmutation des actinides nécessite en premier de disposer de données physiques de base concernant les interactions des radionucléides à transmuter avec les neutrons. Beaucoup ont été acquises et nombre d'incertitudes sur des données déjà existantes ont été réduites. Il reste encore à améliorer les données physiques pour les radionucléides les plus lourds, afin de garantir les performances calculées de certaines opérations de transmutation en un seul passage en réacteur. Il faut ensuite disposer de matériaux incorporant les radionucléides et aptes, sous un conditionnement approprié, à être irradiés en réacteurs. Cette aptitude doit être prouvée expérimentalement. De tels matériaux ont été préparés et des aiguilles expérimentales à base d'uranium, de plutonium, d'américium et de neptunium (renfermant quelques centaines de grammes d'actinides mineurs) ont été irradiées dans différents réacteurs. De fait, la plupart sont encore en cours d'irradiation dans Phénix suite à la disposition tardive de ce réacteur. Les expériences à l'appui de la démonstration scientifique de la transmutation sont lourdes et longues. Seuls les résultats de certaines expériences achevées sont disponibles, qui montrent que certains matériaux à base d'oxydes peuvent être de bons candidats pour constituer des combustibles ou des cibles de transmutation. Des matériaux à base de nitrures et de car-

bures également envisageables, sont à l'étude. D'autres résultats sont en cours d'acquisition.

Les expériences intégrales de transmutation datent d'avant la loi et ont été entreprises suite aux recommandations du premier rapport Castaing. Au plan de la physique de la transmutation, ces expériences d'irradiation dans Phénix ont montré que l'américium et le neptunium peuvent être transmutés dans un flux de neutrons rapides (irradiation terminée en 1988). Les rendements mesurés sont compatibles avec les prévisions correspondant aux conditions expérimentales étudiées.

Globalement, la CNE considère que la faisabilité scientifique de la transmutation dans le spectre de neutrons rapides de Phénix a été établie pour l'américium et le neptunium.

La démonstration de la faisabilité technique de la transmutation en mode homogène (combustible) ou hétérogène (cible) des actinides nécessite de montrer que l'on peut laisser longtemps en réacteur les matériaux de transmutation en quantités significatives (au niveau d'un assemblage par exemple). Toutes les expériences partielles réalisées sur les actinides mineurs dans ce sens ne sont qu'illustratives. Une démonstration complète nécessite aussi de montrer que l'on peut retraiter les matériaux irradiés pour recycler les actinides non transmutés. Aucune expérience dans ce sens n'a encore été réalisée.

Ainsi la CNE considère que la faisabilité technique de la transmutation des actinides mineurs n'est pas acquise à ce jour. Les études effectuées conduisent néanmoins aux observations suivantes.

La transmutation des actinides mineurs en neutrons thermiques est théoriquement possible. Mais elle se heurterait dans la pratique à d'importantes difficultés résultant notamment de la production de curium et de la consommation accrue d'uranium enrichi. Les complications attendues au fur et à mesure des recyclages multiples, écartent de fait l'utilisation des REP à cette fin.

Les réacteurs à neutrons rapides (RNR) peuvent conduire en pratique à une transmutation efficace en produisant moins d'actinides de rang élevé et sans imposer de pénalité énergétique en uranium enrichi. Les RNR à sodium sont une réalité. Ils pourraient théoriquement accepter dans leur com-

bustible MOX jusqu'à 2,5 % d'actinides mineurs (curium inclus), mais il s'agit d'une limite non encore atteinte expérimentalement. Pratiquement, il pourrait être difficile de dépasser 1 %. Pour augmenter le rendement de transmutation, il semblerait possible d'utiliser soit des RNR à gaz (combustible MOX à 5 % d'actinides mineurs) soit des ADS (combustible inerte à 50 % d'actinides mineurs). La possibilité de réaliser de tels systèmes n'est pas avérée et de telles teneurs en actinides mineurs dans des combustibles n'ont encore jamais été atteintes. La teneur maximum en actinides que pourra tolérer un combustible de transmutation, oxyde ou non, est un des enjeux majeurs de la faisabilité technique de la transmutation. La transmutation à partir de cible en RNR sans recyclage, c'est-à-dire « en une seule passe », pose de difficiles problèmes de tenue des matériaux sur une longue période.

Les réacteurs RNR font l'objet d'études dans le projet international « *Generation IV* ». De leur côté, les ADS ont fait l'objet de recherches expérimentales et d'études d'avant-projet dans le cadre de la loi, au sein d'importants programmes (IPHI, MUSE, MEGAPIE, PDS-XADS, différents thèmes des 5^{ème} et 6^{ème} PCRD Euratom). Toutes ont une dimension européenne, voire mondiale, marquée. Les recherches sur l'accélération de protons de haute intensité (IPHI) et sur le couplage d'une source de neutrons avec un cœur sous-critique de réacteur (MUSE) ont été très fructueuses. Les verrous technologiques des trois composants d'un ADS ont été concrètement identifiés mais sont loin d'être levés. Le retard de l'expérience relative à la source de spallation (MEGAPIE), qui est un « verrou » technique majeur, constitue à ce jour un manque important.

La transmutation des produits de fission à vie longue (iode, césium, technétium) est consommatrice de neutrons, nécessite un spectre de neutrons thermiques et demande de longues irradiations. Ces exigences peuvent être surmontées soit en utilisant de l'uranium plus enrichi qu'actuellement dans un REP, soit en utilisant des zones à neutrons thermiques d'un RNR. À cette complication s'ajoutent, pour chacun des trois produits de fission, les difficultés particulières suivantes que les recherches ont montrées. Les composés connus de l'iode ne sont pas aptes à être transmutés en réacteur dans les conditions actuelles. Le césium ne pourrait être transmuté qu'après avoir subi une séparation isoto-

pique, ce qui paraît peu réaliste au vu des quantités de matière à traiter. Ce dernier produit de fission, s'il était séparé, ne pourrait donc bénéficier au mieux que d'un conditionnement spécifique et, à cet égard, les recherches ont montré que des céramiques à fort pouvoir de confinement peuvent être envisagées. L'iode pourrait aussi bénéficier d'un tel conditionnement. Le *technétium* n'est pas totalement récupérable des solutions de dissolution du combustible usé car il est incorporé à des composés insolubles qu'on ne peut pas solubiliser par des moyens compatibles avec le procédé Purex. Pour le technétium soluble, on a montré que l'on pouvait le transmuter en ruthénium stable avec des neutrons thermiques.

Les scénarios

Toutes les recherches sur la transmutation des actinides ont été accompagnées d'études théoriques de scénarios. Celles-ci montrent comment on peut associer la production d'électricité à la transmutation, quels seraient les encours de matières nucléaires et de déchets, les quantités d'actinides mineurs à transmuter en fonction du temps et celles allant aux déchets et, finalement, à quelles sérieuses difficultés il faut s'attendre pour la fabrication et le traitement des combustibles (ou de cibles) au cours des recyclages nécessaires pour transmuter les actinides.

Les scénarios à double strate, qui découplent la production électrique de la transmutation, présentent un intérêt spécifique car ils n'affectent pas le cycle standard du combustible des réacteurs électronucléaires.

Lien entre séparation et transmutation

Sur les deux volets de recherches que comporte le couple séparation-transmutation, le volet séparation est en avance sur celui de la transmutation. La synchronisation qu'exigerait un cycle global séparation-transmutation ne peut pas être atteinte avant longtemps. Aussi trois questions ont-elles été posées :

1. peut-on mettre en œuvre une stratégie de séparation des actinides mineurs sans attendre que soit défini un système de transmutation ?
2. si oui, dans quelles conditions séparer les actinides mineurs et sous quelle forme les entreposer pour pouvoir ultérieurement procéder à leur transmutation ?

3. peut-on reprendre les déchets vitrifiés pour en extraire les éléments à vie longue ?

Les recherches préliminaires entreprises pour tenter de répondre à ces questions montrent qu'elles nécessiteraient des opérations lourdes dont la faisabilité n'est pas démontrée.

Enseignements des recherches

Les enseignements des recherches conduites dans le cadre de l'axe 1 sont les suivants :

- Il apparaît que les trois produits de fission étudiés ne peuvent pas en pratique faire l'objet d'une stratégie industrielle de séparation-transmutation en réacteur et à ce jour, alors que deux d'entre eux, iode et césium, sont les principaux contributeurs au risque résiduel à long terme (millénaires) d'un stockage.

- La transmutation des actinides mineurs dans les réacteurs à neutrons rapides est, en principe, possible. Cependant la capacité de fabriquer des combustibles ou des cibles de transmutation n'est pas encore démontrée. Les oxydes comme support de transmutation des actinides offrent des garanties mais l'étude des combustibles et cibles de transmutation ne porte encore que sur des oxydes peu chargés en actinides. Aucune expérience de leur recyclage n'a été entreprise. Seul le retour d'expérience du retraitement dans le passé de combustible MOX fortement irradié est disponible. Il faudra beaucoup de temps et de moyens pour mettre finalement au point une nouvelle filière de combustible ou de cible de transmutation car les expériences sont longues par nature. Le retard des recherches dans ce domaine est en partie imputable à la non disposition temporaire de moyens d'irradiation en neutrons rapides en France. Il n'y a pas actuellement suffisamment de résultats et de choix stratégique pour prendre une décision de nature industrielle sur la séparation et la transmutation.

1.2 - RECHERCHES ENVISAGEABLES APRÈS 2006

Les recherches envisageables après 2006 devront tenir compte des orientations stratégiques prises par les pouvoirs publics. La cohérence des recherches devrait alors être assurée par les exigences des systèmes permettant la transmutation et qui auront été choisis. Nous présentons ci-dessous un panorama des actions qui pourraient être conduites

dans les différents domaines prolongeant les recherches menées depuis quinze ans.

Les procédés de séparation poussée des actinides en voie de mise au point dans le cadre des recherches conduites jusqu'à aujourd'hui ouvrent des perspectives intéressantes pour aller vers une éventuelle faisabilité industrielle. Toutefois les procédés de séparation ne pourront utilement être développés et testés, par exemple à une échelle pilote, que lorsque les objectifs de séparation auront été définis en termes de devenir des produits séparés, ainsi que ceux concernant les combustibles ou les cibles de transmutation et lorsque les recherches sur ces systèmes auront suffisamment progressé. Ainsi, des procédés innovants en séparation, différents de ceux étudiés jusqu'ici, pourraient être nécessaires pour répondre aux besoins des systèmes RNR de 4^{ème} génération transmutant les actinides, ou des systèmes ADS. Les RNR impliquent quasiment tous d'utiliser une ressource en uranium, notamment celle en uranium appauvri actuellement mis en réserve. Tous les systèmes impliquent le multirecyclage des actinides. Aussi les recherches en séparation sont-elles loin d'être achevées et devraient se poursuivre vigoureusement. Les installations appropriées existent au CEA et dans l'Union européenne.

Les recherches en pyrochimie, qui ont démarré en France dans le cadre de la loi, offrent des possibilités de traitement rapide de matériaux très radioactifs comme les combustibles de transmutation des ADS (ou de cibles) par dissolution dans des sels fondus. Elles pourraient être augmentées et ciblées sur ce sujet car elles n'ont réellement porté que sur l'acquisition de connaissances de base sur les actinides et les produits de fission dans ces milieux. Pour cela il conviendrait de disposer d'installations spécifiques permettant de travailler sur les sels et métaux fondus en haute activité. Celles-ci n'existent pas en France mais certains pays en disposent.

La mise au point de matériaux de transmutation des actinides mineurs va de pair avec les irradiations en réacteurs. Il faut de très longs essais pour mettre au point de nouveaux combustibles ou cibles. C'est un domaine extrêmement compliqué. Il convient donc de terminer les expériences intégrales d'irradiation en cours des aiguilles expérimentales et de poursuivre celles permettant de tester des matériaux. Phénix doit s'arrêter fin 2008. La France ne disposera alors plus de réacteurs à

neutrons rapides et les expériences ne pourront se faire qu'à l'étranger, en collaboration. Il reste aussi à affiner certaines données neutroniques et physico-chimiques pour les actinides lourds, afin de mieux cerner les comportements des combustibles ou cibles de transmutation à haute teneur en actinides mineurs. Les expériences spécifiques que l'acquisition de ces données demande devraient donc être poursuivies.

Les recherches en transmutation pâtissent particulièrement du retard de deux séries d'expériences, pour l'ensemble des systèmes à l'étude. Il s'agit des expériences d'irradiation dans Phénix et, pour les ADS, de l'expérience MEGAPIE relative à la source de spallation, qui est un « verrou » technique majeur. On n'a aujourd'hui qu'un faible retour d'expérience de tels dispositifs. Il conviendrait d'organiser spécifiquement leur poursuite.

Les recherches expérimentales du programme international « *Generation IV* » en sont à leurs débuts. Pour le CEA, elles portent sur trois filières : RNR-sodium, RNR-gaz et réacteurs à très haute température (VHTR). D'autre part, en 2009 sera prise une décision au niveau européen concernant la construction d'un démonstrateur expérimental d'ADS.

D'une façon générale, de solides données techniques et des expériences sur des composants sont nécessaires pour assurer la démonstration de la faisabilité technique des systèmes de transmutation et, à cet égard, un important programme de recherche et développement à caractère technologique devrait être entrepris pour être développé vers le milieu du siècle.

Il est clair que conduire la séparation-transmutation à la maturité industrielle en accord avec les besoins de production d'électricité serait une opération de grande ampleur qui devrait surmonter de sérieuses difficultés au sujet de la fabrication, de l'irradiation et du retraitement des matériaux support de la transmutation. Les recherches pour y parvenir seront lourdes. Un cadre coopératif international paraît assurément nécessaire pour les conduire.

Les études de scénarios d'élimination des actinides mineurs ont permis d'identifier plusieurs démarches possibles, tant au moyen de RNR que d'ADS, en combinant, ou non, ces deux types de systèmes.

Les recherches futures sur la réduction de la nocivité des déchets renfermant des radionucléides à vie longue et de leur puissance thermique résiduelle devraient s'inscrire dans le cadre global des systèmes nucléaires pris dans leur ensemble et comportant les réacteurs destinés à la production d'électricité.

Enfin, dans la perspective de réduire la formation d'actinides lourds, l'utilisation du thorium comme combustible nucléaire est actuellement étudiée en France dans le cadre de la filière de réacteurs à sels fondus.

Si on souhaite transmuter l'iode, il faudrait rechercher des procédés innovants.

1.3 - RÉFLEXIONS DE LA CNE

La date de 2040 avancée pour la mise en œuvre industrielle de réacteurs à neutrons rapides (critique ou sous-critique) susceptible de transmuter les actinides et pour disposer de nouvelles installations de séparation impliquent que jusque vers cette date les déchets HAVL de retraitement resteront de même nature qu'aujourd'hui. Aussi le « colis de verre » demeure-t-il le pivot de la gestion de la quasi-totalité de la radioactivité du combustible usé UOX. Ainsi, *de facto*, jusqu'à la moitié du siècle, les déchets HAVL engagés seront traités comme les déchets actuels, c'est-à-dire comme des déchets ultimes.

La politique annoncée par EDF prévoit de retraiter tous les assemblages UOX de combustible usé du parc et d'en conserver le plutonium restant, après recyclage, dans le combustible MOX usé. La cohérence d'une stratégie de séparation-transmutation appliquée au MOX usé, qui contient beaucoup plus d'actinides mineurs que le combustible usé UOX, voudrait que la séparation précède immédiatement la transmutation. Or, les projets actuels de retraitement du MOX donnés par EDF en liaison avec la date de 2040 sont de commencer cette opération vers 2030 - 2035, alors que l'usine de La Hague sera en fin de vie, mais pas encore remplacée. Il y a donc un problème d'ordonnancement de ces activités.

Au-delà du demi-siècle, la séparation-transmutation pourrait avoir atteint la maturité industrielle. Mais pour cela un long travail de recherche et développement reste à poursuivre avec la volonté d'aboutir car aujourd'hui la CNE considère que :

- Les recherches en séparation poussée ont certes conduit à des avancées scientifiques importantes mais les techniques de cette séparation ont été choisies alors que les conditions et les objectifs de la transmutation du futur n'étaient et ne sont toujours pas fixés. Les exigences industrielles de préparation des combustibles ou cibles sont bien plus sévères qu'à l'échelle de la fabrication des échantillons pour les besoins des irradiations expérimentales et il n'est pas possible actuellement de se prononcer sur la faisabilité des procédés de production des composés solides étudiés, à supposer qu'ils soient appropriés. Dès lors la conclusion du CEA sur « la faisabilité technique de la transmutation de l'américium et du neptunium dans les réacteurs électrogènes de technologie actuelle » considérée comme « acquise » semble prématurée. En revanche celle concernant la transmutation du curium « qui nécessiterait de modifier l'ensemble du cycle du combustible » attire l'attention sur un problème important. Ce radioélément pose un dilemme de gestion dû à sa forte activité. S'il est isolé des autres actinides, il est alors présent en quantités trop importantes pour être incorporé dans les verres actuels et son entreposage de longue durée pour décroissance n'est pas simple. En revanche, s'il est recyclé avec les autres actinides, c'est au prix de complications de fabrication des combustibles ou des cibles de transmutation.

- Les recherches conduites sur l'axe 1, tant fondamentales que technologiques, permettent d'avoir une vision claire de l'ampleur des travaux nécessaires pour aboutir à la faisabilité industrielle de la transmutation des actinides. Lorsque l'on considère le système final à mettre en œuvre pour atteindre des capacités industrielles pour la transmutation, il apparaît que les quantités d'actinides et, d'une façon générale, de matière radioactive qui circuleraient dans les cycles seraient très importantes. Ses caractéristiques seraient très différentes de celles de la matière radioactive qui circule aujourd'hui dans les ateliers du cycle du combustible REP. La transmutation des actinides nécessiterait plusieurs recyclages (retraitement et fabrication) s'étalant sur de longues périodes de temps et il faudrait mettre en place de nouveaux cycles de combustibles. Il faut donc s'attendre à affronter des défis scientifiques et technologiques difficiles. La gestion du curium, question clé, en est un exemple.

- La transmutation est un objectif qui ne peut s'inscrire que dans une poursuite du nucléaire, dans une

perspective de mise en œuvre mondiale de systèmes à spectre de neutrons rapides, laquelle dépend entre autres de la demande d'électricité pour la deuxième moitié du siècle. À l'inverse, il est souvent avancé que le développement du « nucléaire durable » (au-delà des réacteurs sur le marché) passe obligatoirement par la surgénération du plutonium et l'élimination de certains radionucléides à vie longue. Cela implique la séparation des éléments en cause. La séparation et la transmutation sont ainsi rattachées aux moyens d'utiliser plus complètement l'uranium, tout en éliminant certains déchets. Cette affirmation, fondée notamment sur le retour d'expérience des réacteurs, doit être tempérée tant que des études supplémentaires n'ont pas livré de conclusions nettes sur la tenue des divers matériaux dont l'emploi est envisageable.

- Quels que soient les progrès qui pourraient être effectués, il subsistera des déchets ultimes, ne serait-ce que ceux contenant les produits de fission. La séparation-transmutation, même si elle aboutit, ne résoudra pas en totalité et à elle seule le problème de la gestion des déchets HAVL.

On pouvait initialement espérer supprimer les radionucléides de haute activité et à vie longue. Les recherches ont montré qu'il s'agit d'un problème d'une grande complexité qui pose de redoutables problèmes techniques. Il conviendrait de mettre en balance les bénéfices techniques attendus à moyen ou long terme (diminution de la radiotoxicité et de la chaleur dégagée par les colis de déchets) et les risques supplémentaires introduits à court terme, du fait des manipulations. On sera alors amené à privilégier le principe de précaution dans le long terme aux dépens de celui dans le court terme, ou bien l'inverse. Les objets visés par cette analyse peuvent être hiérarchisés, l'iode vient en tête puis les actinides, la fabrication de cibles ou de combustibles correspondants et leur retraitement viennent ensuite. La transmutation à l'échelle industrielle pose ainsi de tels problèmes (absence de composés utilisables de l'iode, volatilité des composés d'américium et de curium...) qu'on ne peut pas en prévoir le succès ou l'échec. Enfin, même en cas de réussite, il restera toujours un résidu de déchets à vie longue.

Axe 2 - Stockage en formation géologique profonde

L'objectif visé par les recherches de l'axe 2 est d'étudier les possibilités de stockage des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue dans des formations géologiques profondes, notamment grâce à la réalisation de laboratoires souterrains. L'Andra a mené ses recherches pour que cet objectif puisse viser non seulement les déchets HAVL issus du retraitement (verres nucléaires), mais aussi les déchets MAVL et les assemblages du combustible usé qui ne serait pas retraité. Après une phase initiale de recherche de sites français potentiellement favorables, le travail de l'Andra s'est concentré depuis 1998 sur :

- une formation argileuse, le Callovo-Oxfordien, qui est étudiée aux confins des départements de la Meuse et de la Haute-Marne sur le site de Bure ;
- des études à caractère générique sur le granite effectuées soit en utilisant les informations disponibles sur des formations géologiques granitiques françaises, soit en travaillant sur des sites étrangers en collaboration avec les pays hôtes, principalement la Suède, la Finlande, la Suisse et le Canada, puisque aucun site précis sur le sol français n'a été retenu.

2.1 - ACQUIS DES RECHERCHES

L'évaluation des résultats des recherches dont la CNE a eu connaissance est la suivante :

Introduction

L'Andra a publié en juin 2005 un volumineux dossier décrivant l'ensemble des résultats obtenus depuis la promulgation de la loi de 1991, tant pour le granite que pour l'argile, avec, en support aux conclusions présentées, des référentiels de connaissance qui regroupent les résultats détaillés des recherches. Une deuxième version du dossier 2005 Argile a été diffusée en décembre. La CNE avait aussi eu connaissance, chaque année, des documents « Bilan et Travaux » de l'Andra et des rapports intermédiaires préparés par l'Andra. Elle les a évalués. Par ailleurs, la commission a aussi eu for-

mellement connaissance, des « revues par les pairs » sollicitées par les pouvoirs publics auprès de la NEA (2003 et version provisoire du 22 décembre 2005). Elle s'est informée des recherches effectuées à l'étranger sur le stockage géologique. En outre, certains membres de la CNE ont pris connaissance du document préparé par l'organisme IEER à la demande du CLIS.

L'Andra a mené ses travaux dans le cadre de larges collaborations nationales et internationales. Elle a participé à de nombreux programmes internationaux et, avant que le laboratoire de Bure ne soit disponible, elle a bénéficié de l'accès à des laboratoires souterrains étrangers, déjà construits, notamment en Europe (Suisse, Belgique). Après la sélection en décembre 1998 du site de Bure par le Gouvernement pour l'implantation d'un laboratoire souterrain, l'Andra a su mobiliser pour l'étude de ce site de très nombreuses équipes universitaires françaises et étrangères, des établissements publics comme le CNRS, le BRGM ou l'IFP, des laboratoires universitaires et d'écoles d'ingénieurs, des entreprises privées et des groupes de recherche étrangers. Ces travaux ont fait appel aux techniques les plus modernes et ont été menés dans un contexte très ouvert, marqué par des participations ou l'organisation de colloques internationaux permettant une discussion et une diffusion rapide des résultats et des découvertes au sein de l'ensemble de la communauté scientifique. De son côté, lors des auditions et dans les divers rapports, la CNE a eu accès à de nombreuses informations complémentaires aux données, qui lui ont été souvent présentées immédiatement après leur acquisition. Elle n'a aucun motif de penser que la transparence, fondement même de l'éthique scientifique, n'ait pas été respectée par l'Andra.

Stockage Granite

Le dossier Granite 2005 évalue les possibilités qu'offre la roche granitique pour le stockage profond. En l'absence de site désigné, l'Andra a travaillé sur une base générique. Ses études ont été

menées sur plusieurs massifs français et en participant à de nombreux programmes expérimentaux d'études des possibilités de stockage en massif granitique dans le monde (Suède, Finlande, Suisse et Canada). Le rapport explicite les caractéristiques générales des granites : de bonnes propriétés mécaniques et une quasi-étanchéité à l'intérieur de blocs délimités par des fractures d'extension, d'espace-ment et d'ouverture variables. Ces fractures conduisent plus ou moins bien l'eau selon qu'elles sont grandes ou petites, ouvertes ou colmatées, et selon leur fréquence (nombre de fractures par mètre) qui détermine leur connectivité. Certaines peuvent être colmatées par des dépôts secondaires qui constituent alors des pièges potentiels pour des radionucléides. On voit ainsi que la qualité d'un site granitique pour un stockage dépend primordialement de sa fracturation. En s'appuyant notamment sur les données acquises dans 78 sites français, l'Andra a développé la démarche de reconnaissance d'un site granitique qui inclut une phase conduite depuis la surface préalable à l'implantation d'un laboratoire souterrain dans une zone qui apparaîtrait favorable. L'accent a été mis en premier chef sur la reconnaissance des fracturations (régionale, locale et la micro fracturation), leur modélisation, puis l'acquisition des données nécessaires à la modélisation hydrogéologique et hydrogéochimique. De ces études approfondies, il ressort que même si un laboratoire souterrain permettait de reconnaître la bonne qualité d'un granite à l'échelle d'un bloc quasi-étanche (parce que peu fracturé) de quelques centaines de mètres de côté, il serait loin d'être simple et nullement assuré dans le contexte français qu'on puisse trouver le volume nécessaire pour un stockage. En effet, celui-ci nécessiterait de trouver une soixantaine de blocs similaires répartis sur un millier d'hectares.

La collaboration de l'Andra aux programmes étrangers lui a permis de mettre au point une méthodologie, de tester et maîtriser différentes techniques de reconnaissance, par exemple par tomographie sismique en forages (notamment grâce à sa collaboration avec la Finlande), de prendre part à des expériences concrètes sur les composants du stockage et leur comportement (comme les scellements avec le Canada), de bien comprendre les interactions entre le colis de déchets et la roche granitique, via les barrières ouvragées. Ces travaux lui ont également permis de disposer d'une expérience en matière de modélisation, notamment sur la circulation des fluides en milieu fracturé (avec la Suède) et

sur les processus qui affectent un stockage granitique sur le long terme. Des simulations ont été réalisées pour apprécier l'évolution et l'impact sur le long terme d'un stockage théorique et l'Andra a ainsi pu tester les méthodes d'analyse de sûreté qu'elle serait amenée à employer. La validation des méthodes expérimentales qu'il faudrait mettre en œuvre *in situ* pour estimer la valeur des paramètres à introduire dans les modèles reste cependant à établir. La complexité élevée de ces modèles fait que l'existence d'un jeu de paramètres capable de reproduire certaines des expériences réalisées *in situ* à l'étranger ne permet pas aujourd'hui de dire que ce jeu de paramètres est unique, et donc de s'engager sur les prédictions faites avec ces modèles. L'Andra est donc bien préparée à l'étude d'un site granitique en France si les pouvoirs publics la jugeaient nécessaire, mais il resterait fort à faire pour mettre en œuvre une telle étude et arriver au niveau de l'analyse de sûreté préalable à l'installation d'un éventuel stockage. De plus, le « pouvoir prédictif » des modèles risquerait de rester très limité.

Stockage en formation argileuse

Moyens mis en œuvre

Le dossier 2005 Argile explicite les recherches conduites autour du site de Bure et dans le laboratoire souterrain. La CNE a détaillé dans son rapport n° 11 les moyens (prospection géophysique, forages, creusement du laboratoire, analyses *in situ* et en laboratoire) mis en œuvre par l'Andra et ses partenaires pour reconnaître la formation argileuse du Callovo-Oxfordien sur le site de Bure. Ces moyens constituent un ensemble remarquable, tant en qualité qu'en quantité, pour tout ce qui concerne les investigations conduites depuis la surface. En particulier, les forages dirigés, les diagraphies et les tests de pression ont fourni plusieurs milliers de mesures et d'échantillons qui ont été étudiés de manière approfondie. Les expérimentations et observations conduites depuis le fond n'ont débuté qu'à l'automne 2004. Elles sont encore à un stade préliminaire même si certains résultats sont déjà disponibles, notamment grâce à la construction de deux galeries expérimentales, l'une creusée à -445 m en haut de la couche du Callovo-Oxfordien, et l'autre à -490 m. Un programme expérimental dense est conduit dans ces deux galeries. La mise en place des expériences a constitué un succès indéniable, compte tenu d'un calendrier très tendu.

Propriétés favorables de la formation

Les études de géophysique et les nombreux forages qui ont été effectués (plusieurs kilomètres de carottes et de diagraphies) ont fourni une moisson exceptionnelle de résultats. L'image des propriétés de la formation géologique qui se dégage de cet ensemble d'investigations est incontestablement favorable.

De façon générale, l'Andra n'a identifié aucun indice de défauts rédhibitoires. La continuité horizontale de la couche hôte a été reconnue sur une surface de 4 km² entourant le site de Bure. Les eaux interstitielles de la couche hôte et des deux encaissants sont constituées d'eaux de pluie très anciennes (centaines de milliers d'années). Leurs compositions isotopiques différentes montrent que le transfert d'eau et les échanges entre les différentes couches sont extrêmement lents. Au vu des essais en sondages ou sur échantillons, l'argilite du Callovo-Oxfordien est très peu perméable et a une forte capacité de rétention des radionucléides. On pouvait craindre que la perméabilité à plus grande échelle de l'argilite ne soit affectée par d'éventuelles fractures verticales ouvertes ; les forages dirigés, dont la CNE avait fortement encouragé le principe, sont rassurants à cet égard, puisqu'ils n'ont pas montré la présence de fracture susceptible de laisser s'écouler des fluides sur le site étudié. Les études sur la migration des radionucléides faites par l'Andra montrent que le transport des solutés dans ces argiles est contrôlé par la diffusion, processus extrêmement lent. De plus, la migration des radionucléides est freinée par les propriétés de rétention de la roche. Ce résultat rejoint les conclusions obtenues internationalement. En dehors d'un scénario d'intrusion, à l'échelle de plusieurs centaines de milliers d'années lorsque les conteneurs seront dégradés, les actinides ne migraient par diffusion que de quelques dizaines de mètres en raison du caractère réducteur du milieu. Ils resteraient donc confinés dans la couche d'argilite. En revanche, certains produits de fission, comme l'iode, commenceraient à sortir en limite de couche, en très faibles concentrations, à cette même échelle de temps. Les conséquences de cette sortie ont été étudiées dans le cadre de l'analyse de sûreté.

Transposition à une zone plus large

Si un stockage devait être créé dans la région étudiée, il devrait être distinct du laboratoire car les puits du laboratoire n'ont pas été foncés avec les caractéristiques requises pour satisfaire aux exigences propres à un stockage. Les travaux effec-

tués par l'Andra semblent montrer la bonne continuité et l'homogénéité des couches géologiques du Callovo-Oxfordien. On peut espérer que les conclusions des études menées sur le site de Bure puissent être étendues à une surface de l'ordre de 200 km², constituant la zone de transposition délimitée à l'est et au sud par les failles de Gondrecourt et de Poissons. C'est au sein de cette zone que l'emplacement du stockage (environ 10 à 20 km²) pourrait être choisi. La décision finale de construction d'un stockage sur un site précis ne pourra donc être prise, d'un point de vue scientifique, qu'après des études de géophysique de surface et par forages, confirmées par une reconnaissance au fond effectuée par puits et galeries.

EDZ et scellements

En situation de stockage, les propriétés naturelles de la formation peuvent être modifiées par différents effets : creusement, ventilation, chaleur dégagée par les déchets, désaturation due au creusement puis resaturation du milieu, dégagement de gaz résultant de la corrosion des aciers ou de la dégradation des bétons. Les propriétés mécaniques, observées au laboratoire ou en sondage, et depuis peu dans les galeries, laissent penser que la construction d'un stockage ne soulèverait pas de difficulté technique importante, avec toutefois des inconnues sur le comportement de la roche après une longue période d'ouverture. On doit examiner si, à plus long terme, dans un stockage fermé, la zone endommagée (EDZ) à la paroi des galeries et des puits pourrait constituer un court-circuit de la barrière géologique. L'Andra a beaucoup utilisé de ce point de vue les acquis des expériences menées au laboratoire du Mont Terri en complément des essais conduits à Bure depuis la surface ou sur échantillons. Le pronostic de l'Andra est une extension et un endommagement modérés, mais dans un tel domaine des conclusions bien fondées doivent attendre les résultats des expériences (en cours ou à lancer) dans le laboratoire souterrain de Bure notamment sur les évolutions à long terme encore insuffisamment bien appréhendées. En tout état de cause, on demandera vraisemblablement des performances élevées aux bouchons d'alvéoles et aux scellements des galeries et puits, qui visent à interrompre l'EDZ ; l'Andra a donné une priorité justifiée à leur étude, notamment au moyen d'essais en place. Ceux-ci ne sont pas terminés et doivent être complétés par d'autres essais inspirés par une formulation rigoureuse de ce problème difficile. Enfin le problème des gaz dans le

stockage a commencé à être étudié par l'Andra et cette étude devra être poursuivie vigoureusement.

Architecture de stockage

Un modèle d'inventaire des divers types de colis de déchets prenant en compte d'éventuels combustibles usés non retraités a été établi. Il a été correctement construit. Il a servi à évaluer le volume de stockage nécessaire, compte tenu des caractéristiques chimiques et thermiques des divers types de déchets. Les installations souterraines de stockage seraient horizontales et de faible extension verticale pour tenir compte de l'épaisseur modérée de la formation argileuse du Callovo-Oxfordien (environ 130 m). La structure serait modulaire. Les zones de stockage des différents types de déchets seraient séparées. Par conception, les modules seraient construits et remplis au fur et à mesure des besoins de stockage. Même s'il n'est volontairement pas figé définitivement, le schéma d'ensemble est cohérent et prend pleinement en compte l'objectif de réversibilité. Il devra néanmoins pouvoir être modifié et optimisé au vu des analyses de sûreté revues avec les résultats des recherches en cours, les observations faites au fond et les contraintes d'ingénierie minière.

Modélisation des phénomènes physiques et simulation numérique

L'ensemble des éléments qui précèdent a permis à l'Andra de construire progressivement une image du fonctionnement d'un stockage aux diverses échelles d'espace et de temps. Cet important travail permet déjà d'identifier des questions sur lesquelles l'attention doit se porter, et qui sont listées dans le paragraphe suivant. Par ailleurs une partie importante des simulations de l'évolution du stockage et des calculs des flux de radionucléides relâchés par les colis dégradés repose sur des estimations des paramètres physiques ou mécaniques de l'argilite qui ont été obtenus à partir de mesures effectuées dans d'autres laboratoires souterrains (Mont Terri) ou sur des échantillons obtenus par forage. Tous ces résultats doivent être confirmés par des mesures *in situ* effectuées dans le laboratoire souterrain de Bure. La modélisation des effets couplés de la resaturation et de la montée en pression de l'hydrogène en est à ses débuts. Le programme de recherche initié par l'Andra doit donc être poursuivi pendant plusieurs années pour acquérir un ensemble cohérent de données sur l'argilite du Callovo-Oxfordien de Bure et s'assurer que les calculs d'impact radiologique ont bien été obtenus avec des valeurs représentatives de la roche locale.

La simulation est une nécessité pour étudier le comportement d'un stockage et la migration des radionucléides à l'échelle des millénaires. Les logiciels sont en place et semblent bien correspondre aux besoins, mais il faudra que l'Andra utilise des calculateurs très performants pour effectuer toutes les simulations nécessaires. L'Andra a fait un travail important d'identification et de sélection des phénomènes à prendre en compte (analyse phénoménologique). Une fois le modèle défini, la plate-forme Alliances mise au point par l'Andra et le CEA permet en principe de prédire par la simulation l'évolution du site sur un million d'années. Cependant, bien que la qualité de l'outil Alliances ne soit pas critiquable, certaines lois de comportement (par exemple, relation perméabilité-contrainte dans l'EDZ, loi de fluage, influence du gaz sur la resaturation) et de nombreux paramètres (par exemple, les constantes de capillarité, etc.) ne sont pas encore connus avec la précision souhaitable. Il faudra s'assurer que tous les phénomènes importants ont bien été pris en compte à leur juste valeur dans les modèles et que les différents couplages numériques conduisent à des modèles robustes. Les expériences *in situ* et leur interprétation par ces modèles contribueront à cet objectif. Pour l'instant, ces incertitudes obligent à calculer des enveloppes supérieures plutôt que des valeurs probables pour l'évolution des flux de radionucléides autour du site. La partie numérique du rapport 2005 argile qui résulte d'une importante quantité de calculs pallie l'imprécision des paramètres par des analyses d'incertitudes et des évaluations rudimentaires de sensibilité. Il donne à penser que les diverses barrières joueront effectivement leurs rôles et qu'un stockage sur le site de Bure confinerait bien les radionucléides. Des défaillances de barrières ouvragées seraient même acceptables. À mesure que le site sera géologiquement mieux connu, on pourra affiner les calculs et remplacer les approximations pénalisantes par les paramètres réels. Dans l'état actuel des connaissances, l'évaluation et l'analyse des conséquences de la réalisation du stockage souterrain que l'Andra a effectuées paraissent satisfaisantes. Il convient de noter que les doses maximales aux exutoires calculées dans l'analyse de sûreté effectuée par l'Andra sont bien inférieures à celles délivrées par l'irradiation naturelle et qu'elles n'interviendront que très tardivement (au-delà de plusieurs centaines de milliers d'années).

2.2 - RECHERCHES ENVISAGEABLES APRÈS 2006

Celles-ci devraient comprendre deux objectifs bien distincts : d'une part, l'exploitation du laboratoire souterrain pour la validation du site et d'autre part, la recherche d'un emplacement favorable à un éventuel stockage d'une superficie de 10 à 20 km² au sein d'une grande zone de 200 km² (zone de transposition). Ces deux éléments sont nécessaires à la prise d'une décision fondée. Les recherches à mener devraient s'appuyer sur la poursuite des travaux déjà engagés et comporter de plus des simulations de grande ampleur et des démonstrations technologiques.

L'expérimentation dans le laboratoire souterrain d'une part, et la recherche et la qualification d'un site de stockage d'autre part, peuvent être menées en parallèle ou l'une après l'autre. Il faut seulement s'assurer que le creusement des nouveaux puits d'accès permettant la reconnaissance du site potentiel de stockage ne soit commencé qu'après une étude qui tienne compte des enseignements tirés du creusement des puits existants et des expérimentations sur les méthodes de scellement.

La CNE considère qu'un tel ensemble de travaux s'étalant dans la durée, devrait être constitué d'une succession de phases plus courtes, s'enchaînant l'une après l'autre. Elles devraient être ponctuées, avec des échéances précises, par des rendez-vous au cours desquels les résultats obtenus seraient présentés aux pouvoirs publics et validés avant que ne soit abordée la phase suivante.

Exploitation scientifique initiale du laboratoire souterrain

Celle-ci pourrait durer une dizaine d'années en maintenant le rythme soutenu actuel des travaux. Les expériences à mener ont pour but d'affiner la caractérisation de l'argilite du Callovo-Oxfordien, de bien comprendre tous les mécanismes et leurs interactions et de déterminer précisément les paramètres pertinents pour obtenir une modélisation réaliste. Les travaux nécessaires sont les suivants :

- *Au plan de la géologie et de la géochimie*
 - la confirmation de la cinétique très lente de la migration des radionucléides et une estimation de l'éventuelle variabilité spatiale des coefficients de

diffusion et de la perméabilité de la couche hôte aux diverses échelles ;

- l'étude du comportement des gaz dans le milieu est encore dans une phase préliminaire : elle devrait être largement complétée par des expériences *in situ* et les modèles numériques devraient être repris avec des calculateurs plus performants et des paramètres plus précis. On devra étudier notamment la vitesse de corrosion des aciers en fonction des conditions locales, la migration des gaz dans les barrières ouvragées et la roche.

- *Au plan du comportement de la roche*

- son comportement hydro-thermo-mécanique qui nécessite un suivi long du comportement des galeries et des expériences thermiques et mécaniques dédiées en laboratoire souterrain ;

- le suivi de l'évolution de l'EDZ et de son éventuelle cicatrization dans les conditions d'un stockage fermé ainsi que les expériences d'interruption de l'EDZ par construction de saignées ; ces expériences devraient s'appuyer sur des bases théoriques solides ;

- une révision des conditions de resaturation après fermeture des alvéoles qui prenne en compte les phénomènes thermiques et la migration des gaz.

- *Au plan de la réalisation et du comportement d'un éventuel stockage*

- l'étude des perturbations chimiques apportées par le béton, les composants métalliques et les déchets et leurs produits de dégradation, ainsi que par les effets thermiques ;

- l'étude de la durée de vie des matériaux introduits dans le stockage, pour laquelle les estimations actuelles doivent être soigneusement validées ;

- les études d'ingénierie, de conception des ouvrages et notamment des puits (position et réalisation), des bouchons et des scellements qui nécessiteront notamment des réalisations expérimentales et la démonstration en vraie grandeur dans le laboratoire souterrain ;

- l'étude de l'évolution du stockage (description de l'épisode transitoire séparant la fermeture du stockage et la resaturation du massif, rôle respectif des barrières ouvragées et de la barrière géologique dans les scénarios d'évolution normaux ou dégradés) nécessite des études approfondies avec, par exemple, la prise en compte du couplage thermique/mécanique/gaz sur la resaturation ;

- l'étude des exigences respectives de la réversibilité et de la sûreté ;

- la réalisation de tests démontrant la réversibilité représenterait une expérimentation importante, longue à mettre en oeuvre, mais qui serait susceptible de donner une crédibilité accrue à cette notion ;

• *Au plan de la simulation numérique*

La prévision aux grandes échelles d'espace et de temps passe par la simulation. Pour acquérir le niveau de simulation requis, l'Andra devra utiliser du matériel informatique de haute performance et les meilleures techniques algorithmiques et mathématiques. Il faudra en particulier :

- continuer le développement des logiciels afin d'en améliorer la précision, la robustesse et les performances en particulier par l'usage du calcul parallèle ;
- valider les modèles par comparaisons avec les résultats des mesures expérimentales ;
- améliorer la connaissance des constantes géologiques et phénoménologiques, éventuellement par l'usage de calculs inverses ;
- développer de manière plus systématique des calculs de sensibilité analytique.

De toutes ces recherches, la CNE considère comme prioritaires celles portant sur :

- la migration des radionucléides,
- l'impact des gaz sur le stockage,
- l'efficacité des scellements.

Recherche d'un emplacement favorable à un éventuel stockage

Celle-ci nécessiterait des travaux spécifiques dans la zone de transposition. Une prospection depuis la surface, à l'aide des moyens de la géophysique et des sondages, devrait être faite pour vérifier les propriétés de la couche hôte et l'absence de failles au niveau de la zone de l'éventuel stockage. Il faudrait ensuite caractériser dans la zone de transposition, les propriétés des aquifères qui encadrent la couche d'argile et des mécanismes de transport vers les exutoires des produits de fission qui pourraient, à très long terme, migrer à travers l'argile. Ceci impliquerait une modélisation hydrogéologique améliorée. Enfin la reconnaissance *in situ* du site retenu devrait être effectuée par le forage de nouveaux puits d'accès et la construction progressive de galeries pour y déceler d'éventuelles anomalies.

On doit garder à l'esprit que le processus de reconnaissance d'un éventuel stockage peut être inter-

rompu si des défauts rédhibitoires apparaissaient. Néanmoins les indices favorables déjà recueillis laissent penser qu'il existe une probabilité raisonnable que le processus de reconnaissance puisse aller jusqu'à son terme.

2.3 - RÉFLEXIONS DE LA CNE

Parmi les options de gestion des déchets nucléaires ouvertes par les recherches menées dans le cadre de la loi de 1991, le stockage géologique est l'option la plus étudiée depuis de nombreuses années par un grand nombre de pays et beaucoup s'y sont ralliés, a minima au plan du principe. Les travaux réalisés en France depuis 15 ans ne sont pas de nature à modifier ce jugement.

L'utilisation simultanée des techniques minières et de celles de l'industrie pétrolière s'est révélée hautement profitable. Les données acquises sur le site du laboratoire de Bure et dans son voisinage sont considérables. Elles placent ces travaux au meilleur niveau et souvent à l'avant-garde des recherches internationales. Le grand intérêt porté par de nombreux pays étrangers aux recherches menées en France dans ce sens (colloques et collaborations internationaux) confirme ce point de vue.

Le site de Bure, selon les informations dont on dispose à ce jour, présente des caractéristiques favorables pour un stockage et ne semble pas receler d'éléments négatifs qui auraient pu apparaître rédhibitoires. Les résultats acquis par l'Andra montrent que dans un scénario d'évolution normale, les actinides mineurs resteraient encore confinés dans la couche du Callovo-Oxfordien après un million d'années et que les produits de fission les plus mobiles comme l'iode n'atteindraient les exutoires qu'après plusieurs centaines de milliers d'années et ce, avec des concentrations très faibles, délivrant des doses notablement inférieures aux limites requises aujourd'hui par la protection de la santé publique.

On peut constater aujourd'hui que l'essentiel des connaissances sur la formation repose sur des données acquises depuis la surface et sur les premiers résultats des expériences *in situ* dans les galeries. Cependant, le laboratoire souterrain n'a pu être utilisé que depuis un an, dans la galerie à -445 m. Il reste maintenant à mener à bien le programme de recherche envisagé dans le paragraphe précédent afin de confirmer les propriétés permettant d'a-

boutir à la conception optimisée d'un stockage réversible.

La CNE souhaite attirer solennellement l'attention sur l'importance de la poursuite pendant plusieurs années d'un effort de recherches scientifiques conduit avec l'élan qui a caractérisé les toutes dernières années et en maintenant les fructueuses collaborations internationales et universitaires.

Des progrès très significatifs ont été obtenus sur l'inventaire des déchets, la connaissance des propriétés de la formation du Callovo-Oxfordien de la région de Bure, l'architecture du stockage, les barrières ouvragées et, d'une manière générale, sur les questions essentielles du point de vue de la sûreté. Cependant, il faut considérer que les concepts de stockage pourraient évoluer. En effet, des questions scientifiques et les développements d'ingénierie nécessiteront des connaissances nouvelles à acquérir en s'appuyant sur les conclusions à tirer des études de sûreté. En particulier, le cahier des charges et le devenir des conteneurs en condition de stockage devra bénéficier d'une attention toute particulière.

Des questions plus générales méritent également d'être approfondies :

- la réversibilité, notion dont l'importance s'est progressivement affirmée au cours des quinze années écoulées et dont il sera à nouveau question dans l'axe 3 à propos de l'entreposage de longue durée ;
- l'extrapolation des observations et des résultats d'expériences à des périodes très longues, question pour laquelle manque une réflexion méthodologique générale.

La CNE considère que les données scientifiques acquises par l'Andra, tant en volume qu'en qualité et réunies dans le dossier 2005 Argile, fournissent des bases solides pour un premier jugement favorable sur la possibilité d'un stockage dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien dans la région de Bure. Néanmoins, pour aboutir à une décision scientifiquement fondée d'implantation d'un stockage réversible dans cette formation argileuse, il reste à mener activement les recherches sur les thèmes évoqués au paragraphe 2.2.

L'Andra, par ses études génériques, a montré qu'elle avait développé les compétences et les principes applicables à un site granitique qui lui serait proposé sur le territoire national. La CNE rappelle toutefois que les caractéristiques et l'histoire géologique des granites français sont fort différentes de celles des boucliers scandinave ou canadien. En France, les massifs granitiques sont de petite taille et ont été affectés par plusieurs orogénèses qui ont pu les fracturer. C'est pourquoi la CNE estime que la possibilité de trouver sur le territoire français une zone granitique apte à faire l'objet d'une étude et d'un laboratoire permettant la qualification d'un site de stockage est assez restreinte.

La CNE rappelle que l'étude de trois sites, en vue de l'implantation de laboratoires souterrains, a été lancée en France dans le cadre de la loi de 1991 : dans les départements de la Vienne, du Gard et de Meuse/Haute-Marne. Seul ce dernier a été retenu. Si les pouvoirs publics étaient amenés à envisager un second laboratoire, le choix de la roche ne devrait pas être limité à un granite. En France, des roches argileuses autres que le Callovo-Oxfordien de la région de Bure présentent également des caractéristiques *a priori* favorables.

Axe 3 - Conditionnement - Entreposage de longue durée

Les objectifs visés par les recherches de l'axe 3 sont le conditionnement des déchets HAVL et MAVL tant pour le stockage que pour l'entreposage de longue durée des déchets conditionnés, soit en surface, soit en sub-surface (demande formulée par le Gouvernement en 1998 en sus de la loi).

Le conditionnement industriel des déchets de retraitement, ou issus d'autres activités, conduit aux colis primaires de déchets HAVL et MAVL. L'entreposage de ces colis est pratiqué industriellement sans problème dans des entrepôts prévus pour être exploités une cinquantaine d'années. Il en est de même pour les assemblages du combustible usé entreposés en piscine et pour quelques assemblages expérimentaux entreposés à sec.

Les études conduites en matière de conditionnement ont porté sur plusieurs points : la réduction du volume des déchets MAVL à La Hague et au CEA, la caractérisation radiologique et chimique des colis primaires de déchets, l'étude de la résistance à la lixiviation et à l'irradiation des matériaux industriels de conditionnement (verre, bitume, matériaux cimentaires et métalliques), l'étude de nouveaux conditionnements (essentiellement des céramiques). En vue d'un éventuel entreposage ou stockage des assemblages de combustible usé, la tenue de ces assemblages et la résistance du combustible usé à la lixiviation ont aussi été étudiées.

L'entreposage de longue durée pour les déchets visés par la loi peut répondre à deux motivations : la nécessité d'entreposer des déchets ultimes en attente de l'ouverture d'un stockage géologique ou bien le choix de conserver des déchets en vue de traitements ultérieurs qui pourraient naître d'avancées techniques dans le futur. Il se différencie de l'entreposage industriel prolongé, voire renouvelé, car il est conçu d'emblée comme devant répondre à des contraintes particulières et implique donc, comme le voulait la loi, des recherches spécifiques. L'entreposage de longue durée vise des périodes pluri-séculaires (jusqu'à 300 ans selon le CEA) de dépôt et de surveillance des colis et, outre

les colis de déchets HAVL et MAVL, il peut viser des assemblages de combustible usé qui ne seraient pas retraités dans l'immédiat.

Les études en matière d'entreposage de longue durée conduites par le CEA, ont donc porté sur les conditions dans lesquelles les colis primaires de déchets pourraient être mis en dépôt et sur des concepts d'entrepôts pour un entreposage à sec.

3.1 - ACQUIS DES RECHERCHES

Conditionnement

Tout colis primaire de déchets est constitué de déchets immobilisés sous forme solide ou incorporés dans une matrice et d'une enveloppe métallique ou à base de ciment, qui assure sa tenue mécanique et l'isolement des radionucléides. Les colis primaires peuvent ensuite être mis en conteneurs pour des besoins de gestion dans le long terme.

L'évaluation des résultats des recherches dont la CNE a eu connaissance est la suivante.

Colis primaires

Le conditionnement industriel des déchets MAVL de retraitement qui conduit à des colis primaires spécifiés, a fait en dix ans des progrès importants, en terme de réduction de volume et, parallèlement, l'activité des effluents rejetés dans l'environnement par l'usine de La Hague a considérablement décru. Les recherches sur de nouvelles méthodes de réduction de volume pour déchets MAVL (décontamination et fusion à haute température par torche à plasma ou induction en creuset froid) ont abouti à des prototypes. Ces essais ont aussi montré que les radionucléides des déchets MAVL ne pouvaient en aucun cas être récupérés pour être transmutés et que ces déchets sont ultimes. Ils ne renferment d'ailleurs que quelques pour-cent de l'activité des assemblages de combustible usé. Enfin des méthodes performantes de caractérisation non des-

tructive de la plupart des colis primaires sont opérationnelles.

Le confinement à long terme des radionucléides contenus dans les colis est essentiellement assuré par la résistance des matrices aux diverses agressions (eau, rayonnements). Les recherches ont permis d'établir des modèles de relâchement des radionucléides pour chaque matrice industrielle dans des situations variées. Les modèles permettent en particulier des estimations qui n'apparaissent pas déraisonnables, en l'état actuel des connaissances, des taux de relâchement des radionucléides dans un stockage, après resaturation en eau et perte d'intégrité des conteneurs. Ces estimations dépendent des conditions locales dans lesquelles l'altération a lieu, en particulier pour la matrice verre. Le comportement à long terme de cette matrice, qui est la forme industrielle éprouvée de colisage des déchets HAVL, a fait l'objet de très nombreux travaux. Au total, la modélisation du relâchement des radionucléides des colis de déchets industriels a beaucoup progressé mais repose sur des modèles dont les paramètres expérimentaux doivent être affinés.

Dans l'hypothèse où l'on disposerait d'éléments séparés, il serait possible de réaliser des matrices céramiques adaptées à chaque élément. Les recherches dans ce domaine ont montré la possibilité de l'incorporation des actinides, de l'iode et du césium dans diverses céramiques très résistantes à la lixiviation (facteur 100 par rapport au verre). Les recherches se poursuivent. Elles concernent à la fois la formulation et la mise en forme des céramiques, et leur caractérisation, ce qui permet d'évaluer d'emblée l'intérêt potentiel de la céramisation. Les céramiques n'ont d'intérêt que si leur qualité de confinement à long terme est significativement supérieure à celle du verre. Il est clair qu'on en connaît moins sur les possibilités réelles de conditionnement dans ces céramiques que dans les verres nucléaires, étudiés depuis près de 40 ans.

Les recherches sur des verres résistants, susceptibles d'incorporer plus d'actinides qu'actuellement, sont en cours. Elles préparent notamment le retraitement du combustible usé MOX en dilution avec du combustible usé UOX.

Les connaissances sur la tenue des assemblages du combustible usé à court (en entreposage à sec ou sous eau) et à long termes (en stockage après resaturation en eau et corrosion des conteneurs) ont

substantiellement progressé. On dispose ainsi, comme pour les colis de déchets à vie longue, de modèles empiriques de relâchement des radionucléides majorant les phénomènes.

La CNE considère que des résultats importants ont été acquis en matière de conditionnement. Le conditionnement et la caractérisation des colis primaires de déchets actuels sont maîtrisés ce qui montre que ce domaine a atteint la maturité industrielle. Il existe des pistes sérieuses d'amélioration de conditionnement pour les déchets MAVL (40 % de ces déchets ne sont pas encore conditionnés) ou pour conditionner tout nouveau déchet contenant des quantités importantes d'actinides qui pourraient résulter d'un changement dans la pratique du retraitement.

En ce qui concerne l'éventuel stockage des colis primaires de déchets, le conditionnement industriel actuel des déchets HAVL et MAVL est approprié à leur stockage géologique, à condition d'y ajouter un conteneurage complémentaire.

Conteneurage des colis primaires de déchets

Les recherches sur les conditions d'entreposage de longue durée ou de stockage ont conduit à privilégier l'option de mettre en conteneurs durables les colis primaires de déchets MAVL (conteneur en béton) et HAVL, ainsi que les assemblages de combustible usé (conteneur métallique pour chacun d'eux). Des démonstrateurs de tels conteneurs, éventuellement pour les deux usages, entreposage et stockage (colis primaires de déchets MAVL), ont été réalisés. Les recherches pour établir leur durabilité sont en cours pour les conteneurs de colis primaires de déchets HAVL et les assemblages de combustible usé UOX et MOX. En ce qui concerne les colis de déchets MAVL, une étude sur les colis cimentés a été présentée. Après expertise, il apparaît que ces résultats s'appliquent à des objets non fissurés. De nouvelles études devraient être menées pour traiter le cas des fissurations et celui des bétons armés. Le béton des conteneurs est un béton spécial différent de celui proposé pour les ouvrages d'entreposage ou de stockage. Des installations expérimentales pour tester les systèmes de fermeture, la corrosion et les échanges thermiques existent.

Entreposage de longue durée

Les premières générations d'entrepôts *de facto*, notamment ceux qui ont reçu les déchets des pre-

miers réacteurs de puissance, sont progressivement remplacés par de nouveaux entrepôts ; les déchets sont repris pour y être transférés.

De première intention, les entrepôts industriels les plus récents ne devaient servir qu'une cinquantaine d'années. Le retour d'expérience de leur exploitation a montré qu'ils pourraient assurer un entreposage jusqu'à cent ans, susceptible d'accueillir tous les colis primaires de déchets de retraitement du parc actuel.

Pour ce qui concerne les entrepôts de longue durée, pluri-séculaires, à ventilation par tirage naturel, les recherches ont montré que c'est la tenue des bétons armés de génie civil non protégés qui pourrait poser problème en premier au-delà de cent ans. Le CEA se dit confiant sur une tenue jusqu'à 300 ans, fondée sur sa connaissance des mécanismes d'altération du béton, mais aucune preuve d'une telle tenue n'a pu être apportée. En particulier, la durabilité des ouvrages de génie civil en béton chauffés temporairement (perte de ventilation, incendie) n'est pas prouvée. Les recherches sur le fonctionnement de galerie d'entreposage débutent dans une installation expérimentale à Marcoule (CECER). Elles ont pour but d'étudier le comportement hydro-thermo-mécanique des bétons. L'entreposage de longue durée pose donc de nombreux problèmes techniques. Les plus aigus concernent la surveillance à long terme, la durabilité du béton et l'évacuation par thermo-convection naturelle de la chaleur dégagée par les colis thermiques.

Seules les recherches pour l'entreposage des colis de déchets actuels de retraitement par reconduction des entrepôts industriels les plus récents sont achevées. Elles permettent d'envisager un entreposage sûr pour des durées de l'ordre du siècle. Pour ce qui concerne l'entreposage de longue durée (jusqu'à 300 ans) en surface ou en sub-surface par création d'entrepôts de conception nouvelle, seuls des schémas de principe et des études préliminaires ont été proposés. Les recherches sur les conditions de dépôt des « colis d'entreposage » doivent encore se poursuivre si le besoin de telles installations était avéré. Pour aller plus loin que les études actuelles, il conviendrait de sélectionner un site potentiel d'entreposage. En effet, le choix du site est important notamment dans le cas d'un entreposage de sub-surface afin de vérifier la compatibilité de la roche hôte avec l'entrepôt à concevoir (compatibilité entre l'eau percolée dans la roche et le béton,

effets thermo-mécaniques, hygrométrie et présence d'aérosols dans l'atmosphère...).

Enseignements des recherches

- Des progrès substantiels ont été réalisés sur la tenue des matériaux utilisés pour isoler les déchets à vie longue et confiner les radionucléides qu'ils contiennent, ces matériaux étant soumis aux diverses agressions qu'ils pourraient connaître en entreposage ou en stockage. Les résultats obtenus permettent de faire des prévisions, à l'échelle du siècle pour l'entreposage et de millénaires pour le stockage.

- Des démonstrateurs de conteneurs d'entreposage pour les colis primaires de déchets MAVL et HAVL et pour les assemblages du combustible usé ont été construits. L'étude de leur durabilité est en cours. Des concepts d'entrepôts de longue durée pour abriter des conteneurs d'entreposage ont été proposés. L'étude sur maquette de leur capacité à remplir leur fonction de durabilité et d'évacuation de la chaleur des colis thermiques est en cours.

- Quoiqu'il en soit, les études montrent qu'une surveillance et une maintenance actives des ouvrages d'entreposage de longue durée seraient nécessaires pendant leur durée de vie. Les opérations de reprise des colis au terme de leur entreposage n'ont pas été étudiées.

3.2 - RECHERCHES ENVISAGEABLES APRÈS 2006

Les recherches envisageables après 2006 devraient se poursuivre sur le conditionnement des déchets car elles concernent tant un mode de gestion des colis de déchets par stockage que par entreposage de longue durée. Si cette dernière option était envisagée les recherches devraient aussi se poursuivre sur les conteneurs, notamment en béton, et les matériaux de génie civil pour les entrepôts, afin de garantir que la durée d'intégrité des conteneurs soit au moins égale à celle des entrepôts.

Ces recherches sont de deux natures : fondamentales pour tout ce qui touche au comportement des colis de déchets, et plutôt technologiques et d'ingénierie pour ce qui concerne les conteneurs et les entrepôts.

Au plan de la recherche fondamentale, il resterait à poursuivre les expériences de tenue des matrices

actuelles ou nouvelles car leur capacité de confinement joue un rôle important à long terme. À cet égard, la matrice verre qui occupe une place centrale dans la gestion des déchets HAVL français mérite encore une attention particulière. L'étude de la tenue du combustible usé, notamment du MOX en entreposage, devrait être aussi poursuivie. Les mécanismes d'altération puis de ruine des ciments et des matériaux dérivés devraient être affinés pour lever les incertitudes sur la tenue des bétons dans le temps, qu'ils soient ou non portés à température relativement élevée. La plupart des expériences à mener sont par nature de longue durée.

Au plan de la recherche technologique sur la durabilité des conteneurs en béton (d'entreposage et de stockage), la CNE considère que les recherches, qui ont commencé tardivement, n'ont abouti qu'à des résultats partiels et qu'elles devraient se poursuivre, notamment au moyen des démonstrateurs, dans la perspective de réalisation de prototypes. Pour ce qui concerne les entrepôts de longue durée, le principal problème à régler est celui de la fiabilité de la dissipation de la chaleur par les colis d'entreposage, en régime de thermo-convection naturelle. Il convient de noter à cet égard les difficultés et l'importance de la simulation numérique dans ces problèmes pour l'entreposage de longue durée en sub-surface. Pour parvenir à la démonstration de faisabilité, des progrès cruciaux devraient donc être faits dans la modélisation, en parallèle aux expériences sur maquettes partielles à échelle unité, que le CEA a entreprises. De plus, les paramètres affectant la tenue des ouvrages de génie civil en béton devraient être clairement identifiés pour trouver des parades à leur vieillissement. Enfin, les entreposages devant être surveillés et entretenus, y compris le massif rocheux d'accueil en sub-surface, il faudrait régler les problèmes de l'instrumentation de surveillance et d'ingénierie y afférents.

3.3 - RÉFLEXIONS DE LA CNE

Il n'est pas établi, faute d'étude, qu'un conditionnement innovant des actinides et de produits de fission séparés dans des céramiques apporte une amélioration pour le stockage par rapport au conditionnement sous forme de verre, dont la durabilité a été démontrée (à la réserve près d'un approfondissement nécessaire de la connaissance des processus d'altération à long terme). Trois éléments pourraient bénéficier d'un conditionnement spécifique : l'iode, facile à séparer, en raison de sa contribution poten-

tielle à l'impact radiologique en stockage, le césium pour la même raison et sa contribution à la charge thermique durant les premiers siècles et le strontium, autre contributeur à la charge thermique. Les recherches sur la faisabilité technique des matrices innovantes devraient être menées à terme, au moins jusqu'au point où une comparaison complète de leurs propriétés de confinement avec celles de la matrice vitreuse pourra être effectuée.

La CNE attache de l'importance à ce que les exigences fonctionnelles des conteneurs d'entreposage soient clairement définies, notamment leur durée d'intégrité. Ceci devrait se traduire par des spécifications et un ensemble de tests permettant de vérifier la conformité des objets réalisés. La CNE note que, dans les études de sûreté de l'Andra, la contribution aux doses maximales aux exutoires des combustibles usés non retraités, en particulier des MOX, est plus importante que celle des colis issus du retraitement. Pour le cas où le stockage des assemblages du combustible usé serait envisagé, la CNE recommande que des collaborations soient établies avec les équipes scientifiques étrangères disposant d'une large expérience sur le conteneurage.

L'entreposage est un moyen d'ajuster dans le temps la gestion des colis de déchets pour des échelles de temps différentes, par exemple pour attendre le refroidissement des combustibles usés non retraités ou des colis de déchets vitrifiés ou bien à cause de l'absence effective d'un stockage. L'entreposage et le stockage doivent jouer un rôle complémentaire. Ce rôle est clair pour les entreposages industriels. Il pose question pour des durées au-delà du siècle, car la possibilité pour un entreposage de durer au-delà de cette période n'a pas été prouvée, et par conséquent ne peut pas être garantie.

Les déchets MAVL sont des déchets ultimes et les caractéristiques des colis de ces déchets sont telles que ceux-ci peuvent être mis en stockage géologique dès que possible. Leur mise en entreposage de longue durée est possible, mais difficilement défendable car elle n'apporte aucun avantage au plan technique par rapport à l'entreposage industriel ni aucun bénéfice quant aux dispositions ultérieures à prendre pour leur stockage. L'entreposage des colis MAVL ne se justifie techniquement que par l'absence d'un stockage.

L'essentiel des colis de déchets HAVL vitrifiés devant rester en entreposage plusieurs dizaines d'an-

nées pour refroidir, il n'est pas envisageable de les mettre en dépôt géologique avant 2050 au plus tôt, suivant les critères thermiques et le concept retenus par l'Andra. Seuls les colis de déchets HAVL correspondant aux premières vitrifications effectuées à Marcoule dès 1970 (environ 10 % de l'inventaire HAVL) pourraient rejoindre les colis MAVL à l'ouverture d'un stockage, si celle-ci se profilait à l'horizon 2020-2030.

Un entreposage à durée limitée des colis HAVL, dans des conditions proches de celles des entreposages industriels récents et perfectionnés, suivi d'un transfert, si possible sans reconditionnement, dans un site de stockage agréé par l'autorité de sûreté paraît être la solution de référence. La réversibilité du stockage, si elle est assurée, permettra pendant plusieurs décennies d'apporter des corrections au projet initial de gestion des colis de déchets MAVL et HAVL. Si cette voie était choisie, la durée d'entreposage vis-à-vis de la charge thermique et donc *in fine* de l'emprise d'un stockage pourrait être optimisée.

Si la mise en œuvre industrielle de la séparation-transmutation avec des réacteurs de 4^{ème} génération se trouvait être retardée bien au-delà de 2040, il n'y aurait pas de demande massive en plutonium pour lancer des RNR et les assemblages de combustibles MOX devraient faire l'objet d'un entreposage industriel prolongé spécifique, en prévoyant un programme de surveillance adéquat. Un point de rendez-vous pour statuer sur cette question serait à prévoir vers 2020, en fonction des perspectives de développement des réacteurs de quatrième génération.

En tout état de cause, la CNE estime que le choix entre le lancement d'un entreposage de longue durée et une solution par étapes successives, en utilisant les entrepôts industriels existants ou à construire, mérite une évaluation particulière, tant au plan économique qu'à celui de la sécurité. La localisation de l'entreposage de longue durée est un point important des réflexions, eu égard aux transports des colis de déchets.

Construire en surface un entrepôt de durée multi-séculaire pour les déchets HAVL paraît peu réaliste dans les conditions actuelles. Si néanmoins on voulait le réaliser, cela représenterait une véritable rupture technologique. En revanche, l'entreposage de longue durée pourrait être obtenu par reconduction périodique d'entrepôts industriels tels que ceux les plus récemment construits auprès des ateliers de retraitement du combustible usé.

L'entreposage de longue durée en sub-surface pourrait renforcer la résistance à certaines agressions externes, mais il est mal adapté aux colis de déchets MAVL pour lesquels, selon les rapports présentés, une ventilation forcée des ouvrages est nécessaire. Comme il n'est pas démontré non plus que le refroidissement de chaque colis de déchets HAVL par convection naturelle serait bien assuré, la ventilation forcée pourrait être nécessaire pour ce type de déchets. La durabilité des ouvrages de génie civil, construits à l'intérieur des ouvrages excavés, surtout des bétons chauds, n'est pas davantage prouvée comme on l'a déjà dit. Par contre, le « gros œuvre » constitué par la roche en place, de caractéristiques appropriées, peut être considéré comme stable, même à très long terme. Enfin on ne peut concevoir une étude approfondie d'un tel entreposage que pour un site bien défini.

L'entreposage de longue durée est surtout une affaire d'ingénierie. Quelles que soient les options retenues, il ne pourrait être mis en œuvre sur des périodes séculaires qu'au prix d'une surveillance, d'une maintenance et d'une protection constantes, sinon même d'opérations périodiques de renouvellement des installations, qui seront de plus en plus difficiles au fur et à mesure que la période de temps d'entreposage sera longue. On est loin d'un entreposage sans surveillance attentive.

Un membre de la CNE a souhaité attirer l'attention sur l'intérêt d'une option d'entreposage de longue durée installé en profondeur qui a été évoquée récemment. Cette option a semblé aux autres membres comporter des ambiguïtés et soulever des difficultés. Une brève description de cette option est donnée par ce membre en annexe 3.

Conclusions générales

La loi a ouvert aux scientifiques un vaste champ de recherche sur des problèmes étudiés avant 1991 par la communauté restreinte du nucléaire. Les connaissances ont incontestablement progressé et permettent d'asseoir la gestion des déchets radioactifs à vie longue sur des bases scientifiques solides. Pour diminuer les incertitudes qui subsistent, les recherches doivent se poursuivre. La CNE vient de présenter les principaux acquis des recherches mais de très nombreux résultats, qui ont été obtenus sur les chemins de ces acquis, sont « en réserve ». La loi a aussi permis d'apporter au public une information réservée jusque-là à quelques experts.

Une évaluation des questions économiques et sociétales n'est pas incluse dans les missions de la CNE. Il pourrait, par exemple, être envisagé que des entreposages de colis de déchets soient périodiquement renouvelés et ainsi soient prolongés pendant des siècles. Une telle solution postule la stabilité des sociétés humaines, l'existence d'institutions responsables et la pérennité d'un niveau technique adéquat. Son principal avantage est de laisser la porte ouverte à de nouveaux modes de gestion des déchets à vie longue qui pourraient être imaginés dans le futur, mais elle présente des risques au-delà du siècle et fait peser sur les sociétés futures de lourdes contraintes économiques et techniques. Le stockage géologique, qui est conçu pour confiner à long terme les déchets affranchit des incertitudes sociétales dès qu'il est fermé, mais comporte un risque, certes minime, sur la conformité de son mode de fonctionnement par rapport aux prévisions.

Une approche purement comptable favorise a priori les dispositions les moins onéreuses à court terme : prolongation de l'entreposage, report du stockage, alors qu'une logique qui place au premier plan la sécurité des travailleurs et des populations favorise l'inverse : entreposage limité dans le temps des déchets à vie longue, suivi d'un stockage géologique le plus tôt possible. Il s'agit là d'un débat de société qui présente un caractère central et dépasse en importance toutes les discussions pon-

ctuelles ; il relève de l'éthique. La CNE ne possède pas de qualification particulière et n'a pas de compétence dans ce domaine, seul le législateur a qualité pour prendre position.

Les principales conclusions scientifiques et recommandations sont exposées au début du rapport et rappelées ci-dessous :

Quatorze années de travaux s'achèvent, qui ont été conduits en vue de définir une stratégie globale de gestion des déchets de haute activité et à vie longue, la loi ayant indiqué trois orientations de recherche à mener de front. Un grand nombre de connaissances ont été acquises qui pourront être utilisées complémentaires dès lors que des voies cohérentes de gestion auront été dégagées.

L'ampleur des acquis est telle qu'il est maintenant possible d'opérer des choix stratégiques pertinents. Vouloir mener toutes les orientations de la loi de 1991 jusqu'à un développement industriel serait une lourde et longue charge de recherche car chaque domaine exigerait des moyens progressivement croissants. On doit, pour établir les grands programmes à venir, comparer les avancements dans chaque orientation en termes de maturité scientifique.

Les recherches sur la gestion des déchets nucléaires les plus avancées, en France, sont celles sur le stockage réversible en situation géologique profonde qui représente la voie de référence pour une gestion définitive de déchets ultimes que la France se doit d'étudier jusqu'au bout. L'utilisation simultanée des techniques minières et de celles de l'industrie pétrolière s'est révélée hautement profitable sur le site de Bure. Les données acquises sur ce site sont considérables. Elles placent ces travaux au meilleur niveau des recherches internationales. Le grand intérêt porté par de nombreux pays étrangers aux recherches menées en France dans ce sens (collaborations internationales) confirme ce point de vue. Le stockage dans une roche argileuse très régulière et homogène, dépourvue de failles

conductrices d'eau, comme l'est la couche du Callovo-Oxfordien sur le site de Bure, peut être retenu comme une solution de référence.

Toutefois la CNE souligne que les conditions d'une éventuelle décision finale de réalisation d'un stockage ne sont pas encore réunies. Le laboratoire souterrain doit être exploité pendant une durée suffisante. Les propriétés géologiques favorables observées à Bure doivent maintenant être vérifiées dans une zone plus large où pourrait être implanté un stockage.

L'issue des recherches sur l'entreposage des déchets, en surface ou à faible profondeur avec intention de les reprendre, dépend de la durée visée. S'il s'agit de moins d'un siècle, ce qui est suffisant pour permettre aux déchets actuels HAVL de refroidir, l'entreposage industriel de La Hague existe et pourrait être étendu. Il en va de même pour les déchets MAVL. Si on désire les entreposer pour plus longtemps (par exemple 300 ans) il faut prendre en compte le problème de la durabilité des ouvrages d'entreposage à construire qui n'a pas encore reçu de réponse acceptable. Sans préjuger de la stabilité des sociétés sur le long terme, un entreposage de longue durée fait peser une lourde charge sur des générations futures qui devraient aussi assumer le devenir ultime des déchets.

Le conditionnement des déchets a fait l'objet d'importants développements, portant à la fois sur les colis industriels et sur de nouvelles matrices.

Des conteneurs adéquats constituent une barrière indépendante essentielle pour la sécurité vis-à-vis des déchets, tant pour l'entreposage que pour le stockage. Un premier effort a été mené et de premiers démonstrateurs ont été réalisés. Les conteneurs destinés aux colis de déchets et aux éventuels assemblages de combustible usé demandent encore beaucoup de recherches et de travaux. Leurs spécifications ne sont pas encore définies.

L'objectif principal de la séparation-transmutation est la réduction de l'inventaire de radiotoxicité (par ingestion) et du dégagement thermique dans les déchets HAVL destinés au stockage géologique. Il s'agit d'un processus long qui n'a de sens que dans le cas du recours à l'énergie nucléaire sur une durée au moins séculaire. Dans cette perspective, de nombreuses études de très haut niveau et des développements technologiques sont à poursuivre en prenant en compte le traitement complexe d'une matière hautement radioactive.

Les recherches sur la séparation et la transmutation doivent être conduites en prenant en compte les exigences des ensembles industriels des systèmes nucléaires du futur. À part les RNR refroidis au sodium, les autres réacteurs évoqués pour assurer la destruction de certains radionucléides à vie longue, n'existent pas aujourd'hui. Certains d'entre eux sont spécifiquement destinés à ce rôle (ADS), d'autres sont d'abord prévus pour produire de l'électricité (*Génération IV*). De plus, dans l'état actuel des recherches, la transmutation de certains radionucléides, tel que l'iode, paraît particulièrement difficile, alors que celle d'autres radionucléides présentant moins de risques résiduels pourrait être obtenue. Un tel ensemble de recherche devrait être évalué en termes risque-bénéfice. Il ne pourrait être mené à son terme que dans le cadre de coopérations internationales. L'efficacité d'un programme pouvant conduire à une réalisation industrielle dépendra de l'intensité de la recherche (dont des outils d'irradiation et d'analyses) et des difficultés rencontrées. En revanche, un déploiement industriel dépendra de nombreux autres facteurs tels que le contexte énergétique, l'importance de l'option nucléaire et, en fin de compte, de la pertinence et de la viabilité économique de la séparation-transmutation.

Les pouvoirs publics ont désormais les moyens de construire une stratégie de gestion des déchets radioactifs à vie longue (HAVL et MAVL) et de fixer les objectifs, répartir les ressources et établir les calendriers.

Principales recommandations

1. Etablir une stratégie globale de gestion des déchets radioactifs à partir des acquis de la recherche menée depuis quinze ans.
2. Retenir le stockage en formation géologique profonde comme la voie de référence pour la gestion des déchets ultimes et l'étudier complètement.
3. Dans ce cadre, continuer les recherches dans le laboratoire souterrain et sur la région de Bure, avec un programme par étapes.
4. Etudier l'ensemble des problèmes liés à la mise en œuvre et à l'insertion dans le territoire d'un éventuel stockage souterrain : ingénierie minière, transports, emploi, impact industriel, économique et social régional.
5. Approfondir les recherches sur le conteneurage des déchets de différents types, tenant compte des étapes successives de gestion des colis de déchets.
6. Maintenir l'effort sur les études de comportement à long terme des matériaux naturels et artificiels.
7. Si l'entreposage de longue durée devait être retenu comme voie de gestion, choisir un site précis d'application pour y conduire les études nécessaires.
8. Développer des techniques de séparation en relation avec le devenir des produits séparés.
9. Réorienter, focaliser et coordonner la recherche sur la séparation-transmutation en relation avec les exigences des systèmes de « *Génération IV* ».
10. Conclure sur le rôle et le devenir des ADS à l'issue du programme EUROTRANS.

Annexe 1

Réflexion sur les liens entre les axes de recherche

L'interdépendance des recherches dans les trois axes de la loi suscite une réflexion sur les liens entre ces trois axes de recherche.

Axes 1 et 2

Si l'on considère les matières radioactives résiduelles, après transmutation, comme des déchets ultimes destinés à un stockage géologique, on peut tenter d'évaluer le bénéfice qu'apporte cette transmutation, dans un scénario d'évolution normale ou altérée d'un stockage géologique.

Les recherches de l'axe 1 ont été focalisées sur les actinides mineurs porteurs d'une nuisance élevée et générateurs de chaleur sur de longues périodes. La diminution des quantités d'actinides mis aux déchets HAVL ne réduirait que leur charge thermique, car leur impact radiologique résiduel en situation normale de stockage serait quasiment nul. En effet, les actinides restent confinés (ainsi que leurs descendants) dans la géosphère profonde qui offre par nature des conditions réductrices, contrairement aux produits de fission à vie longue comme l'iode et le césium qui, dans de telles conditions, peuvent migrer à terme. Éliminer les actinides revient donc à se prémunir contre les situations altérées de leur retour à la biosphère (forage recoupant un alvéole, perte d'étanchéité des puits et galeries, etc.) mais n'apporte rien en dehors de ce cas. De telles situations n'interviendraient que dans le cas de perturbations oxydantes qui permettraient un accroissement de la solubilité des actinides et leur éventuel transport. On peut toutefois noter que les études de telles situations altérées retenues par l'Andra ne conduisent, dans aucun des scénarios pris en compte, à mettre en évidence une contribution significative des actinides à l'impact radiologique.

La CNE considère que finalement la séparation-transmutation répond au principe de précaution de la charte de l'environnement plutôt qu'à la recherche d'une diminution du risque réel dû à la présence en profondeur des déchets HAVL. Par ailleurs, il existera toujours dans les déchets à vie longue d'autres produits de fission et d'activation

non transmutables dont il faudra s'accommoder en stockage géologique.

Un bilan reste à faire pour évaluer les bénéfices réels qu'apporte la transmutation au stockage géologique. Outre l'aspect thermique évoqué ci-dessus, qui pourrait se traduire par une réduction de l'emprise des installations de stockage et une simplification des concepts de stockage (un bénéfice qui peut être appréciable), il convient également de clarifier comment la séparation-transmutation pourrait trouver une justification avec la prise en compte de scénarios altérés.

Axes 1 et 3

Les recherches de l'axe 1 sur les matériaux pour la transmutation ont des points communs avec celles conduites sur les matrices de conditionnement dans l'axe 3 : recherche de composés extrêmement résistants, mise en forme de ces composés, études des dégâts d'irradiation. Certes, il ne s'agit pas de résoudre les mêmes problèmes dont les dimensions temporelles sont très différentes mais ces recherches ont conduit à l'émergence d'une science du vieillissement des matériaux radioactifs qui doit se développer.

Les recherches sur le conditionnement des actinides et produits de fission séparés dans des céramiques nouvelles pourraient se révéler utiles pour conditionner des matières nucléaires qui ne seraient pas transmutes ou pour conditionner de nouveaux déchets issus de la pyrochimie.

Au plan stratégique, les liens des recherches entre les axes 1 et 3 se situent d'une part, au niveau de la reprise éventuelle des déchets vitrifiés et, d'autre part, à celui d'une mise en attente sous forme solide des actinides éventuellement séparés. Ces deux opérations ne sont pas impossibles dans leur principe, mais elles présentent de sérieuses difficultés et leur faisabilité n'est à ce jour aucunement démontrée. *A contrario*, le développement de verres très résistants capables d'incorporer des

actinides mineurs en quantités croissantes est en cours.

La reprise des verres nucléaires pour en extraire les radionucléides à transmuter est possible en théorie, mais elle n'apparaît pas réaliste dans la pratique. Les études préliminaires ont montré que cette opération serait complexe et lourde. Il n'est pas établi que cette opération offre un bénéfice quelconque au niveau d'un stockage. Quoi qu'il en soit un arbitrage serait à faire au regard d'un bilan comparatif d'impact radiologique, d'une part, entre reprise et non reprise des colis de verre des déchets, et d'autre part, entre colis dont on aurait extrait les radionucléides transmutables ou que l'on aurait conditionnés sous une forme à définir. Les déchets vitrifiés peuvent raisonnablement être considérés pour longtemps comme des déchets ultimes, la stratégie de séparation-transmutation se situant dans une logique de progrès continus des procédés industriels existants.

La reprise des colis de déchets MAVL, également étudiée, ne serait utile que pour une amélioration de leur conditionnement mais non pour une transmutation. Les déchets MAVL sont bien des déchets ultimes.

Le retraitement des assemblages de combustible MOX est possible. Dès à présent il peut être fait en mélange avec du combustible UOX dans l'usine de La Hague. Mais le recyclage dans les réacteurs actuels des matières valorisables du MOX de deuxième génération n'a que peu d'intérêt, alors qu'il serait de grande utilité dans de futurs réacteurs à neutrons rapides. Il convient donc d'envisager un

entreposage industriel prolongé des MOX dans les usines de retraitement en attente d'un emploi futur du plutonium qu'ils contiennent.

Axes 2 et 3

Une complémentarité des recherches existe entre ces deux axes dans le cas des conteneurs pour les colis primaires de déchets. Dans le cas des colis de déchets MAVL, l'Andra et le CEA ont travaillé ensemble sur la conception d'un conteneur en béton spécial qui conviendrait à l'entreposage et au stockage géologique. Dans le cas des colis de déchets HAVL, il résulte des recherches qu'un changement de conteneurs devrait être fait pour passer de l'entreposage au stockage.

L'optimisation de la durée d'entreposage avant stockage relève aussi de ces deux axes. En effet, l'emprise, voire la conception de certaines parties du stockage, est en relation directe avec la thermique des colis de déchets.

Il n'est pas établi, faute d'étude, qu'un conditionnement innovant des actinides et de produits de fission séparés dans des céramiques, tel qu'étudié dans le cadre de l'axe 3, apporte une amélioration pour le stockage par rapport au conditionnement sous forme de verre dont la durabilité a été démontrée (à la réserve près d'un approfondissement nécessaire de la connaissance des processus d'altération à long terme).

Si l'élimination de l'iode par rejet en mer ne pouvait continuer, il serait nécessaire d'approfondir les recherches sur la céramique spécifique pour le conditionnement de l'iode et d'étudier son conteneurage.

Annexe 2

Experts consultés

La CNE s'est entourée des avis et conseils des experts suivants :

Hubert BAIRIOT

Thierry CHAUSSADENT

Emmanuel DETOURNAY

Jean FUGER

Bruno GODART

Jean-Francis MARUCCO

Servais PILATE

Luc VAN DEN DURPEL

Annexe 3

Réflexions sur l'entreposage longue durée. Point de vue de Ghislain de Marsily

Je souhaite apporter ici une brève réflexion personnelle sur l'entreposage de longue durée, en particulier pour les déchets de moyenne activité et à vie longue (MAVL) ; il m'a donc semblé normal de m'exprimer ici à titre individuel, sans engager l'assentiment de mes collègues de la CNE. Ce texte ne remet cependant en rien en cause l'ensemble du rapport de la CNE, auquel je m'associe.

Un des résultats majeurs des quinze ans de recherche de la loi de 1991 a été pour moi de montrer qu'un choix existe aujourd'hui pour le législateur entre différentes options de gestion, en particulier le stockage en profondeur et l'entreposage de longue durée, en surface ou sub-surface. Je voudrais suggérer ici qu'une réflexion sur les possibilités de faire un entreposage en profondeur devrait également être menée, en particulier pour les MAVL.

Il me semble cependant nécessaire de résumer en préalable les concepts que ces deux options sous-tendent. La CNE a indiqué, à plusieurs occasions, qu'il y a tout d'abord là un choix de société : le risque résiduel lié à l'option « stockage » tient surtout à un comportement de la barrière géologique qui ne serait pas celui que nos connaissances scientifiques actuelles nous conduisent à prévoir – la science est-elle capable de le faire sur des durées aussi longues ? – ; l'option entreposage laisse aux générations futures la charge de la surveillance, et fait donc porter le risque sur la pérennité des structures sociales et leur capacité à maintenir l'entrepôt en état, et à le protéger des agressions de toute nature, qu'il soit en surface ou en sub-surface.

La durée avancée d'un entreposage, dans les rapports CEA existants, est de l'ordre de 300 ans. Il semble difficile que cet objectif puisse être atteint par une seule installation capable de durer 300 ans, avec les projets présentés aujourd'hui, mais qu'en revanche, par le jeu d'une reconstruction périodique des entrepôts, et éventuellement d'un reconditionnement des déchets, il n'y a pas de raison technique de limiter la durée de vie d'un entreposage.

Quelles sont les raisons qui pourraient conduire à entreposer sur de si longues durées ? On peut par exemple en proposer trois :

- (i) attendre une évolution des concepts de stockage, répondant mieux aux attentes de la société, et engendrant une meilleure conviction du public que le risque « géologique » résiduel est à un niveau acceptable ; si cette évolution ne se produit pas, il faut poursuivre l'entreposage en en faisant peser la charge sur les générations futures ;
- (ii) attendre que certaines matières contenues dans les déchets deviennent valorisables ; c'est particulièrement le cas des combustibles usés non retraités, dont la CNE a toujours indiqué qu'ils ne constituent pas pour elle un « déchet ultime » ;
- (iii) attendre une évolution technologique majeure, que la science actuelle n'est pas capable d'imaginer, qui permette de résoudre de façon plus satisfaisante le problème, pour tout ou partie des déchets ; si cette évolution ne se produit pas, il faut poursuivre l'entreposage ou recourir au stockage ; un argument parfois cité est l'envoi dans l'espace, qui est clairement aujourd'hui inaccessible ; un autre est d'utiliser l'option de l'enfouissement dans les fonds sous-marins, qui est aujourd'hui interdite par un traité international ; un troisième est qu'en conservant les déchets sous la responsabilité de l'homme, celui-ci serait ainsi contraint à trouver une solution meilleure que le stockage, dont la réalisation conduirait à occulter le problème et à le faire oublier.

De cette brève énumération, on peut d'ores et déjà tirer les enseignements suivants, qui concernent les déchets MAVL.

– Ceux-ci ne contiennent aucune matière valorisable, c'est aujourd'hui pratiquement certain.

– Ceux-ci ne pourront jamais, pour la majorité d'entre eux, bénéficier d'une évolution technologique majeure : leur volume est élevé (de l'ordre de

la centaine de milliers de m³), en extraire, par des procédés physiques ou chimiques, les radionucléides à vie longue contenus ne paraît pas concevable, cela demanderait des quantités d'énergie phénoménales, sans certitude d'aboutir ; espérer les transmuter sans les séparer n'est pas physiquement possible ; les envoyer tels quels dans l'espace, si cela devenait possible, demanderait aussi une quantité d'énergie énorme ; les inclure dans des conteneurs spéciaux très résistants (par exemple en cuivre comme le proposent les Suédois pour les combustibles usés) est aussi exclu pour des raisons de volume des déchets et de coût. Seuls certains d'entre eux, comme par exemple les déchets bitumés, pourraient être éventuellement repris, reconditionnés différemment et leur volume réduit.

– Ceux-ci ne représentent que quelques pour-cent de la radioactivité contenue dans les déchets engendrés par la production électronucléaire, ils n'émettent que peu de chaleur, et leur impact sur l'environnement est donc plus réduit que les déchets de haute activité et à vie longue (HAVL).

La CNE a toujours indiqué que les déchets MAVL n'avaient d'autre devenir final que le stockage. Ceci est la conséquence des trois raisons rappelées ci-dessus, qui excluent par définition les objectifs (ii) et (iii) de l'entreposage. Si donc on décide néanmoins de les entreposer, il ne reste en lice que l'objectif (i), c'est-à-dire l'hypothèse que le concept de stockage recueilli à terme davantage l'assentiment du public qu'aujourd'hui. Notons que le seul stockage profond de déchets nucléaires en œuvre aujourd'hui dans le monde est celui du WIPP, aux Etats-Unis, pour des déchets MAVL enfouis à 600 m dans le sel. Les pouvoirs publics vont-ils décider de construire un entreposage de longue durée des déchets MAVL, ou un stockage ?

C'est ici que pourrait intervenir de façon utile un concept un peu nouveau, envisagé par les Anglais et évoqué par les Canadiens, et dont l'idée est suggérée brièvement par l'Andra dans son rapport de synthèse final, qui consiste à dire qu'en raison du principe de réversibilité mis en œuvre dans un stockage, et pour une durée d'environ 200 à 300 ans, un stockage réversible se comporte de façon proche d'un entreposage tant que les bouchons des alvéoles ne sont pas mis en place. Dès lors, s'il était décidé de construire en sub-surface un entreposage de longue durée pour des déchets MAVL, ne serait-il pas de meilleure politique de le faire directement en profondeur ?

Dans un site profond choisi pour avoir d'excellentes propriétés de confinement sur le très long terme, les déchets MAVL pourraient être entreposés et surveillés, de façon analogue ou voisine à celles d'un entreposage de sub-surface, maintenance et surveillance pouvant être assurées sur deux à trois siècles, selon l'Andra. Pendant cette période séculaire d'observation des déchets et du milieu, la conviction que le site est aussi capable de fonctionner en stockage pour ces déchets pourrait être, si c'est bien le cas, progressivement acquise. Il reviendrait alors aux générations futures de décider de transformer l'entrepôt en stockage, pour tout ou partie de son contenu, par fermeture des alvéoles et puits. Si cette conviction n'était pas acquise, l'entreposage pourrait être soit poursuivi, soit déconstruit en remontant en surface les déchets stockés, pour une option meilleure ou un site meilleur que ces générations auraient trouvé.

Par rapport à un entreposage en sub-surface « classique », cette option mérite à mon sens que l'on s'y attarde un instant. J'ai tenté d'indiquer plus haut pourquoi il est vraisemblable que la seule option possible, à l'issue d'un entreposage de déchets MAVL, quelle qu'en soit la durée, est le stockage. Si l'entrepôt est déjà conçu comme un stockage potentiel, les sujétions laissées aux générations futures sont très réduites, c'est de fermer le dépôt, alors que pour un site en sub-surface, il faudrait reprendre les déchets et les transférer à un nouveau site de stockage, au prix d'efforts importants. Mais surtout, la décision de stocker ou non revient aux générations futures, celles qui seront le plus concernées par ce choix. On maximise ainsi leur liberté de choix, sans pour autant leur léguer de sujétion importante, en leur apportant une solution rationnelle correspondant aux meilleures possibilités de la science actuelle, qui leur laisse aussi la possibilité de prendre une décision meilleure, en fonction de leurs connaissances futures. Notons enfin la plus grande protection apportée par un entreposage profond contre les agressions, les accidents, ou même l'abandon prématuré du site, en cas d'effondrement de la société.

Certes, cette option est encore à l'état d'idée, et non de projet ; il conviendrait donc, si elle était retenue comme intéressante par les pouvoirs publics, de demander à l'Andra de l'étudier plus avant et de la formaliser, en mesurant les risques et modalités, dont au premier chef la compatibilité entre les

deux objectifs du point de vue de la sûreté ; puis de
rechercher un site approprié.

Paris, le 18 janvier 2006

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Ghislain de Marsily'. The signature is fluid and cursive, with a long vertical stroke extending downwards from the end.

Ghislain de Marsily

Professeur émérite à l'Université Pierre et Marie
Curie (Paris VI)

Membre de l'Académie des Sciences, Membre de
l'Académie des Technologies

Membre de l'*Academia Europaea*, associé étranger
de l'*U.S. National Academy of Engineering*

Liste des membres de la Commission nationale d'évaluation au 1^{er} janvier 2006

Bernard TISSOT, Président

Pierre BEREST

Robert DAUTRAY

Jean-Claude DUPLESSY

Robert GUILLAUMONT

Juan-Manuel KINDELAN

Jacques LAFUMA

Jean LEFEVRE

Ghislain de MARSILY

Olivier PIRONNEAU

Jean-Paul SCHAPIRA

Claes THEGERSTRÖM

