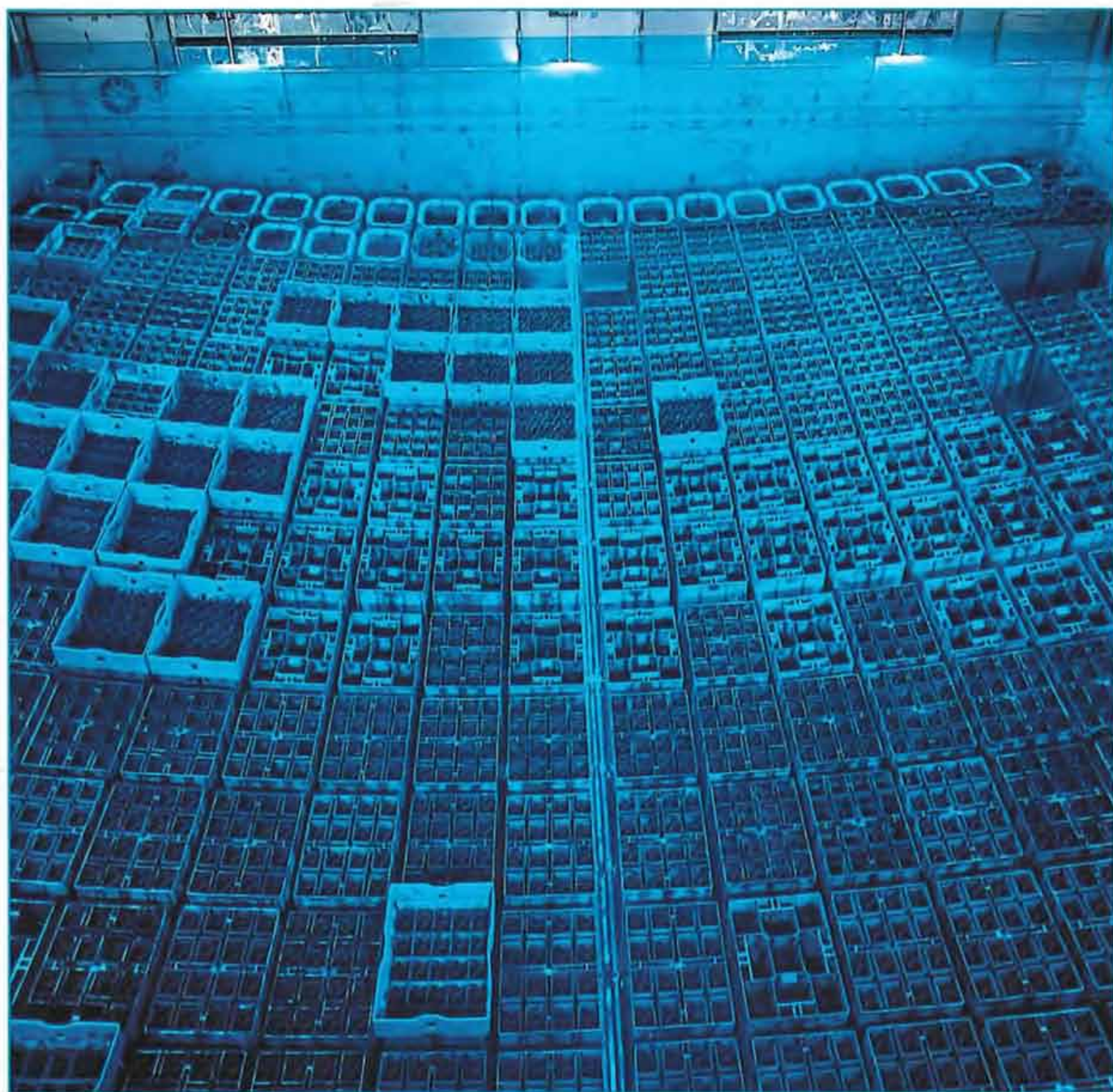


C O N T R Ô L E



La gestion des déchets radioactifs : l'état des recherches début 2000





Creusement du puits d'accès - Praclay (Belgique)

La gestion des déchets radioactifs : l'état des recherches début 2000

Sommaire

- **Avant-propos :**
par André-Claude Lacoste, Directeur de la sûreté des installations nucléaires – DSIN
- **La loi du 30 décembre 1991 : solution démocratique et riche en perspectives**
par Christian Bataille, Député du Nord, membre de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques
- **Un inventaire national : un outil partagé de décision**
Par Yves Le Bars, Président, et Alain Canvel, Chef de projet « Méthodologie de l'inventaire » – ANDRA
- **Séparation et transmutation des radionucléides à vie longue dans la gestion des déchets nucléaires**
par L.H. Baetslé, Conseiller à la Direction générale – Centre d'études de l'énergie nucléaire (Belgique)
- **Les programmes de recherche français sur la séparation et la transmutation**
Par Patrice Bernard, Directeur de programme « Loi de 1991 », Michel Boidron, Responsable de segment « transmutation et systèmes hybrides », Bernard Boullis, Responsable de segment « séparation poussée », et Jean-Baptiste Thomas, Directeur de programme « systèmes hybrides », au CEA
- **Le Plan de développement du projet HAVL de l'ANDRA**
par Jean-Marc Niezborala, Directeur des projets – ANDRA
- **Les fonctions de sûreté : outil clé de la conception d'un stockage de déchets radioactifs**
par Jean-Paul Minon, Directeur général adjoint de l'Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies (ONDRAF)
- **Bure : un laboratoire de recherche souterrain pour qualifier un site de stockage géologique**
par Patrick Lebon, adjoint à la Directrice scientifique de l'ANDRA
- **La sûreté d'un stockage géologique réversible**
par Michèle Viala, Directrice déléguée chargée de la sûreté des déchets à l'Institut de protection et de sûreté nucléaire (IPSN)
- **Une solution originale de stockage de déchets industriels non radioactifs : le stockage souterrain réversible en mine, dans une couche de sel**
par Christian Floderer, Chef du groupe de subdivision du Haut-Rhin et Thomas Maurin, Chef de division nucléaire, énergie et mines – DRIRE Alsace
- **L'acceptabilité sociale du stockage des déchets radioactifs : la situation au Canada**
par Blair Seaborn, Président de la Commission de l'évaluation environnementale relative à la gestion à long terme des combustibles usés au Canada
- **L'étude de l'entreposage à long terme des déchets radioactifs**
par Daniel Iracane, Responsable du segment « entreposage de longue durée » au CEA
- **Conteneurs de haute intégrité : recherche et application pour l'exploitant CEA**
par Rose-Marie Atabek, direction de la gestion des déchets du CEA
- **Bilan des travaux d'évaluation (1994-1999) de la CNE**
par Bernard Tissot, Président, et Rémi Portal, secrétaire scientifique de la Commission nationale d'évaluation
- **S'assurer du développement de modes de gestion sûrs des déchets de haute activité et à vie longue**
par Olivier Brigaud et Philippe Raimbault, Direction de la sûreté des installations nucléaires (DSIN)
- **Etat d'avancement des projets de dépôts géologiques dans le monde**
par Hans Riotte, Chef de division, protection radiologique et gestion des déchets radioactifs – OCDE/AEN
- **Saura-t-on gérer de manière sûre les déchets radioactifs de haute activité et à vie longue ?**
par M^{me} Rivasi, Députée de la Drôme et membre de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques

Avant-propos

En votant le 30 décembre 1991 une loi relative à la recherche sur les déchets de haute activité et à vie longue, le Parlement français a créé un cadre original pour aboutir à moyen terme à la mise en place d'une ou plusieurs voies de gestion pour ce type de déchets. Rendez-vous est fixé en 2006 pour faire le point sur l'avancement des recherches engagées par le CEA et l'ANDRA selon les trois axes définis par la loi : séparation et transmutation, stockage géologique réversible ou irréversible et entreposage provisoire de longue durée.

A mi-parcours, il m'a semblé utile de dresser un premier bilan de ce qui a été accompli sur ces trois axes, qui sont, je le rappelle, plus complémentaires que concurrents. Les articles rassemblés ici permettent de mesurer le chemin parcouru : même si aucune solution industrielle n'est encore en vue, des progrès réels ont été enregistrés après une première période sans grands résultats. Il reste encore à préciser les projets qui se dessinent et à asseoir leur crédibilité, notamment pour ce qui concerne les aspects de sûreté. Il conviendra ainsi de mettre au point des concepts et des scénarios robustes qui intègrent la dimension temps des projets. Les décisions prises par le Gouvernement en 1998 et mises en application en 1999 concernant l'inventaire des déchets radioactifs, la création d'un laboratoire souterrain à Bure, la recherche d'un site granitique pour un second laboratoire et la définition d'un avant-projet d'entreposage de longue durée doivent permettre aux acteurs de la loi de poursuivre leur travail. On constate également qu'au niveau international aussi les idées se pré-

cisent et sont parfois transcrites en projets, essentiellement sur le thème du stockage en profondeur.

Ce dossier de Contrôle met en relief un point particulier. Certains projets associés aux trois axes de la loi suscitent le scepticisme, voire le rejet, de la part du public et de ses relais. Aussi, alors que les techniciens semblent être d'accord pour donner la préférence à certaines options, il reste à obtenir l'adhésion des citoyens... ou plutôt à prendre en compte leurs attentes en faisant évoluer d'autant les projets. Ceci nécessitera certainement d'établir un dialogue. A cet égard, il pourrait être utile d'organiser une « conférence de citoyens », comme cela a pu déjà se faire en France sur les OGM ou dans les pays nordiques sur de multiples sujets. Un tel processus ou une démarche analogue éclairerait sûrement les membres du Parlement qui, en dernier ressort, auront à faire au bout de 15 ans le bilan de la loi qu'ils ont votée.

Il convient de gérer les déchets de haute activité et à vie longue, comme tous les déchets, de manière adéquate. Ils représentent un très faible volume mais concentrent, pour une longue durée, une toxicité très élevée. Leur devenir mérite toute la réflexion nécessaire ainsi que l'intervention de tous ceux qui se sentent concernés. Heureusement, à quelques exceptions près, qui sont identifiées et qui sont en cours de traitement, les conditions dans lesquelles ils sont entreposés permettent de disposer du temps nécessaire aux recherches, aux réflexions et aux discussions.

André-Claude Lacoste

La loi du 30 décembre 1991 : solution démocratique et riche en perspectives

par **Christian Bataille**, Député du Nord, membre de l'Office
parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques

En 1990, le gouvernement, alors sous l'autorité de Michel Rocard, se tournait vers le Parlement pour lui demander un rapport sur le problème posé par la gestion des déchets nucléaires à haute activité. L'objectif était en réalité de donner au Gouvernement l'avis de la représentation nationale sur le problème des déchets nucléaires. Le développement de la production d'énergie nucléaire ne s'était pas accompagné à temps des propositions indispensables sur la gestion des déchets radioactifs. Devant les mouvements de population et d'opinion nés d'une pratique maladroite, le gouvernement, par son recours à l'avis du Parlement, exprimait sa volonté d'une approche démocratique ouverte et transparente.

Dans le rapport que j'avais rédigé ensuite, il y a donc 10 ans, j'avais suggéré au gouvernement d'actionner les ressorts de la démocratie, à travers les élus choisis par le peuple souverain. Naturellement, les collectivités territoriales devaient prendre toute leur place dans un processus de dialogue.

Le Parlement, dont la principale fonction est législative, devait proposer une loi. Il n'a pas été demandé, comme bien souvent, aux membres de l'Assemblée Nationale de répondre par oui ou par non à un texte préalablement bouclé, mais de faire part d'une réflexion aboutie sur un problème bien défini. C'est donc au cours de l'année 1991 que s'est élaborée, par navettes successives entre l'Assemblée Nationale et le Sénat, la loi du 30 décembre 1991, qui représente, à ce jour, le seul aboutissement législatif dans le domaine de l'énergie nucléaire, et dont les principes fondateurs sont la responsabilité, la transparence et la démocratie.

Ces principes sont plus que jamais actuels.

La responsabilité : car on voit trop aujourd'hui revenir à la surface des comportements biaisés qui veulent éluder la responsabilité de la démocratie ici, en France, et maintenant, en 2000. Ici, en France, car les sous-produits de notre consommation énergétique ne doivent pas échouer au tiers-monde, dans la cordillère des Andes comme certains irresponsables le proposent, ou bien encore dans un pays en difficulté, la Russie, comme cela est envisagé par d'autres. Maintenant, en 2000, car la grande facilité serait de dire « on verra plus tard » ; il n'appartient certainement pas aux enfants du XXI^e siècle de trouver une solution à un dossier que, par manque de courage, les gens du XX^e siècle n'auront pas résolu.

Le second grand principe fondateur est la transparence. Ce mot est devenu la ritournelle des donneurs de leçon et des nouveaux propagateurs du politiquement correct. Il y a une dizaine d'années, cependant, il représentait un concept réellement novateur : nous étions en face d'un savoir prestigieux et d'une industrie profondément marquée par le culte du secret. Cette notion qui peut paraître banale aujourd'hui ne l'était donc pas à cette époque. Etre transparent, c'est rechercher les problèmes et les dire pour leur trouver une solution, non pas jouer fausement aux outragés.

Le troisième principe fondateur est la démocratie. Admettre la démocratie, c'est admettre la traduction du suffrage universel, donc la volonté de la majorité. La logique des minorités agissantes est tout à fait contraire aux principes démocratiques. Le rapport proposait d'avoir recours aux institutions de la démocratie : les assemblées territoriales (Conseils municipaux, régionaux et généraux) et le Parlement. Il y a 10 ans, il n'y avait aucune loi relative à la production d'énergie nucléaire ; aujourd'hui, il n'en existe hélas

toujours qu'une, la loi du 30 décembre 1991. La proposition de recours à la loi était bien destinée à permettre de continuer le travail entrepris. La loi devait faire en sorte qu'aucune porte ne soit fermée et que le travail puisse être continué sans que des préjugés apparaissent à propos des résultats potentiels. Les débats en témoignent.

La loi propose trois axes de recherche qui doivent être développés parallèlement, équitablement. Ceci ne signifie pas qu'il faille se comporter en notaires et comptabiliser au franc près des dépenses dont l'ampleur peut varier en fonction de la nature des recherches.

L'axe de la recherche fondamentale se développe notamment à travers le programme Atalante, mis en place à Marcoule par le CEA.

L'axe de l'entreposage en surface n'est pas suffisamment développé aujourd'hui ; mais il faut veiller à ce que la notion de subsurface ne dissimule pas une fausse bonne idée qui cumule en fait tous les inconvénients d'une non-solution.

L'axe de la recherche en laboratoires souterrains en vue du stockage profond a pour objectif de déterminer s'il est raisonnable et efficace d'envisager un stockage souterrain des matières radioactives. Il se met en œuvre de façon satisfaisante dans la Meuse ; l'idée d'une mission faisant à nouveau l'inventaire exhaustif des sites granitiques en France me semble relever d'une provocation maladroite, sans grand intérêt scientifique pour la recherche nucléaire, et devrait être conduite de façon plus modeste.

La loi pose un certain nombre de jalons et impose un certain nombre de principes dont les partenaires devront se souvenir. Les laboratoires sont des lieux de recherche et il ne saurait être question d'en faire autre chose. On ne peut y introduire que les faibles quan-

tités de matières radioactives nécessaires à la conduite des expériences.

La loi a prévu, à toutes les étapes, des instances de dialogue, de concertation. Les Commissions Locales d'Information doivent être à l'écoute du monde des élus et des associations. La Commission Nationale d'Evaluation, composée d'experts pluralistes, doit rendre un avis sur la manière dont les recherches sont conduites. Sa mission est d'apprécier l'état d'avancement des recherches et de le transmettre au Parlement et au gouvernement.

La loi votée en 1991 s'impose à tous. Le vote par le Parlement de cette loi ne saurait, par conséquent, en aucune manière être interprété comme un artifice pour contourner les difficultés vis-à-vis de l'opinion publique et les problèmes momentanés. Il est inopérant d'organiser à l'infini une réflexion redondante. Un texte voté par une Assemblée est un équilibre trouvé, il trace des perspectives d'avenir et invite à l'action. Il est donc maintenant une règle que tous doivent intégrer, même s'il peut entraîner des modifications de comportement ou des changements dans les modalités de l'action. Le débat a été suffisamment nourri ; le gouvernement a fait des propositions, des amendements ont été apportés par les différents groupes parlementaires. Le résultat a été officialisé par un vote pratiquement unanime. Je pense d'ailleurs que, si ce débat devait être recommencé et que si un nouveau texte devait venir, la loi qui en résulterait ne serait pas très éloignée de celle que nous avons aujourd'hui.

La totalité de ce qui concerne la gestion des déchets, a fortiori l'ensemble de la filière nucléaire, ne figure pas dans la loi. Aujourd'hui des problèmes sont laissés en suspens, notamment le dossier des combustibles irradiés non retraités qui existent aussi en France ; notre pays se trouve ainsi sous l'égide d'une double filière : le retraitement et le non-retraitement.

La loi est nécessaire pour faire le point sur de nombreux sujets caractéristiques de notre société. Je déplore que, pour le dossier nucléaire et des déchets radioactifs, pour d'autres thèmes, il n'existe toujours qu'une loi. Il faut sans doute y voir le résultat d'une certaine timidité et d'une certaine crainte de la part du pouvoir exécutif. Des sujets tels que la sûreté des centrales pourraient faire l'objet



d'un texte de loi, qui permette de fonder une démarche et de surmonter les obstacles. Nous sommes constamment confrontés à l'opinion publique et il est nécessaire de trouver des réponses adéquates à ses questions.

Nous avons, bien sûr, tenu compte de l'avis des techniciens, de celui de l'exécutif et de tous ceux qui, avec mérite, savoir et prestige, travaillent sur ces questions. Mais nous avons également cherché à considérer les interrogations de la population. Il serait excessif de prétendre avoir apporté une réponse parfaite, mais nous avons mis en place un dispositif qui peut être complété.

Plusieurs écoles existent. Certains sont partisans d'une grande loi cadre nucléaire. Je ne suis, pour ma part, pas vraiment enthousiasmé par cette thèse. En effet, une loi cadre ne pourrait permettre de brasser que des idées générales et vagues et aboutirait à l'adoption d'un texte flou. Je crois beaucoup plus en un

dispositif de textes successifs qui se complètent à la manière des cases d'un tableau.

Dans les années à venir, en raison de la détermination de l'opinion, le Parlement devra avancer dans ce domaine et le pouvoir exécutif abandonner son assurance régalienne. Les organismes techniques, les responsables de ce dossier auront besoin de tels débats débouchant sur des textes de loi. Ceux-ci devraient d'ailleurs se dérouler approximativement dans des conditions proches de celles que nous avons connues.

Il est très surprenant d'entendre aujourd'hui prétendre que la loi serait en soi mauvaise. Elle est au contraire un ressort essentiel de la démocratie. Dans le domaine de l'énergie nucléaire, dont la réglementation est aussi notoirement absente, ce n'est pas la loi qui gêne mais c'est l'absence de loi qui fait scandale.

LOI N° 91-1381 DU 30 DECEMBRE 1991

relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (Extraits)

Article 1^{er}. — La gestion des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue doit être assurée dans le respect de la protection de la nature, de l'environnement et de la santé, en prenant en considération les droits des générations futures.

Article 2. — [...] Le stockage souterrain en couches géologiques profondes de produits dangereux, de quelque nature qu'ils soient, est soumis à autorisation administrative [...]. Les conditions et garanties selon lesquelles certaines autorisations peuvent être accordées ou prolongées pour une durée illimitée [...] seront définies dans une loi ultérieure.

Article 3. — Le stockage en France de déchets radioactifs importés, même si leur retraitement a été effectué sur le territoire national, est interdit au-delà des délais techniques imposés par le retraitement.

Article 4. — Le Gouvernement adresse chaque année au Parlement un rapport faisant état de l'avancement des recherches sur la gestion des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue et des travaux qui sont menés simultanément pour :

- 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 de procédés de conditionnement et d'entreposage de longue durée en surface de ces déchets.
- Ce rapport fait également état des recherches et des réalisations effectuées à l'étranger.

A l'issue d'une période qui ne pourra excéder quinze ans à compter de la promulgation de la présente loi, le Gouvernement adressera au Parlement un rapport global d'évaluation de ces recherches accompagné d'un projet de loi autorisant, le cas échéant, la création d'un centre de stockage des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue et fixant le régime des servitudes et des sujétions afférentes à ce centre. Le Parlement saisit de ces rapports l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques.

Ces rapports sont rendus publics.

Ils sont établis par une commission nationale d'évaluation [...].

Article 13. — Il est créé, sous le nom d'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, un établissement public industriel et commercial, placé sous la tutelle des ministres de l'industrie, de la recherche et de l'environnement [...].

Un inventaire national : un outil partagé de décision

Par Yves Le Bars, Président, et Alain Canvel, Chef de projet « Méthodologie de l'inventaire » – ANDRA

L'homme n'a pas une longue expérience de la radioactivité. Qu'elle soit naturelle ou artificielle, il la ressent comme une menace qu'aucun de ses cinq sens ne peut percevoir. Les déchets radioactifs n'y échappent pas. Il faut donc qu'on puisse voir et savoir ce que sont les déchets radioactifs, combien et où ils sont et les prendre en charge sur le long terme.

Répondant à ce souci, la loi du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs a confié à l'ANDRA la charge de « répertorier l'état et la localisation de tous les déchets radioactifs se trouvant sur le territoire national ».

La mission, confiée par le Gouvernement au Président de l'ANDRA, de « proposer toute réforme visant à fiabiliser l'inventaire de ces déchets et notamment l'extrapolation de l'inventaire à moyen et long terme » conduit à repréciser les besoins et à constater ce qui se fait déjà pour formuler de nouveaux objectifs.

Un inventaire : pour quoi faire ?

Un inventaire est d'abord nécessaire sur un plan opérationnel, pour gérer les installations de stockage ou d'entreposage, en concevoir de nouvelles et, d'une manière générale, optimiser la gestion des déchets radioactifs.

Les besoins sont également politiques et sociaux. Les politiques publiques et les stratégies de gestion qui en découlent ont besoin de s'appuyer sur des synthèses chiffrées. Il faut également informer le citoyen et l'aider à se représenter ce que sont les déchets radioactifs. Enfin on doit montrer que rien n'est perdu, ni oublié, ni caché.

Qu'existe-t-il déjà en France ? Que fait-on à l'étranger ?

L'ANDRA établit plusieurs inventaires.

Le plus connu est l'inventaire, publié tous les ans depuis 1993, de la localisation des déchets radioactifs. C'est un catalogue site par site, avec une description des déchets entreposés faite volontairement par le détenteur. Il est large (on y trouve, par exemple, les sites de Mururoa ou les déchets miniers) et il a permis de sensibiliser les petits producteurs de déchets à leurs responsabilités. Mais les combustibles usés sans réemploi n'y figurent pas et la manière dont il est bâti ne permet pas de faire des totalisations.

L'ANDRA a établi des inventaires pour concevoir les projets de stockage. Ces inventaires sont prévisionnels et construits sur la base d'informations fournies par les producteurs de déchets selon des spécifications de l'ANDRA. Un groupe de travail réunissant les Producteurs et l'ANDRA permet d'en discuter. Le contenu radiologique et la toxicité chimique des colis sont définis pour partie par mesures, pour partie par calcul, et donnés par excès : c'est ainsi une enveloppe de la réalité, prudente pour concevoir les projets.

La gestion des centres de stockage de surface demande un travail d'inventaire spécifique. Deux types d'inventaire sont établis pour le Centre de l'Aube. Le premier, basé sur l'enregistrement de chaque colis reçu, permet de faire des bilans des quantités reçues et de les comparer à la capacité du centre. Le deuxième, prévisionnel sur 5 ans, est utilisé pour prévoir le nombre des alvéoles de stockage à construire en conséquence.

À l'étranger, on notera tout particulièrement que la Grande-Bretagne publie un inventaire détaillé tous les 3 ans. Celui-ci comptabilise les déchets existants définis en 1000 « waste streams », analogues à nos familles de

déchets, avec une description des radionucléides et toxiques chimiques. Une prévision des déchets « engagés », c'est-à-dire dont la production est quasi certaine à cause des outils industriels existants et de leur durée de vie supposée, y figure également. D'autres pays (Suisse, Belgique et USA) font aussi des inventaires très détaillés. Pour les USA, l'inventaire est disponible sur Internet.

Quel constat peut-on faire ?

Les outils actuels, en France, répondent dans les grandes lignes aux besoins pour lesquels ils ont été créés.

Cependant, il y a autant d'outils que de besoins. La cohérence d'un inventaire à un autre risque de faire défaut, en particulier en raison des hypothèses faites pour les établir, et des difficultés apparaissent pour réaliser des tableaux de synthèse offrant une vision complète et transverse de l'ensemble des quantités et caractéristiques des déchets radioactifs.

On constate également que les producteurs de déchets sont sollicités pour fournir des données de différentes manières, et dans différents contextes, ce qui ne favorise pas la qualité de leur travail.

Il faut enfin noter les remarques faites par la CNE (Commission nationale d'évaluation des recherches menées selon les axes de la loi de 1991), qui soulignait dans ses derniers rapports que :

- les inventaires présentés ne faisaient pas apparaître les stocks existants ;
- pour les évolutions ultérieures (changements technologiques ou reprises de déchets anciens), il faudrait tenir compte d'un facteur

raisonnable de succès de ces opérations et argumenter les hypothèses retenues ;

- les déchets issus d'opérations de démantèlement ne semblaient pas être pris en compte et aucun combustible ne figurait dans l'évaluation faite pour 2020.

Pour répondre à l'objectif fixé par le Gouvernement et répondre aux différents besoins, il faut donc compléter le dispositif existant.

Vers un inventaire français unifié, large et vérifié

Le constat et les problèmes rappelés plus haut conduisent à proposer que soit établi en France un inventaire national des déchets radioactifs existants et à venir.

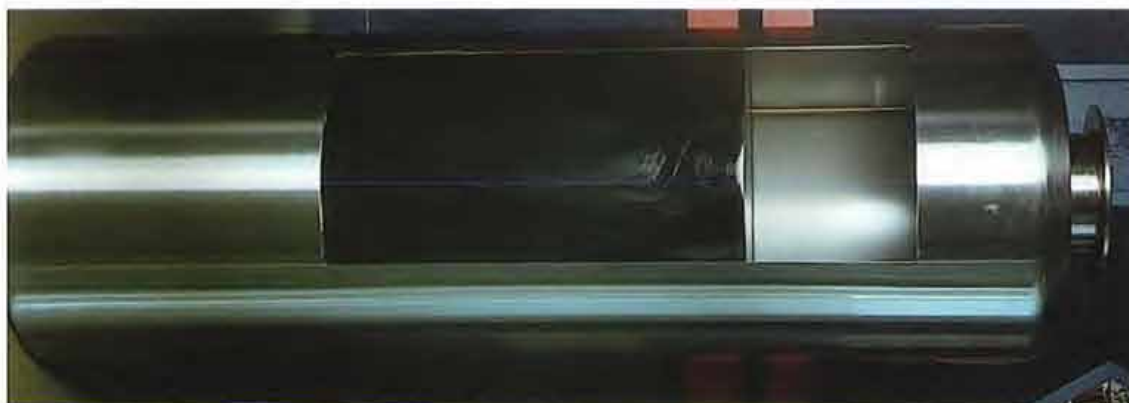
1. Il s'agit de **créer un système unifié de gestion** des données d'inventaire s'appuyant notamment sur les acquis de l'ANDRA et sur les études déchets faites par les producteurs de déchets radioactifs à la demande de la DSIN. Ce système de gestion permettra de produire différentes synthèses.

Aux données en volume, en activité et en composition chimique, il faudra ajouter un inventaire photographique et iconographique des déchets et de la façon dont ils sont manipulés par l'homme.

L'inventaire national devra servir de référence et par conséquent être largement diffusé (version papier, CD-Rom, Internet).

2. **Plusieurs orientations sont à prendre**, pour définir l'information de base à rassembler, commune à tous les acteurs :

- *sur le champ d'investigation* : le domaine des matières radioactives à retenir doit être



Verre contenant les produits de fission et actinides mineurs (maquette)

large, soit parce qu'il n'est pas aisé d'appréhender précisément ce qu'est un déchet radioactif, soit parce que les déchets sont inclus dans des matières radioactives potentiellement réutilisables (cas des combustibles usés). Dans ce dernier cas, une rubrique à part devrait être définie ;

– sur les aspects temporels : il faut distinguer clairement, dans l'inventaire, les données sur les déchets existants et les prévisions sur les déchets « engagés » par le parc industriel existant. Des études prospectives de production de déchets selon différentes hypothèses de renouvellement de l'outil industriel doivent être traitées dans un autre cadre ;

– sur les aspects qualitatifs : une distinction doit être faite entre les déchets radioactifs conditionnés selon des spécifications, les déchets anciens à reconditionner, et les déchets anciens non conditionnés ;

– sur l'unité élémentaire de référence : l'inventaire portera sur des familles de colis de déchets ou l'unité de déchets en vrac, et non pas colis par colis.

3. Les hypothèses et les scénarios seront explicités et argumentés.

Ainsi en est-il pour les *hypothèses de conditionnement des déchets anciens* non conditionnés ou à reconditionner. Il appartient aux producteurs de déchets de proposer ces hypothèses et à l'ANDRA d'en assurer l'expertise en tant que spécificateur. Les plannings de reprise et conditionnement de ces déchets devraient figurer dans l'inventaire.

Il est nécessaire de définir un scénario de référence pour la production future des déchets par les *installations existantes*. On se propose de retenir un scénario sans rupture par rapport aux tendances actuelles.

Le scénario concernant les *déchets issus du retraitement* et leur répartition entre les différents clients de la COGEMA devra être explicité, pour une bonne prévision des colis restant en France. Des paramètres complémentaires au paramètre radiologique utilisé comme traceur depuis le combustible retraité jusqu'aux déchets sont nécessaires pour la bonne connaissance des colis, en particulier leur puissance thermique et la densité radiologique.

4. Un inventaire doit **pouvoir être évalué et vérifié**. Plusieurs modes de vérification doivent être mis en œuvre en parallèle, depuis la connaissance par l'ANDRA de l'origine des déchets (pour expertiser les données reçues) jusqu'à la réalisation des audits effectués chez les producteurs commandités par l'ANDRA et à l'ANDRA commanditée par les Autorités administratives.

Par contre, il n'est pas souhaitable que la responsabilité de l'ANDRA, gestionnaire de l'inventaire, soit celle d'une autorité administrative pour la vérification des déclarations des producteurs.

5. Les propositions ci-dessus se situent dans **un cadre de responsabilité** sans grand changement en ce qui concerne les rôles respectifs des producteurs de déchets, de l'ANDRA et des Autorités administratives.

Toutefois un financement stable de la fonction inventaire de l'ANDRA devra être assuré, qui en garantisse la dimension « service public ».

Par ailleurs, on peut s'interroger sur l'intérêt de rendre obligatoire la déclaration de détention de déchets radioactifs, comme cela se fait pour d'autres catégories de déchets.

Conclusion

On mesure la difficulté de la tâche qu'il faut accomplir : unifier des pratiques d'inventaire très diverses, faites selon des hypothèses variables et les rendre compréhensibles, le plus largement possible.

Mais on voit bien tout l'intérêt qu'il y a à rendre mieux perceptibles les déchets radioactifs en France : les déchets existants d'abord, dont il faut améliorer le conditionnement, et les déchets qui seront générés par le parc industriel actuel. Quels que soient les choix techniques ou les choix de société futurs, notre génération doit prendre en charge les déchets issus des choix passés de défense, de la médecine et, bien sûr, de la production d'énergie. En ce sens, l'inventaire doit servir à concrétiser le schéma français pour la gestion à long terme de tous les déchets radioactifs : il doit contribuer à la mise en place des filières nécessaires de gestion à long terme pour qu'une solution existe pour chaque famille de déchets radioactifs.

1 – Classification des déchets radioactifs selon la filière de gestion à long terme

	Vie courte principaux éléments < 30 ans	Vie longue principaux éléments > 30 ans
Très faible activité (TFA)	Etudes en cours pour réalisation	Mise en sécurité à l'étude pour les résidus miniers
Faible activité (FA)	• Centre de l'Aube (stockage de surface)	Stockage dédié à l'étude (déchets radifères, graphites)
Moyenne activité (MA)	• A l'étude pour les déchets tritiés	
Haute activité (HA)	À l'étude (loi du 30 décembre 1991)	

2 – Exemple d'estimation des déchets radioactifs produits par les outils industriels existant aujourd'hui (Stocks existant actuellement et prévisions y compris démantèlement)

Catégorie de déchets	Production totale (part française)	Remarque
TFA (hors résidus miniers)	1 à 2 000 000 m ³	Essentiellement démantèlement Estimation à préciser à partir des premiers démantèlements
FMA – vie courte	1 300 000 m ³ (stockés)	Incluant Centre de la Manche et immersions
FMA – vie courte Déchets tritiés	3 500 m ³	
FA – vie longue Graphites	14 000 m ³	Volume non conditionné
FA – vie longue Radifères	> 100 000 m ³	Déchets d'industries anciennes et de sites pollués
MA – vie longue	60 000 m ³	
HA Produits de fission vitrifiés	5 000 m ³	

3 – Exemple d'estimation des quantités de combustibles entreposés, en fin de parc électronucléaire actuel

Combustibles usés	3 500 tonnes (métal lourd)	Répartis en 2 650 tonnes de MOX et 850 tonnes d'URE
--------------------------	-------------------------------	--

Hypothèses prises en compte pour les estimations (toute modification des hypothèses conduirait à une modification des quantités figurant ci-dessus) :

- sur la base d'une durée de vie du parc électronucléaire de l'ordre de 40 ans, le total de combustibles déchargés s'établit à environ 40 000 t (UOX, MOX, combustible à l'uranium de retraitement),
- le combustible UOX déchargé est supposé entièrement retraité, y compris au-delà de l'arrêt des centrales du parc existant,
- les combustibles MOX déchargés (environ 100 t/an à partir de 1995) et les combustibles à

l'uranium de retraitement déchargés sont supposés non retraités.

Nota : la gestion du combustible peut conduire à un autre scénario, avec d'abord un retraitement chaque année d'une partie seulement de l'UOX, en fonction des besoins en plutonium pour le MOX, et ensuite en arrêtant le retraitement en même temps que le parc existant. Cela modifierait le tableau ci-dessus de la façon suivante :

- HA, produits de fission : 3 500 m³,
- MA, vie longue : 56 000 m³,
- combustibles usés : 15 000 tonnes (dont 2 650 tonnes de MOX et 850 tonnes d'URE).

Séparation et transmutation des radionucléides à vie longue dans la gestion des déchets nucléaires

par L.H. Baetslé, Conseiller à la Direction générale –
Centre d'études de l'énergie nucléaire (Belgique)

Depuis plusieurs décennies les chercheurs du secteur nucléaire ont été attirés par le problème de l'élimination des radionucléides à vie longue dans le but de réduire leur toxicité et leur risque pour les générations, voire les civilisations futures.

En effet, chaque décision prise dans le domaine de la production d'électricité nucléaire a des conséquences très lointaines pour l'homme et son environnement. La constante de temps des opérations du cycle du combustible est très longue et dépasse de loin l'horizon de la vie humaine. Ceci pose le problème de la co-responsabilité entre générations.

La réduction de la radiotoxicité accompagnée d'une réduction substantielle de la durée de vie des déchets nucléaires est le but ultime des opérations de séparation et de transmutation des actinides et de certains produits de fission à vie longue, mais sa réa-

lisation pose des problèmes scientifiques, technologiques et économiques.

Les cycles du combustible nucléaire

Il y a actuellement trois types de stratégies dans le monde :

– la première voie est l'enfouissement direct des éléments combustibles usés dans une formation géologique (Etats-Unis, Suède, Finlande, Espagne, Canada...);

– la deuxième voie passe par un cycle comprenant le retraitement des combustibles usés, la récupération et le recyclage du plutonium, la transformation des « déchets de haute activité » en blocs de verre et l'enfouissement de ces déchets (France, Royaume-Uni, Japon, Russie, Chine, Inde et pays associés) en formation géologique ;

– la troisième voie, en phase de recherche dans quelques pays nucléaires (Japon, France

Lors de la fission nucléaire un éventail d'isotopes de fission se créent avec des demi-vies allant de quelques secondes à des milliers d'années. Les produits de fission les plus « influents » sur la gestion des déchets sont le césium 137 et le strontium 90, qui ont des demi-vies d'environ 30 ans. Mais ils sont accompagnés de quelques radionucléides à vie longue comme le technétium 99 (213 000 ans), l'iode 129 (16 millions d'années), le césium 135 (2,3 millions d'années), le zirconium 93 (1,5 millions d'années). Les produits de fission mentionnés ont des demi-vies approchant des périodes géologiques mais sont, par rapport aux actinides, relativement peu toxiques.

En même temps se forment des actinides de masse atomique supérieure à celle de l'uranium naturel (U 235, U 238), en particulier le neptunium 237 (demi-vie de 2 140 000 d'années), le plutonium (demi-vie des isotopes de 87 à 24 000 ans), l'américium (demi-vie des isotopes de 430 à 8 500 ans) et le curium (demi-vie des isotopes de 18 à 8 500 ans). Chacun de ces actinides crée des familles de produits de décroissance. Les actinides sont très toxiques mais leur solubilité est très basse dans les eaux souterraines.

Un stockage souterrain de déchets nucléaires aurait une radiotoxicité qui serait déterminée par les actinides, mais ce serait les produits de fission à vie longue qui constitueraient un risque de contamination des nappes aquifères à cause de leur mobilité dans la géosphère.

et quelques pays associés), envisage un cycle du combustible avancé ayant pour but l'élimination des radionucléides à vie longue des déchets nucléaires par une série de procédés de séparation et de transmutation. Le développement du cycle du combustible avancé nécessite le retraitement des combustibles usés, soit par voie aqueuse, soit par voie pyrométallurgique, la mise en œuvre de réacteurs spécialement dédiés à la transmutation des actinides par fission, et la transformation de certains produits de fission en éléments stables ou de courte demi-vie.

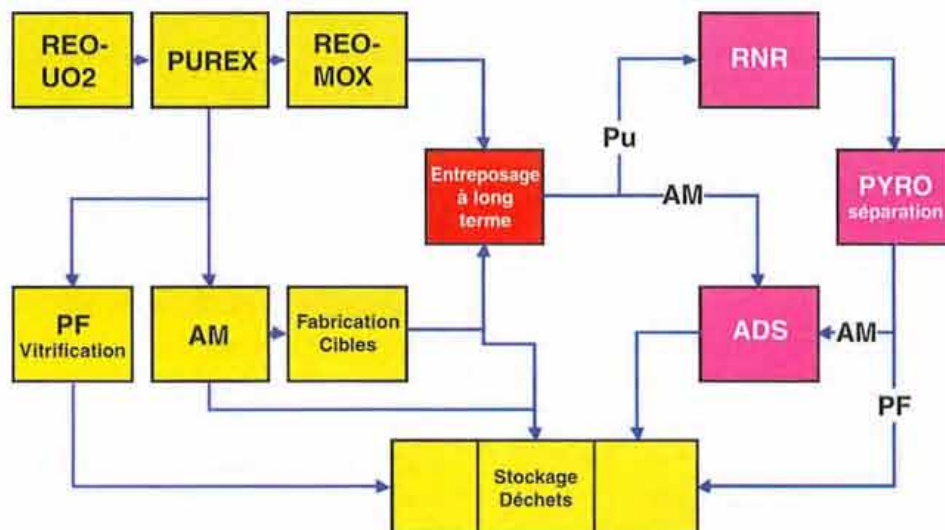
La séparation des radionucléides à vie longue

Du fait de leur très importante radiotoxicité, les actinides ont fait l'objet de la majorité des recherches. La séparation du plutonium dans les unités de retraitement par le procédé PUREX atteint un rendement de l'ordre de 100 %. Associé à l'utilisation du plutonium sous forme de MOX, elle constitue donc un bel exemple de recyclage quantitatif de l'ac-

tinide le plus important en matière de radiotoxicité. La séparation des « actinides mineurs », neptunium, américium et curium, a connu un développement considérable durant la deuxième décennie. Plusieurs méthodes de séparation de la fraction actinides-lanthanides ont été mises au point et testées dans des conditions de laboratoire de haute activité (TRUEX, TRPO, DIAMEX, DIDPA...). Le développement le plus spectaculaire est la mise au point de méthodes permettant la séparation actinides/lanthanides (CYANEX, SANEX, ALINA...) avec un rendement de 50 % à 100 %, ce qui permet de séparer les actinides mineurs (individuels ou en groupe) avec un degré de pureté chimique de 50 à 90 %. La prochaine étape consistera à simplifier les schémas de séparation et à introduire le moment voulu les méthodes développées dans les procédés de retraitement industriels.

La séparation des produits de fission à vie longue implique le développement de nouvelles méthodes de séparation, en particulier des techniques de séparation isotopiques.

CYCLE DU COMBUSTIBLE AVANCE



Sigles de la figure:

- REO : Réacteurs à eau ordinaire
- RNR : Réacteurs à neutrons rapides
- PF : Produits de Fission
- Pu : Plutonium
- AM : Actinides Mineurs (Np,Am,Cm)
- ADS : Réacteurs hybrides pilotés par accélérateur à protons (Accelerator driven systems)
- PYRO : Séparations pyrochimiques

Le conditionnement et l'entreposage intermédiaire des actinides après séparation

Les actinides mineurs séparés du reste des produits de fission pourraient subir un traitement spécifique pour améliorer leur confinement durant l'entreposage intermédiaire. Plusieurs modes de conditionnement des actinides mineurs peuvent être envisagés : la fabrication de cibles encapsulées en vue de l'irradiation dans des flux à neutrons rapides, le conditionnement sous forme d'un composé très stable (SYNROC) et très peu soluble, et en principe aussi l'incorporation dans des verres spéciaux.

Il est évident qu'une combinaison des techniques de préparation de cibles d'irradiation et de composés très peu solubles et stables à température élevée permet de laisser la voie ouverte aussi bien à la transmutation qu'au stockage « sur mesure », adapté à la géochimie des actinides mineurs, dans des formations géologiques.

Le conditionnement poussé d'actinides mineurs permet d'envisager un stockage réversible de longue durée dans une formation géologique avec la possibilité de récupérer les « cibles » pour les introduire dans des réacteurs du futur si la décision en est prise. Un stockage pareil nécessite une instrumentation de contrôle pour permettre aux autorités de suivre durant plusieurs décennies le comportement des cibles à très haute radioactivité. Le conditionnement spécifique des actinides mineurs permet également aux autorités de choisir la formation géologique la plus intéressante pour un stockage de longue durée.

L'emploi de verre comme matériau de conditionnement constitue par contre une étape irréversible.

La transmutation des actinides et des produits de fission à vie longue

La transmutation, soit par capture de neutrons soit par fission, est la seule méthode qui permet d'envisager la réduction de l'inventaire radiotoxique des radionucléides accumulés lors de la production d'énergie. La première priorité du recyclage est le **plutonium** à cause de la quantité produite, de sa radioactivité et de son potentiel de criticité (le plu-

tonium 239 se transforme en uranium 235). Mais, après son passage en réacteur de puissance pour la production d'énergie, la radioactivité du combustible MOX augmente considérablement et le multirecyclage en réacteur thermique devient problématique. La mise en œuvre de réacteurs à neutrons rapides RNR (critiques) avec une nouvelle technologie de refroidissement (par exemple plomb-bismuth au lieu de sodium) mérite d'être envisagée comme solution d'avenir. Ce type de réacteur est le plus indiqué pour diminuer significativement l'inventaire du plutonium séparé lors du retraitement. Le multirecyclage dans des réacteurs rapides nécessitera à long terme la mise au point d'une nouvelle technologie de retraitement capable de traiter le combustible à haut taux de combustion (150-200 GWj/t) après un temps de refroidissement court. La pyrometallurgie est dans ce contexte une voie à étudier, mais les problèmes des matériaux de structure et de leur corrosion nécessiteront d'importants travaux de recherche et développement.



Réacteur à neutrons rapides Phénix

La transmutation du **neptunium** en réacteur thermique donne lieu à la formation de plutonium 238 avec une demi-vie de 87,7 ans et une émission de chaleur de 0,55 W/g. La transformation massive du neptunium en plutonium 238 réduit la période de radioactivité de plusieurs millions d'années à 877 ans (10 demi-vies), mais implique une augmentation d'un facteur de 24 000 par unité de poids de la toxicité. La transformation dans un flux de neutrons rapides (RNR ou ADS) donne lieu à un mélange de produits de fission (27 %), de plutonium-238 (33 %) et de

neptunium non transformé (40 %). Il faut donc prévoir au moins 3 recyclages pour éliminer significativement le terme source du neptunium. Un recyclage hétérogène est à préférer. La chaleur résiduelle postirradiative des cibles est un problème pour le stockage souterrain.

La transmutation de l'**américium** en réacteur thermique donne lieu à une élimination de 74 % par cycle : 60 % sont convertis en un mélange de plutonium 238 et de curium 244, 13 % en produits de fission, et 26 % de l'américium initial reste dans la cible. Une irradiation pareille ne modifie pas significativement le bilan radiotoxique mais diminue la demi-vie moyenne du mélange radio-isotopique final. La présence d'environ 40 % de curium 244 dans les cibles irradiées constitue le problème technique le plus ardu à cause de l'émission de chaleur et de neutrons.

La transmutation dans un réacteur rapide (type EFR, 120 GWj/t) permet une « incinération » de 22 %, le reste étant constitué de 37 % de l'américium initial et de 41 % d'actinides divers dont le plutonium 238 et le curium 244 constituent les radionucléides les plus importants. Il faut donc procéder au multirecyclage (4 cycles) pour éliminer effectivement l'américium. Dans un flux rapide (localement modéré) d'un réacteur du type CAPRA, et surtout dans un ADS, il est théoriquement possible d'envisager une irradiation durant 30 ans jusqu'à l'épuisement de la source d'actinides. Un calcul a montré que la transmutation à 98 % d'une cible d'américium donne lieu à la formation de 80 % de produits de fission, 12,1 % de plutonium et 5 % de curium. Dans ce cas d'école, l'inventaire final en actinides s'élève encore à 20 %. La radiotoxicité augmente temporairement après l'irradiation pour tomber à 60 % de la valeur initiale après 100 ans. La radiotoxicité finale est due aux isotopes de plutonium. La chaleur émise par une cible pareille s'élève à environ 100 kW/t d'américium. Les radionucléides critiques en matière thermique sont le curium 244 (70 %) et le plutonium 238 (30 %).

La transmutation des produits de fission à vie longue peut en principe être effectuée dans des réacteurs thermiques dédiés à cet effet. L'enrichissement du combustible doit être augmenté et la « demi-vie d'irradiation » atteint 17 à 30 ans pour les principaux radionucléides (Tc99, I129). Le coût et la durée de ces opérations sont très élevés.

Conclusions

La séparation des actinides mineurs des déchets de haute activité diminue le « danger potentiel » à long terme du stockage géologique mais ne diminue pas le risque de contamination de la géosphère environnante. La production de déchets vitrifiés ne contenant qu'une infime fraction des actinides aurait l'avantage de diminuer considérablement la radiotoxicité après 300 à 500 ans. Mais l'extension du cycle du combustible en vue de la séparation des actinides mineurs nécessite l'adaptation des installations de retraitement et de conditionnement.

Le conditionnement des actinides mineurs séparés diminue le risque lors d'un enfouissement définitif à cause de la diminution de la solubilité des déchets correspondants.

La transmutation diminue le « danger potentiel » à long terme mais nécessite un investissement important dans le domaine des réacteurs rapides ou dans des installations de transmutation assistée d'accélérateurs de protons. La transmutation des produits de fission à vie longue est économiquement difficile à réaliser.

Le multi-recyclage d'actinides requiert le développement de nouvelles techniques de retraitement en milieu non aqueux. La réduction escomptée par transmutation et multi-recyclage peut atteindre un facteur 10, mais ne pourra dépasser le facteur 100 sans impact important sur le coût du cycle du combustible avancé.

Un effort important devra être consenti pour limiter autant que possible la production de déchets secondaires.

Les programmes de recherche français sur la séparation et la transmutation

Par Patrice Bernard, Directeur de programme « Loi de 1991 », Michel Boidron, Responsable de segment « transmutation et systèmes hybrides », Bernard Boullis, Responsable de segment « séparation poussée », et Jean-Baptiste Thomas, Directeur de programme « systèmes hybrides », au CEA

Objectifs et cadre

L'objectif général des recherches de l'axe 1 est d'étudier les solutions permettant de réduire à la source la quantité de radionucléides à vie longue formés lors de la production d'énergie, en les séparant (par des procédés de séparation chimique en aval du retraitement des combustibles usés) des autres atomes contenus dans les déchets, puis en les transmutant (en les plaçant sous flux neutronique), afin de les transformer en atomes non radioactifs, ou à vie plus courte.

En complément à la stratégie de référence « séparation-transmutation », on examine aussi une voie alternative de « séparation-conditionnement » avec l'étude et le développement de nouvelles matrices de conditionnement spécifiques pour les radionucléides séparés qui ne pourraient être transmutés. L'étude et le développement de ces matrices, ainsi que la démonstration de leur performance de confinement à long terme, sont menés dans l'axe 3.

Les études portent sur :

- les actinides mineurs (américium, curium, neptunium), qui représentent l'essentiel de l'inventaire radiotoxique à long terme des déchets nucléaires ;
- certains produits de fission présentant à la fois un isotope à vie très longue, d'abondance relative importante dans le combustible usé, et des propriétés chimiques les rendant potentiellement plus mobiles (solubilité plus élevée, moindre capacité à se fixer sur les matériaux solides environnants) : iode 129, césium 135, technétium 99.

On notera que les développements menés au sein de cet axe supposent la permanence

d'une stratégie de retraitement des combustibles usés, qui permet de séparer industriellement l'uranium et le plutonium des actinides mineurs et des produits de fission à vie longue.

Le plutonium étant à la fois une matière énergétique valorisable, et aussi le principal contributeur à la radiotoxicité potentielle à long terme, les études de scénarios s'articulent par rapport à celles qui concernent la gestion à long terme du plutonium.

Les objectifs de recherche pour l'axe 1 se déclinent de la façon suivante :

- 1) étudier la faisabilité d'un processus de séparation poussée pour les 6 principaux radionucléides (Am, Cm, Np, I, Cs, Tc) ;
- 2) étudier des scénarios permettant de stabiliser l'inventaire en radionucléides à vie longue, et minimiser les radionucléides à vie longue dans les déchets ultimes ;
- 3) évaluer différentes filières de transmutation en réacteurs critiques ou en systèmes innovants.

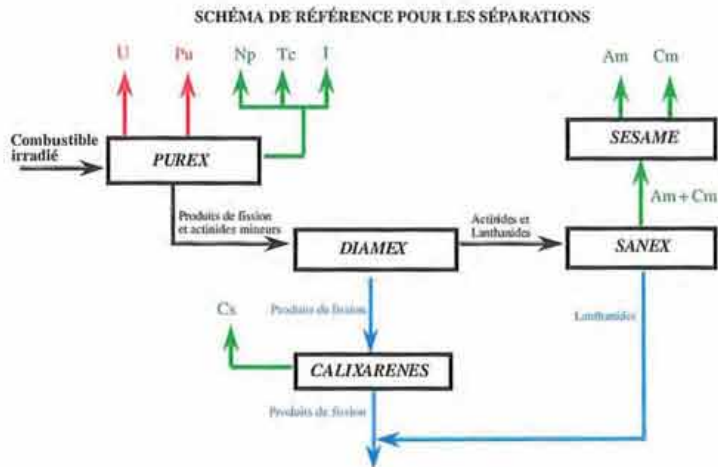
Les recherches sont menées en coopération avec les partenaires de l'industrie nucléaire, EDF, COGEMA et FRAMATOME, et de la recherche, CNRS et les Universités. Elles bénéficient d'importantes collaborations européennes et internationales.

Etudes de séparation

Les études de séparation constituent un tronc commun préalable pour des possibilités de gestion plus spécifique des radionucléides à vie longue. Les voies de référence du programme sur la séparation poussée sont basées sur l'extraction liquide, soit en adap-

tant le procédé PUREX utilisé industriellement pour le retraitement des combustibles, soit en développant de nouveaux procédés d'extractions liquides complémentaires, en aval de PUREX.

Grâce aux études menées, le schéma de référence d'un procédé avancé de séparation des principaux radionucléides à vie longue, présents dans les déchets, a été défini :



- le neptunium, l'iode et le technétium pourraient être séparés par des adaptations du procédé PUREX utilisé industriellement dans les usines de retraitement ;

- pour séparer l'américium, le curium et le césium, il a fallu développer une nouvelle chimie de la séparation, en concevant des molécules très sélectives capables de les séparer ; la séparation du césium se fait en une étape, celle de l'américium et du curium en trois étapes.

Les familles d'extractants ont été définies, les principales molécules de référence ont été synthétisées et leurs performances ont été vérifiées, ou sont en cours de vérification, expérimentalement sur solutions radioactives réelles pour atteindre l'étape de la faisabilité scientifique. L'étape suivante est celle de la faisabilité technique : il faut passer de la molécule au procédé chimique d'ensemble, qui sera défini, et validé en laboratoire, notamment dans l'installation ATALANTE à Marcoule.

Parmi les résultats récents, soulignons notamment en 1998 et 1999 :

- la nouvelle molécule de référence sélectionnée pour le procédé DIAMEX (qui sépare les actinides mineurs et les lanthanides du

reste des produits de fission), testée en actif à l'Institut des Eléments Transuraniens dans le cadre du contrat européen Newpart avec des résultats globalement satisfaisants ;

- les avancées vers la faisabilité scientifique des étapes SANEX (qui sépare les actinides mineurs, américium et curium, des lanthanides) et SESAME, avec notamment pour SANEX l'identification d'une nouvelle famille de molécules azotées, capables d'opérer en milieu acide avec une très bonne sélectivité, et la réalisation d'un essai SANEX sur solutions réelles, en aval de DIAMEX, en décembre 1999 à ATALANTE.

On étudie aussi, dans une démarche à plus long terme concernant les réacteurs et cycles du futur, des procédés de retraitement et séparation alternatifs aux procédés par voie hydrométallurgique, notamment les procédés pyrochimiques (dissolution des cibles et séparation des espèces chimiques en milieu sels fondus), leurs potentialités (compacité de principe, solubilisation de composés particuliers, milieu résistant à des niveaux élevés de rayonnements permettant d'envisager un retraitement quasi immédiat...), et aussi les difficultés à cerner (hautes températures, milieux très corrosifs, performances limitées des opérations unitaires de séparation, quantité et conditionnement des déchets secondaires...).

Les recherches dans le domaine de la séparation poussée bénéficient des études de base en chimie théorique et modélisation, en liaison notamment avec le groupement de recherche PRACTIS regroupant le CNRS, le CEA, l'ANDRA et EDF.

Etudes de transmutation

Les programmes sur la transmutation évaluent le potentiel de transmutation des déchets à vie longue en réacteurs critiques ou dans des systèmes hybrides.

Sur les réacteurs critiques, les programmes se décomposent en deux grands domaines :

- les études de la neutronique de la transmutation et de scénarios, intégrant les études de physique de base, pour compléter et améliorer les données nucléaires (valeurs de sections efficaces) et les schémas de calcul, avec quantification des incertitudes ;

- les études expérimentales sur les combustibles et cibles, qui ont permis de définir des familles de nouveaux types de combustibles adaptés à la transmutation, et de débiter les expériences d'irradiations dans le réacteur PHENIX, dont le programme expérimental d'irradiations est consacré à ces études, et qui fait, à cette fin, l'objet de travaux de contrôle, rénovation et maintenance ; ces recherches bénéficient notamment de la collaboration européenne EFTRA.

Les programmes sur la transmutation en systèmes hybrides sont menés notamment dans le cadre du groupement de recherche GEDEON regroupant le CEA, le CNRS, EDF et FRAMATOME, ainsi que l'ANDRA. Il faut souligner dans ce domaine :

- le projet IPHI, qui rassemble les compétences du CEA et du CNRS et qui a pour objectif la réalisation d'un injecteur de protons de haute intensité associé à un accélérateur capable de produire un faisceau de protons de 100 mA sous 5 MeV ; le premier élément de l'ensemble, la source SILHI, a fonctionné en 1999 pendant 104 heures avec un taux de disponibilité de 99,96 % ;

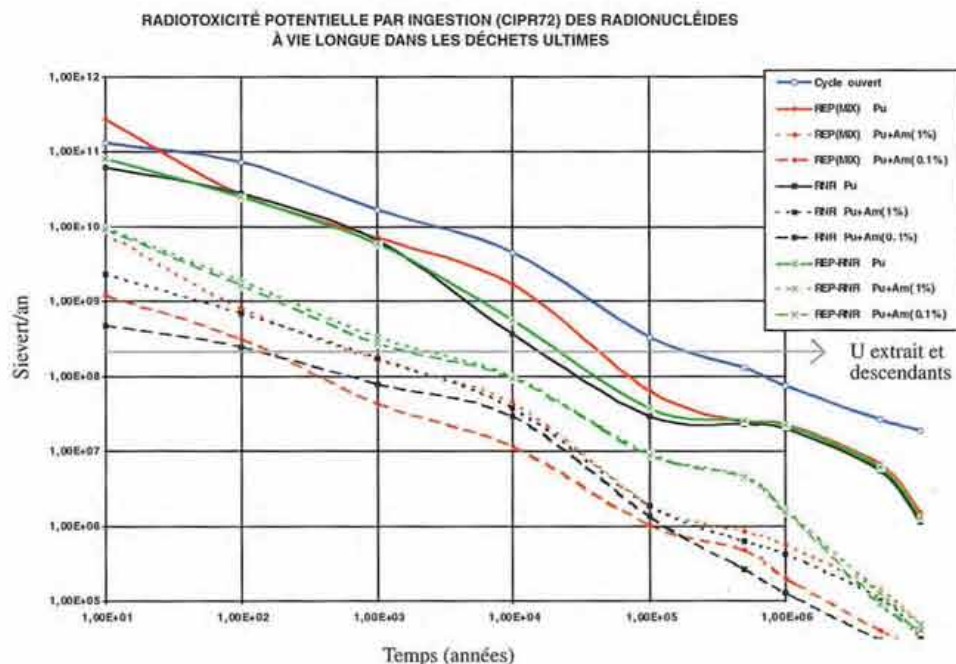
- les expériences MUSE réalisées dans le réacteur expérimental MASURCA à Cadarache avec un générateur de neutrons, placée au centre d'un massif simulant l'environnement d'une source de spallation dans un système hybride, menées par le CEA et le CNRS/ISN ;

- la réflexion sur les filières innovantes menée en 1998 et 1999, sous l'égide du ministère chargé de la recherche, en envisageant la perspective d'un démonstrateur européen de système hybride et l'élaboration d'un schéma d'organisation CEA-CNRS pour la maîtrise d'ouvrage de ces études.

Les performances potentielles de la séparation – transmutation sont évaluées globalement à travers des études de scénarios. Les études menées notamment depuis 1998 considèrent cinq grandes familles de scénarios : trois font appel aux technologies actuelles (parc REP, RNR, ou mixte REP et RNR) et deux considèrent des technologies innovantes (parc mixte REP [UOX] et systèmes hybrides incinérant le plutonium, les actinides mineurs et les produits de fission à vie longue, parc à « double strate » où les REP et les RNR multirecyclent le plutonium et les hybrides transmutent les actinides mineurs et les produits de fission à vie longue).

L'évolution, au cours du temps, de la radiotoxicité potentielle des déchets ultimes produits, chaque année, par les différentes simulations de parcs basés sur les technologies actuelles, est donnée sur la figure ci-dessous.

Globalement, on observe des gains de l'ordre de 100 pour les scénarios de multi-recyclage du plutonium, associés à la stratégie séparation-transmutation (ou à la stratégie séparation – conditionnement spécifique des actinides mineurs), en réacteurs à eau légère ou en réacteurs à spectre rapide.



Acquis et perspectives

Les travaux menés depuis 1991 ont permis de constituer le cadre scientifique des recherches, de réaliser et configurer les grands équipements expérimentaux nécessaires, de produire des résultats scientifiques et techniques importants, et de dégager les principales lignes directrices suivantes :

- les études de séparation constituent un tronc commun préalable pour évaluer des possibilités de gestion plus spécifiques des radionucléides à vie longue ; le programme de recherche et développement pour aboutir en 2005 à la faisabilité technique de la séparation poussée des actinides mineurs, de l'iode, du technétium et du césium, est solidement engagé, et s'appuiera fortement sur les expérimentations représentatives à mener de 2000 à 2005 dans l'INB ATALANTE ;
- la transmutation s'inscrit dans une vision à long terme de l'énergie nucléaire et ouvre des perspectives de stabilisation dans le temps des inventaires en radionucléides à vie longue, et de réduction de la quantité et de la toxicité potentielle des déchets ultimes ; ces quantités pourraient être faibles, sans toutefois être nulles ;
- les études de neutronique illustrent des scénarios où le multirecyclage du plutonium en

réacteur à eau légère en stabiliserait l'inventaire et réduirait la quantité et la toxicité des déchets ultimes d'un facteur 3 par rapport au cycle ouvert, et où la séparation et la transmutation des actinides mineurs apporteraient des gains supplémentaires, selon les modes de séparation et de transmutation considérés, jusqu'à un facteur global de réduction de l'ordre de 100 ; elles sont à compléter par une phase d'études détaillées, notamment sur le combustible et son cycle ;

- on considère aussi des scénarios en perspectives à plus long terme, où de nouveaux types de réacteurs innovants à spectre rapide et à haute température, et/ou des systèmes hybrides, associés à des installations innovantes du cycle du combustible, mutirecycleraient le plutonium, les actinides mineurs, et optionnellement les produits de fission à vie longue, et en minimiseraient la quantité dans les déchets ultimes,
- la communauté scientifique nationale a réalisé un important travail d'appropriation des recherches sur les systèmes hybrides pour la transmutation, et a engagé une dynamique de travail dans la perspective d'un démonstrateur européen ;

Les principaux jalons des recherches de l'axe 1 sont donnés dans le tableau I.



Chaîne de cellules blindées d'Atalante

Tableau I. Principaux jalons de recherches de l'axe 1.

Séparations poussées

	Faisabilité scientifique	Faisabilité technique
Séparation Np	1995	2003
DIAMEX	1994	2002
SANEX	2001	2005
SESAME	2000	2005
Séparation Cs	1995	2005

Transmutation

Études de scénarios

	caractéristiques générales	études détaillées	réactualisation – synthèse
technologies actuelles REP et RNR	1999	2001	2005
réacteurs dédiés	2001	2003	2005

Études de combustibles pour la transmutation

première sélection de matériaux	seconde sélection de matériaux	concepts de référence pour les éléments combustible
1994-1995	2000	2005

première série d'irradiations Phénix, RHF, Siloé	seconde série d'irradiations Phénix, RHF, BOR 60
1996-1999	2001 - ≥ 2004

Concepts de systèmes hybrides en perspective d'un démonstrateur

dossier technique de motivation	dossier d'options techniques et de sûreté	études de faisabilité et de définition
2000	2002	2006

Principaux jalons expérimentaux

expériences MUSE	IPHI	Source de spallation
MUSE4 2000-2001	* SILHI 100h-99,96 % 1999 * première cavité RFQ 2000 * disponibilité faisceau avec RFQ et ligne diagnostic 2003	irradiation MEGAPIE ¹ 2004

1. Au Paul Scherrer Institute à Würlingen en Suisse.

Le Plan de développement du projet HAVL de l'ANDRA

par Jean-Marc Niezborala, Directeur des projets – ANDRA

Introduction

L'ANDRA a été désignée comme pilote des recherches à mener sur l'axe 2 « étude des possibilités de stockage réversible ou irréversible dans les formations géologiques profondes, notamment grâce à la réalisation de laboratoires souterrains », de la loi du 30.12.91

De 1992 à 1999, plusieurs étapes décisives du programme de recherche ont été franchies. La plus visible a concerné la recherche de sites pouvant présenter les qualités favorables au plan géologique ainsi qu'une acceptation locale du projet de création d'un laboratoire souterrain.

Parallèlement l'ANDRA s'est préparée à exploiter ses laboratoires souterrains en participant dans des laboratoires étrangers à des expérimentations comparables à celles qui seront menées en France. Elle a également contribué à des programmes internationaux, notamment européens, portant sur l'étude et la modélisation des phénomènes qui caractérisent le fonctionnement du stockage ainsi que sur les approches développées pour analyser la sûreté à long terme d'un stockage.

Elle a, enfin, recherché et sélectionné les solutions de conception des différents composants du stockage appropriés aux caractéristiques géologiques des trois sites étudiés jusqu'à fin 1998 (argilites de Bure, siltites de Marcoule, granite de la Chapelle-Bâton) et susceptibles de répondre aux critères de la règle fondamentale de sûreté III.2.f. Ces choix sont fondés sur de nombreux résultats de recherche portant sur des échantillons extraits des sites étudiés et sur les matériaux susceptibles d'entrer dans la construction des composants d'un stockage.

Sur la base de la sélection, en 1997, « d'options initiales de conception », ainsi qu'en s'appuyant sur les données d'entrées relatives aux sites et aux colis, l'ANDRA a établi

son programme des recherches. Depuis la décision interministérielle de décembre 1998, ce programme a été recentré sur les études relatives au site de Meuse/Haute-Marne. Les études relatives au milieu granitique sont poursuivies pour ce qui concerne les aspects génériques, notamment à travers des expérimentations en laboratoires méthodologiques. Un programme spécifique sera développé dès que le Gouvernement aura autorisé les recherches sur un site à l'issue de la mission de concertation actuellement en cours.

Les objectifs du programme de recherche pour 2005

Les objectifs du programme de recherche ont été précisés en 1999 :

- ❶ les colis de déchets susceptibles d'entrer au stockage doivent être clairement définis : leur inventaire maîtrisé, leurs caractéristiques radiologiques, mécaniques et chimiques étant connues et compatibles avec les exigences spécifiées par l'ANDRA ;
- ❷ la formation géologique étudiée doit présenter des performances favorables, garantes du confinement à long terme ;
- ❸ les solutions de conception proposées doivent être industrielles, simples et robustes :



Forage sur le site Meuse/Haute Marne

les conditions de construction et d'exploitation doivent être maîtrisables avec la qualité requise, dans des délais et des coûts acceptables ;

④ l'évaluation du comportement à long terme sera fondée sur des éléments convaincants, notamment la clarté de l'analyse doit permettre de faire partager la conviction de sûreté du stockage ;

⑤ la réversibilité du stockage doit être garantie par des dispositions de conception, des modes d'exploitation et des moyens de surveillance dont les performances prévisibles sont précisées dans différentes hypothèses de durée ;

⑥ les conclusions proposées doivent être fondées sur des éléments scientifiques et des modélisations validés par la communauté scientifique nationale et internationale. Elles traduisent les résultats d'analyses de sûreté ayant fait l'objet d'intercomparaison avec les analyses menées dans le cadre de programmes similaires à l'étranger et d'évaluations au sein d'instances nationales et internationales.

La durée du programme de recherche, dont l'échéance est encore éloignée de 6 ans, sa sensibilité à l'environnement socio-politique, sont tels que les objectifs ainsi énoncés en 1999 sont encore susceptibles d'évoluer : la mission de l'ANDRA est de mener à bien les programmes de recherche permettant de répondre aux principales questions scientifiques et techniques qui conditionnent la faisabilité d'un stockage, et telles qu'elles s'exprimeront en 2006.

Pour cela les programmes de recherches devront couvrir les différents modes de gestion des déchets HAVL susceptibles d'être envisagés en 2006.

Le Plan de développement du projet HAVL

Il était donc important pour l'ANDRA de concevoir une programmation de ses travaux cohérente avec sa capacité à acquérir les données d'entrée, à faire préciser et valider les éléments scientifiques et méthodologiques qui fonderont le dossier, que l'ANDRA remettra au gouvernement en 2005.

Les éléments structurants sont :

- le planning de construction du laboratoire de recherche souterrain de Meuse Haute-Marne ;

- la démarche d'approche de sûreté comprenant trois phases successives, couplée à la démarche de conception (la conception constitue la donnée d'entrée pour la vérification de sûreté, dont les résultats alimentent la phase suivante de conception) ;

- la démarche de spécification des colis, liée aux deux démarches précédentes pour aboutir in fine à des spécifications effectivement applicables aux colis industriels et cohérentes avec les dispositions retenues et les performances qui sont attendues des différents composants ;

- la démarche de modélisation du fonctionnement à long terme : le niveau de connaissance à atteindre et le besoin en modélisation sont définis par approches successives pour atteindre les objectifs de 2005.

Ainsi a été élaboré un plan de travail (Plan de développement du Projet HAVL) en trois étapes successives. Des rendez-vous intermédiaires (fin 2001 et en 2004) sont prévus pour faire converger le processus (cf. figure 1). La troisième et dernière étape concerne la préparation du dossier de 2005.

L'ensemble du programme a fait l'objet d'une optimisation concernant la hiérarchisation des objectifs à atteindre à chaque étape, sa planification et son coût.

Le Plan de développement est établi pour toute la période des recherches, mais est régulièrement mis à jour pour tenir compte des résultats acquis au cours des étapes précédentes. Il constitue en permanence un référentiel permettant l'information et l'échange aussi bien entre les différents services de l'ANDRA qu'entre l'ANDRA et ses prestataires, ou l'ANDRA et ses différents interlocuteurs (producteurs de déchets, Organismes d'évaluation et de contrôle...)

Il constitue aussi un outil de management du projet, permettant le fonctionnement d'une organisation complexe (nombre d'intervenants et de disciplines scientifiques et techniques).

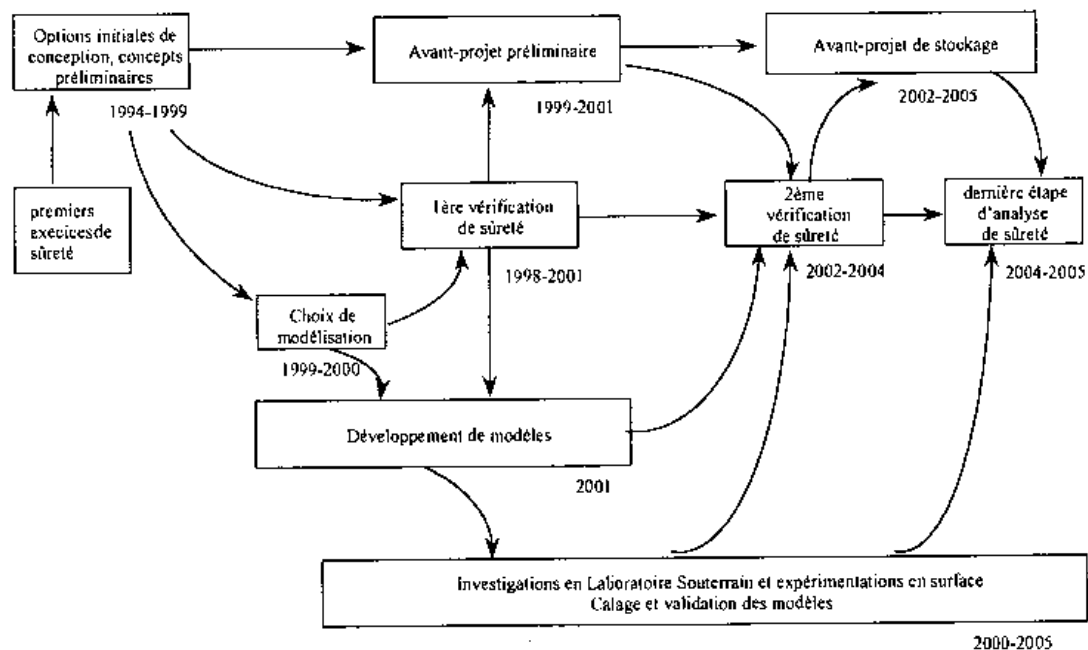


Figure 1. Plan de développement HAVL. Logique générale de déroulement et d'enchaînement général des études

L'organisation mise en place

L'ANDRA assure prioritairement la Maîtrise d'ouvrage de ses programmes de recherche. Elle s'appuie pour cela sur ses compétences internes et notamment celles de sa Direction scientifique ainsi que sur les Maîtres d'œuvres et prestataires.

① **Le Projet HAVL** mène toutes les actions de conception, de modélisation et d'analyses de sûreté. Il spécifie ses besoins en termes de connaissances, nécessaires pour réaliser ses missions.

② **Le laboratoire souterrain.**

Le programme du laboratoire souterrain correspond à deux objectifs : la construction de l'ouvrage et les expérimentations.

L'organisation sur le terrain vise à garantir l'atteinte des objectifs scientifiques du projet HAVL tout en respectant les contraintes de coûts et de délai de construction.

Le Plan de développement traduit également l'importance primordiale de la sûreté dans le programme de l'ANDRA : l'analyse de sûreté est au cœur du plan de développement. C'est en fonction de ses besoins que sont établis les programmes expérimentaux et le développement de modélisations. C'est en fonction de ses résultats que la conception sera adaptée aux étapes de 2001 et 2004. La Direction de la Sûreté a donc un rôle privilégié au sein de l'organisation du projet HAVL :

elle définit la doctrine de sûreté et les méthodes à appliquer pour les analyses de sûreté, puis elle vérifie les résultats par rapport à ses prescriptions. Elle assure la liaison avec l'Autorité de sûreté.

Les trois grandes étapes du Programme de recherches

1999-2001 – Avant-Projet Préliminaire et première vérification de sûreté

A l'issue de cette première étape il sera possible de :

- fixer le contenu et le niveau de précision des éléments techniques du dossier de 2005 adaptés à la méthode d'évaluation de sûreté ;
- revenir sur les choix de modélisation puis de conception ;
- ajuster les objectifs des études et expérimentations menées de 2002 à 2006 ;
- identifier les options de conception permettant de prolonger la réversibilité.

2002-2004 – Avant-Projet et deuxième vérification de sûreté

C'est pendant cette phase que va s'acquérir l'essentiel des résultats expérimentaux du laboratoire souterrain permettant de caler et valider les modélisations impliquant le milieu

géologique. Celles-ci autoriseront un premier dimensionnement des composants du stockage, s'appuyant aussi sur les résultats de la première vérification de sûreté de 2001, pour en vérifier la faisabilité et en définir les spécifications.

Par ailleurs, les options permettant de prolonger la période de réversibilité seront analysées et dimensionnées.

La seconde vérification de sûreté s'appuiera sur des modélisations adaptées si nécessaire suite à la première vérification de sûreté et bénéficiant du calage par les résultats acquis en laboratoire souterrain.

Des exercices d'intercomparaison des résultats obtenus des modélisations ainsi que des

approches de sûreté pourront être engagés avec des organismes chargés de programmes similaires sur la base des résultats de la phase précédente.

Les ouvrages dimensionnés feront l'objet d'analyses de coûts de construction et d'exploitation. Certaines optimisations pourront être envisagées à ce stade.

2004-2005 – Préparation du dossier destiné en 2005 au Gouvernement

Ce travail intégrera l'ensemble des résultats expérimentaux et de leurs évaluations par la communauté scientifique nationale et internationale organisées par l'ANDRA.



Camions vibrateurs lors d'une campagne de reconnaissance géologique

Les fonctions de sûreté : outil clé de la conception d'un stockage de déchets radioactifs

par Jean-Paul Minon, Directeur général adjoint de l'Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies (ONDRAF)

Une approche claire et transparente

Toute solution retenue pour la gestion à long terme des déchets de haute activité devra faire l'objet d'un large partage de conviction au sein de l'ensemble du corps social.

Une condition nécessaire à ce partage de conviction est la clarté et la transparence des processus décisionnels et partant des éléments à l'appui de la décision.

Ceci s'applique bien entendu aux stratégies et méthodes mises en œuvre pour établir et démontrer la sûreté d'un stockage en profondeur de déchets de haute activité : la sûreté doit se décliner selon des règles compréhensibles et assimilables.

Il est donc important de comprendre comment le stockage est bâti et quel rôle chacun de ses composants joue dans la sûreté de l'ensemble.

« objectif sûreté »

Avant tout, il faut rappeler que le phénomène de décroissance radioactive est un élé-

ment intrinsèque de la sûreté d'un stockage de déchets radioactifs : la radioactivité ne peut que décroître, c'est une loi de la nature.

L'objectif principal d'un stockage est d'assurer une protection passive de l'homme et de son environnement contre les effets nocifs potentiels des déchets.

Cela signifie que :

- le stockage doit maintenir les déchets hors de la biosphère et garantir leur confinement de façon qu'un niveau acceptable de protection de l'homme et de son environnement soit assuré maintenant et aussi longtemps que nécessaire ;

- le stockage doit assurer cette protection de façon passive en sorte que la sûreté ne dépende pas de mesures actives à prendre par les générations futures.

La mise en œuvre de ces objectifs fait appel à quatre fonctions de sûreté fondamentales. Ces fonctions entrent en jeu à tour de rôle au cours de l'évolution normale ou perturbée du stockage. La sûreté est le résultat de la contribution des différents éléments du système aux fonctions de sûreté.

1. Fonctions de conception

Les deux premières fonctions de sûreté régissent le concept ; elles doivent être optimisées et architecturées de façon robuste c'est-à-dire insensibles aux incertitudes résiduelles.

• Isolation et confinement physique

Pendant la première phase de l'existence du stockage, les éléments radioactifs doivent rester isolés et être maintenus à l'abri de l'eau. Aussi longtemps que cette fonction est



Hades : laboratoire de recherche souterrain en Belgique

remplie, aucune dispersion significative de radioéléments n'a lieu.

Le confinement permet :

- de tirer au maximum avantage de la décroissance radioactive des éléments à vie courte ;
- de découpler le relâchement ultérieur des éléments radioactifs des phénomènes transitoires du début de l'évolution du stockage : resaturation, dégagement thermique, radiolyse, reconstitution de la pression hydrostatique...

• *Retard et étalement du relâchement*

Au fur et mesure de l'affaiblissement du confinement, la seconde fonction de sûreté entre en jeu ; l'eau entre en contact avec les déchets et le lessivage des radioéléments commence. Le relâchement direct des radioéléments n'est toutefois pas possible. En effet, toute une série de phénomènes physico-chimiques bien connus (lixiviation des matrices de déchets, sorption ou complexation dans des phases immobiles, diffusion, précipitation...) retardent et étalent dans le temps l'arrivée des radioéléments dans la biosphère. Ces phénomènes contrôlent la migration.

Le retard et l'étalement du relâchement permettent :

- de tirer au maximum profit de la décroissance des éléments à vie longue pendant la période de migration,
- de réduire fortement la fraction de l'inventaire des radioéléments arrivant dans la biosphère par unité de temps ; le résultat de ce relâchement étalé ou « dilution » dans le temps est que, sur une période donnée, l'homme et l'environnement ne seront exposés qu'à des fractions faibles de l'inventaire en radioéléments.

2. Fonction de complément

La troisième fonction intervient en appoint du concept ; elle ne peut être optimisée mais peut représenter un complément important à la sûreté de l'ensemble.

• *Dilution et dispersion*

Les radioéléments qui s'échappent du stockage sont rejetés, de façon étalée dans le

temps, dans les aquifères voisins et l'environnement immédiat. La dispersion et la dilution dans les aquifères et les eaux de surface réduiront les concentrations en ces radioéléments.

Cette fonction n'est qu'un appoint au concept car elle repose sur les éléments les moins stables du système : la biosphère et les comportements humains.

3. Fonction ultime de protection

• *Accessibilité limitée*

Les trois premières fonctions ont pour but d'empêcher et de retarder le passage des radioéléments vers la biosphère ; la quatrième fonction quant à elle vise à empêcher l'homme d'accéder involontairement aux déchets. Alors que les trois fonctions précédentes visent à la protection du plus grand nombre, cette fonction vise à limiter l'exposition de quelques individus.

La mise en œuvre des fonctions de sûreté

La mise en œuvre des fonctions de sûreté se fait au moyen d'une série de barrières que l'on interpose entre les déchets et la biosphère : c'est le concept « multibarrières ». Ces barrières doivent être indépendantes, diverses et robustes. Ces exigences se précisent comme suit :

- indépendance : les performances d'une barrière ne peuvent dépendre du fonction-



Creusement du puits d'accès Praclay (Belgique)

nement correct des autres barrières ; la perte de performance d'une barrière ne peut influencer négativement celles des autres barrières ;

- diversité : les performances des différentes barrières doivent résulter de propriétés physiques, mécaniques, chimiques diverses de sorte qu'un haut degré de complémentarité soit acquis ;

- robustesse : les performances estimées des barrières doivent être indépendantes ou peu influencées par les incertitudes restantes.

La sûreté du stockage est le résultat de la combinaison des performances des différentes barrières. Tout affaiblissement des performances de l'une doit être compensé par le renforcement des performances d'une ou plusieurs autres de sorte que la sûreté de l'ensemble reste garantie. Un haut niveau de redondance entre les barrières doit aussi être atteint, sachant toutefois qu'il est impossible que chaque barrière puisse à elle seule assurer toutes les fonctions. Dans un stockage profond, la contribution des différentes barrières à la réalisation des différentes fonctions de sûreté s'organise de la façon esquissée ci-après :

- Isolation et confinement physique : quel que soit le type de roche hôte ou de concept, cette fonction est remplie par la barrière ouvragée ; elle repose en premier lieu sur le conteneur du déchet qui peut si nécessaire être renforcé par un surconteneur.

- Retard et étalement du relâchement : cette fonction, primordiale pour la sûreté à long terme, est remplie par la géosphère dans le cas d'un stockage dans l'argile et par la barrière ouvragée (matrice du déchet, matériau de remplissage) dans le cas des roches fracturées (granite).

- Dilution et dispersion : c'est l'environnement hydrogéologique qui contribue à cette fonction ; le débit et la pérennité des exutoires en sont un élément clé de même que la capacité des aquifères.

- Accessibilité limitée : c'est la géosphère (profondeur, dureté de la roche...) qui joue ici le rôle principal ; pendant des périodes gérables à l'échelle historique (500 ans environ), des mesures de caractère institutionnel peuvent être prises pour conserver la mémoire du site et du danger potentiel qu'il représente.

Il devient ainsi clair que la réalisation concrète des fonctions de sûreté s'effectue de façon adaptée aux différentes contraintes imposées au concepteur : nature du déchet, matériaux disponibles, nature et propriétés de la roche hôte.

La mise en œuvre des fonctions de sûreté a pour but de combiner au mieux l'ensemble des éléments du concept et de tirer au maximum parti des éléments naturels du site.

Une démarche de bâtisseur

Les fonctions de sûreté sont les règles à disposition de l'architecte-ingénieur qui le guident tout au long de l'élaboration du concept.

L'approche méthodologique par les fonctions de sûreté permet d'atteindre un haut degré de compréhension du fonctionnement des éléments du système et de leur contribution à la sûreté de l'ensemble ; elle permet d'apprécier la robustesse du stockage, d'en connaître les points faibles et les points forts. Il s'agit d'une approche mécaniste qui est la clé d'un concept bâti de façon robuste au niveau de chacun de ses composants.

L'évaluation de sûreté d'un stockage géologique sur le site de Meuse/Haute-Marne

Les questions clés à maîtriser

Par Michel de Franco, Directeur de la sûreté – ANDRA

La règle fondamentale de sûreté III.2.f., édictée en 1991, a identifié ce que l'on attend des différentes barrières pour assurer au mieux le confinement des déchets. Pour la barrière géologique, c'est d'abord la stabilité du site, ce qui a conduit au choix du secteur de Meuse/Haute-Marne. C'est aussi une formation dont la très faible perméabilité interdit toute circulation convective de l'eau dans la zone de stockage. C'est la raison du choix de la couche d'argilite du Callovo-Oxfordien. Il convient maintenant de confirmer cette très faible perméabilité, de caractériser sa variabilité et de vérifier qu'il n'y a pas de fissures locales qui pourraient remettre en cause la capacité de confinement du site en certains endroits.

La contrepartie de cette qualité de confinement c'est une qualité mécanique moyenne, et surtout le peu d'expérience minière de ce type de matériaux. En particulier, il y a deux phénomènes qui vont perturber le milieu géologique, et qui doivent être étudiés in situ dans le laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne :

- Le creusement des puits, des galeries et des alvéoles va perturber la couche du Callovo-Oxfordien, en décomprimant l'argilite. Des micro-fissures vont apparaître le long des excavations et la perméabilité accrue de cette zone endommagée pourra permettre alors un transport convectif. Il est donc essentiel de déterminer l'extension de cette zone, de la caractériser et d'étudier les moyens de la limiter le mieux possible. Il faut toutefois que ces perturbations ne soient pas trop dépendantes des conditions de creusement : la sûreté ne doit pas reposer sur des techniques trop difficiles à maîtriser.
- En outre, ces puits et ces galeries, même remblayés, présenteront une perméabilité probablement plus élevée que le milieu d'origine. Ils pourront donc constituer des chemins préférentiels qui pourraient permettre aux radioéléments d'échapper au confinement par la barrière géologique. En l'absence de gradient hydraulique, il n'y aura pas de circulation convective, quelle que soit la perméabilité, que ce soit dans les galeries, ou dans la zone perturbée. Il est donc essentiel de déterminer si de tels gradients peuvent s'établir.

Bien évidemment, le concept de stockage peut permettre de limiter les conséquences de cette altération. Des scellements vont être placés dans les galeries et les puits pour interrompre les possibilités de circulation de l'eau. Des bouchons vont isoler les galeries des alvéoles contenant les déchets. Mais il faut montrer qu'on sait ancrer les bouchons et scellements dans la roche saine de manière qu'ils ne puissent pas être contournés à travers la zone endommagée. Il faut aussi démontrer que ces scellements resteront performants sur de très longues durées.

Si l'endommagement est maîtrisé et si les gradients hydrauliques restent faibles, le stockage pourra avoir la performance souhaitée, avec des techniques de réalisation aisément accessibles. La faisabilité des scellements ne doit pas être une nécessité, seulement un plus.

Il y a d'autres difficultés, comme les effets de la chaleur dégagée par certains déchets. Mais on peut toujours les maîtriser, ne serait-ce que par un entreposage préalable leur permettant de refroidir. Il y a aussi les contraintes dues à la réversibilité : pour la phase de réversibilité facile, il faut évaluer dans quelle mesure les moyens de manutention utilisés pour la mise en place pourraient rester opérationnels, compte tenu des possibilités de maintenance ; en cas de difficulté, il faudra prévoir des dispositions adaptées. Il faut également évaluer dans quelle mesure l'ouverture prolongée des ouvrages peut accentuer l'endommagement du milieu géologique. Pour les phases de réversibilité ultérieures, après fermeture des alvéoles et des galeries, il est nécessaire d'avoir des colis dont l'altération reste faible pour qu'ils puissent être repris sans que cela entraîne de risques de contamination pour les opérateurs.

Bure : un laboratoire de recherche souterrain pour qualifier un site de stockage géologique

par Patrick Lebon, adjoint à la Directrice scientifique de l'ANDRA

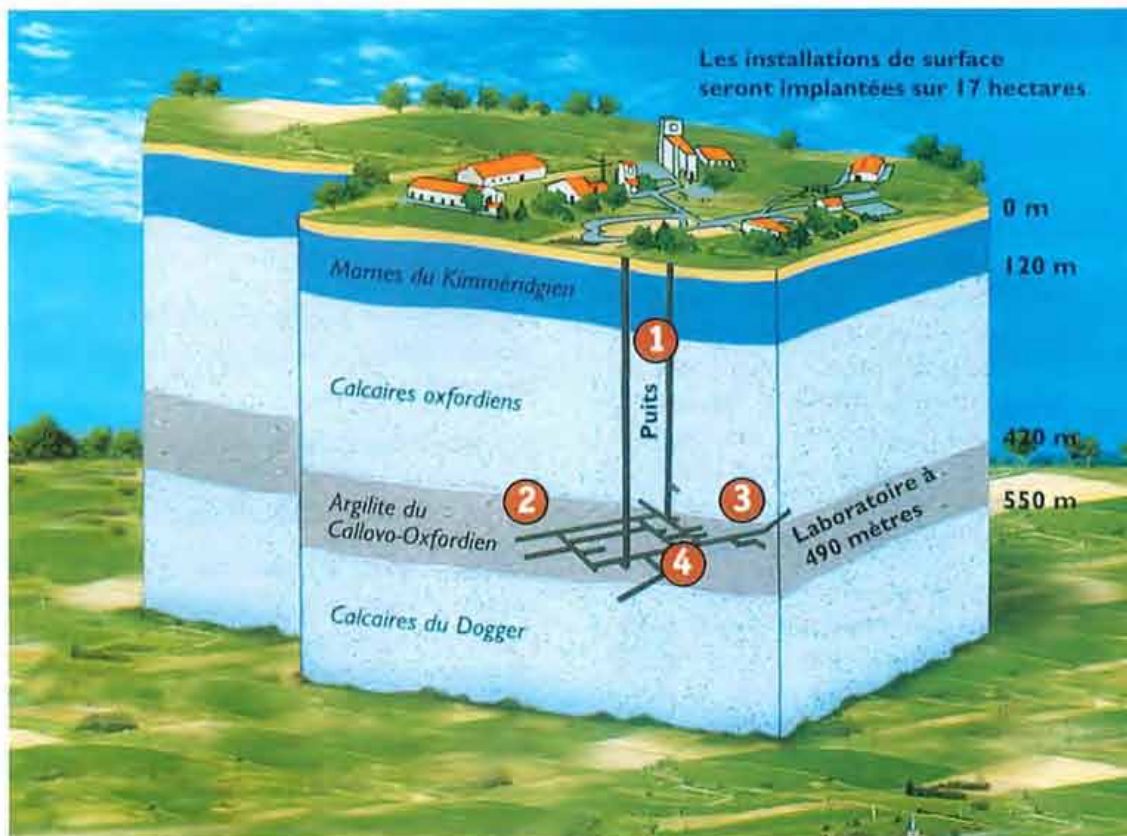
Le décret du 3 août 1999 a autorisé l'installation et l'exploitation du laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne à Bure :

- un laboratoire de recherche car cette installation s'inscrit dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991, prescrivant la poursuite de trois voies de recherche sur la gestion des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue, mais recherche appliquée car il s'agit de qualifier un site potentiel de stockage réversible ou irréversible en formation géologique, c'est-à-dire de montrer que le site de Bure répond bien aux critères de sûreté d'un éventuel stockage, tels que définis par la règle fondamentale de sûreté III.2.f. ; cette qualification passe d'abord par la mise en

évidence et la quantification des principaux phénomènes se produisant dans le milieu géologique et plus particulièrement dans les argilites du Callovo-Oxfordien.

- il s'agit de vérifier in situ d'une part que le mode de réalisation des ouvrages n'obère pas les conditions de mise en place et de réversibilité des colis de déchets, d'autre part que les perturbations induites à cette occasion sont bien celles prévues et ne remettent pas en cause les capacités de confinement du site.

Le programme de recherche, auquel la loi du 30 décembre 1991 a fixé une échéance en 2006, a été planifié en fonction de l'avancement physique des travaux de construction du laboratoire, qui peut être décomposé en



Le laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne

3 grandes étapes : une période préparatoire avant début des travaux en souterrain, la phase de creusement des puits d'accès au laboratoire souterrain, la phase de construction et d'utilisation de la zone expérimentale. Ce calendrier conditionne la disponibilité des ouvrages souterrains pour les expérimentations.

Qualification du site

Les capacités de confinement des argilites peuvent être évaluées en mesurant leurs propriétés de rétention et la cinétique des processus de transport.

Compte tenu de la liaison étroite entre l'eau contenue dans la roche et les minéraux la constituant, il faut pour cela connaître les processus d'interactions physiques et chimiques. Les premiers prélèvements et extractions d'eau interstitielle, opérations délicates, seront effectués dès que les puits d'accès pénétreront dans la formation du Callovo-Oxfordien fin 2001/début 2002. Ils devraient permettre une analyse fine de la composition chimique des eaux et la recherche de marqueurs naturels des processus d'interaction physiques et chimiques et de leur évolution au cours du temps. A partir de la fin de 2002, des tests de migration in situ seront réalisés en utilisant des éléments chimiques réagissant ou non avec l'argillite.

Le transport par advection dépend du champ de pression hydraulique et de la transmissivité du milieu. Il semble que la formation du Callovo-Oxfordien soit en légère surpression par rapport aux formations carbonatées adjacentes, mais on ne sait si le champ de pression y est homogène et permanent sur une très longue période. L'architecture du laboratoire souterrain permettra d'obtenir à partir de 2002 des mesures de pression hydraulique sur un profil vertical, grâce un matériel spécifique mis au point dans le laboratoire souterrain du Mont Terri (Suisse).

La transmissivité mesurée est très faible, mais à grande échelle elle pourrait être plus élevée s'il existait des fractures non détectées par les levés géologiques et la sismique réflexion 2D. C'est pourquoi la première opération du programme de recherche a été la réalisation fin 1999 d'une campagne de sismique-réflexion 3D, couvrant toute l'emprise du laboratoire. Les galeries expérimentales

du laboratoire souterrain, creusées en 2002 dans l'horizon central de la formation, puis une galerie montante et une galerie descendante orientées perpendiculairement au sens des grandes failles régionales en 2003, permettront le cas échéant de vérifier l'existence de fractures supposées par l'interprétation de la sismique 3D et d'évaluer leur transmissivité actuelle et passée.

Les coefficients de diffusion dans les argilites seront confirmés en 2002 par une série d'échantillonnages à partir des galeries du laboratoire, pour la mesure en laboratoire classique, souterrain, sur une base statistique en fonction des variations pétro-physiques mises en évidence. En même temps, seront lancés des tests de diffusion in situ dans plusieurs unités lithologiques de la formation du Callovo-Oxfordien.

Evaluation des perturbations liées au creusement des ouvrages

Le laboratoire souterrain sera aussi un ouvrage pilote pour tester le comportement de l'argillite pendant et après le creusement d'ouvrages de différentes formes et tailles, ce qui permettra ultérieurement de spécifier les méthodes de creusement et de soutènement d'un éventuel stockage.

Seront plus particulièrement instrumentés :

- le puits principal entre les cotes - 460 et - 473 m, début 2002 ;
- une galerie expérimentale spécifique au niveau - 490 m.

Les mesures permettront également le calage des modèles rhéologiques, puis leur vérification en aveugle.

Le laboratoire souterrain permettra enfin de mesurer les diverses perturbations induites par le creusement des ouvrages :

- augmentation de perméabilité, en cas de développement d'une fracturation mésoscopique organisée à leur pourtour, ce qui nécessitera des mesures de perméabilité systématiques le long des différentes galeries du laboratoire souterrain dans le but d'en préciser la variabilité ;
- mesure des effets thermo-mécaniques sur les propriétés de transport et de rétention

des argilites par une expérimentation dédiée prévue en 2003 ;

- évolution d'un front d'oxydo-réduction sous l'influence de la ventilation et perturbations alcalines dues à la dégradation des structures en liant hydraulique, qui feront l'objet d'observations et de mesures spécifiques pendant les expérimentations précédentes.

L'architecture souterraine du laboratoire a été conçue en fonction du modèle géologique du site (notamment de la variabilité spatiale des caractéristiques sédimentologiques du Callovo-Oxfordien et donc de ses propriétés physico-chimiques). Les expé-

érimentations sollicitant le milieu géologique dans des conditions représentatives du creusement et de l'exploitation du stockage (essai mécanique type mine-by test, essai thermique) seront situées dans la partie médiane de la couche, qui correspond à la zone la plus argileuse. Les expérimentations visant à vérifier la capacité de confinement de la formation géologique seront effectuées à différentes profondeurs grâce à l'ensemble des ouvrages du laboratoire souterrain.

Le programme pourra être revu si des éléments nouveaux éventuels apparaissent lors des différentes étapes de la première évaluation de sûreté en 2000/2001.

Le choix des sites pour la création d'un laboratoire souterrain

Par Philippe Raimbault, direction de la sûreté des installations nucléaires

Dans le cadre défini par la loi du 30 décembre 1991, le député Christian Bataille a conduit un processus de concertation avec les élus et la population qui a abouti, en 1994, au choix par le Gouvernement de quatre zones présentant des caractéristiques géologiques a priori favorables, situées dans les départements du Gard, de la Haute-Marne, de la Meuse et de la Vienne. Les travaux de reconnaissance géologique menés par l'ANDRA dans ces quatre départements ont permis de sélectionner trois sites potentiels pour l'implantation d'un laboratoire souterrain de recherche :

- le site de Bure situé à la limite entre les deux départements de la Haute-Marne et de la Meuse, où la roche est une formation argileuse ;
- le site de Chusclan, dans le département du Gard, pour lequel la roche hôte est également une formation argileuse ;
- le site de La Chapelle-Bâton, dans le département de la Vienne, où la roche hôte est une formation granitique, sous couverture sédimentaire.

L'ANDRA a adressé à ses ministres de tutelle une demande d'autorisation d'installation et d'exploitation (DAIE) d'un laboratoire souterrain, accompagnée d'un dossier établi sur la base des résultats des travaux de reconnaissance, pour chacun de ces trois sites.

Conformément à la loi du 30 décembre 1991 et à ses textes d'application, les préfets des départements concernés ont soumis à enquête publique les DAIE et ont parallèlement organisé la consultation des conseils régionaux, généraux et municipaux concernés. Les enquêtes publiques se sont déroulées au cours du premier semestre 1997. Les commissions d'enquête ont remis leur rapport aux préfets qui les ont transmis au Gouvernement avec le résultat des consultations locales entre juillet et octobre 1997.

Les dossiers des DAIE transmis par l'ANDRA ont été analysés par l'IPSN et le Groupe permanent d'experts chargé des déchets, qui a rendu son avis à la DSIN en avril 1997.

Sur la base de l'avis que lui a transmis l'Autorité de sûreté en décembre 1997 et de celui de la Commission Nationale d'Evaluation, le Gouvernement a décidé, le 9 décembre 1998, de poursuivre les recherches sur le site de Bure et de rechercher un nouveau site granitique.

Après avis favorable du Conseil d'Etat, le Gouvernement a donc autorisé, par le décret du 3 août 1999, l'ANDRA à installer et exploiter, sur le territoire de la commune de Bure, un laboratoire souterrain.

La sûreté d'un stockage géologique réversible

par Michèle Viala, Directrice déléguée chargée de la sûreté des déchets à l'Institut de protection et de sûreté nucléaire (IPSN)

Qu'est-ce qu'un stockage réversible ?

Dans son glossaire de sûreté, l'Agence internationale de l'énergie atomique recommandait les définitions suivantes pour les installations accueillant des déchets :

- **stockage des déchets** : mise en place des déchets radioactifs dans une installation appropriée sans intention de les retirer (waste disposal, repository) ;
- **entreposage des déchets** : détention des déchets radioactifs dans une installation appropriée avec l'intention de les retirer dans un quelconque futur. Ainsi, entreposer des déchets est par définition une mesure temporaire (waste storage) ;

La notion de « stockage réversible » est venue bousculer cet usage et il convient d'explicitier ce que l'on attend d'un stockage réversible. Sa fonction fondamentale (remplie aussi par un entreposage) peut s'énoncer ainsi : « *Maintenir les radionucléides et les produits toxiques assez isolés de la biosphère pour protéger à un niveau acceptable l'homme et son environnement aussi longtemps que nécessaire* ».

La seconde fonction du stockage qui le distingue de l'entreposage est : « *Assurer la possibilité d'une protection passive de telle façon que la sûreté ne repose pas sur des contrôles à assurer par les générations futures* ».

Depuis décembre 1998, le gouvernement français a retenu une logique de réversibilité pour les études relatives au stockage. « Pour des raisons d'exigences d'ordre éthique, la condition de l'acceptabilité des décisions tient à leur réversibilité : il est capital que les générations futures ne soient pas liées par les décisions déjà prises et puissent changer de stratégie, au vu des évolutions techniques ou sociologiques intervenues ». Une troisième fonction définit donc le stockage réversible : « *Préserver la libre décision des générations*

futures de disposer des déchets selon leur propre choix ». Cette troisième fonction n'apparaît pas comme une fonction de sûreté, au contraire des deux premières.

Ainsi, le stockage réversible est un ouvrage d'isolement des déchets sûr et robuste devant les incertitudes liées au long terme, offrant aux générations futures trois possibilités : reprendre aisément les déchets, en particulier si les technologies du moment permettent une gestion que ces générations considèrent préférable au stockage réversible ; prolonger l'entreposage en profondeur, moyennant éventuellement des opérations de maintenance plus ou moins lourdes ; fermer partiellement ou complètement le stockage.

Conserver ouvertes ces possibilités a un coût et il y a nécessité d'élaborer un processus décisionnel pour conserver la maîtrise des choix au cours du temps. La phase de réversibilité du stockage, succédant à la phase d'exploitation, concerne une durée (typiquement 100 ans) pendant laquelle des rendez-vous seraient prévus pour décider laquelle des solutions précédentes est retenue pour l'avenir, après réalisation, le cas échéant, d'actions correctives permettant de retrouver des conditions compatibles avec la solution retenue.

Au regard de la sûreté, l'oubli du stockage, en phase de réversibilité, avant d'avoir procédé à la fermeture de l'ouvrage, est un risque à examiner.

L'ANDRA a défini, en vue de la conception et de la mise en œuvre du stockage, différents degrés de réversibilité selon les niveaux de fermeture du stockage. Au degré dit de « *réversibilité initiale* », l'ensemble des moyens d'accès et de manutention de chaque alvéole est en place, le retrait des colis est aisé. Au degré dit de « *réversibilité transitoire* », les alvéoles de stockage et les galeries de manutention sont remblayés puis obturés avec des bouchons définitifs. Les puits d'accès

restent accessibles. Pour retirer les colis il faudrait déblayer les accès et restaurer des moyens de manutention adaptés. La mémoire du nombre de colis, de leur nature, leur position est essentielle. A partir du moment où la corrosion porte atteinte à l'intégrité des colis, il s'agit d'« intervention » en vue de récupérer les colis plutôt que de réversibilité.

Au regard de la sûreté, l'intervention est à examiner en dehors du domaine de fonctionnement normal du stockage auquel appartient la phase de réversibilité.

Quelques questions relatives à la sûreté d'un stockage réversible

Pour évaluer la sûreté du stockage, il sera nécessaire d'examiner les phases d'exploitation, c'est-à-dire de mise en place et de retrait des colis, la phase de réversibilité, c'est-à-dire d'attente, et la phase de fermeture, c'est-à-dire l'évolution à long terme du stockage.

Les mesures de sécurité des travailleurs, y compris pendant le désentreposage, vis-à-vis des risques radiologiques et miniers devront être étudiées. L'agencement des alvéoles et le cadencement de leur remplissage et du déstockage peuvent influencer la gravité des accidents de manutention.

En phase d'attente, la stratégie devrait être clairement énoncée. Quels sont les scénarios retenus ? Ferme-t-on les alvéoles un à un dès qu'ils sont remplis, pour placer l'ouvrage au degré de réversibilité transitoire au plus tôt ? Laisse-t-on l'ouvrage ouvert le plus longtemps possible au degré de réversibilité initiale, avec une ventilation ? Choisit-on de renforcer les soutènements, de placer des surconteneurs sur les colis de déchets, de construire des chemins de roulage pour faciliter le retrait éventuel de colis ? Choisit-on au contraire de procéder à une maintenance fréquente et, par exemple, de refaire régulièrement les soutènements ? Par quels moyens ?

Tous ces éléments attirent l'attention sur un corollaire important du stockage réversible, la nécessité de la surveillance de l'état du stockage qui peut être plus ou moins lourde selon que la stratégie retenue est le surdimensionnement ou l'entretien. Quels sont les paramètres à surveiller ? Les déformations des ouvrages ? Les températures ? La teneur en hydrogène ? L'état des colis de déchets ?

Des scellements ?... Il conviendra de prévoir un domaine normal de fonctionnement, et en cas d'évolution hors de ce domaine, de savoir effectuer des mesures palliatives et correctives...

Les dispositifs de surveillance et de maintenance devraient en outre permettre de préciser l'aptitude à la prolongation de la durée de la phase de réversibilité. Peut-on penser qu'un module pilote permettrait un retour d'expérience utile ?

Les dispositions prévues pour la phase de réversibilité peuvent entraîner quelques inconvénients en phase de fermeture, notamment amoindrir les performances de confinement du système. Par exemple, l'ouverture prolongée d'ouvrages souterrains et leur ventilation peut conduire, pour une formation argileuse, à une décompression, une dessiccation, une oxydation des roches, favorables à la formation de fissures et de cheminements privilégiés d'eau le long des structures de soutènement et le long des jeux éventuellement ménagés pour faciliter le retrait des colis.

En outre, d'éventuels suremballages de colis créeront des produits de corrosion, un relâchement d'hydrogène, une augmentation de volume par oxydation, dont les effets restent à examiner.

Enfin, le cas d'oubli du stockage avant sa fermeture pose, par exemple, la question d'éventuelles venues d'eaux souterraines. La traversée de formations aquifères pour atteindre la formation d'accueil du stockage nécessite de rendre étanche les puits d'accès au niveau du contact avec ces formations. Quels effets pourraient avoir la dégradation lente de ces scellements lorsque des galeries, des alvéoles n'ont pas été remblayés ?



Scellement en argile gonflante en cours de construction. Essai TSX dans l'Underground Research Laboratory au Canada

réversibilité aisée des déchets si la situation l'exige.

Si ces facteurs influencent la perception du public vis-à-vis de la sûreté, d'autres éléments importants sont à considérer pour l'acceptabilité sociale du concept AECL ou de tout autre concept. L'un d'eux est l'importance de la confiance du public dans l'organisation en charge de la gestion des déchets et dans l'Autorité de sûreté qui la contrôle. Un autre est le souhait du public d'être informé sur les différentes options de gestion à long terme des déchets de manière à procéder à un choix raisonnable. Le public éprouve le besoin d'être informé de manière appropriée et impartiale sur les avantages et inconvénients de chaque proposition. Enfin, on ressent le besoin du public de pouvoir être informé au niveau national et local et participer à la prise de décision. Tous ces éléments sont considérés comme critiques par la Commission pour obtenir un soutien du public et doivent faire l'objet d'une attention plus grande que celle consacrée à ce sujet jusqu'à présent au Canada.

La Commission a conclu que, pour qu'il y ait un espoir de gagner la confiance du public pour une solution de gestion à long terme du combustible usé, les dispositions suivantes devraient être retenues :

- un processus participatif défini avec et pour les populations canadiennes indigènes dont de nombreux représentants habitent dans les régions les plus fréquemment citées comme

techniquement appropriées pour une installation de stockage, et qui ont été souvent ignorées ou marginalisées dans le passé lorsque des décisions importantes les concernant ont été prises ;

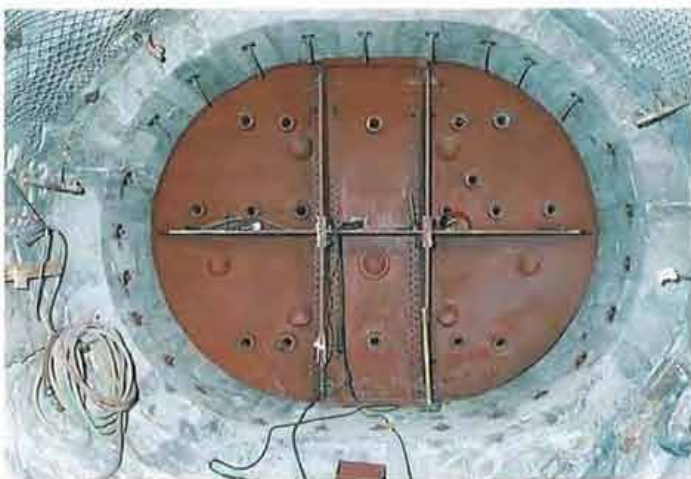
- une agence, indépendante des producteurs de déchets et de l'AECL, pour gérer et coordonner l'ensemble des activités aussi bien techniques que sociales relatives à la gestion à long terme. Elle devrait recevoir un financement autonome auquel les producteurs et les propriétaires des déchets devraient contribuer ; son organisation devrait être représentative des principaux groupes concernés, disposer d'un conseil scientifique fort et être soumise aux mécanismes de contrôle appropriés ;

- les risques, coûts et bénéfices de différentes options possibles de gestion des déchets à long terme devront être étudiés et comparés pour que le public et les décideurs puissent faire un choix informé de l'option qui semblera être la meilleure ;

- des moyens devront être mis en œuvre pour informer le public sur les faits et les enjeux impliqués ; il devrait également exister un plan d'action qui mette en avant les dispositions par lesquelles et les moments auxquels le public sera impliqué dans la prise de décision.

La Commission recommande que la recherche d'un site spécifique ne soit pas programmée avant que les étapes indiquées ci-dessus ainsi que celles qui auront été définies plus tard ne soient franchies.

Dans sa réponse, le Gouvernement canadien a accepté sans réserve la majorité des recommandations de la Commission. Il a reconnu légitimes les autres recommandations, à l'exception de celle relative à la nomination et à la composition de l'équipe dirigeante de la nouvelle agence de gestion des déchets. Les Canadiens concernés attendent maintenant impatiemment de voir comment ces engagements du Gouvernement vont être effectivement mis en œuvre. « Le diable, comme l'on dit, est dans les détails ». Il ne sera pas possible de se prononcer, avant que ces détails ne soient connus, sur l'acceptabilité de la solution canadienne pour la gestion des combustibles usés.



Galerie d'essai et bouclier en acier servant de massif de réaction au scellement (essai TSX au Canada)

L'étude de l'entreposage à long terme des déchets radioactifs

par Daniel Iracane,

Responsable du segment « entreposage de longue durée » au CEA

Les études de l'axe 3 de la loi du 30 décembre 1991 concernent le conditionnement et l'entreposage à long terme des déchets radioactifs. En 1997 le CEA a renforcé ce domaine pour fournir en 2006 de réelles possibilités décisionnelles.

Un premier volet concerne les études sur les nouveaux conditionnements pour :

- créer la disponibilité de filières pour les différents résidus primaires ;
- développer pour des radionucléides à vie longue séparés des matrices spécifiques présentant un confinement très supérieur à l'existant.

Un deuxième volet concerne le comportement à long terme des colis pour déterminer leur aptitude à être gérés dans la durée. En associant des modèles opérationnels d'évolution et les données de l'environnement, on concrétise l'aptitude du colis en une performance quantitative nécessaire aux concepteurs de stockage ou d'entreposage. Ce volet d'études produit aussi la définition des moyens de caractérisation des colis. Les études se matérialisent sur la production dès 2001 d'un dossier, révisé annuellement, décrivant les modèles, leurs références et la stratégie de confirmation sur objet réel.

Un troisième volet a pour objectif la définition de modes de gestion des colis en entreposage, reposant, au titre de l'ouverture des options, sur la mise en attente séculaire des colis. Ceci permet d'élaborer un référentiel de sûreté et de durabilité propre aux entreposages de très longue durée « EtLD ». On observe dans le monde une grande hétérogénéité de performance déclarée pour la durabilité des entrepôts ; les technologies sont somme toute assez proches mais la méthodologie de démonstration n'est ni partagée ni systématiquement explicitée. La réflexion sur ce référentiel « EtLD » a débuté en 1997 et fait l'objet depuis de discussions

avec les industriels et de présentations devant les instances d'évaluation et de contrôle.

L'entreposage dans le monde

Dans de nombreux pays nucléaires, on voit apparaître une double nécessité :

- créer un outil centralisé d'entreposage ;
- rallonger les périodes d'entreposage à l'échelle séculaire.

L'AIEA organise la réflexion autour des problèmes techniques et réglementaires pour entreposer le combustible irradié sur des périodes « aussi longues que 100 ans ». L'entreposage est présenté comme le mode de gestion principal des prochaines décennies.

Aux USA, les entreposages sont autorisés pour un maximum de 20 ans. Les réflexions portent sur l'extension des autorisations à 100 ans compte tenu des délais imposés par la fin du cycle.

Après avoir étudié en 1998 l'intérêt de la subsurface (-200 m, 100 ans) pour la flexibilité du cycle, la protection physique et la résistance au séisme, le Japon a jeté en 1999 les bases légales d'un entreposage centralisé « away from reactor » opérationnel en 2010 pour 50 ans.

En France, il existe des entreposages tampons pour la gestion des flux et des entreposages pour la mise en attente. Dès maintenant, l'industrie aurait la capacité technique pour déployer des entreposages à différentes échelles. Dans le délai prévu par la loi, il s'agit donc de faire progresser cette capacité en instruisant le problème suivant :

« L'ouverture des options sur les modes de gestion des déchets et sur les futurs parcs de réacteurs conduit à un besoin de flexibilité

pouvant conduire à un entreposage séculaire ; faut-il déployer des entreposages conçus dès l'origine pour cette longue durée, et qu'est-ce que cela implique par référence au renouvellement périodique d'installations d'entreposage de courte durée ? Faut-il une installation unique, centralisée ou non, en subsurface ou en surface ? Quelles sont les synergies et contraintes partagées avec le stockage ? »

Plusieurs familles de concepts d'entreposage en cours d'étude

Les concepts préliminaires d'entreposage sont des combinaisons qui servent de support à différentes études et évaluations. La prise en compte de la R&D menée parallèlement permettra à partir de 2003 de converger vers la proposition d'un ou plusieurs entreposages de longue durée.

Plusieurs familles de concepts sont retenues à ce jour :

- en subsurface à flanc de colline ;
- en plaine excavée, du type casemate, éventuellement optimisés pour une gestion densifiée de MOX ;
- en surface et régional.

Un référentiel de principes de sûreté dans la longue durée

La spécificité d'un EtLD est d'être une installation sous contrôle permanent de la société, garantissant, dès la conception, la préservation et la reprise des colis dans des conditions de sûreté et d'économie viables pour des durées inférieures à 300 ans. L'entreposage n'est pas conçu pour devenir définitif.

Un tel objectif ne peut pas être atteint par un réajustement continu du référentiel de sûreté de l'installation au vu du comportement constaté dans la durée.

Ceci nécessite la définition d'un ensemble de principes de sûreté pour le dimensionnement d'une telle installation séculaire, cet ensemble définissant le référentiel « système » de l'EtLD. Bien sûr, ces principes liés à la longue durée viennent en complément des règles et des méthodologies actuellement en vigueur pour les installations nucléaires de base et qui sont applicables à un EtLD.

Le référentiel système est à ce jour constitué d'une quinzaine de principes de base qui prennent en compte la non-connaissance de l'évolution séculaire des environnements écologique, industriel, sociétal.

Ce référentiel système est complété par une méthodologie permettant la quantification de la performance de durabilité des concepts et utilisant des analyses des modes de défaillance selon des méthodes déjà éprouvées dans l'industrie et adaptées au contexte.

Les concepts sont le support à une évaluation quantitative de la durabilité et permettent de tester le référentiel système. Cette évaluation technique est complétée par une concertation avec les acteurs concernés. La satisfaction des objectifs fixés par la loi du 30 décembre 1991 et de la puissance publique passe par l'élaboration d'un consensus national voire international autour de ces quelques principes généraux (ou de leurs évolutions).

Tout objet redevable de la loi peut être géré en EtLD

Dans une logique d'étude propre à l'axe 3, la typologie des colis est plus importante que leur nombre. En effet, l'entreposage sera conçu comme des modules déployés en fonction des besoins. Par contre, la sûreté dépend de la cohérence entre le colis et le module qui l'abrite. C'est l'objet même des critères d'acceptation reposant :

- sur le regroupement des colis en « colis types » redevables par définition d'un même mode de gestion ;
- sur la définition du module associé en terme de règles de conception, de construction et de fonctionnement ;
- sur les dispositions de caractérisation des objets industriels.

Les résidus primaires étant très diversifiés, l'économie et la faisabilité technique conduisent à limiter la typologie des colis types par une stratégie de colisage reposant sur des conteneurs multi-enveloppe pour contribuer à cet objectif.

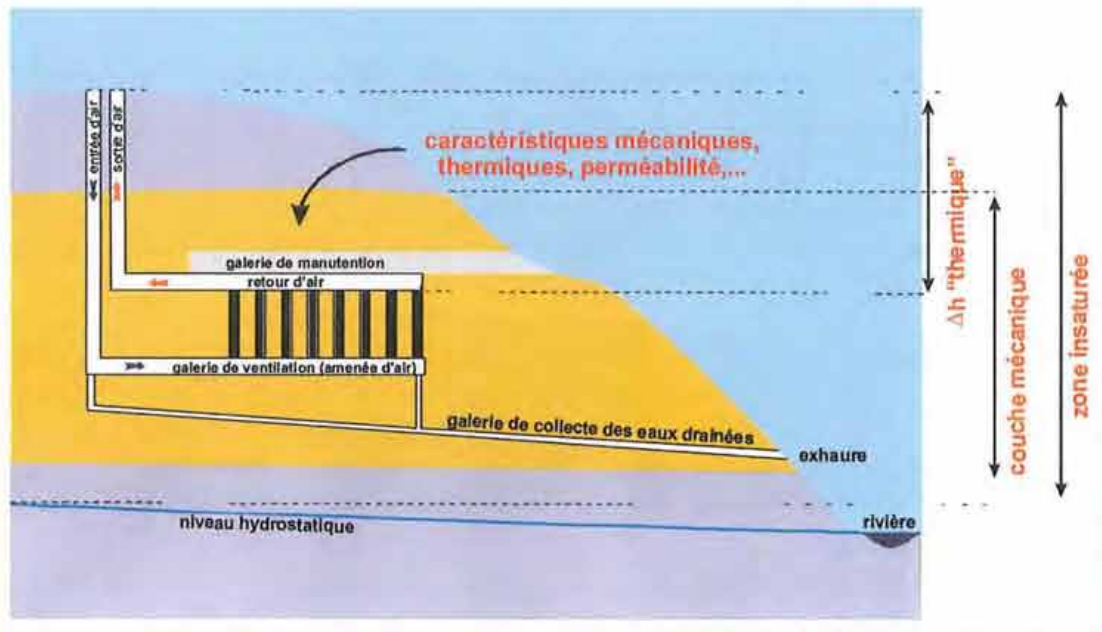
Que ce soit pour les combustibles irradiés ou les déchets à vie longue, le colis EtLD est constitué par un conteneur comprenant des étuis. Le conteneur est standardisé ; sa compatibilité avec un éventuel stockage est dis-

**D'une installation industrielle d'entreposage refroidi par ventilation naturelle
(Entreposage CASCAD pour combustibles irradiés à Cadarache)**



En 1998, le gouvernement a demandé d'évaluer la faisabilité d'un entreposage de subsurface. En réponse, le CEA étudie dans un même projet une évolution des concepts existants (type CASCAD) ou des combinaisons résolument novatrices (la subsurface par exemple) pour définir, dans une démarche d'ouverture des options, le paradigme de l'entreposage de longue durée permettant la mise en attente et la reprise des colis dans des conditions de sûreté et d'économie viables à l'échelle séculaire.

A un concept d'entreposage en subsurface (configuration en relief, roche dure)



cutée avec l'ANDRA. La mise en étui de chaque assemblage de combustible irradié permet de mieux garantir les fonctions de sûreté primaires dans la durée. Un conteneur universel de déchets B permet d'apporter une flexibilité de gestion dans l'ensemble de la production existante, en permettant pour certains déchets un prétraitement minimum voire nul (résidus en vrac non bloqués).

Calendrier

La définition en 2006 de concepts d'un entreposage de longue durée est un véritable enjeu dans l'exploration de toutes les voies de recherche définies par la loi du 30 décembre 1991. Deux ans d'analyse de ce problème ont permis de définir un nouveau paradigme répondant à cet enjeu.

La décision de réalisation d'une telle installation passera par les décisions de la puissance publique et le choix d'un ou plusieurs sites dont les caractéristiques seront prises en compte dans la démonstration de sûreté. Dans une première étape, des études générales et méthodologiques doivent être menées, impliquant éventuellement une

présence limitée sur le terrain. Mais c'est la sélection d'un futur site d'entreposage industriel qui est délicate et qui implique un processus de concertation et d'apprentissage collectif construit sur un dialogue entre les sphères techniques et politiques, processus sous le contrôle de la puissance publique.

La R&D sur le comportement à long terme

La recherche portant sur le comportement à long terme des colis est au cœur de la maîtrise de la sûreté, notamment pour garantir le confinement et la reprise des colis à l'échelle séculaire. Le confinement passe ici par la connaissance de l'inventaire radiologique facilement mobilisable. La reprise repose sur un choix cohérent de conditions d'environnement, de matériaux, de techniques de surveillance, ce qui nécessite une connaissance des mécanismes impliqués dans l'intégrité externe du colis. On soulignera ainsi l'importance pour l'entreposage (mais aussi pour le stockage dans ses premières phases de vie) des études de comportement séculaire pour :

- le combustible irradié (limites de tenue de gaine, pression de gaz, évolution de la matrice),
- la corrosion des enveloppes métalliques dont la vitesse est fonction de l'air ambiant et doit donc faire l'objet d'une surveillance fondée sur une connaissance fine des mécanismes.

Cette recherche est complétée par l'étude des matériaux d'infrastructure (béton et géomatériaux) en fonction de la durée et de la température pour déterminer les zones d'irréversibilité en cas d'interruption volontaire ou non de la ventilation.

Le développement porte principalement sur les technologies d'un conteneur durable. Il s'agit de produire les méthodes et les règles permettant de démontrer la fiabilité industrielle séculaire des conteneurs de combustible irradié ou de déchets à vie longue. Il faut par exemple pouvoir « tester et accepter » les technologies de fermeture (relaxation des joints, fissuration des soudures, fluage des boulonneries...).

Le CLAB : un entreposage du combustible irradié en Suède

par Hans Riotte, Agence à l'énergie atomique de l'OCDE

Il est possible d'entreposer des combustibles irradiés dans des locaux surveillés durant une longue période. Cet entreposage surveillé fait partie du système suédois de gestion des déchets radioactifs.



Le système suédois pour la gestion du combustible irradié consiste en un système de transport en bateau vers un site d'entreposage intermédiaire centralisé du combustible irradié (CLAB). Le site d'entreposage intermédiaire est situé à côté de la centrale nucléaire d'Oskarshamn. Selon les prévisions de la compagnie suédoise pour la gestion des déchets (SKB), après 30 à 40 ans de stockage intermédiaire, le combustible irradié sera enfermé dans

des caissons en cuivre et sera déposé dans le socle cristallin. Parce que la construction de ce système prendra plusieurs décennies, l'entreposage intermédiaire dans des locaux est une partie fondamentale du système suédois de gestion des déchets radioactifs.

En plus du combustible irradié, d'autres composants fortement radioactifs (tels que des barres de contrôle) sont également entreposés au CLAB.

Le combustible irradié est entreposé durant 9 mois, au minimum, dans des piscines des réacteurs, avant d'être transporté au CLAB. Pour simplifier le stockage final du combustible irradié, celui-ci fait ensuite l'objet d'un entreposage intermédiaire complémentaire pendant 30 ou 40 ans. A l'issue de cette période, la radioactivité et le dégagement de chaleur ont diminué de 90 %. Cependant, la protection biologique est toujours nécessaire.

Le combustible irradié est transporté au CLAB dans de gros containers, assurant la protection radiologique des travailleurs et du public, et en même temps la protection physique des combustibles. Le CLAB comprend une aire de réception en surface, où les containers sont introduit dans une piscine et où le combustible irradié est déchargé sous eau. Le combustible y est conservé dans des bassins remplis d'eau, installés dans des salles souterraines creusées dans la roche à environ 25 m au-dessous du niveau du sol. L'eau refroidit le combustible tout en protégeant du rayonnement. La caverne, de 120 m de long, contient 4 piscines de stockage plus une piscine supplémentaire.

L'installation CLAB est entrée en service en 1985. En 1998, par exemple, un total de 95 transports de containers de combustible irradié, provenant des sites nucléaires, a été reçu au CLAB. Ceci représente 291 tonnes de combustible irradié. Les piscines peuvent contenir environ 5000 tonnes de combustible irradié et, à la fin de 1997, 2650 tonnes de combustible irradié ont été déposées. A ce rythme-là, le CLAB sera plein dès le début de 2004.

SKB a donc commencé à agrandir le site du CLAB. Des piscines destinées à accueillir 3000 tonnes supplémentaires de combustible irradié seront bâties dans une nouvelle grotte rocheuse. Durant la période de construction du nouveau site, SKB porte beaucoup d'attention à la sécurité des piscines existantes du CLAB, où le combustible irradié est entreposé. La distance entre les deux cavernes sera d'environ 40 m.

Le travail sera accompli d'ici la fin de 2003. D'ici là, SKB a demandé un permis de construire pour agrandir le CLAB en vue de passer de 5000 à 8000 tonnes.

Conteneurs de haute intégrité : recherche et application pour l'exploitant CEA

par **Rose-Marie Atabek,**
Direction de la gestion des déchets du CEA

Dans l'attente des décisions qui seront prises en 2006 sur les modes de gestion à long terme des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue, le CEA en tant qu'exploitant regroupe sur son Centre de Cadarache les déchets de catégorie B (moyenne activité à vie longue) qu'il produit sur ses sites civils et militaires.

La connaissance des déchets existants et l'évaluation des productions futures ont permis d'estimer le volume de déchets B à environ 11 000 m³ en 2070, dont 70 % seront produits avant 2000.

Cette estimation est basée sur des hypothèses d'optimisation des opérations de tri, de décontamination et de réduction de volume par compactage, et d'autre part sur des déclassements de déchets de catégorie B en déchets stockables en surface, après nouvelle caractérisation. Elle tient compte de la mise en exploitation d'installations nouvelles à Cadarache telles que :

- CEDRA (Conditionnement et Entreposage de Déchets RADIOactifs) permettant le tri, l'incinération de déchets combustibles et la décontamination de déchets solides contaminés en émetteurs alpha ;
- AGATE (Atelier de Gestion Avancée et de Traitement des Effluents) construite pour le traitement et la vitrification des effluents en remplacement du procédé actuel de cimentation.

A terme, les colis B du CEA, bien que de nature très variée, pourront être regroupés en cinq grandes familles ; les colis n'entrant pas dans ces cinq familles feront l'objet d'une caractérisation poussée et d'un reconditionnement. Après une phase d'entreposage actuellement à l'INB 56 de Cadarache puis dans le futur à CEDRA, les colis B feront l'objet d'un retraitement selon l'une des voies prévues par la loi du 30 décembre 1991.

Dans le cadre de ce schéma, le CEA a mis au point des Conteneurs de Haute Intégrité (CHI), qui jouent un rôle important dans la gestion des déchets de catégorie B. Ils permettent en effet :

- le conditionnement réversible de certains déchets B dans le but soit d'attendre la mise en place de nouveaux moyens de traitement, soit de pouvoir récupérer à terme les actinides dont il convient de limiter la quantité en stockage profond. A titre d'exemple, les déchets magnésiens résultant des opérations de dégainage des combustibles de la filière UNGG sont conditionnés dans un CHI en fonte et entreposés à CADARACHE, dans l'attente de leur traitement. Dans le futur, certains déchets volumineux en vrac ou résidus contaminés en émetteurs alpha, issus de l'installation CEDRA, seront conditionnés en CHI pour entreposage ;
- le reconditionnement des colis anciens, colis de déchets conditionnés dans le passé, n'entrant pas dans les cinq familles de référence, et dont le conditionnement s'avère incompatible avec les spécifications futures des exutoires. Dans le cas d'une évacuation vers un stockage profond ou un EtLD, les caractéristiques géométriques et les performances des colis reconditionnés en CHI devront être compatibles avec celles des colis déjà pris en compte pour les dimensionner. Ces opérations de reconditionnement, actuellement réalisées en conteneur béton de 500 l dans le cas de fûts de boues cimentées, se poursuivront en particulier lors de la mise en exploitation des entreposages de CEDRA et de la reprise de certains colis entreposés dans l'INB 56 de Cadarache à partir de 2002 ;
- la sur-conteneurisation de certains colis, afin d'étendre les domaines de fonctionnement des installations ou d'adapter la géométrie et/ou les performances des colis aux spécifications de prise en charge des entrepôts de CEDRA et/ou des exutoires ultimes.

Cette option est en cours d'étude pour les colis de verre B qui seront produits par l'installation AGATE dans les années 2006-2007 ;

- éventuellement, l'entreposage de décroissance des déchets irradiants susceptibles d'atteindre par simple décroissance naturelle les critères d'acceptation en Centre de stockage en surface. Ceci pourrait être appliqué aux cas de certains types de sources (^{60}Co) ou de déchets de démantèlement.

Un CHI est défini comme un conteneur qui assure à lui seul, pour le colis et pendant une durée définie arbitrairement à 50 ans, les fonctions principales suivantes :

- **la fonction de conteneurisation** impliquant l'absence de défauts ou fissures dans le matériau constitutif, une fermeture efficace du couvercle et une résistance mécanique suffisante pour supporter le poids du déchet et manutentionner le colis ; dans le cas du CHI, cette fonction devra être réversible pour permettre la reprise éventuelle des déchets ;

- **la fonction de durabilité** avec le maintien des propriétés physiques et de l'intégrité du colis durant toute la période d'entreposage ;

- **la fonction de confinement des radionucléides** en conditions d'entreposage, sans nécessité d'enrobage du déchet.

Au cas par cas, des fonctions secondaires pourront être attribuées au CHI telles que **la fonction de transport et la fonction de protection biologique**.

En plus de l'exigence de réversibilité de conditionnement, les colis fabriqués avec un CHI doivent respecter les spécifications de prise

en charge en vigueur pour les entreposages actuels (INB 56) ou futurs (CEDRA) relatives :

- à la nature des déchets conditionnés en CHI : déchets n'évoluant pas physiquement ou chimiquement de façon à dégrader la sûreté de l'entreposage ;

- aux contraintes de conteneurisation : résistance mécanique du conteneur, tenue sous charge et résistance au feu du colis ;

- au maintien de l'intégrité du conteneur : tenue à l'irradiation (propriétés mécaniques, cinétiques de formation de gaz), résistance aux cycles de température et cinétique de corrosion ;

- aux contraintes de confinement : caractéristiques radioactives des déchets compatibles avec le dimensionnement de l'entreposage, taux de dégazage en radon et tritium, coefficient de diffusion des radionucléides.

Le cahier des charges du conteneur universel (conteneur CUBE) développé par le CEA pour l'EtLD, qui prend en compte la grande variété des déchets de haute activité à vie longue produit, ne diffère de celui du CHI présenté ci-dessus que par le maintien des fonctions du conteneur sur des durées beaucoup plus longues, reposant sur une exploitation passive et robuste dans un entrepôt adapté. En conséquence, les résultats des actions de recherche menées dans le cadre de l'axe 3 de la loi du 30 décembre 1991 sont utilisables par l'exploitant CEA notamment pour ce qui concerne le développement de conteneurs multi-enveloppes, la réalisation de maquettes et l'optimisation des opérations de scellement et de réouverture du conteneur et de reprise des déchets.



Conteneurs CHI en fonte contenant des déchets magnésiens

Le développement des conteneurs de haute intégrité à l'étranger

par Rose-Marie Atabek, direction de la gestion des déchets du CEA

Sur le plan international, l'idée du conteneur de « haute intégrité » (CHI) s'est développée, tant aux Etats-Unis, dans l'optique du stockage définitif des déchets de faible et moyenne activité, qu'en Europe, dans le cadre du stockage direct des combustibles irradiés ou du stockage des déchets dans l'ancienne mine de fer de Konrad en Allemagne.

Pour la gestion aux USA des déchets de faible et moyenne activité, la règle 10 CFR 61.56 (b) exige que les déchets soient stabilisés ou qu'ils soient disposés dans un conteneur qui assure leur stabilité. Ces types de conteneurs dénommés « High Integrity Container », sont en général des conteneurs multibarrières permettant d'assurer à la fois les fonctions de confinement du déchet et de tenue mécanique du colis en conditions de stockage. Différents types de matériaux sont utilisés pour remplir ces fonctions : entre autres fût en acier, béton armé, béton imprégné de polymère, béton fibres, fibres de verre, polyéthylène de haute densité (PEHD). L'utilisation des conteneurs CHI fait l'objet aux USA d'une qualification (« Agreement ») par l'exploitant du site de stockage ainsi que par la NRC, dans l'optique d'un stockage définitif de surface et pour une durée de vie de 300 ans. L'Etat où est implanté le site délivre un certificat de conformité aux règles de la NRC.

A titre d'exemple, le conteneur multi-usage, développé par la société Chemical Nuclear Systems, a reçu l'agrément NRC en mars 1995.

En Allemagne, les conteneurs CHI ont été développés pour le conditionnement des déchets radioactifs. Ils sont utilisés dans un but de transport, manutention et gerbage des colis qui doivent respecter les critères de performances nécessaires pour l'acceptation en stockage définitif dans la mine de Konrad.

La société GNS a développé le système de conteneurs MOSAIK, fabriqués en fonte à partir de ferrailles recyclées, pouvant être faiblement contaminées. Trois types de conteneurs sont utilisés suivant les catégories de déchets à conditionner. Les déchets sont directement placés dans les conteneurs, sans enrobage ni blocage particulier.

Le MOSAIK I permet de conditionner des déchets très actifs, provenant par exemple des éléments de structures internes des cœurs de réacteurs.

Le MOSAIK II est spécialement utilisé pour la mise en conteneur des concentrats d'évaporateurs et des résines échangeuses d'ions qui nécessitent un séchage.

Enfin, le MOSAIK III est utilisé pour le stockage des concentrats d'évaporateurs secs.

Par ailleurs, on rappelle, à titre d'information, que le conteneur cylindrique POLLUX, à paroi d'acier de 50 mm d'épaisseur et muni d'un dispositif de ventilation, permet en Allemagne de conditionner des composants très actifs. En Suède, les études sur les conteneurs CHI sont effectuées dans l'optique très particulière du stockage direct des combustibles irradiés.

Bilan des travaux d'évaluation (1994-1999) de la CNE

par **Bernard Tissot, Président et Rémi Portal,**
Secrétaire scientifique de la Commission nationale d'évaluation

La Commission nationale d'évaluation instituée par la loi n° 1381 du 30 décembre 1991 élabore chaque année – au mois de juin, en règle générale – un rapport, qu'elle remet au Gouvernement, sur l'état d'avancement des recherches en France, et aussi à l'étranger. Le Gouvernement transmet ce rapport au Parlement, qui en saisit l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. Le rapport annuel est rendu public.

La Commission examine l'état d'avancement des recherches au cours d'auditions des « acteurs » de la loi qui lui présentent les avancées scientifiques obtenues.

Les thèmes choisis par la Commission pour ces auditions couvrent, au cours de chaque exercice annuel, l'ensemble du champ des recherches. Toutefois, certains domaines particuliers et très spécialisés ne font l'objet d'un examen que tous les deux ans. Tous les acteurs des recherches relatives au cycle du combustible nucléaire et à son devenir sont représentés à chacune des auditions, au cours desquelles un dialogue entre spécialistes des domaines les plus divers peut s'engager, lorsqu'une confrontation des opinions ou un rapprochement des connaissances acquises est utile.

La Commission peut aussi devoir, à la demande du Gouvernement, étudier de façon approfondie certains sujets dans le champ défini par la loi.

La Commission doit enfin, au terme fixé par la loi – 2006 –, établir un rapport global d'évaluation des recherches que le Gouvernement adressera au Parlement, en l'accompagnant d'un projet de loi autorisant, le cas échéant, la création d'un centre de stockage.

Bilan des travaux d'évaluation (1994-1999)

La Commission, qui a été mise en place en avril 1994, a, au cours de sa première année d'activité, examiné la stratégie et les programmes de recherches. Elle a exprimé la nécessité d'une coordination scientifique et technique des organismes participant aux recherches, identifié les principales lacunes des programmes, et appelé les acteurs à clarifier les objectifs visés et à définir une stratégie équilibrée. La Commission a, en particulier, observé combien la planification des activités de recherche de l'ANDRA est tendue pour atteindre le résultat recherché : répondre, en 2006, à la question de faisabilité des possibilités de stockage dans des formations géologiques profondes.

L'évaluation plus détaillée des programmes et des premiers résultats obtenus a ultérieurement conduit la Commission à attirer particulièrement l'attention du Gouvernement sur la nécessité de certaines actions :

- étudier la séparation et de l'élimination de certains produits de fission à vie longue, que ce soit par un conditionnement spécifique ou par transmutation, car les études révèlent l'impact majeur de ces radionucléides dans l'option « stockage géologique profond » ;
- approfondir l'étude de certains scénarios possibles de séparation et d'incinération/transmutation de radionucléides à vie longue, pour en étudier tous les aspects : faisabilité, sûreté, gestion des déchets, impact radiologique ;
- améliorer la connaissance des quantités (inventaire actuel, extrapolation à long terme) et caractéristiques des déchets à prendre en compte pour les études d'entre-

posage de longue durée et de stockage géologique. Des évaluations non cohérentes ont été présentées à la Commission, appelant d'urgentes réévaluations. La méconnaissance de ces données de base entrave le développement des études ;

– prendre résolument en compte, ainsi que la loi le dispose, l'objectif d'étudier les conditions de la réversibilité du stockage des déchets en formation géologique profonde. La loi ne définit pas la notion de réversibilité ; la Commission, sans se substituer au législateur, a engagé une réflexion sur les conditions de la réversibilité, en raison de son importance pour l'orientation des recherches ;

– clarifier la finalité et la durée visée pour l'entreposage de longue durée, dont la loi impose l'étude sans en préciser l'objet. Les divergences d'opinions sur l'entreposage de longue durée devaient être résolues pour qu'un programme cohérent pût être défini.

La Commission eut à examiner les dossiers de sites reconnus pour l'implantation de laboratoires souterrains. Si elle a pu approuver le choix du site de BURE, finalement retenu pour l'implantation d'un premier laboratoire, elle dut exprimer des réserves sur le site granitique sous couverture sédimentaire reconnu par l'ANDRA, en raison des risques de circulation de fluides entre le granite et les aquifères exploités, qui augmenteraient considérablement la difficulté de qualifier ce site pour un éventuel stockage.

Plus récemment, la Commission a exprimé des recommandations vigoureuses pour la mise en œuvre d'un programme fort de modélisation et de simulation numérique, dans la perspective d'aboutir à un outil de simulation des phénomènes qui se produisent dans un dépôt géologique profond et à son voisinage. Cet outil devra être capable de servir aux démonstrations techniques en support à une analyse de sûreté pour l'avant-projet de stockage qui devrait être soumis aux pouvoirs publics en 2006.

Enfin, dans son 5^e rapport (1999), la Commission a recommandé l'engagement d'un programme d'étude des risques sanitaires, chimiques et radiologiques.

Suites données aux recommandations de la Commission – perspectives futures

Les avis et recommandations de la Commission ont été très généralement rapidement suivis d'effet.

Pour répondre à la recommandation d'une formulation explicite de la stratégie et du programme des recherches, le ministre chargé de la recherche a pris l'initiative, à la fin de l'année 1995, d'une réflexion commune des organismes de recherche et des industriels de l'aval du cycle du combustible nucléaire. Les documents annuels issus de ce travail de réflexion et de coordination, et en particulier, depuis 1999, le document synthétique intitulé « Stratégie et programmes de recherches », ont constitué un élément essentiel du dialogue entre la Commission et les acteurs de la loi de 1991. Les orientations retenues à présent paraissent bien fixées, et devraient rester valables jusqu'au terme des programmes, en 2006, sauf infléchissements ou mises à jour qu'appelleraient notamment les résultats des recherches et les recommandations de la Commission. Celle-ci doit continuer à s'assurer que la mise en œuvre de la stratégie s'effectue de manière satisfaisante.

Compte tenu des remarques exprimées par la Commission sur les conditions d'étude de la réversibilité, le Gouvernement a demandé à la Commission un rapport spécial sur ce thème, qu'elle a établi en juin 1998. Dans ce dernier, la Commission a émis des propositions distinguant les déchets suivant leur nature. Le Gouvernement s'est fondé sur les réflexions de la Commission en prenant clairement parti pour une logique de réversibilité, dans laquelle s'inscrivent désormais les études et travaux de l'ANDRA, et en relevant tout particulièrement :

– qu'un lien étroit doit être fait entre le type de déchets et les types d'entreposage ou de stockage à étudier ;

– que l'architecture du stockage doit également traduire la logique de réversibilité.

A la suite des critiques de la Commission sur les incohérences de l'inventaire des déchets à haute activité et à vie longue, affiché par les producteurs, une mission « méthodologie de l'inventaire » a été confiée au Président de l'ANDRA, avec pour objectif essentiel de proposer toute réforme visant à fiabiliser l'in-

ventaire de ces déchets, et en particulier de pouvoir extrapoler cet inventaire à moyen et long terme. Les propositions du Président de l'ANDRA, qui seront établies en liaison étroite avec les producteurs de déchets, seront présentées à la Commission.

Au terme d'une mission d'expertise externe, qui vient de s'achever, l'ANDRA engage un programme de développement de modélisation et de simulation numérique du stockage géologique des déchets. Le Commissariat à l'Énergie Atomique poursuit un effort convergent pour l'entreposage de longue durée, incluant la modélisation du comportement des colis de déchets.

Un programme de toxicologie nucléaire est engagé par le CEA, comprenant :

- une étude des cycles biogéochimiques et des procédés de dépollution ;
- un travail de modélisation et de simulation des transferts de toxiques nucléaires dans la biosphère, qui rejoint l'effort général de modélisation ;
- un renforcement de ses capacités pour les besoins de caractérisation et de spéciation des toxiques nucléaires nécessaires aux recherches sur la toxicologie humaine et les cycles biogéochimiques.

Désormais, l'activité de la Commission devrait être orientée beaucoup moins vers l'analyse des programmes de recherche que vers l'observation de leur mise en œuvre, et l'évaluation proprement dite des résultats des recherches. En effet, des progrès importants devraient être accomplis à partir de 2001 :

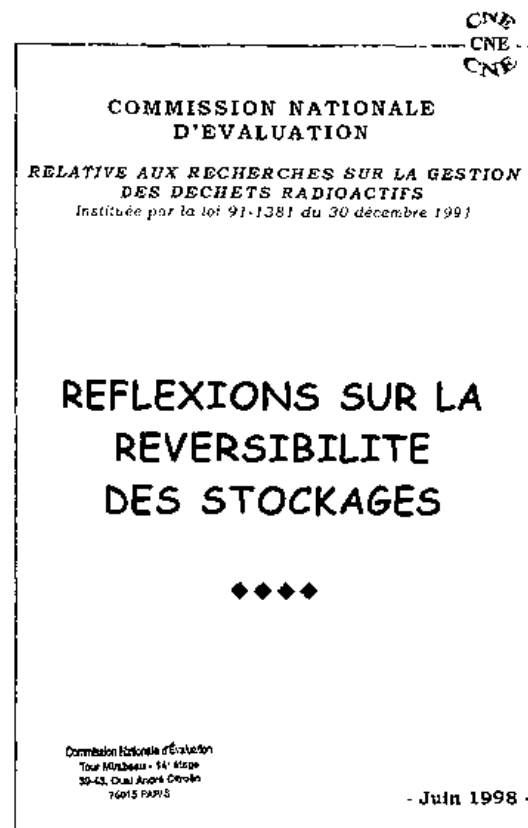
- évaluation de la faisabilité de procédés de séparation poussée. Ceci résulte du fait que des essais représentatifs des procédés développés par le CEA pour la séparation de l'américium et du curium peuvent, depuis quelques mois, être réalisés dans l'installation ATALANTE du CEA à Marcoule ;
- évaluation d'un avant-projet préliminaire de stockage géologique, de la modélisation de son comportement. Quoique l'effort à venir de modélisation et de simulation numérique n'ait pu produire pleinement ses effets, les outils existants et les données rassemblées jusqu'à présent devraient permettre à l'ANDRA d'effectuer, à la fin de l'année 2001, une première itération, nécessaire à la mise au point de ses méthodes d'analyse.

A cette échéance, il sera encore possible d'ajuster le programme expérimental, et plus globalement l'ensemble du programme de Recherche et Développement scientifique ;

- choix de matrices nouvelles de conditionnement : plusieurs matrices nouvelles de conditionnement spécifique des radionucléides séparés sont étudiées, dont les propriétés semblent prometteuses. Une évaluation de la faisabilité scientifique, c'est-à-dire de la conformité aux objectifs qui ont guidé le choix des matériaux de conditionnement, sera faite en 2001 ;

- revue de projet et consolidation des choix de concepts d'entreposage de longue durée, étudiés par le CEA.

Rappelons enfin que le Gouvernement recherche, dans le cadre d'une procédure de concertation, des sites possibles pour l'implantation d'un laboratoire souterrain dans un massif granitique, en substitution au site reconnu antérieurement, sur lequel la Commission avait été amenée à exprimer ses réserves. La Commission a émis un avis sur les massifs potentiellement intéressants, qui pourraient faire l'objet d'études complémentaires et de travaux de reconnaissance dont les résultats devront être évalués par la Commission.



S'assurer du développement de modes de gestion sûrs des déchets de haute activité et à vie longue

par **Olivier Brigaud et Philippe Raimbault,**
Direction de la sûreté des installations nucléaires (DSIN)

Dans le domaine de la gestion des déchets radioactifs, l'Autorité de sûreté nucléaire a pour objectif de s'assurer que chaque catégorie de déchets trouve une voie d'élimination adaptée à ses caractéristiques.

Actuellement, seuls les déchets de faible et moyenne activité à vie courte bénéficient d'une filière complètement définie : celle-ci aboutit au stockage définitif dans une installation gérée par l'ANDRA, éventuellement après des étapes de pré-traitement (compactage, décontamination) et de traitement. Pour ce qui concerne les déchets de haute activité à vie longue, il n'existe pas de filière de gestion complète. L'essentiel des déchets de ce type sont actuellement entreposés dans des installations prévues à cet effet, en attendant que leur devenir soit précisé.

Le Parlement, en votant la loi du 30 décembre 1991 relative à la recherche sur les déchets de haute activité et à vie longue, a défini trois voies à explorer pour les gérer de manière plus définitive. Ces trois voies sont respectivement :

- 1) la séparation associée à la transmutation des radioanucléides les plus toxiques et/ou de longue durée de vie ;
- 2) le stockage en couche géologique profonde ;
- 3) le conditionnement et l'entreposage provisoire de longue durée.

La loi prévoit de réaliser un bilan des recherches réalisées en 2006.

L'action de l'Autorité de sûreté nucléaire est placée dans le contexte de l'application de cette loi, qui voit le CEA chargé par le Gouvernement d'effectuer des recherches sur le premier et le troisième axes et l'ANDRA chargée de développer un programme selon le deuxième axe. Alors que la Commission

nationale d'évaluation instituée par la même loi a pour mission de s'assurer que les recherches avancent selon un rythme suffisant sur l'ensemble des trois axes, l'Autorité de sûreté s'assure que les projets associés à la mise en œuvre de la loi prennent bien en compte les principes fondamentaux de sûreté. Pour ce faire, elle précise, quand cela est jugé nécessaire, les objectifs de sûreté qu'elle exige de voir atteints, elle suit chaque étape de développement des projets et contrôle par le biais d'inspections ou d'audits que les principes d'assurance de la qualité applicables à la conception d'installations nucléaires sont respectés. Dans le cadre de son action, l'Autorité de sûreté s'appuie sur les compétences de ses experts techniques, l'Institut de protection et de sûreté nucléaires (IPSN) et les Groupes permanents d'experts.

Les objectifs et les approches de sûreté définis par l'Autorité de sûreté

L'action de l'Autorité de sûreté s'est plutôt concentrée dans ce domaine sur les problèmes de sûreté associés au deuxième et au troisième axes de la loi du 30 décembre 1991, les recherches concernant le premier axe de la loi, la séparation et la transmutation, en étant encore à un stade fondamental.

Stockage géologique

En 1991, à l'issue d'une réflexion engagée plusieurs années auparavant et qui s'est appuyée sur des travaux réalisés par des experts français (commission Goguel) mais aussi étrangers, l'Autorité de sûreté a publié une règle fondamentale de sûreté, la RFS III.2.f, rassemblant les grands principes de sûreté devant présider à la localisation, la conception et la démonstration de sûreté d'un éventuel stockage profond de déchets

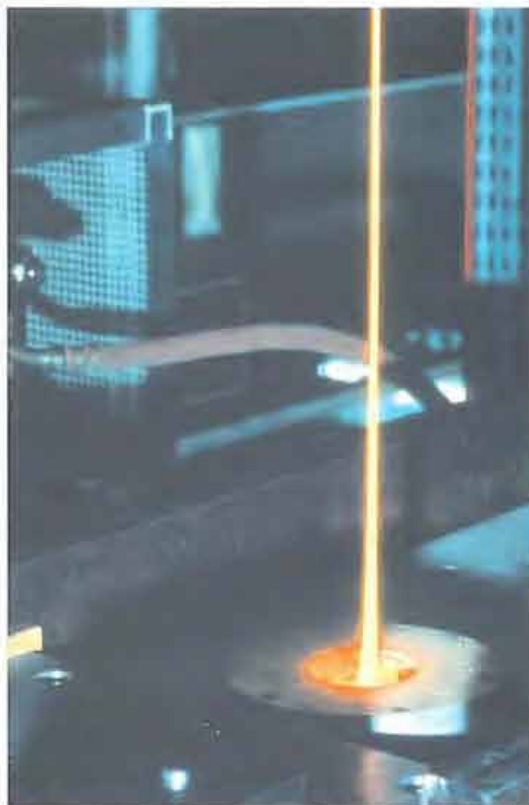
radioactifs. Les échelles de temps à considérer (de l'ordre du million d'années), sans commune mesure avec celles habituellement prises en compte pour des installations industrielles, ont fait l'objet d'une attention particulière et ont conduit à définir des scénarios d'évolution à envisager au cours des temps géologiques pour un éventuel stockage. Afin de prendre en compte à la fois des avancées conceptuelles réalisées notamment dans le domaine de la radioprotection (future publication 81 de la CIPR), une demande forte concernant la notion de réversibilité mais aussi un retour d'expérience résultant de plusieurs exercices de modélisation effectués en France et à l'étranger, un projet de document précisant la RFS III.2.f est en cours de préparation. Il bénéficie du résultat d'échanges approfondis entre des experts français et allemands qui devraient trouver un prolongement dans le cadre d'autres coopérations bilatérales.

Conditionnement des déchets

Au cours des années 80, l'Autorité de sûreté a également publié plusieurs règles fondamentales de sûreté (RFS III.2.a-d) concernant les colis de déchets non stockables en surface. Ces documents précisent les caractéristiques attendues pour ce type de colis, étant entendu qu'il s'agit là d'un des éléments essentiels de la sûreté d'un entreposage ou d'un stockage (au moins dans les premiers temps d'exploitation). Ces RFS devront certainement faire l'objet de révisions dans un futur proche, au fur et à mesure que les projets résultant de l'application de la loi du 30 décembre 1991 se préciseront.

Entreposage à long terme

Enfin, en ce qui concerne l'entreposage de longue durée, la problématique de sûreté rejoint celle des entreposages classiques. Ce type d'installations, qui existe depuis les premiers jours du nucléaire, fait l'objet d'un travail, récemment lancé, d'analyse du retour d'expérience d'exploitation qui aboutira, là aussi, à la rédaction, avec l'appui de l'IPSN, d'une règle fondamentale de sûreté. C'est en partie à l'aune de ce référentiel que l'Autorité de sûreté jugera de la recevabilité des options retenues par le CEA dans son projet d'entreposage de longue durée.



Coulée de verre (COGEMA)

Le suivi de nouveaux projets

L'Autorité de sûreté a engagé une démarche de suivi et d'évaluation des projets qui commencent à se dessiner, tant pour le stockage que l'entreposage de longue durée. Cette approche sera reproduite pour la séparation et la transmutation si des projets industriels en résultent.

L'Autorité de sûreté s'est préoccupée très tôt de suivre régulièrement les travaux de l'ANDRA sur l'axe 2 de la loi du 30 décembre 1991. L'interprétation par l'ANDRA des résultats des reconnaissances de terrain qu'elle a menées sur les trois sites (Bure, La Chapelle-Bâton et Marcoule) retenus en 1994 par le Gouvernement a été évaluée à deux reprises. Les analyses réalisées à ces occasions par l'IPSN ont donné lieu à des avis du Groupe permanent d'experts chargés des déchets. Ces travaux ont permis de préciser la qualité respective des sites. Ils ont conduit l'Autorité de sûreté à rédiger deux rapports, en 1996 et 1997, à l'attention du Gouvernement indiquant qu'aucun des sites étudiés ne présentait de caractéristiques rédhibitoires par rapport aux critères définis

dans la RFS III.2.f, tant sur le plan de la stabilité géologique ou de l'hydrogéologie que de l'épaisseur des couches pouvant accueillir un stockage ou de l'absence de ressources naturelles. Toutefois, l'Autorité de sûreté a été amenée à préciser que, dans une perspective de recherche appliquée, le site de Bure paraissait présenter une facilité d'approche plus grande que les sites de Marcoule et de la Vienne, ce dernier site se révélant le plus complexe à explorer.

Une nouvelle évaluation des travaux de l'ANDRA a été effectuée au début de l'année 2000. Elle a concerné le référentiel géologique du site de Bure, finalement choisi par le Gouvernement pour y installer un laboratoire profond, ainsi que l'approche de sûreté et les options initiales de conception retenues par l'ANDRA. Dans le cadre de cette évaluation et de celles qui sont programmées pour le futur (environ deux par an jusqu'à 2006), l'Autorité de sûreté vise à s'assurer que l'ANDRA réalise des investigations en adéquation avec la préparation d'une démonstration de sûreté d'un éventuel stockage profond et développe une approche conforme aux principes affichés dans la RFS III.2.f. Elle vérifie par ailleurs que les travaux menés par l'ANDRA sur le site de Bure ne vont pas l'altérer pour son usage potentiel futur.

Une démarche interactive régulière du même type a été plus récemment lancée sur les entreposages de longue durée, après qu'un premier rapport sur le sujet a été remis par le CEA au Gouvernement en novembre 1998. Cette démarche devrait conduire à au moins trois évaluations complètes des travaux du CEA avant l'échéance de 2006. L'objectif de l'Autorité de sûreté consistera à vérifier qu'une éventuelle installation d'entreposage sera exploitée selon les règles de sûreté en vigueur et, notamment, que le vieillissement des structures, qui prendra un caractère particulier si l'installation est exploitée une centaine d'années, voire plus, est correctement géré. L'Autorité de sûreté sera également particulièrement vigilante à ce que la conception de l'installation intègre d'emblée correctement le besoin de protéger les colis au cours du temps en vue de leur désentreposage.

Le contrôle de la qualité des colis de déchets produits et de la conception des projets

L'essentiel de l'action de contrôle de l'Autorité de sûreté se porte pour l'instant sur la qualité des colis de déchets. Cette action se traduit par plusieurs inspections par an chez l'ANDRA et chez les producteurs de déchets, qui permettent de vérifier que les colis produits répondent bien aux spécifications prévues et que leur production fait l'objet d'une traçabilité adéquate. Pour ce qui concerne les déchets de retraitement, ces spécifications ont fait l'objet d'un examen approfondi piloté par l'Autorité de sûreté afin de vérifier leur conformité aux objectifs des RFS concernant les colis non stockables en surface.

En 1998, l'Autorité de sûreté a par ailleurs demandé aux APAVE de réaliser un audit de l'organisation de l'ANDRA pour la conduite de son projet de développement d'un stockage géologique. Le résultat de cet audit a conduit l'Autorité de sûreté à demander à l'ANDRA de réviser certains aspects de son plan de développement et de son organisation. Cet audit est venu compléter des inspections sur le même thème, qui sont appelées à se faire plus nombreuses avec le creusement et l'exploitation du laboratoire souterrain de Bure.

..

Grâce à cet ensemble d'actions complémentaires (définition d'objectifs de sûreté, évaluations régulières et contrôles), l'Autorité de sûreté fait en sorte que les recherches menées par le CEA et l'ANDRA prennent en compte dès la conception les questions de sûreté. Le travail réalisé lui permettra d'être en mesure de donner son avis au Gouvernement sur l'application de la loi du 30 décembre 1991, lorsque celui-ci en fera le bilan.

A ce stade de l'avancement des projets, l'Autorité de sûreté note que de nombreux délais ont conduit à prendre du retard. Le rythme des recherches devra être soutenu pour pouvoir présenter des éléments substantiels d'appréciation au Parlement en 2006. L'interaction constante et organisée de l'Autorité de sûreté avec le CEA et l'ANDRA sur leurs projets devrait y contribuer.

État d'avancement des projets de dépôts géologiques dans le monde

par **Hans Riotte**, Chef de division, protection radiologique et gestion des déchets radioactifs – Agence pour l'énergie atomique de l'OCDE

L'utilisation du combustible nucléaire pour générer de l'énergie électrique est l'une des principales sources de déchets radioactifs de haute activité et à vie longue. Dans certains pays, tout combustible nucléaire usé sera considéré comme déchet et sera spécifiquement conditionné pour une mise en dépôt directe. D'autres pays ont choisi de retraiter le combustible usé de manière à récupérer l'uranium et le plutonium encore utilisables. Ce processus génère, comme déchets, des résidus hautement actifs. Ces deux types de déchets sont caractérisés par le fait qu'ils continuent à générer de la chaleur durant plusieurs décennies et que, même si une partie significative de la radioactivité décroît, une radioactivité considérable demeure et ce, durant des milliers d'années. A l'aube de l'ère nucléaire, il a été reconnu qu'une stratégie permettant d'isoler les déchets de haute activité et à vie longue de l'homme sur des périodes très longues était requise.

Évacuation des déchets en formations géologiques

La plupart des pays confrontés au problème des déchets radioactifs à vie longue ont élaboré des programmes de gestion prévoyant *in fine* la mise en dépôt de ces déchets au sein de formations géologiques.

Le concept d'évacuation géologique nécessite la construction de dépôts à grande profondeur qui assurent la sûreté (c'est-à-dire qui résistent aux intrusions criminelles ou accidentelles) et le confinement des déchets sur des périodes géologiques. Les formations géologiques susceptibles d'accueillir les déchets sont choisies pour leur stabilité à long terme, la possibilité d'y implanter des dépôts, mais aussi leur capacité d'empêcher ou de limiter fortement tout rejet éventuel de radioactivité. Cette barrière de sûreté

naturelle est complétée et renforcée par un système de barrières ouvragées conçu pour assurer un confinement physique et chimique des déchets. Le résultat est un système pérenne de sûreté passive, qui n'impose pas de charge aux générations futures.

Variété dans les concepts de dépôt

Actuellement, 16 pays membres de l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire, poursuivent activement des programmes de dépôts géologiques. Les objectifs et buts de ces programmes varient considérablement ainsi que les concepts techniques étudiés et les niveaux de développement atteints, reflétant des différences dans la taille du pays, la taille du programme nucléaire, l'organisation, le calendrier des programmes énergétiques, la géologie...

Alors que certains pays envisagent le dépôt géologique pour tous les types de déchets radioactifs, y compris les déchets de faible activité et de démantèlement (par exemple, l'Allemagne), d'autres ont défini des concepts spécifiques pour différents types de déchets, ne considérant la mise en dépôt géologique que pour les déchets à haute activité et à vie longue (la France par exemple). Différentes formations géologiques sont envisagées : sel en couches, dôme de sel, tuf, granite et différents types de formations argileuses. Sur le plan technique, différentes variantes du concept multi-barrière sont envisagées.

Une grande diversité existe également dans les calendriers envisagés pour la mise en dépôt profond, depuis des projets « serrés » dont la mise en œuvre est prévue pour les prochaines 10 à 15 années (par exemple en Finlande, Suède et aux États-Unis) jusqu'à des programmes délibérément reportés dans le

temps, comme par exemple au Royaume-Uni, où l'on parle d'évacuation géologique dans 50 ans ou en Allemagne où cette dernière n'est pas envisagée avant 2030.

Les progrès scientifiques et technologiques

Les principaux points qui suivent font l'objet d'un large consensus parmi ceux qui ont une responsabilité directe dans la gestion des déchets, qu'il s'agisse des maîtres d'œuvre, des autorités réglementaires ou des décideurs.

Ces dix dernières années, la connaissance scientifique comme la technologie nécessaire à l'évacuation géologique ont bien progressé. Ces progrès concernent notamment la connaissance scientifique des mécanismes déterminant l'efficacité avec laquelle les dépôts remplissent leur fonction de confinement des déchets sur de longues échéances-périodes, la caractérisation et l'évaluation quantitative des moyens par lesquels les barrières ouvragées et la roche environnante contribuent à la sûreté, les études spécifiques des sites envisagés et également les travaux souterrains et d'autres aspects pratiques de la réalisation des dépôts.

Aujourd'hui, les scientifiques et techniciens de l'évacuation des déchets sont aussi convaincus que l'évacuation en formation géologique est techniquement sûre et que les technologies de construction et d'exploitation des dépôts sont suffisamment mûres pour que l'on puisse envisager de les appliquer. Ces convictions sont le résultat des longues années de recherches menées par des cohortes de spécialistes de par le monde. Ces travaux se caractérisent par une extrême liberté dans les échanges d'informations et de connaissances entre spécialistes et par le fait que la documentation a toujours été laissée à la disposition des experts et du public en vue d'examen critiques.

Il est cependant nécessaire de poursuivre des recherches scientifiques et techniques de très grande qualité. Malgré l'état d'avancement actuel de la technologie de l'évacuation en formation géologique, son perfectionnement, les essais, les travaux de démonstration, ainsi que la réalisation du stockage et les contrôles de qualité dans des conditions

de référence, font partie des défis de longue haleine.

Laboratoires souterrains de recherche

Une grande partie de la confiance technique vient du travail effectué au sein des laboratoires souterrains. Ces laboratoires sont divisés en deux catégories :

- Les laboratoires de recherches génériques, utilisés principalement pour obtenir des informations sur un type de roche, afin d'approfondir nos connaissances, de tester des modèles et d'expérimenter les techniques de caractérisation des sites, de construction et d'exploitation des dépôts. Entrent dans cette catégorie, les installations d'Asse en Allemagne, de Stripa et d'Äspö en Suède, de Grimsel et du Mont Terri en Suisse, du labo-



Déchargement de conteneurs de déchets vitrifiés hors d'un emballage de transport

ratoire souterrain du Canada, de Tono au Japon et de Tournemire en France.

- Les laboratoires spécifiques à un site, qui font partie intégrante du programme d'étude et d'aménagement d'un site potentiel qui est entrepris avant de construire le dépôt. On peut citer le « Yucca Mountain Exploratory Studies Facility (ESF) » aux États-Unis, le laboratoire HADES/URF de Mol en Belgique, les futurs laboratoires français et la RCF « Rock Characterisation Facility » que souhaitait la Nirex en Angleterre.

Mise en œuvre

L'évacuation finale de déchets radioactifs dans des cavités souterraines est déjà une réalité, ce qui prouve la faisabilité de ce type de projet.

- Entre 1967 et 1978, l'Allemagne a mis en dépôt des déchets de faible activité dans la mine de sel d'Asse dans le cadre d'un projet de démonstration. Un dépôt de déchets de faible et moyenne activité a été exploité dans le dôme de sel de Morsleben entre 1981 et 1998. Ces deux installations sont aménagées à plus de 500 mètres de profondeur. La procédure d'autorisation pour l'évacuation de déchets non thermogènes dans la mine de fer désaffectée de Konrad, à une profondeur de 1 000 mètres, se trouve en phase finale.

- En Suède, un dépôt de déchets de faible et moyenne activité est exploité depuis 1988 à une profondeur intermédiaire sur le site nucléaire de Forsmark. Dans ce cas, les cavités de dépôt ont été creusées dans le socle granitique à 60 mètres environ sous le fond de la mer Baltique.

- En Finlande, des dépôts de déchets de faible et moyenne activité ont été ouverts respectivement en 1992 sur le site d'Olikiluoto, et en 1998, sur le site de Loviisa. Ces dépôts sont constitués de cavités aménagées dans le socle granitique à environ 100 mètres de profondeur.

- Toujours pour ce type de déchets, le dépôt d'Himdalen, en Norvège, a été mis en service en 1999. Il comprend quatre cavités situées sous une couverture de 50 mètres de socle rocheux.

- Une première dans le monde a été la mise en œuvre, aux États-Unis, d'un dépôt géolo-

gique pour les déchets à longue vie le 26 mars 1999 : le « Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) » au sud-est du Nouveau Mexique. Les déchets mis en dépôt contiennent une proportion significative d'éléments à vie longue, bien que les déchets de haute activité thermogènes soient exclus de cette installation. Les déchets sont placés dans des cavités aménagées à 650 mètres de profondeur dans une formation de sel en couche.

Les pays qui sont les plus avancés sur la voie de l'évacuation géologique des déchets de haute activité et à vie longue sont les États-Unis, la Suède et la Finlande.

- Les États-Unis ont mené un programme complet d'investigations en surface et ont construit des galeries d'accès et d'expérimentation à 350 mètres de profondeur sur le site de Yucca Mountain, au sud du Nevada. Il est prévu de recommander un site en 2001 et, si le site de Yucca Mountain est retenu, le dossier de demande d'autorisation pourrait être présenté en 2002.

- La Suède prévoit d'entreprendre des recherches détaillées sur deux sites au tout début du 21^e siècle.

- En Finlande, une communauté locale a accepté d'accueillir un dépôt géologique national. Le choix du site sera arrêté en 2000.

Il y a actuellement un mouvement général en faveur d'une démarche par étapes, comportant une phase permettant la reprise des déchets mis en dépôt (par exemple, en Suède, en Suisse et aux États-Unis).

Aspects sociaux

Alors que les questions techniques sont considérées être comme résolues à l'échelle générale, le grand public ne partage pas nécessairement la confiance de la communauté scientifique et technique.

En particulier, il a été reconnu récemment que, le concept de dépôt géologique doit non seulement satisfaire des contraintes techniques et environnementales rigoureuses, mais aussi réussir les tests d'acceptabilité sociale et politique. Il s'agit de déterminer quand et où cette solution devra être mise en œuvre compte tenu des obligations éthiques à respecter et de la nécessité de réduire les risques présents et à venir, de

garantir que les autres options soient étudiées comme il convient, d'associer largement de la société à ce choix et enfin de faire mieux accepter cette stratégie.

C'est dans ce contexte que les mérites d'autres stratégies de gestion des déchets et de la souplesse dans la mise en œuvre de l'évacuation géologique sont discutées. Des approches plus exotiques telles que l'enfouissement des déchets dans les fonds sous-marins et dans des forages ultra profonds ou leur lancement dans l'espace se sont avérées trop coûteuses, trop risquées ou encore impraticables pour des raisons politiques ou juridiques. Cependant, certains éléments alternatifs sont actuellement considérés. Ainsi, les mérites potentiels d'un entreposage à long terme sous contrôle institutionnel des déchets de haute activité ou de vie longue sont discutés (par exemple au Royaume-Uni et en Suisse). La faisabilité technique d'un tel entreposage est intensément analysée en France. Le concept de récupération des déchets et de réversibilité du

dépôt profond fait partie intégrante des programmes de dépôts en France, en Suède et à Yucca Mountain aux États-Unis.

Conclusions

Les débats engagés dans le cadre des programmes de gestion des déchets radioactifs, remettent rarement en cause le fait que le dépôt en formation géologique soit le moyen privilégié pour évacuer les déchets de haute activité et à vie longue. En outre, dans une perspective internationale et indépendamment de l'usage futur de l'énergie nucléaire dans le monde, il ne fait aucun doute de la nécessité de développer des dépôts géologiques. Il faut en effet évacuer dans des conditions sûres les déchets produits en grande quantité à ce jour par les programmes civils et militaires. Quoi qu'il en soit, le débat sur l'évacuation est indissociable des débats sur les stratégies d'approvisionnement en énergie, d'origine nucléaire ou autre.

Le WIPP : une première mondiale

En mars 1999, le projet pilote de confinement des déchets radioactifs (WIPP) dans le sud-est de l'État du Nouveau-Mexique aux États-Unis est devenu le premier dépôt géologique profond opérationnel au monde pour des déchets à vie longue. Les déchets qui seront déposés dans l'installation WIPP proviennent des programmes de défense des États-Unis et sont des sous-produits de la production et du démantèlement d'armes nucléaires. On les appelle communément déchets transuraniens. Il s'agit de vêtements, de chiffons, d'instruments, de débris, de résidus et d'autres éléments non liquides à jeter, contaminés par des éléments radioactifs à l'état de trace, essentiellement du plutonium.

Les déchets sont placés à l'intérieur de chambres de stockage creusées dans une formation saline stratifiée à 650 m de profondeur. Cette formation a été choisie en premier lieu pour sa stabilité géologique et pour l'absence de sources significatives d'eau potable dans la zone affectée par le dépôt. Le choix du site et la construction de l'installation WIPP sont conformes aux critères établis par l'autorité réglementaire responsable aux États-Unis, à savoir l'Agence de protection de l'environnement (EPA). Le processus d'approbation réglementaire comportait des auditions publiques et une analyse de la sûreté à long terme du dépôt après sa fermeture, comme prévu dans la « Compliance Certification Application » qui a été soumise par le ministère de l'énergie des États-Unis à l'EPA. Quelques groupes opposés au projet WIPP ont intenté des actions, mais celles-ci ont été rejetées par le Tribunal.

Le dépôt souterrain comprend 55 chambres de stockage susceptibles de recevoir 6 millions de pieds cubes (180 000 mètres cubes de déchets). Le volume disponible devrait permettre de stocker la moitié des déchets contaminés d'origine militaire des États-Unis pour les 35 prochaines années. Leur acheminement impliquera plusieurs milliers d'expéditions à partir de plusieurs sites aux États-Unis. La définition des itinéraires de transport a nécessité d'intenses consultations



Transport de colis de déchets vers le WIPP (installations de surface en arrière plan)

avec les États de transit et les tribus indiennes. Des expéditions ont déjà été reçues en avril 1999 en provenance de producteurs de déchets du Nouveau-Mexique et de l'Idaho.

L'entrée en service de l'installation WIPP ouvre la voie aux futurs dépôts de stockage de déchets contenant de fortes concentrations de radioactivité, par exemple des déchets de haute activité et du combustible irradié. L'exploitation de ces dépôts peut contribuer puissamment à convaincre le public qu'il est possible de traiter les déchets de façon sûre et efficace.

En 1996, l'AEN a organisé en collaboration avec l'AIEA une expertise internationale par des pairs pour vérifier si l'évaluation de l'installation WIPP après sa fermeture a été réalisée de façon appropriée, techniquement correcte et conformément aux normes et aux pratiques internationales. Le groupe d'experts comprenait des représentants d'organismes de réglementation nucléaire, de services de gestion des déchets radioactifs, d'universités et d'établissements de recherche. Un rapport contenant les conclusions du Groupe d'experts international a été transmis au Ministère de l'énergie (DOE). L'AEN a organisé plusieurs expertises comparables dans d'autres pays Membres à leur demande.

Saura-t-on gérer de manière sûre les déchets radioactifs de haute activité et à vie longue ?

Interview de Michèle Rivasi, Députée de la Drôme et membre de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. Propos recueillis par Yannick Gornet

La loi de 1991 fixait trois objectifs de recherche. Votre rapport relève que ces trois programmes n'ont pas donné à ce jour beaucoup de résultats. Vous engagez le gouvernement à intensifier ces programmes ?

Sur la première voie, celle de la séparation – transmutation, je pense qu'il faut développer les recherches de façon à trouver des solutions permettant de diminuer l'activité des radioéléments à longue période. A l'heure actuelle la transmutation en est à ses prémises : ce n'est pas véritablement une voie d'élimination des déchets radioactifs. Néanmoins, il faut développer cette voie parce que d'ici quelques années on trouvera des solutions. Donc mettons de l'argent là-dedans.

La deuxième voie, celle des laboratoires souterrains, est la seule voie où il y a eu véritablement de l'argent investi, celle sur laquelle on a énormément focalisé l'opinion publique alors que c'est celle qui va poser le plus de problèmes politiques, d'acceptabilité sociale ; d'autant que cette voie

n'a même pas l'ambition d'être la solution pour tous les types de déchets.

Or nous sommes dans l'urgence de trouver des filières de sortie pour tous les déchets. Pour cela il y a un passage obligé, ce que la loi appelle la voie de l'entreposage. Il faut donc absolument qu'on développe cette voie, parce que c'est la seule qui permette d'envisager avec responsabilité de trouver des solutions pour la gestion des déchets radioactifs. C'est d'ailleurs la conclusion de mon rapport.

Les trois options ne sont-elles pas complémentaires ?

La transmutation, à l'heure actuelle, ne résout absolument pas la question des déchets. S'il y a une complémentarité, c'est peut-être entre l'entreposage et les stockages souterrains. Mais est-ce que cette complémentarité est bien entrevue dans la perspective de la réversibilité ? Même si le gouvernement semble s'être engagé dans la réversibilité, la question est plutôt : ce sera réversible pendant combien de temps ? Car on peut sans doute garantir la réversibilité pour cinquante ans ou même cent ans, le temps d'exploitation du site, mais après se posera un problème de confinement. La réversibilité va à l'inverse du confinement. Plus vous allez garantir la réversibilité, plus vous allez mettre une faille dans le système susceptible de produire des passages d'eau. C'est d'ailleurs pourquoi on tient à expérimenter un site granitique, parce que là ce sont des galeries sans doute relativement plus stables que dans l'argile. L'argile est une roche tendre et fluide. Personne ne peut garantir une réversibilité dans l'argile à long terme.



Même si cela est sans doute plus étanche. Et quand on prend le WIPP aux Etats Unis qui est un site de stockage de déchets radioactifs militaires, là c'est dans du sel, c'est carrément irréversible.

Alors que d'un autre côté, dans l'entreposage en sub-surface, vous allez avoir des gens qui constamment vont aller vérifier les fûts, vérifier l'existence de fissures, récupérer les eaux de lixiviation, faire des mesures. La sûreté à long terme d'une telle installation est incomparablement moins douteuse. On en a eu un aperçu à Cadarache : il y avait là des fûts contenant du radium 228 qui venait de Rhône-Poulenc. Trois fois ces fûts ont été reconditionnés : d'abord il y avait du béton qui a fissuré, ils ont été reconditionnés en acier ; il y a eu une oxydation, on a donc recommencé cette fois en mettant deux structures. Imaginez : si on les avaient enfouis à 600 mètres, qui les aurait jamais reconditionnés ?

L'entreposage n'est pas une fuite en avant, comme je l'entends dire. Au contraire, il faut avoir le courage de dire aux générations futures : ces déchets, on n'a pas su les traiter. Mais on vous les transmet, les yeux grands ouverts, parce qu'un jour vous saurez résoudre les questions que cela pose. Eh bien, je trouve cette attitude plus responsable que d'enfouir nos déchets à 600 mètres, en l'état actuel de nos connaissances.

Mais n'est-ce pas aussi difficile de trouver des sites d'entreposage, et notamment d'entreposage en sub-surface, plutôt que des sites de stockage souterrain ?

Il y a plusieurs solutions à envisager : des sites nucléaires, des sites militaires ou bien à la rigueur des friches industrielles. Cadarache est un site nucléaire, par exemple, où il y a énormément d'entreposage, où l'on dispose d'une surface importante. Pourquoi n'y aurait-il pas un ciblage de certains déchets dans ce site ? Pour les sites militaires, le site de Valduc est un exemple, tous les sites où le fleuve ne constitue pas un risque d'inondation (cf. Le Blayais). Essayons d'abord de chercher dans cette direction, plutôt que de rechercher de nouveaux sites dans le domaine public.

Car je ne crois pas que l'opinion publique soit prête à accepter une « décharge radioactive » dans des sites où il y a la moindre idée collective de « patrimoine ». Vous imaginez l'image : accepter de vivre à côté d'une poubelle radioactive. Cela va à l'encontre du tourisme, du développement rural, de l'image d'une région, avec en prime l'idée qu'il y en a pour des milliers d'années.

Alors que, si on le fait dans des sites nucléaires qui sont le plus loin possible des fleuves, là où le risque d'inondation est correctement maîtrisé, on limite la contamination à des zones qui sont déjà balisées.

Prenez l'exemple de la SOCODEI, qui souhaitait installer CENTRACO, son unité d'incinération des déchets radioactifs, à La Voulte dans la vallée du Rhône. Nous leur avons dit : on ne va pas encore transporter des déchets, des ferrailles contaminées dans un site qui ne l'est pas ; alors qu'à Marcoule il y avait déjà des ferrailles à démanteler, il y a la voie SNCF qui y est, et puis il y a des gens du nucléaire qui travaillent à proximité, donc on est dans le même réseau. C'est la même idée, le même discours qu'il faut tenir à propos de l'entreposage : il ne faut pas contaminer des sites qui ne le sont pas. Qu'est-ce qu'on va aller faire dans la Mayenne, dans le Cantal ou en Bretagne ?

Vous nous dites là qu'il y a une sérieuse réévaluation à faire de la loi de 1991 ?

Cette loi a eu pour le moins le mérite d'exister, et d'avoir représenté une première prise de conscience, voire une prise en charge par la représentation nationale de l'importance et des implications du problème des déchets.

Mais on voit maintenant ses limites : on a décidé que l'ANDRA devait s'occuper des déchets A et des laboratoires souterrains. Or c'est insuffisant : je revendique la création d'un plan national de gestion des déchets, de tous les déchets. Il y a aujourd'hui des déchets partout : des déchets B et C à Marcoule, à la Hague ainsi qu'à Cadarache, là où l'ANDRA n'a aucun moyen ni autorité pour aller voir ce qui s'y passe. Il y a des déchets qui n'ont aucune solu-

tion : les déchets miniers. Or l'ANDRA n'intervient pas à ce niveau. Il y a des déchets à base de tritium, un peu à Valduc, un peu à Cadarache, un peu à Saclay, pour lesquels l'ANDRA n'a toujours pas de responsabilité, et enfin des déchets TFA qui ont été, pour certains d'entre eux, mis dans les décharges d'ordures ménagères. Vous vous rendez bien compte qu'il n'y a là rien de sérieux. Qui peut donc définir et garantir un inventaire exhaustif, sérieux et crédible ?

Il faut donc amender la loi Bataille pour donner autorité à un organisme pour prendre en charge la gestion complète de tous les déchets. Si l'ANDRA est le meilleur choix, il faut que sa mission soit redéfinie et qu'on lui attribue les moyens de l'accomplir, qu'on étende l'autorité de la DSIN sur le contrôle de la sûreté dans tous les cas, et qu'enfin un livre blanc précise l'engagement des politiques sur la gestion des déchets. Bref, nous avons besoin d'une lisibilité correcte, d'une cohérence sérieuse sur l'ensemble de la gestion des déchets nucléaires et non pas comme c'est le cas d'une dispersion des responsabilités. Là comme ailleurs, la transparence est obligatoire, elle est un signe de responsabilité et d'acceptabilité sociale.

Est-ce que le problème des déchets n'est pas une façon d'imposer la sortie du nucléaire ?

A l'heure actuelle, vu qu'on a que des ersatz de solution, on est bien obligé de se poser la question de l'origine de ces déchets. Cela nous conduit à optimiser la production de ces déchets et à diminuer la part du nucléaire en faveur d'une diversification de la production d'électricité. Regardez la violence avec laquelle l'opinion publique s'est dressée contre la mission granite en Mayenne et dans d'autres départements à propos des laboratoires souterrains ou des décharges : comment

va-t-on résoudre cela ? Et on ne peut pas leur dire que le risque est nul, n'est-ce pas ? Si demain, ou dans dix ans, on trouve une ou des solutions pour les déchets radioactifs, là on pourra se poser la question : est-ce qu'on repart ou pas ?

Et puis parlons d'argent : quand on évoque les sites de stockage, le démantèlement, les déchets miniers, qui va financer tout cela ? Ce sont les générations futures, avec leurs impôts ? On est sur une politique de marché : une politique de marché, c'est la transparence des prix. Donc, à un moment ou à un autre, les choix qu'on va faire sur les déchets auront une répercussion sur le prix du kilowattheure.

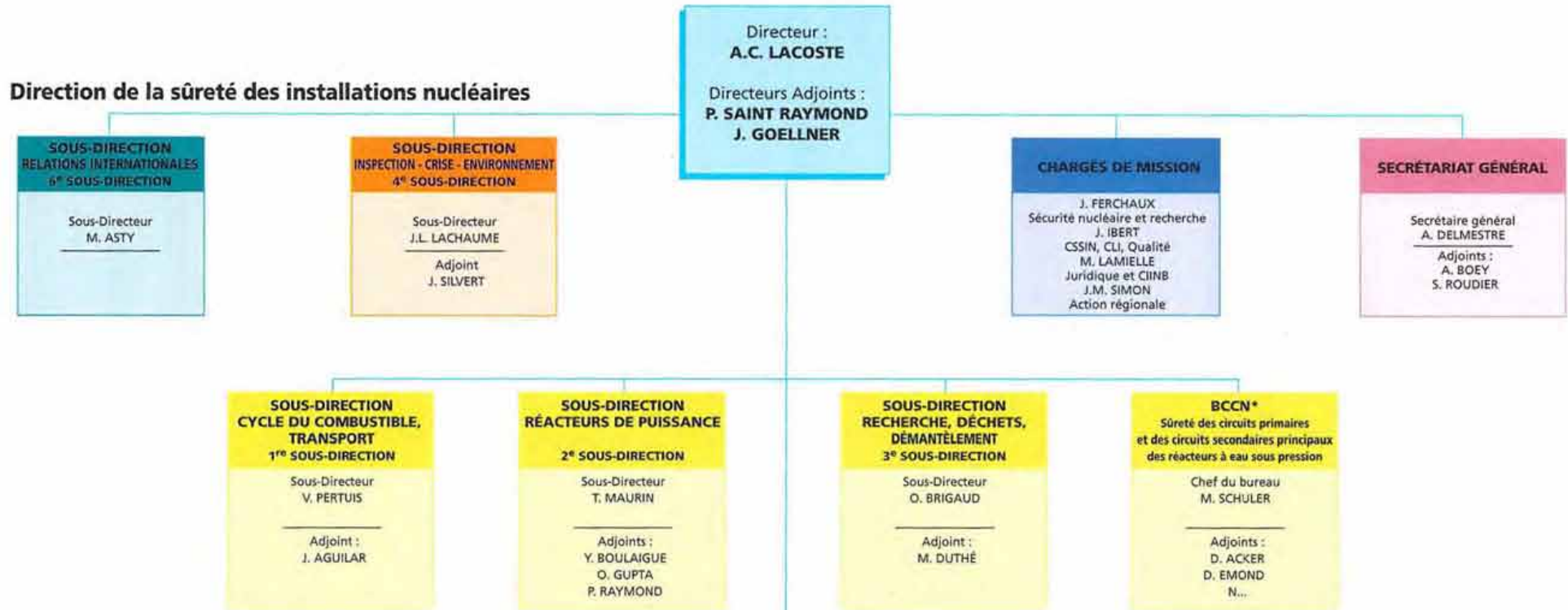
Dans ce prix du kilowattheure, où est la prise en charge du démantèlement, du stockage des déchets, comment ces coûts sont-ils intégrés ? Or aujourd'hui on ne sait pas encore comment on va faire pour aller jusqu'au « gazon », comme dit EDF, ni combien cela coûtera vraiment. On n'a que des évaluations des sommes en jeu. Quand vous voyez que Marcoule en est à 38 milliards pour le démantèlement de l'usine de retraitement et que cette somme ne représente qu'une petite partie de tout ce qu'il y a à démanteler... calculez, vous imaginez les sommes qui sont en jeu.

Cela dit, on ne pourra pas dire du jour au lendemain : on arrête. Il y a des emplois, des compétences et des investissements engagés. Donc il faut faire des recherches pour inerte le plutonium, et diversifier la production énergétique : il faut qu'EDF investisse dans les turbines à gaz. Le marché évolue très vite alors que, dans le nucléaire, on est dans un système d'une très grande inertie ; avec encore vingt ans devant nous, mais il faut tout de suite engager une diversification, y compris sur la compétence des gens. Il ne faut pas attendre, on perd des marchés. Et nous aurons besoin de beaucoup d'argent pour résoudre le problème des déchets.

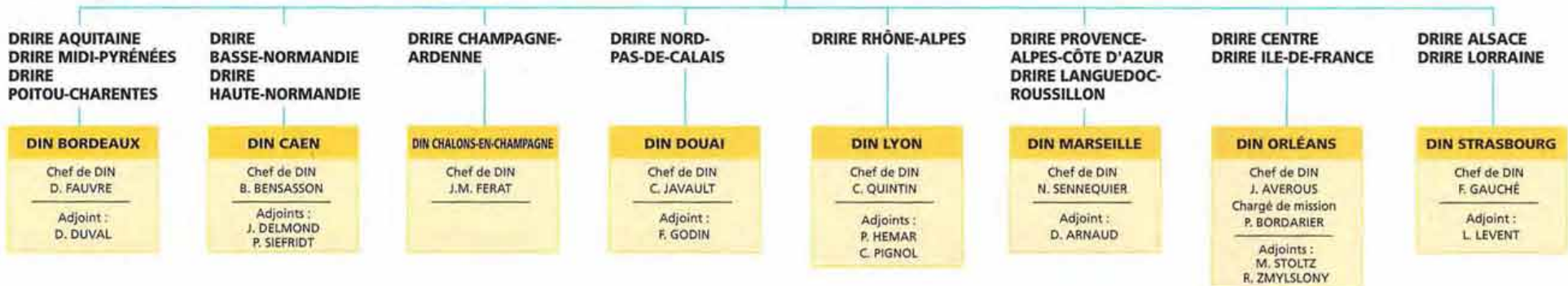
Autorité de sûreté nucléaire

Organigramme au 1^{er} novembre 2000

Direction de la sûreté des installations nucléaires



Divisions des installations nucléaires des DRIRE



NOM Prénom

Adresse

Code postal Ville Pays

**A renvoyer à : Direction de la sûreté des installations nucléaires
99, rue de Grenelle – 75353 Paris 07 SP – Fax 33 (0)1 43 19 23 31**

Les dossiers de la revue Contrôle			Nombre d'exemplaires*
100-101	La communication (octobre 1994)	Epuisé	
102	Les déchets faiblement radioactifs (décembre 1994)	Epuisé	
103	Le rapport d'activité 1994 de la DSIN (février 1995)	Epuisé	
104	Les commissions locales d'informations (avril 1995)	Epuisé	
105	La sûreté des réacteurs du futur – le projet EPR (juin 1995)	Disponible	
105	Special topic: Safety of future reactors – the EPR project (June 1995)	Epuisé	
106	L'organisation du contrôle de la sûreté et de la radioprotection (août 1995)	Epuisé	
107	Les réacteurs en construction – le palier N4 (octobre 1995)	Epuisé	
108	La crise nucléaire (décembre 1995)	Epuisé	
109	L'activité en 1995 de la DSIN (février 1996)	Epuisé	
110	Le retour d'expérience des accidents nucléaires (avril 1996)	Epuisé	
111	Les rejets des installations nucléaires (juin 1996)	Epuisé	
112	Les exercices de crise (août 1996)	Epuisé	
113	Déchets radioactifs : les laboratoires souterrains de recherche (octobre 1996)	Epuisé	
114	La communication sur les incidents nucléaires (décembre 1996)	Epuisé	
115	L'activité de la DSIN en 1996 (février 1997)	Epuisé	
116	La sûreté du cycle du combustible 1 ^{re} partie (avril 1997)	Epuisé	
117	La sûreté du cycle du combustible 2 ^e partie (juin 1997)	Epuisé	
118	La gestion des déchets très faiblement radioactifs (août 1997)	Disponible	
119	Le démantèlement des installations nucléaires (octobre 1997)	Disponible	
120	Le transport des matières radioactives (décembre 1997)	Disponible	
121	L'activité de la DSIN en 1997 (février 1998)	Disponible	
122	Le contrôle de la construction des chaudières nucléaires (avril 1998)	Disponible	
123	Radioprotection et INB (juin 1998)	Disponible	
124	Les relations internationales bilatérales (août 1998)	Disponible	
124	Bilateral international relations (august 1998)	Disponible	
125	25 ans de contrôle de la sûreté nucléaire (novembre 1998)	Epuisé	
125	25 years of Nuclear Safety Supervision (november 1998)	Disponible	
126	La gestion des matières radioactives et son contrôle (décembre 1998)	Disponible	
127	La sûreté nucléaire en 1998 (mars 1999)	Disponible	
128	Les réacteurs expérimentaux et de recherche (avril 1999)	Epuisé	
129	Le vieillissement des installations nucléaires (juin 1999)	Epuisé	
130	Sites contaminés et déchets anciens (août 1999)	Epuisé	
131	Les systèmes informatiques dans l'industrie nucléaire (octobre 1999)	Disponible	
132	Le retour d'expérience des exercices de crise nucléaire (janvier 2000)	Epuisé	
133	La sûreté nucléaire en 1999 (mars 2000)	Disponible	
134	La gestion des déchets radioactifs : l'état des recherches début 2000	Disponible	
135	Les relations internationales multilatérales (juin 2000)	Disponible	
135	Multilateral International Relations (June 2000)	Disponible	
136	Le risque d'incendie dans les installations nucléaires (septembre 2000)	Disponible	
137	Les rejets des installations nucléaires (novembre 2000)	Disponible	

* Maximum 5 exemplaires

« CONTROLE »

LA REVUE DE L'AUTORITÉ DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE »

est publiée conjointement par le ministère de l'économie, des finances et de l'industrie
secrétariat d'état à l'industrie

et le ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement

99, rue de Grenelle, 75353 Paris 07 SP

Diffusion : Tél. 33 (0) 1 43.19.32.16 – Fax : 33 (0) 1 43.19.23.31 – Mel : Dsin.PUBLICATIONS@industrie.gouv.fr

Directeur de la publication : André-Claude LACOSTE, directeur de la sûreté des installations nucléaires

Rédacteur en chef : Olivier BRIGAUD et Philippe RAIMBAULT

Assistante de rédaction : Isabelle THOMAS

Photos : ANDRA, CEA, COGEMA, EDF

ISSN : 1254-8146

Commission paritaire : 1294 AD

Imprimerie : Louis-Jean, BP 87, GAP Cedex

Tiré à part du dossier 134 de la revue de l'Autorité de sûreté nucléaire

Le magazine télématique

3614 MAGNUC

L'actualité de la sûreté nucléaire et de la radioprotection



En France : 3614 MAGNUC - de l'étranger : 33 8 36 43 14 14 MAGNUC