

Informations générales

Le point sur l'évacuation des déchets radioactifs en formations géologiques

AGENCE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE
ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

En vertu de l'article 1^{er} de la Convention signée le 14 décembre 1960, à Paris, et entrée en vigueur le 30 septembre 1961, l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) a pour objectif de promouvoir des politiques visant :

- à réaliser la plus forte expansion de l'économie et de l'emploi et une progression du niveau de vie dans les pays Membres, tout en maintenant la stabilité financière, et à contribuer ainsi au développement de l'économie mondiale ;
- à contribuer à une saine expansion économique dans les pays Membres, ainsi que les pays non membres, en voie de développement économique ;
- à contribuer à l'expansion du commerce mondial sur une base multilatérale et non discriminatoire conformément aux obligations internationales.

Les pays Membres originaires de l'OCDE sont : l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la France, la Grèce, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Luxembourg, la Norvège, les Pays-Bas, le Portugal, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Turquie. Les pays suivants sont ultérieurement devenus Membres par adhésion aux dates indiquées ci-après : le Japon (28 avril 1964), la Finlande (28 janvier 1969), l'Australie (7 juin 1971), la Nouvelle-Zélande (29 mai 1973), le Mexique (18 mai 1994), la République tchèque (21 décembre 1995), la Hongrie (7 mai 1996), la Pologne (22 novembre 1996) et la Corée (12 décembre 1996). La Commission des Communautés européennes participe aux travaux de l'OCDE (article 13 de la Convention de l'OCDE).

L'AGENCE DE L'OCDE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

L'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN) a été créée le 1^{er} février 1958 sous le nom d'Agence européenne pour l'énergie nucléaire de l'OECE. Elle a pris sa dénomination actuelle le 20 avril 1972, lorsque le Japon est devenu son premier pays Membre de plein exercice non européen. L'Agence compte actuellement 27 pays Membres de l'OCDE : l'Allemagne, l'Australie, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la Finlande, la France, la Grèce, la Hongrie, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Japon, le Luxembourg, le Mexique, la Norvège, les Pays-Bas, le Portugal, la République de Corée, la République tchèque, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Turquie. La Commission des Communautés européennes participe également à ses travaux.

La mission de l'AEN est :

- d'aider ses pays Membres à maintenir et à approfondir, par l'intermédiaire de la coopération internationale, les bases scientifiques, technologiques et juridiques indispensables à une utilisation sûre, respectueuse de l'environnement et économique de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques ; et
- de fournir des évaluations faisant autorité et de dégager des convergences de vues sur des questions importantes qui serviront aux gouvernements à définir leur politique nucléaire, et contribueront aux analyses plus générales des politiques réalisées par l'OCDE concernant des aspects tels que l'énergie et le développement durable.

Les domaines de compétence de l'AEN comprennent la sûreté nucléaire et le régime des autorisations, la gestion des déchets radioactifs, la radioprotection, les sciences nucléaires, les aspects économiques et technologiques du cycle du combustible, le droit et la responsabilité nucléaires et l'information du public. La Banque de données de l'AEN procure aux pays participants des services scientifiques concernant les données nucléaires et les programmes de calcul.

Pour ces activités, ainsi que pour d'autres travaux connexes, l'AEN collabore étroitement avec l'Agence internationale de l'énergie atomique à Vienne, avec laquelle un Accord de coopération est en vigueur, ainsi qu'avec d'autres organisations internationales opérant dans le domaine de l'énergie nucléaire.

© OCDE 2000

Les permissions de reproduction partielle à usage non commercial ou destinée à une formation doivent être adressées au Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris, France. Tél. (33-1) 44 07 47 70. Fax (33-1) 46 34 67 19, pour tous les pays à l'exception des États-Unis. Aux États-Unis, l'autorisation doit être obtenue du Copyright Clearance Center, Service Client, (508)750-8400, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA, ou CCC Online : <http://www.copyright.com/>. Toute autre demande d'autorisation ou de traduction totale ou partielle de cette publication doit être adressée aux Éditions de l'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 Paris Cedex 16, France.

AVANT-PROPOS

Aujourd'hui, l'énergie nucléaire assure 25 % de toute l'électricité produite dans les pays de l'OCDE (17 % à l'échelle mondiale). Les technologies sont parvenues à maturité, les performances s'améliorent et les coûts d'exploitation diminuent. À condition d'être convenablement gérée, cette énergie présente des avantages économiques et environnementaux. En particulier, elle peut apporter une contribution importante à la réalisation de ce qui devrait devenir l'objectif environnemental premier du XXI^e siècle : la limitation des émissions de gaz à effet de serre, et notamment du dioxyde de carbone.

À l'aube de ce siècle, l'industrie nucléaire doit relever plusieurs défis dont peut dépendre la survie de cette forme d'énergie : améliorer sa compétitivité, maintenir les niveaux de sûreté élevés actuels, établir un cadre réglementaire plus stable et obtenir une adhésion plus large du public et des hommes politiques. Trouver des solutions sûres, acceptables d'un point de vue environnemental et économique, pour éliminer tous les types de déchets est un impératif que doivent respecter toutes les techniques quelles qu'elles soient. Mais il ne s'agit pas seulement en l'occurrence de préserver l'avenir du nucléaire. Quand bien même la totalité des activités nucléaires devraient cesser immédiatement, il faudrait évacuer les déchets accumulés jusqu'à présent ainsi que ceux qui seront inévitablement produits au cours du démantèlement des centrales nucléaires et d'autres installations.

La mise au point et l'application des technologies de traitement, de conditionnement, de stockage et de transport de tous les types de déchets radioactifs ont considérablement progressé, et la mise en dépôt de nombreux déchets à vie relativement courte (ceux dont la radioactivité décroît à des niveaux inoffensifs au bout de quelques dizaines d'années ou, tout au plus, de quelques siècles) est depuis longtemps une opération de routine. Pour ce qui est des déchets à vie plus longue qui doivent être isolés de l'environnement humain pendant des millénaires, depuis les années 50 au moins, on privilégie, pour des raisons éthiques et techniques, l'évacuation dans des dépôts aménagés à grande profondeur dans des formations géologiques stables, choisies avec soin.

La justification et la sûreté de l'évacuation en formations géologiques comme mode de gestion à long terme des déchets font l'objet d'un large consensus dans la communauté scientifique et technique. On a beaucoup appris sur la façon dont fonctionneront les dépôts en formations géologiques profondes sur de très longues périodes, et on a mis au point des méthodologies pour évaluer le comportement du système de dépôt dans son ensemble, à savoir les structures ouvragées et les formations géologiques qui les séparent de la surface, afin d'obtenir le maximum de garanties quant à sa sûreté et au respect de la réglementation. Cependant, de nombreux pays ont connu des difficultés dans la réalisation de leur programme d'évacuation – essentiellement dues à l'incapacité des spécialistes de la gestion des déchets de recueillir le soutien public et politique nécessaire – et certains groupes plaident pour l'ajournement des opérations d'évacuation et pour un réexamen des divers modes de gestion des déchets.

D'un point de vue purement technique, il n'est pas urgent d'évacuer les déchets à vie longue – les volumes de déchets résultant des programmes électronucléaires sont relativement faibles, et il est possible de construire et d'exploiter des installations d'entreposage garantissant un très haut niveau de sûreté. De plus, un entreposage de plusieurs dizaines d'années permet un refroidissement suffisant de la plupart des déchets radioactifs avant leur mise en dépôt.

Néanmoins, dans la plupart des pays, les responsables de la gestion des déchets radioactifs continuent de préconiser l'adoption d'une démarche prudente, graduelle, pour l'aménagement de dépôts, s'alignant en cela sur le point de vue de la communauté internationale des spécialistes de la gestion des déchets, exprimé dans une Opinion collective de l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) en 1995, à savoir :

- du point de vue de l'éthique et de la sûreté à long terme, l'évacuation définitive nous permet de mieux nous acquitter de nos responsabilités à l'égard des générations futures que des solutions d'entreposage provisoires qui sont synonymes de surveillance et de transmission de la responsabilité à long terme des déchets aux générations futures, et peuvent, finalement, être négligées par les sociétés de demain dont on ne peut préjuger de la stabilité ;
- après avoir étudié les possibilités d'isoler comme il convient ces déchets de la biosphère, l'évacuation dans des formations géologiques est la stratégie qui, aujourd'hui, rallie la majorité des suffrages.

Si l'énergie nucléaire doit continuer d'assurer 25 % de la production d'électricité des pays de l'OCDE, voire davantage, dans les pays qui souhaiteraient ainsi s'acquitter des engagements qu'ils ont pris à Kyoto en matière de limitation des émissions de dioxyde de carbone, il faudra construire de nouvelles centrales nucléaires au cours des premières décennies de ce siècle. Étant donné les délais considérables que nécessitent la planification, la délivrance des autorisations et la construction de nouvelles installations nucléaires, auxquels il faut ajouter l'idée, communément admise, que le « problème » de l'évacuation des déchets radioactifs contribue pour beaucoup à la difficulté de faire accepter la poursuite de l'option nucléaire, il a paru opportun de dresser un bilan des progrès réalisés sur la voie de l'évacuation en formations géologiques des déchets à vie longue et de réfléchir à de nouvelles mesures pour mettre en œuvre ces opérations, compte tenu des exigences techniques et réglementaires et de la nécessité de recueillir l'adhésion de la société.

Le présent rapport est le fruit de ce bilan, réalisé conformément à la mission de l'objectif de l'AEN « d'aider les pays Membres dans le domaine de la gestion des déchets radioactifs, en particulier à élaborer des stratégies de gestion sûres pour les combustibles irradiés, les déchets à longue période et les déchets issus du déclassement des installations nucléaires ». On y trouvera une évaluation des progrès réalisés et des perspectives des dépôts géologiques, s'inspirant en grande partie de deux rapports récents du Comité de la gestion des déchets radioactifs de l'AEN/OCDE, composés de responsables des politiques et de la réglementation ainsi que de gestionnaires de déchets.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	3
1. INTRODUCTION	9
2. AVANCÉES DE LA LÉGISLATION ET DE LA RÉGLEMENTATION	13
Résumé.....	13
Évolutions internationales.....	14
Évolutions nationales.....	16
3. AVANCÉES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES	19
Résumé.....	19
Concepts d'évacuation.....	20
Conditionnement et emballage des déchets	21
Barrières ouvragées.....	22
Barrière géologique.....	23
Caractérisation des sites	25
Laboratoires de recherche souterrains.....	27
Analogues naturels.....	29
Évaluation des performances	30
4. PROGRÈS VERS L'AMÉNAGEMENT DE DÉPÔTS.....	37
Résumé.....	37
5. PERSPECTIVES ET DÉFIS	41
Résumé.....	41
Confiance dans les aspects scientifiques, techniques et réglementaires ..	42
Gagner la confiance de la société civile.....	46
La recherche d'autres options pour la gestion des déchets	55
6. LA DIMENSION INTERNATIONALE	59
BIBLIOGRAPHIE	63

Chapitre 1

INTRODUCTION

La gestion des déchets radioactifs résultant de la production électronucléaire, dans des conditions à la fois sûres, acceptables d'un point de vue environnemental et économique, est un élément majeur des programmes nucléaires. Des progrès techniques notables ont été réalisés et, de plus, de nombreux pays ont acquis une expérience considérable de toutes les étapes de la gestion des déchets. Le traitement, le conditionnement, le stockage et le transport des déchets sont devenus des activités courantes dont la sûreté a été prouvée. Le stockage dans des installations proches de la surface ou à des profondeurs de quelques dizaines ou centaines de mètres dans des environnements géologiques divers est, lui aussi, une opération de routine. Cependant, presque tous les dépôts installés concernent des déchets à vie assez courte.

Au fil des années, plusieurs solutions ont été examinées pour l'évacuation des déchets à vie longue. Ont été étudiés l'enfouissement dans les sédiments des fonds sous-marins et dans des forages ultra-profonds ainsi que des propositions beaucoup plus originales comme l'évacuation dans des zones de subduction géologique, dans les calottes polaires ou encore le lancement des déchets dans l'espace. Toutes ces options et propositions sont apparues trop coûteuses ou trop risquées, ou encore impraticables pour des raisons politiques et juridiques. Depuis longtemps, les spécialistes de la gestion des déchets s'accordent à reconnaître que l'évacuation en formation géologique constitue la seule méthode dont la faisabilité soit acquise pour isoler suffisamment longtemps les déchets à vie longue de l'environnement humain et, ainsi, « boucler le cycle du combustible nucléaire ». Les débats actuels engagés dans le cadre des programmes de gestion des déchets portent principalement sur le moment et le lieu où ces opérations prendront place, 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 davantage la société à ce choix et, enfin, de faire mieux accepter cette stratégie.

Ces dix dernières années, la connaissance scientifique, comme la technologie nécessaire à l'évacuation en formations géologiques, ont bien progressé, notamment la compréhension des rôles respectifs des barrières naturelles et ouvragées, la caractérisation des sites, l'évaluation des performances des dépôts et la démonstration de la fiabilité de ces évaluations. Des progrès ont également été enregistrés dans les domaines de la législation et de la réglementation. Cependant, on s'est montré trop optimiste quant aux calendriers de réalisation de l'évacuation en formations géologiques des déchets à vie longue. Il n'existe qu'un seul dépôt de déchets à vie longue, spécialement conçu à cet effet, aux États-Unis, et encore ne fonctionne-t-il que depuis mars 1999. Y sont stockés des déchets produits dans le cadre des programmes militaires des États-Unis qui contiennent une bonne proportion d'éléments à vie longue, bien qu'en soient exclus les déchets de haute activité thermogènes. Ailleurs, mais aussi aux États-Unis en ce qui concerne la plupart des déchets à vie longue, les estimations des calendriers d'aménagement de dépôts varient entre plusieurs années et plusieurs décennies, et, dans de nombreux pays, des incertitudes considérables subsistent quant aux calendriers, aux conditions et aux mécanismes sociaux indispensables à la réalisation de ces dépôts.

Le Comité de la gestion des déchets radioactifs (RWMC) de l'AEN a réalisé un bilan critique de l'évolution, au cours des dix dernières années, de l'évacuation en formations géologiques des déchets à vie longue, afin d'évaluer l'état actuel des programmes d'évacuation dans ses pays Membres, de suivre l'évolution du consensus technique et d'orienter les activités futures (une bibliographie succincte figure à la page 63). Dans un second rapport, le RWMC a défini les axes stratégiques de ses travaux futurs, en fonction des principaux défis auxquels sont aujourd'hui confrontés les responsables des programmes nationaux de gestion des déchets, notamment dans le domaine de l'évacuation des déchets à vie longue.

La présente étude répond aux grandes *questions* suivantes :

- La recherche d'un moyen techniquement sûr et approprié pour gérer les déchets radioactifs à vie longue progresse-t-elle ?
- En particulier, en quoi le dossier technique de l'évacuation en formations géologiques, mais aussi son acceptabilité, ont-ils évolué ?
- Quels sont aujourd'hui les principaux problèmes et sujets qui conditionneront l'évolution future et l'acceptabilité de ce mode de gestion des déchets ?

Les *axes stratégiques* des futurs travaux, que l'on cite ici par souci d'exhaustivité bien qu'ils ne soient pas tous liés à l'évacuation des déchets à vie longue, sont les suivants :

- Questions générales relatives à la gestion des déchets : problèmes environnementaux, sûreté et développement durable ; analyse comparée des effets de la gestion des déchets radioactifs et non radioactifs et des réglementations qui s'y appliquent ; aspects économiques, par exemple déréglementation du marché de l'électricité et répercussions des coûts de la gestion des déchets sur la viabilité économique de l'électronucléaire.
- Processus d'aménagement des dépôts de déchets radioactifs à vie longue, notamment la résolution des problèmes techniques ; l'élaboration d'un consensus entre les gestionnaires de déchets, les autorités de réglementation et les responsables de politiques quant aux buts à atteindre et à la répartition des responsabilités ; faire en sorte que la société ait confiance dans la démarche adoptée à chacune des étapes de l'aménagement d'un dépôt.
- Gestion des matières issues du déclassé et du démantèlement ainsi que des déchets de très faible activité.
- Perception et confiance du public, notamment : compréhension des préoccupations des différentes parties prenantes ; communication efficace ; partage des expériences pratiques et processus de décision publique.
- Incidences des textes d'orientation et accords internationaux et participation à leur élaboration.
- Analyse systémique et progrès technologiques : suivi des nouvelles technologies de gestion et d'évacuation des déchets ; analyse de leurs répercussions sur l'ensemble du système et échanges d'informations.

Les trois chapitres qui suivent abordent respectivement l'évolution de la réglementation et de la législation ; les avancées scientifiques et techniques et les progrès (et, dans certains cas, les difficultés rencontrées) de l'aménagement des dépôts et de son corollaire vital, l'adhésion de la société. Le chapitre suivant sera consacré aux travaux qui restent à réaliser pour que soit possible une évacuation rationnelle, sûre et économique des déchets radioactifs à vie longue. Le dernier chapitre analysera le rôle des organisations et de la coopération internationale.

Chapitre 2

AVANCÉES DE LA LÉGISLATION ET DE LA RÉGLEMENTATION

Résumé

L'originalité de la réglementation propre à la gestion des déchets radioactifs tient à l'importance du consensus international concernant les normes de sûreté sur lesquelles sont fondées les législations nationales. L'objectif premier consiste à protéger les générations actuelles et futures contre des expositions inacceptables à la radioactivité émise par les déchets ou par les produits de leur décroissance radioactive.

La plupart des pays qui devront procéder à l'évacuation en formation géologique se sont dotés de directives réglementaires établissant des principes et exigences spécifiques applicables au stockage souterrain. Plusieurs pays ont également défini des exigences pour des sites particuliers et publié des directives concernant la démonstration de la conformité des dépôts à la réglementation en vigueur.

La tendance actuelle est à l'utilisation d'indicateurs de performances à long terme qui soient moins restrictifs que les doses de rayonnement et de risque d'exposition, et il apparaît de plus en plus clairement que les évaluations des performances changent de nature en fonction de l'échelle de temps considérée.

Plusieurs pays ont procédé à des réformes institutionnelles afin de confirmer ou de renforcer l'indépendance des autorités de réglementation nucléaire, de conférer, au sein des pouvoirs publics, une visibilité plus importante aux questions de gestion des déchets et de mettre en place des mécanismes d'échanges réguliers entre les autorités de réglementation et les gestionnaires de déchets.

Évolutions internationales

Commission internationale de protection radiologique (CIPR)

La protection radiologique se fonde sur les recommandations de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR), un organisme indépendant composé d'experts en médecine et de scientifiques, qui formule des principes et critères fondamentaux de radioprotection applicables dans le monde entier.

Les publications les plus récentes de la CIPR, pour ce qui concerne l'évacuation en formations géologiques, sont la Publication 64(1993) consacrée à la protection contre les expositions potentielles aux rayonnements et la Publication 77(1998) qui décrit la façon dont doivent être appliquées à l'évacuation des déchets radioactifs les recommandations générales de la CIPR.

Un groupe de travail de la CIPR a récemment développé des recommandations consacrées spécifiquement à l'évacuation des déchets à vie longue (Publication 81). Il s'agit de compléter les recommandations de 1985 de la CIPR (Publication 46) en fonction des évolutions récentes, et notamment des recommandations contenues dans la Publication 77.

Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA)

S'inspirant des travaux de la CIPR, l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) a publié des normes non contraignantes, internationalement reconnues, sur la sûreté des déchets radioactifs, les Normes de sûreté pour les déchets radioactifs (RADWASS). Le principal document de cette organisation, intitulé « Principes de la gestion des déchets radioactifs », a été publié en 1995. Il constitue la base technique sur laquelle s'appuie la Convention commune sur la sûreté de la gestion du combustible usé et sur la sûreté de la gestion des déchets radioactifs, qui a été signée en 1997 par 41 États dont 19 étaient États Parties en mai 2000. Les efforts portent désormais sur l'harmonisation des normes, l'AIEA envisageant de publier d'ici quelques années un ensemble de documents.

Agence pour l'énergie nucléaire (AEN)

En janvier 1997, s'est tenue à Cordoue une réunion internationale de l'AEN à laquelle étaient conviés des autorités de réglementation et des

gestionnaires de déchets intervenant dans un large éventail de programmes nationaux. Les participants ont débattu des objectifs et critères applicables à l'évacuation des déchets et des tendances observées dans l'évaluation des performances et la conduite du processus réglementaire. S'agissant plus précisément des questions réglementaires, ils se sont accordés sur les points suivants :

- Les critères réglementaires simples tels que les indicateurs de risques et de doses présentent l'avantage d'être transparents et faciles à comprendre. Toutefois, une approche plus élaborée intégrant de multiples facteurs, serait plus appropriée.
- La protection de l'environnement est un domaine où des éclaircissements s'imposent, notamment en raison de l'intérêt que suscite actuellement la préservation de l'environnement en soi. Protéger l'homme contre les rayonnements peut en général suffire à protéger la faune et la flore, du moins les espèces – ce qui est probablement la préoccupation essentielle – mais pas nécessairement les individus.
- Il n'est pas vraiment justifié, d'un point de vue scientifique et technique, de fixer des échéances pour les évaluations des performances. Il faudra évoluer d'une approche essentiellement quantitative vers une démarche plus qualitative pour le très long terme (au-delà de 10 000 ans).
- Il est nécessaire d'améliorer la communication entre les autorités réglementaires et les gestionnaires de déchets ainsi que les relations avec des groupes plus larges.
- Les critères de délivrance des autorisations (soit « les règles du jeu ») doivent être formulés bien avant leur application. Ils peuvent légitimement inclure des approches simplifiées ou stylisées.
- La mise en œuvre d'une approche par étapes pour la planification, la délivrance des autorisations et l'aménagement des dépôts présente un intérêt tant pour les gestionnaires de déchets que pour les autorités de réglementation, les décideurs et le public.

Union européenne

Les directives de l'UE, que les États membres sont tenus de mettre en œuvre, recouvrent les normes de base de la radioprotection, les contrôles des transports de matières radioactives et, en ce qui concerne les nouvelles

installations, les études d'impact sur l'environnement, qui doivent inclure l'information du public. S'agissant des évolutions concernant spécifiquement la gestion des déchets radioactifs, on peut citer les révisions en 1996 de la Directive fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants, qui établit des limites de dose plus basses pour les travailleurs et le public, ainsi que les modifications de 1997 de la Directive sur les études d'impact sur l'environnement, qui rend désormais obligatoires des évaluations des installations de stockage de déchets radioactifs d'une durée supérieure à 10 ans, ainsi que des dépôts.

Évolutions nationales

Au cours des dix dernières années, on a observé d'importantes évolutions des législations nationales. Aux États-Unis, les hommes politiques et les législateurs ont déployé beaucoup d'énergie pour faire avancer les projets de dépôts, tandis que de nouvelles lois ont été adoptées au Royaume-Uni, en Allemagne, aux Pays-Bas, en Hongrie et en République tchèque. En 1997, le Canada a modifié sa législation pour rationaliser et réorganiser sa structure réglementaire et renforcer le dispositif garantissant que les futurs exploitants disposent de moyens financiers adéquats.

S'agissant de la réglementation, la plupart des pays qui prévoient de construire des dépôts en formations géologiques disposent aujourd'hui de directives établissant les principes et exigences spécifiques applicables à l'évacuation souterraine. Plusieurs pays ont également défini des exigences propres à des sites et publié des consignes détaillées quant à la procédure que doit observer toute organisation qui souhaite évacuer des déchets radioactifs pour prouver qu'elle respecte la réglementation en vigueur. Récemment, les États-Unis, la Suisse, la Suède, la Finlande, l'Espagne et le Japon ont modifié leur réglementation spécifiquement consacrée à l'évacuation des déchets radioactifs, ou sont en train de le faire, ou encore en préparent une. D'autres pays comme la Belgique et les Pays-Bas, n'en sont pas encore dotés. Souvent, il existe des échanges réguliers entre les autorités de réglementation et les organismes de gestion des déchets destinés, par exemple, à faire le tour des activités de recherche et des études de sûreté ainsi que des évaluations des performances successives.

On observe, dans les réglementations nationales, une tendance à utiliser des indicateurs de performances à long terme plus généraux que de simples estimations de la dose de rayonnement ou du risque d'irradiation, par exemple les concentrations de nucléides dans l'environnement et leurs déplacements dans

la biosphère. On s'aperçoit de plus en plus que la nature des évaluations des performances évolue avec l'échéance considérée. Les incertitudes augmentant avec le temps, il convient de considérer les résultats de ces évaluations comme des indicateurs de performances plutôt que comme des prévisions précises des impacts. De ces réflexions sont nées des propositions préconisant la mise au point de méthodes d'évaluation des impacts à long terme qui bénéficient d'une reconnaissance internationale. On préconise, en général, une démarche réglementaire par étapes, de sorte que le mécanisme de décision impliquant les parties prenantes puisse intervenir par paliers successifs de portée limitée.

Il existe également une tendance à intégrer les lois et réglementations nationales relatives à l'évacuation des déchets dans le cadre plus large de la réglementation sur l'environnement. Cependant, si de nombreux pays revendiquent une certaine cohérence entre leur législation sur l'évacuation des déchets radioactifs et les autres textes de lois sur l'environnement, on connaît aujourd'hui peu de cas réels de réglementations objectives fondées sur le risque qui traitent de manière équitable tous les risques auxquels l'homme est exposé et permettent de le vérifier. Par exemple, pour obtenir l'autorisation d'injecter des substances toxiques dans des trous de forage, le demandeur doit démontrer, en principe, que ces substances ne menaceront « jamais » les eaux souterraines, mais il n'est pas tenu de présenter des prévisions des performances à très long terme, ni de les faire examiner de manière exhaustive, ce qui est le cas pour les déchets radioactifs. Plus généralement, la législation ou la réglementation environnementale ignorent encore largement des questions comme la durabilité ou la nécessité d'adopter des approches visant à garantir une protection uniforme contre une diversité de substances radioactives et contre les déchets dangereux non radioactifs.

Plusieurs pays sont en train de modifier leur cadre institutionnel afin de confirmer ou de renforcer l'indépendance des autorités de réglementation nucléaire. Ainsi, en République tchèque, la responsabilité de la réglementation a été transférée de la Commission de l'énergie atomique à une nouvelle organisation, l'Office d'État pour la sûreté nucléaire (SONS). En France, l'Institut de protection et de sûreté nucléaire (IPSN) est désormais séparé du Commissariat à l'énergie atomique (CEA). Au Canada, une nouvelle Commission canadienne de sûreté nucléaire prend la place de l'ancienne Commission de contrôle de l'énergie atomique. En Espagne et en Suède, la restructuration des autorités réglementaires contribue à donner une plus grande place à la gestion des déchets au sein des pouvoirs publics.

Certains pays ont opéré des modifications organisationnelles destinées à faciliter le choix des sites, si souvent sujet à controverse. La France a nommé un médiateur qui a réussi à identifier des communes volontaires pour accueillir un

laboratoire souterrain, et la Suède, un coordinateur national qui a pour mission de faciliter les négociations sur le choix des sites.

Peu de changements importants sont intervenus dans l'organisation du secteur opérationnel de la gestion des déchets. Des organismes spécialisés dans la gestion des déchets existent depuis plusieurs années dans de nombreux pays, d'autres ont vu le jour plus récemment en Finlande, en République tchèque, en Hongrie et en Suisse (GKN). Le Japon et le Canada envisagent d'en créer.

Chapitre 3

AVANCÉES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

Résumé

Au cours des dix dernières années, l'approche technologique à la base de l'évacuation en formations géologiques n'a pas profondément changé. Cette approche repose sur le recours à des barrières ouvragées et naturelles qui, ensemble, empêchent ou restreignent le déplacement des déchets hors des dépôts, dans l'environnement humain, et ainsi assurent l'isolement nécessaire à long terme.

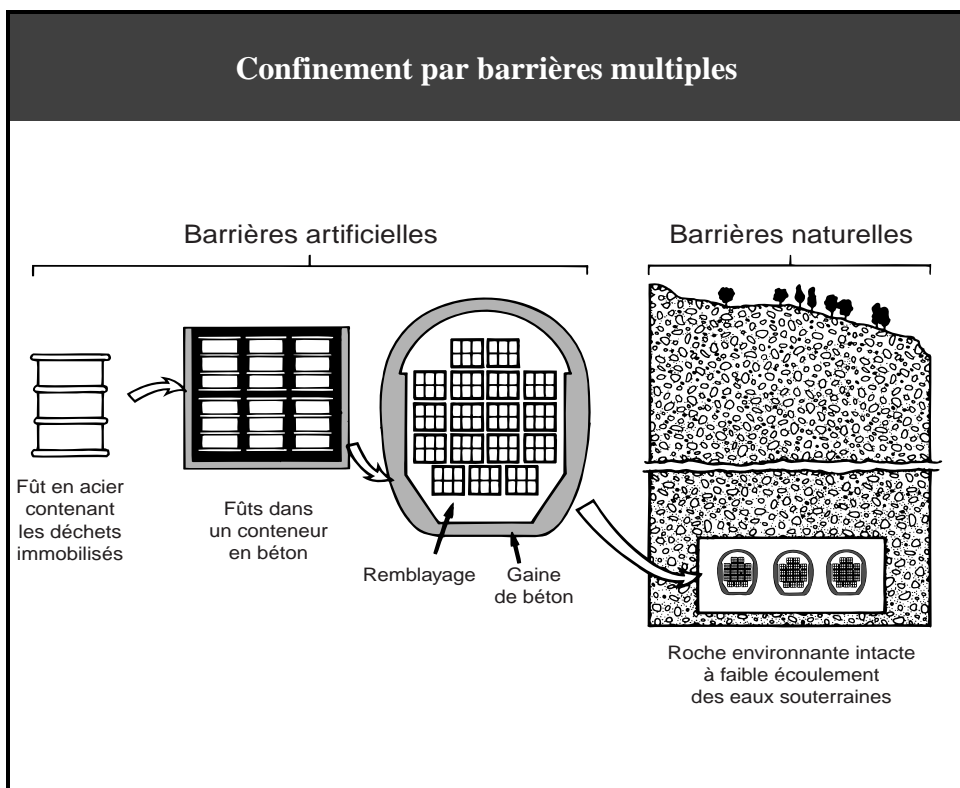
Rares ont été les nouveaux concepts et les percées technologiques, mais de nombreux aspects des systèmes de dépôts en formations géologiques, notamment la mise au point de systèmes de barrières ouvragées robustes, les sciences et la technologie à la base des évaluations des performances et l'intégration de la conception des systèmes de dépôts, de la caractérisation des sites et des évaluations des performances, ont marqué des progrès notables. Les travaux réalisés dans un nombre croissant de laboratoires souterrains et l'étude des analogues naturels continuent de fournir des données essentielles et de renforcer la confiance accordée à l'évacuation en formations géologiques. L'étude des analogues naturels s'organise souvent dans le cadre de coopérations regroupant, pour chaque projet, plusieurs organisations. Les organisations qui participent ont pu ainsi bénéficier des relations internationales et interdisciplinaires que favorisent ces collaborations.

Les interdépendances entre ces différents secteurs d'activité étant désormais largement admises, des structures intégrées de gestion de projets ont été mises en place afin de favoriser les interactions entre ces domaines. L'intégration plus poussée de la caractérisation des sites et de la conception des systèmes notamment, a permis de cibler plus précisément les études expérimentales et la conception de dépôts sur des secteurs propices à un renforcement de la sûreté et de la confiance.

En général, les technologies nécessaires à l'évacuation en formations géologiques sont disponibles et pourront être mises en œuvre dès que le public et les conditions politiques y seront favorables. Toutefois, certaines d'entre elles ayant été relativement peu appliquées, les travaux de démonstration et les essais devront être poursuivis afin de les perfectionner encore.

Concepts d'évacuation

Toutes les méthodes utilisées ou à l'étude pour l'évacuation en formations géologiques font appel à une série de barrières pour isoler de manière satisfaisante les déchets de l'environnement humain. Ces barrières peuvent être ouvragées, en acier ou en béton, par exemple, ou naturelles, à savoir constituées de couches épaisses d'argile ou de centaines de mètres de roche. Un faible taux de migration des eaux souterraines est un élément crucial de la barrière géologique, étant donné que la solubilisation et le transport des déchets par les eaux souterraines constituent en général la principale voie de transfert des déchets d'un dépôt profond à l'environnement humain.



Les progrès réalisés résultent principalement d'améliorations progressives de la conception des dépôts et des technologies nécessaires pour les mettre en œuvre. Peu de nouveaux concepts ou de percées technologiques sont apparus, ce qui tendrait à prouver que l'on n'a pas eu besoin de revoir d'une manière radicale les décisions prises il y a plus de dix ans. La progression spectaculaire des techniques informatiques, des systèmes de communication et de contrôle-commande, qui a permis d'utiliser des équipements télécommandés pour l'installation des colis de déchets et des opérations annexes, constitue une exception.

En partie parce qu'ils étaient conscients de la difficulté de caractériser de façon satisfaisante certains environnements géologiques, les chercheurs se sont concentrés, ces dernières années, sur la mise au point de systèmes de barrières ouvragées qualifiés de robustes. Il s'agit de systèmes dont on peut être sûr qu'ils garantiront un confinement efficace à long terme, grâce à une combinaison de barrières physiques et de processus chimiques, sans qu'il soit vraiment nécessaire de faire appel aux propriétés de la roche hôte. Dans certains cas, lorsqu'il a été possible d'étudier des sites réels, la conception de la barrière ouvragée a été adaptée le plus finement possible aux caractéristiques propres du site.

On relèvera également l'accent qui a été mis sur la nécessité d'adopter une vision intégrée du système de barrières multiples, marquant ainsi une évolution entre l'ancienne conception des barrières indépendantes fonctionnant comme des poupées gigognes et une conception fondées sur un ensemble complémentaire de barrières interdépendantes.

Conditionnement et emballage des déchets

Les performances globales du système de barrières ouvragées dépendent des propriétés des déchets eux-mêmes qu'il est possible de modifier en intervenant sur leur composition ou le procédé de conditionnement (procédé utilisé pour préparer les déchets sous une forme adaptée à l'entreposage ou à l'évacuation à long terme). Le matériau le plus couramment utilisé pour conditionner les déchets, hormis les déchets de haute activité, est le ciment, fabriqué selon diverses formules. Pour les déchets de haute activité, la vitrification s'est imposée et est même employée aujourd'hui pour d'autres déchets.

S'agissant des conteneurs, plusieurs conceptions et matériaux sont, ou ont été, étudiés suivant le type de déchets à conditionner, et des recherches sont effectuées sur les propriétés des matériaux et la résistance à la corrosion à long

terme. Toutefois, dans les études de faisabilité et les évaluations des performances on adopte souvent un seul modèle de référence. L'accent mis aujourd'hui sur la fiabilité de la fabrication des conteneurs et leurs performances à long terme s'est répercuté sur le programme de développement. La Suède, par exemple, a fabriqué des prototypes en vraie grandeur de conteneurs en cuivre pour son combustible usé. Aux États-Unis, pour démontrer la faisabilité du procédé de fabrication employé, on a construit des prototypes, au diamètre définitif et au quart de la longueur, de conteneurs de la conception actuelle bimétallique destinés tant aux combustibles usés qu'aux déchets de haute activité.

Barrières ouvragées

Normalement, le système de barrières ouvragées comprend les conteneurs de déchets en acier, puis les structures bétonnées dans lesquelles ces conteneurs sont disposés, et enfin un matériau de remblayage, voire une épaisseur supplémentaire de béton. Dans le cas des déchets de haute activité et du combustible usé (s'il est considéré comme un déchet et n'est donc pas retraité), le remblayage utilisé pour les conteneurs composites (par exemple, un premier conteneur en acier et un surconteneur en cuivre) sera, par exemple, de la bentonite. Une expérience en vraie grandeur, menée en coopération sur le site expérimental de Grimsel, en Suisse, sous les auspices de l'Union européenne, a pour objet d'étudier la fabrication industrielle, la manutention et la mise en place d'un remblayage en bentonite ainsi que son comportement dans des conditions représentatives de celles d'un dépôt.

Les barrières ouvragées contribuent ensemble à retarder l'accès des eaux souterraines aux déchets et par la suite, la circulation d'eaux souterraines contenant des radionucléides en solution dans les roches environnantes. Les résultats d'expériences tendent à prouver que les barrières ouvragées devraient assurer le confinement physique des déchets pendant plusieurs milliers d'années.

Dans certains concepts de dépôts, le système de barrières ouvragées contribue, en outre, de façon notable au confinement à long terme à l'intérieur du dépôt car il crée des conditions chimiques telles qu'une bonne partie des composants des déchets se dissolvent avec une extrême lenteur. La Suisse et les États-Unis, par exemple, ont mis au point des matériaux de remblayage à base de ciment poreux qui créent des conditions alcalines dans lesquelles la solubilité d'une bonne partie des radionucléides essentiels décroît de plusieurs ordres de grandeur par rapport à sa valeur dans des eaux souterraines standard. De surcroît, en raison de leur porosité, ces matériaux sont capables de piéger par

sorption des radionucléides qui auraient été dissous dans les eaux souterraines, retardant encore leur migration hors du dépôt.

Plusieurs programmes, dont des études en laboratoire, le développement et la validation de modèles, ont permis de mieux comprendre les propriétés chimiques à long terme des diverses formes de remblayage proposées. Étant donné les faibles débits des eaux souterraines que l'on attend d'une roche hôte appropriée, l'emploi de ces matériaux de remblayage devrait assurer sur plus d'un million d'années des conditions chimiques propres à garantir la faible solubilité et une bonne sorption d'une bonne partie des radionucléides importants.

Grâce à ce système de barrières ouvragées physiques et chimiques, la majeure partie de la radioactivité initiale des déchets devrait décroître à l'intérieur du dépôt et les radionucléides devraient migrer très lentement à l'extérieur et à de très faibles concentrations.

On a toujours considéré que l'environnement géologique était une composante essentielle de l'ensemble des systèmes de dépôt. Dans certaines formations comme l'argile, le rôle des structures ouvragées pourrait bien se limiter à garantir la sûreté pendant la phase opérationnelle du dépôt. S'agissant d'autres formations, comme des roches cristallines fracturées, les analystes ont beaucoup progressé dans la compréhension et la caractérisation des particularités géologiques et hydrogéologiques du système naturel et sont désormais plus conscients de la difficulté de caractériser suffisamment ce système pour pouvoir réaliser des évaluations des performances et des incertitudes associées. Ceux qui envisagent d'exploiter des environnements géologiques de ce type ont tendance à se tourner vers des systèmes de barrières ouvragées robustes pour compenser certaines des difficultés inhérentes à l'évaluation des performances des systèmes naturels et ainsi renforcer la fiabilité du système global. Les différents éléments de ces systèmes robustes doivent être simples et dimensionnés de manière prudente, chimiquement compatibles avec les systèmes naturels et complémentaires par leurs fonctions. Les conteneurs massifs en cuivre qu'élaborent actuellement les Suédois pour le combustible usé sont un exemple parfait de cette conception robuste.

Barrière géologique

Le milieu géologique assure un environnement stable pour les déchets, à l'abri des intrusions humaines ou des perturbations dues à des phénomènes naturels, ainsi que des conditions propices à la longévité des matériaux qui constituent le système de barrières ouvragées et, de plus, il joue le rôle de

tampon physique et chimique ralentissant la dégradation des conteneurs et, par la suite, le relâchement de substances radioactives. Dans l'idéal, la géosphère doit ralentir l'écoulement des eaux souterraines dans le dépôt et assurer des conditions chimiques (notamment dans les eaux souterraines) qui ne dégradent pas le système de barrières ouvragées. Autres propriétés importantes de la géosphère, le temps que mettent les eaux souterraines à atteindre la biosphère, la dispersion des radionucléides en solution dans l'eau et le ralentissement des radionucléides par rapport à la vitesse d'écoulement des eaux souterraines. Plus les radionucléides sont freinés par la géosphère, plus longue est la durée propice à leur décroissance radioactive et à leur dispersion, avec pour résultat une moindre quantité de radionucléides relâchés dans la biosphère quelle que soit la période considérée.

Les principaux types de formations géologiques qui ont été étudiées pour l'évacuation sont le sel, des formations sédimentaires telles que les argiles et les schistes, des formations cristallines comme le granite et le gneiss ainsi que des formations volcaniques comme le basalte et les tufs.

Les formations salifères datent de plusieurs millions d'années et, comme le sel se dissout facilement dans l'eau, leur existence même démontre la rareté des écoulements d'eau dans ces formations pendant très longtemps. Sous pression, le sel a un comportement plastique, ce qui revient à dire que les fissures ont tendance à se refermer naturellement. En outre, la résistance mécanique de ces formations permet le creusement de grandes cavités et galeries dépourvues de soutènement.

Les principaux avantages de formations telles que les argiles et les schistes tiennent à leurs propriétés de sorption. Dans des formations argileuses, par exemple, cette sorption explique que beaucoup de radionucléides importants se déplacent jusqu'à un million de fois plus lentement que l'eau souterraine dans laquelle ils sont dissous. La vitesse de déplacement de l'eau à travers les formations peut être extrêmement faible, voire proche de zéro, dans les argiles plastiques. Cependant, même les argiles et les schistes peuvent présenter des zones de fracture par lesquelles les eaux souterraines s'écouleront plus vite comme dans les roches cristallines.

Les roches cristallines sont très peu perméables lorsqu'elles ne sont pas fissurées. Par ailleurs, elles présentent des bonnes propriétés de sorption ainsi qu'une stabilité structurelle et chimique satisfaisante. S'il est fréquent qu'à proximité de la surface elles soient parcourues par des réseaux de fissures qui peuvent laisser passer beaucoup d'eau, ces fissures ont tendance à se raréfier avec la profondeur. Pour ce type de roche, il est donc primordial d'étudier et de

bien comprendre les écoulements d'eaux souterraines à l'intérieur et autour de la zone du dépôt.

Le basalte possède une faible perméabilité et une faible teneur en eau et de plus, il est très dur et résistant. Les tufs ont soit une forte densité lorsqu'ils sont peu poreux et à faible teneur en eau, ou une faible densité lorsqu'ils ont de bonnes propriétés de sorption.

Caractérisation des sites

Il y a dix ans, le manque de données spécifiques aux sites constituait un handicap majeur pour l'évaluation des performances à long terme de concepts de dépôts et de la faisabilité de leur construction. À l'époque, on disposait encore de peu de données sur des sites potentiels, et les stratégies et méthodes de collecte étaient beaucoup moins développées. Depuis, un travail considérable a été réalisé pour combler ces lacunes, notamment à Sellafield, au Royaume-Uni, à Yucca Mountain et dans l'installation WIPP, aux États-Unis, à Gorbelen en Allemagne, à Mol en Belgique, sur le site du Wellenberg, en Suisse, et sur les sites envisagés pour des dépôts profonds, en France. On trouvera décrits dans l'encadré xx quelques progrès techniques parmi les plus récents.

Plusieurs programmes nationaux ont mis au point une stratégie plus intégrée de caractérisation des sites. Notamment, des techniques probabilistes ont été élaborées pour optimiser cette stratégie, et les États-Unis, entre autres, ont procédé à des évaluations systémiques formelles de façon à orienter les expérimentations et les études de conception sur les domaines les plus susceptibles de favoriser un renforcement de la sûreté et de la confiance. On a également pris conscience de la nécessité de mettre sur pied une structure interactive de gestion de projet. Ce type d'organisation devrait permettre une coordination plus efficace de la planification et de la réalisation des études de sites, l'évaluation des caractéristiques du site en fonction du projet, la mise au point de méthodes d'évaluation des performances et leur application dans le cadre d'évaluations globales.

L'expérience acquise lors des travaux récents de caractérisation a montré que ces études peuvent fournir des données contradictoires. D'où la nécessité de recueillir davantage d'informations pour comprendre le système, ou en d'autres termes, réduire les incertitudes sur un système qui se révèle plus complexe qu'on ne l'avait initialement prévu. On citera, à ce propos, le cas de Yucca Mountain, aux États-Unis, où des mesures ont révélé l'existence de chemins préférentiels permettant un écoulement de l'eau plus rapide que ce que l'on avait

jusqu'alors modélisé, ce qui a conduit à une restructuration des modèles employés pour calculer l'écoulement des eaux souterraines.

Progrès techniques récents dans le domaine de la caractérisation des sites

Les techniques employées pour mesurer et interpréter les données ont été affinées et testées sur des sites potentiels et dans des laboratoires de recherche souterrains. Les progrès récents concernent :

- la détection de faibles écoulements d'eaux souterraines dans des forages profonds ;
- l'extraction d'échantillons d'eaux souterraines non perturbées dans des milieux à faible perméabilité ;
- l'utilisation, dans le cas des milieux non saturés, de méthodes d'échantillonnage des isotopes dans l'environnement, pour mettre en évidence des voies de recharge rapides en eau, anciennes et potentielles ;
- la détermination par des méthodes électromagnétiques, de la profondeur où se situent les eaux plus salées.

L'interprétation des données bénéficie :

- des techniques 3D de visualisation assistée par ordinateur pour l'intégration de données relevant de différentes disciplines (par exemple, les données géologiques, hydrogéologiques et géochimiques) ;
- de meilleurs outils de modélisation numérique pour représenter l'hétérogénéité, dont des outils de modélisation probabiliste permettant de prendre en compte la variabilité naturelle impossible à caractériser parfaitement ;
- de l'utilisation de données hydrochimiques pour obtenir des schémas d'écoulement des eaux souterraines.

Grâce aux meilleures performances des codes de traitement et d'interprétation, les enseignements tirés des données de terrain (campagnes sismiques, par exemple) sont plus pertinents que par le passé.

En résumé, des progrès notables ont été enregistrés au cours des dix dernières années, grâce à une meilleure connaissance du milieu naturel, aux évolutions technologiques et aux études exhaustives réalisées sur plusieurs sites. La caractérisation des sites, qui jadis se résumait à une collecte, assez peu structurée, de données géologiques, est devenue une activité technique ciblée, consistant à recueillir les informations indispensables pour évaluer les performances d'un système de dépôt.

Laboratoires de recherche souterrains

Des recherches ont été réalisées dans seize laboratoires souterrains de neuf pays. Onze d'entre eux sont des laboratoires de recherche générique construits sur des sites où il n'est pas prévu d'installer des dépôts, et cinq sont spécifiques à un site et font partie intégrante du programme d'étude et d'aménagement d'un site candidat dont le choix doit être confirmé par des analyses souterraines approfondies. La France, la République tchèque et le Japon envisagent de construire des laboratoires respectivement dans la Meuse, à Pribram et à Horonobe.

Ces laboratoires constituent l'environnement indispensable pour mettre au point et démontrer la validité des techniques employées pour les travaux souterrains et permettent de recueillir des données inestimables pour tester les modèles scientifiques et mathématiques utilisés dans les évaluations de performances. Ils sont également le lieu de démonstrations pratiques de nature à renforcer la confiance de tous ceux qui en observent le fonctionnement, ou y participent, outre le fait qu'ils ont favorisé le lancement de projets de recherche internationaux. Ces laboratoires ont servi notamment à :

- poursuivre la mise au point et les essais de techniques d'excavation ;
- quantifier l'impact des travaux d'excavation (échelles régionale et locale ; perturbations physiques et chimiques) ;
- mettre en œuvre des stratégies de reconnaissance des sites et méthodes pour adapter les systèmes souterrains à mesure que l'on collecte de nouvelles données ;
- intégrer les résultats pour en tirer des conclusions, des modèles conceptuels et des prévisions concernant la circulation des eaux souterraines (écoulements diphasiques) ;

Laboratoires et autres centres de recherche souterrains

Pays	Roche hôte	Laboratoire
Belgique	Argile de Boom (argile plastique)	Mol/Dessel. Installation de recherche spécifique au site. 230 m. En service depuis 1984.
Canada	Granite	Lac du Bonnet. Laboratoire de recherche générique. 240-420 m. En service depuis 1984.
France	Granite	Fanay-Augères. Galeries dans une mine d'uranium. Laboratoire de recherche générique. En service de 1980 à 1990.
	Granite	Installation de Tournemire. Ancien tunnel ferroviaire et galeries adjacentes. Laboratoire de recherche générique. En service depuis 1990.
Finlande	Granite	Galerie de recherche d'Olkiluoto. Laboratoire de recherche spécifique au site. 60-100 m. En service depuis 1992.
Allemagne	Dôme de sel	Asse. Programme de R-D. Laboratoire de recherche générique. Fermé en 1995.
	Dôme de sel	Gorleben*. Site de dépôt potentiel. >900 m. Construction des puits de 1985 à 1990. Galeries en construction depuis 1997.
Japon	Sédiments	Tono, galeries d'une ancienne mine d'uranium, laboratoire de recherche souterrain générique, en service depuis 1986.
	Granite	Kamaiishi. Galeries d'une ancienne mine de Fe-Cu. Laboratoire de recherche générique. Achievé en 1998.
	Granite	Mizunami. Laboratoire de recherche générique. Forages en cours.
Suède	Granite	Mine de Stripa, galeries d'une ancienne mine de fer, laboratoire de recherche souterrain générique, 360-410 m., en service de 1976 à 1992.
	Granite	Laboratoire d'Aspo. Recherches génériques. <460 m. Début de la construction en 1990.
Suisse	Granit	Site de test du Grimsel, galerie creusée à partir d'une galerie menant à une centrale hydroélectrique, laboratoire de recherche souterrain générique, 450 m., en service depuis 1983.
	Argile à Opalinus (argile raide)	Projet du Mont Terri. Galerie creusée à partir d'un tunnel d'autoroute. Laboratoire de recherche générique. 400 m. Projet lancé en 1995.
États-Unis	Sel (en couches)	Carlsbad. Nouveau Mexique. WIPP. Laboratoire de recherche spécifique au site. 650 m. En service depuis 1982.
	Tuf soudé	Yucca Mountain. Exploratory Studies Facility. Laboratoire de recherche spécifique au site. 300 m. Début des expérimentations <i>in situ</i> en 1996. Construction d'un tunnel exploratoire terminée en 1998.

* Le laboratoire de Gorleben a été choisi pour mener des recherches en profondeur destinées à démontrer la faisabilité d'un dépôt sur ce site.

- tester des modèles, des méthodes d'exploration et des processus pouvant intervenir lors du transport des radionucléides à travers la roche ;
- simuler les effets de la mise en place des déchets radioactifs (dégagement de chaleur, relâchement de nucléides, effets mécaniques) ;
- démontrer la faisabilité des systèmes de barrières ouvragées ;
- réaliser des expériences sur les processus à long terme, les phases post-fermeture, la corrosion géochimique, la stabilité géomécanique, etc.

Analogues naturels

Les analogues naturels, qui sont des processus naturels proches de ceux qui devraient déterminer les comportements à long terme d'un dépôt, doivent servir à compléter les données tirées de la caractérisation des sites et des mesures effectuées dans les laboratoires souterrains. Pour acquérir la confiance nécessaire, ils peuvent se révéler particulièrement précieux dans la mesure où ils nous permettent de vérifier l'exactitude de nos connaissances de processus qui se déroulent trop lentement ou à une échelle beaucoup trop grande pour qu'on puisse les mesurer directement en laboratoire ou sur le terrain. Il est rare que les données sur les analogues naturels soient utilisées directement dans l'évaluation des performances d'un dépôt étant donné que l'on ignore, par exemple, les conditions initiales du système analogue, ce qui ajoute à la complexité et rend l'interprétation difficile. Ces données peuvent toutefois confirmer les connaissances qualitatives et (plus rarement) quantitatives que l'on a des principaux processus. Elles peuvent, par ailleurs, servir à démontrer que l'on n'a négligé aucun processus ou phénomène à long terme potentiellement important et, d'une manière générale, inspirent confiance dans le comportement géologique d'un dépôt.

Les principaux progrès réalisés au cours des dix dernières années sont les suivants :

- connaissance sur l'oxydation de l'uranium et sur la migration du dioxyde d'uranium grâce à des études sur des sites d'analogues, au Mexique et en Grèce ;

- amélioration des connaissances sur les processus conditionnant le comportement du combustible usé stocké dans un dépôt aménagé dans la roche plutonique, dans un environnement réducteur et protégé par des argiles, grâce aux études menées sur le gisement d'uranium de Cigar Lake, au Canada ;
- démonstration, par des études sur les argiles naturels, du maintien, sur une période très longue, de la capacité de gonflement, de la perméabilité et de la capacité d'échange d'ions de la bentonite, dans les conditions régnant dans un dépôt ;
- démonstration de la stabilité des gels de ciment, de l'absence de colloïdes et d'agents complexants organiques et du niveau très bas de l'activité microbienne, grâce aux études réalisées sur le site de Maqarin en Jordanie ;
- observation de la diffusion de l'uranium dans la matrice rocheuse : granite sur le site d'El Berrocal, en Espagne, roches cristallines, sur le site de Grimsel, en Suisse ;
- validation des données thermochimiques utilisées pour modéliser les interactions entre la roche et l'eau, grâce à l'étude de données géochimiques enregistrées dans les puits pratiqués dans les gisements géothermiques de Wairakei, en Nouvelle-Zélande ;
- Pocos de Caldas, une vaste étude internationale de la solubilité et du transfert des radionucléides dans et autour des gisements d'uranium et de thorium, assortie de tests de modélisation de ces processus ;
- évaluation des méthodes d'analyse des performances dans le cadre du projet d'étude de l'analogue naturel de Palmottu, en Finlande ;
- travaux sur les propriétés de la bentonite dans un gisement de ce matériau en Saskatchewan.

Évaluation des performances

L'aménagement de dépôts géologiques et l'évaluation de leurs performances s'appuient sur des données, des connaissances et des modélisations, et cela à plusieurs niveaux :

- Si l'on veut déterminer la possibilité d'utiliser des formations géologiques pour isoler les déchets de l'environnement humain, il faut acquérir une connaissance générale des propriétés physiques, géochimiques et hydrogéologiques pertinentes d'un large éventail de

formations géologiques adaptées à l'installation d'un dépôt, ainsi que de la façon dont ces propriétés, comme celles de l'environnement à la surface, peuvent évoluer avec le temps.

- Afin d'élaborer et d'évaluer des concepts de dépôts adaptés à différents types de déchets et des environnements géologiques variés, on a besoin d'une compréhension plus fine de procédés tels que l'écoulement des eaux souterraines, le ralentissement et la dispersion des substances radioactives entraînées à travers la roche par les eaux souterraines ainsi que des mécanismes par lesquels ces substances peuvent passer dans la biosphère et atteindre l'homme.
- Enfin, déterminer si l'on peut construire et exploiter un concept particulier de dépôt sur un site donné, en respectant les exigences réglementaires, passe par une caractérisation détaillée du site et une analyse exhaustive du comportement probable, tant à court terme qu'à long terme, de tous les composants du système de dépôt, qu'ils soient naturels ou ouvragés.

Les travaux effectués depuis plusieurs décennies sur le terrain, en laboratoires – notamment souterrains – et sur les sites d'analogues naturels, souvent dans des cadres internationaux, ont permis d'acquérir une somme de connaissances dans ce domaine particulièrement difficile de la science et de la technologie, en grande partie grâce aux techniques les plus avancées de mesure et d'analyse. Les méthodes évoluées de traitement et d'interprétation des données permettent d'affiner les informations obtenues. En outre, il est devenu possible, par des calculs mathématiques sur des ordinateurs puissants, de prévoir avec précision les performances de systèmes complexes ainsi que les éventuelles conséquences de toute incertitude subsistant dans les données.

Une bonne partie des recherches sur le milieu naturel réalisées ces dix dernières années, ont porté sur les éléments conducteurs d'eau et l'écoulement des eaux souterraines dans des milieux géologiques pressentis pour des dépôts. D'autres facteurs importants pour les évaluations de la sûreté, comme l'étude hydrogéochimique et l'analyse du rôle des colloïdes, des matières organiques et d'éventuels processus microbiens, ont également attiré l'intérêt des chercheurs.

La spécification de critères techniques permettant d'évaluer l'acceptabilité de roches hôtes potentielles du point de vue de la sûreté (y compris, en Suède, de critères d'acceptation pour des alvéoles de stockage individuelles) a bien avancé. La définition de ces critères avant le lancement d'un programme de reconnaissance présente le double intérêt de guider l'exécution de ce programme et d'inspirer confiance au public, dans la mesure où elle offre la démonstration que les responsables du projet seraient prêts à abandonner ce site s'il se révélait

Progrès de la connaissance des composants du système

Pour procéder à l'analyse des performances d'un système intégré de dépôt, il faut impérativement posséder une connaissance quantitative suffisante du comportement du colis de déchets, des structures ouvragées qui l'entourent, de la roche hôte et de la biosphère. À chacun de ces éléments sont associées une ou plusieurs fonctions de sûreté. La barrière géologique, par exemple, joue un double rôle : elle fait obstacle au relâchement et au transport de nucléides et, en tant qu'environnement stable, elle vient compléter le système de barrières ouvragées qu'elle protège sur des périodes prolongées.

Chacune de ces barrières peut avoir des fonctions de sûreté différentes suivant le moment. Par exemple, les fûts en acier peuvent assurer, dans une première phase, un parfait confinement des radionucléides, après quoi il est possible que les produits de la corrosion de ces conteneurs créent des conditions chimiques favorisant la rétention du nucléide au sein du remblayage. C'est pourquoi, on a tendance aujourd'hui à considérer les différents éléments d'un dépôt comme complémentaires et non indépendants les uns des autres. Cette conception est à opposer à la description traditionnelle des dépôts, fondée sur l'analogie avec les poupées gigognes, à savoir des séries de barrières indépendantes. De toute évidence, ces éléments doivent être compatibles : les matériaux de remblayage par exemple doivent présenter une compatibilité géochimique avec l'environnement géologique. À travers l'évaluation des performances, de nombreux programmes nationaux et internationaux ont cherché à mieux comprendre ces fonctions de sûreté et leur importance relative.

Concernant les performances de chacune de ces barrières, des progrès importants ont été réalisés dans :

- la compréhension des mécanismes de dégradation des colis de déchets ;
- la modélisation des processus qui peuvent entraîner la détérioration et la rupture des conteneurs, devenue plus réaliste ;
- la modélisation des ruptures précoces de conteneurs ;
- l'utilisation de codes et de données géochimiques pour simuler les processus chimiques intervenant dans l'eau porale ;
- la compréhension des effets de l'évolution thermique du dépôt ;
- la modélisation 3D de l'écoulement des eaux souterraines, reproduisant aussi les effets de la densité et les effets transitoires, et l'utilisation de modèles intégrant la variabilité naturelle des milieux hydrogéologiques et reposant sur des données *in situ* ;
- la modélisation du transport dans la géosphère à travers les milieux fracturés et non saturés et les tests de ces modèles à l'aide de données *in situ* ;
- la modélisation sur des bases plus solides de la stabilité de la géosphère, en rapport avec le changement climatique, la sismicité et le volcanisme ; des effets des colloïdes et des rejets facilités par la présence de gaz, ainsi que des interactions entre les composants du dépôt.

inacceptable. Inversement, l'adoption de critères irréalistes, ou par trop simplistes, risquerait de provoquer l'abandon d'un site qui, pourtant, satisfait à la réglementation.

L'évaluation intégrée des performances est l'une des évolutions les plus importantes des dernières années. On entend par là le fait d'intégrer l'évaluation des performances, la sélection et la caractérisation du site et la conception du dépôt. Il est largement admis qu'une communication efficace doit s'instaurer entre les responsables de l'évaluation des performances et les spécialistes de la caractérisation du site. Si bien que l'on peut aujourd'hui constater, dans la plupart des programmes d'évacuation, une intégration étroite des travaux des géologues, des hydrogéologues, des concepteurs et des auteurs des modèles d'évaluation des performances. Par exemple, plusieurs organisations utilisent les résultats des évaluations des performances pour optimiser leur programme de caractérisation des sites et d'étude en laboratoire mais aussi pour évaluer et améliorer la configuration du dépôt. Cette intégration permet d'axer la caractérisation du site sur les aspects importants pour la sûreté et d'éviter de choisir des sites, des conceptions, voire de développer des modèles, pour lesquels il serait probablement impossible d'obtenir les données nécessaires à la démonstration de la sûreté du système.

Globalement, on est de plus en plus convaincu que les évaluations des performances constituent aujourd'hui une base fiable pour juger de l'acceptabilité d'un site et d'une conception de dépôt du point de vue de la sûreté.

Un groupe de travail de l'AEN a revu une sélection d'évaluations des performances réalisées entre 1991 et 1996 et en a conclu :

- que l'Opinion collective de l'AEN/AIEA/CCE de 1991 reste valable, en d'autres termes que « l'on dispose à l'heure actuelle de méthodes d'analyse de la sûreté permettant d'évaluer de façon adéquate les incidences radiologiques potentielles à long terme, sur les êtres humains et l'environnement, d'un système d'évacuation de déchets radioactifs soigneusement conçu » ;
- que, bien que l'utilisation plus fréquente de données provenant de sites réels et la spécification plus détaillée de la conception des dépôts aient présenté de nouvelles difficultés et nécessité davantage de ressources que les analyses des performances antérieures, l'application des méthodes d'évaluation des performances n'a pas posé de nouveaux problèmes insurmontables ;

- que l'on avait particulièrement bien progressé dans les domaines suivants : compréhension des performances et composants des systèmes et de leur rôle respectif, traitement des incertitudes, présentation des résultats des évaluations et exploitation de ces résultats lors du choix et de la caractérisation des sites et lors de la conception des dépôts.

Accroître la confiance

En général, on peut dire que les modèles utilisés pour évaluer les performances des barrières ouvragées et géologiques inspirent davantage confiance et que les modélisations correspondantes sont plus réalistes qu'il y a dix ans. Des expériences à grande échelle réalisées dans des laboratoires souterrains ont permis de tester les modèles des barrières ouvragées et de l'hydrogéologie de la géosphère. La modélisation de la barrière géologique a, elle aussi, bien progressé. La variabilité naturelle est prise en compte de façon plus réaliste dans les modèles de transport dans la géosphère, et l'on connaît mieux la nature des éléments conducteurs d'eau sur une gamme d'échelles ainsi que l'interface entre le système de barrières ouvragées et la géosphère. Des études de la zone perturbée par l'excavation, réalisées dans des laboratoires souterrains, permettent maintenant de modéliser cette interface avec davantage de fiabilité.

Toutefois, il subsiste d'importantes incertitudes dans la modélisation de tous les aspects du comportement du système de dépôt géologique. Parmi les problèmes rencontrés, on peut citer la variabilité naturelle des roches hôtes, la difficulté de déterminer l'évolution, sur de très longues périodes, des écoulements d'eaux souterraines et des propriétés de la roche et le fait que les modèles sont difficiles à tester sur des échelles spatiales et temporelles pertinentes.

On peut classer de la manière suivante les sources d'incertitude dans les évaluations des performances ainsi que les principales méthodes de traitement de ces incertitudes :

- incertitudes sur les données, traitées par la méthode bien connue de l'analyse de sensibilité ;
- incertitudes dans les modèles, traitées par la validation et la vérification, par exemple en utilisant les modèles pour effectuer des prévisions qui seront ensuite comparées aux données observées, ou en procédant à des comparaisons avec des modèles analogues mais

indépendants ou des calculs directs réalisés sans utiliser de codes de calcul ;

- incertitudes quant à l'évolution à long terme du dépôt, de l'environnement et des comportements humains, que l'on traite en analysant un large éventail de scénarios, compte tenu des probabilités de ces scénarios.

Bien que le constructeur du dépôt puisse émettre des suggestions quant à la façon de traiter ces incertitudes, il relève de l'autorité de réglementation et d'autres décideurs concernés de juger de la valeur du traitement appliqué, dès lors que les résultats doivent servir à des comparaisons avec les critères de réglementation.

Présentation des résultats des évaluations

La présentation des résultats pose aux organisations concernées par les évaluations des performances un certain nombre de problèmes liés, par exemple, aux longues échelles de temps sur lesquelles portent ces évaluations. La présentation devient particulièrement difficile si l'on utilise des méthodes d'évaluation probabilistes, dans la mesure où il faut parvenir à faire ressortir les principales conclusions de la multitude de résultats obtenus.

Bien que le contenu exact d'un rapport d'évaluation des performances dépende de contraintes pratiques, spécifiques au programme considéré, il existe un consensus quant aux éléments à faire figurer dans ce type de rapport. Les aspects suivants sont les plus importants :

- la traçabilité : un relevé clair et complet des décisions et des hypothèses adoptées, des données et modèles utilisés, pour parvenir à un ensemble donné de résultats ;
- la transparence : l'établissement d'un rapport clair sur l'évaluation des performances, en veillant à ce que le lecteur puisse bien comprendre ce qui a été fait, les résultats obtenus et pourquoi les résultats sont ce qu'ils sont.

Les progrès réalisés ces dix dernières années concernent :

- la représentation graphique des résultats de l'évaluation, qui met en évidence les performances des différents composants du système et les performances globales ;

- les méthodes illustrant les déplacements des radionucléides dans le système en fonction du temps ;
- l'utilisation de modèles simplifiés qui reproduisent et expliquent le comportement des radionucléides importants en fonction de principes physiques et chimiques simples ;
- la rédaction de rapports spécifiques adaptés à différents publics ;
- la comparaison des résultats de l'évaluation avec les risques associés à d'autres activités humaines ;
- la nécessité de justifier la confiance que l'on a dans les résultats de l'évaluation des performances ;
- la prise de conscience de la nécessité de joindre aux conclusions de l'évaluation des performances des avertissements appropriés quant aux limites de sa portée technique et à l'incidence potentielle de ces limites sur l'analyse.

En dépit de ces progrès, plusieurs organisations admettent que la présentation des résultats doit encore être perfectionnée, notamment pour l'adapter à la diversité des publics.

Chapitre 4

PROGRÈS VERS L'AMÉNAGEMENT DE DÉPÔTS

Résumé

Malgré les avancées importantes enregistrées dans certains pays sur la voie de la construction de dépôts en formations géologiques, la progression a été plus lente qu'on ne le prévoyait il y a dix ans, et plusieurs pays ont connu d'importantes difficultés.

Des dépôts ont été aménagés pour de nombreux types de déchets radioactifs, à l'exception notable des déchets à vie longue, en particulier le combustible nucléaire usé et les déchets de haute activité.

- Entre 1967 et 1978, l'Allemagne a stocké des déchets de faible activité dans la mine de sel d'Asse, dans le cadre d'un projet de démonstration, et un dépôt de déchets de faible et moyenne activité a été mis en service en 1981 dans le dôme de sel de Morsleben, mais son exploitation a été interrompue. Ces deux installations sont aménagées à plus de 500 mètres de profondeur. La procédure d'autorisation de 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. Les alvéoles de stockage ont été creusées dans un socle granitique à 60 mètres environ sous le fond de la mer Baltique. On y accède depuis la terre par une galerie. 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 100 mètres environ 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 à 50 mètres de profondeur dans le socle rocheux.

- Mais l'événement le plus notable est la délivrance, en 1999, aux États-Unis, des autorisations nécessaires à la mise en exploitation du Waste Isolation Pilot Plant (WIPP), au sud-est du Nouveau Mexique, où sont stockés les déchets produits dans le cadre des programmes militaires. Les déchets à stocker contiennent une bonne proportion d'éléments à vie longue, bien qu'en soient exclus les déchets de haute activité thermogènes. L'installation des déchets dans les cavités aménagées à 650 mètres de profondeur dans une formation saline se déroule actuellement. Le premier arrivage de déchets a été installé, le 26 mars 1999, dans ce qui constitue le premier dépôt en formation géologique profonde de déchets à vie longue jamais aménagé à cet effet dans le monde.

Les pays qui ont le plus avancé sur la voie de l'évacuation géologique des déchets à vie longue sont les États-Unis et la Scandinavie.

- Les États-Unis ont mené un programme complet de travaux de 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. Une évaluation complète de la viabilité de ce site (Viability Assessment) a été soumise au Congrès en décembre 1998. 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.
- En Finlande, une commune a accepté d'accueillir un dépôt national. Une décision de principe du gouvernement concernant le choix du site sera arrêtée en 2000.
- La Suède prévoit d'entreprendre des recherches sur deux sites au tout début du XXI^e siècle.

La Belgique, la France et le Japon travaillent dans ce domaine, mais ont encore beaucoup de chemin à parcourir avant de pouvoir aménager des dépôts.

Certains pays ont connu des difficultés. Ailleurs, l'avenir des projets de dépôts en formations géologiques est incertain.

- Au Canada, une commission indépendante, dans son rapport au gouvernement sur l'examen du concept de stockage géologique des déchets de combustible nucléaire, conclut que « d'un point de vue

technique, la démonstration de la sûreté du concept a été, tout bien soupesé, jugée suffisante ». Mais elle observe également que « la démonstration n'a pas été faite que le concept de stockage permanent en formations géologiques profondes jouit d'un vaste appui du public », et que « sous sa forme actuelle, ce concept n'a pas le degré voulu d'acceptabilité pour être adopté comme mode canadien de gestion des déchets de combustible ». Des réformes organisationnelles et un processus de consultation approfondi sont notamment recommandés.

- Les Allemands ont bien avancé l'étude entreprise pour déterminer les possibilités d'installer, dans l'important dôme de sel de Gorleben, un dépôt où seraient stockées toutes sortes de déchets, dont le combustible usé et les déchets de haute activité. Des puits verticaux ont été excavés jusqu'à 960 mètres de profondeur. Cependant, le gouvernement fédéral actuel a annoncé son intention de mettre fin à la production électronucléaire et de revoir les solutions possibles pour la gestion à long terme des déchets. Si l'on reconnaît que l'on aura besoin un jour de dépôts en formations géologiques profondes, l'incertitude règne quant au calendrier de leur mise en place et aux décisions politiques concernant la poursuite des projets de dépôts.
- Après le rejet, en 1997, de la demande de construction d'une installation de caractérisation des roches (RCF) à Sellafield, qui devait marquer un pas vers la construction d'un dépôt en profondeur, le Royaume-Uni se trouve dépourvu de plan pratique pour l'évacuation définitive des déchets à vie longue. Une commission d'enquête de la Chambre des Lords a depuis confirmé la faisabilité et l'intérêt de l'évacuation géologique, tout en insistant sur la nécessité d'obtenir l'assentiment du public. Comme au Canada, une vaste consultation et des réformes organisationnelles sont recommandées.
- En Suisse, la proposition d'aménager un dépôt géologique pour les déchets de faible et moyenne activité au Wellenberg a été rejetée lors d'un référendum cantonal. On envisage aujourd'hui de soumettre une nouvelle proposition modifiant le processus de conception et de réalisation.

Chapitre 5

PERSPECTIVES ET DÉFIS

Résumé

Au cours des dix dernières, les progrès notables enregistrés ont renforcé la conviction des gestionnaires de déchets que la construction de dépôts en formations géologiques est la solution la plus appropriée pour l'évacuation des déchets à vie longue. Bien qu'il importe de poursuivre les recherches scientifiques et techniques à très haut niveau, les technologies nécessaires pour construire et exploiter les dépôts sont suffisamment mûres pour être mises en œuvre.

La lenteur avec laquelle cette technologie est mise en pratique peut s'expliquer en partie par une attitude antérieure optimiste concernant des problèmes techniques comme la caractérisation géologique et l'acquisition d'une bonne connaissance de sites réels, dont on a sous-estimé la difficulté. En outre, le poids de la réglementation – qui exige de prouver, avec un pourcentage d'erreur minimale, que les normes de sûreté très sévères seront respectées sur des échelles de temps considérables avec, de surcroît, une traçabilité et une transparence suffisantes – n'a vraiment été perçu qu'au moment où il a fallu présenter des propositions spécifiques et les soumettre au contrôle réglementaire.

Plus critiques sont les difficultés rencontrées parce que l'on a sous-estimé les dimensions politique, publique et réglementaire des projets de dépôts. D'une manière générale, le public ne partage pas la confiance que leur accorde la communauté scientifique et technique.

La confiance que l'on a dans les décisions concernant les dépôts en formations géologiques repose sur la conviction technique de la sûreté du dépôt, sur la certitude de la valeur morale, économique et sociale de l'évacuation géologique et sur la confiance dans les structures organisationnelles, les cadres juridiques et les procédures d'examen réglementaires.

Les responsables sont de plus en plus conscients que la confiance du public et des décideurs politiques à l'égard de la sûreté des dépôts, de la compétence des responsables de la réglementation et des gestionnaires, de la justification et de l'acceptabilité du processus de décision passe par l'adoption d'une approche par étapes de la planification, de la délivrance des autorisations et de l'aménagement des dépôts, qui tient compte de l'aversion du public pour des phases importantes irréversibles.

Les options telles que l'entreposage de longue durée, mais aussi la séparation et la transmutation, peuvent être intégrées à une stratégie globale de gestion des déchets mais ne remplacent pas la nécessité de stocker définitivement les déchets.

Confiance dans les aspects scientifiques, techniques et réglementaires

Au cours des dix dernières années, d'importants progrès scientifiques et techniques ont été accomplis sur la voie du stockage géologique, grâce aux travaux d'envergure entrepris dans le cadre des programmes nationaux. Malgré les difficultés rencontrées, et bien que certains pays aient décidé de reporter leurs programmes d'implantation ou s'interrogent sur la valeur du site choisi, aucune nation n'est pour l'instant revenue sur sa décision d'enfouir ses déchets dans des formations géologiques.

La confiance des spécialistes de la gestion des déchets dans le concept et la faisabilité de l'évacuation en formation géologique a été renforcée par les évolutions suivantes :

- les progrès de la connaissance des processus influant sur la sûreté qu'ont permis la caractérisation des sites et la recherche, y compris les travaux réalisés dans les laboratoires souterrains et sur les analogues naturels ;
- la mise au point de concepts détaillés de dépôts dans de nombreux pays ;
- la démonstration de la sûreté des concepts de dépôts par des méthodes rigoureuses d'évaluation de la sûreté ;
- la vérification de ces évaluations par des groupes d'experts nationaux et internationaux indépendants ;
- l'élaboration et, dans certains cas, la démonstration des technologies nécessaires à la réalisation des dépôts géologiques.

Toutefois, si les technologies sont au point, il est néanmoins nécessaire de poursuivre les recherches scientifiques et techniques de haut niveau, pour affiner les concepts de base, tester, démontrer, mettre en œuvre, surveiller et contrôler la qualité. De nouvelles recherches doivent être entreprises afin de réduire les incertitudes, de caractériser un éventail plus large de sites et de formations géologiques, d'optimiser et d'améliorer les performances économiques de la caractérisation des sites et de faciliter l'application des connaissances actuelles à de nouveaux milieux géologiques, flux de déchets et concepts de dépôts. Il s'agit là de tâches de longue haleine. Les sections suivantes font la synthèse des défis que réserve l'avenir et des tendances susceptibles de se dessiner dans un certain nombre de domaines.

Caractérisation des sites

Il faudra affiner des techniques de mesure qui n'altèrent pas les caractéristiques des roches étudiées. Pour les pays sur le point de mettre en place un processus systématique d'implantation de dépôts, comme le Canada, le développement d'outils électroniques de cartographie géologique et de méthodes d'intégration de données provenant de capteurs à distance et de sources en surface constitue une priorité. Parmi les autres domaines où des efforts supplémentaires sont requis, on peut mentionner :

- la compréhension des effets possibles de cheminements peu fréquents mais influant fortement sur le transport des radionucléides ;
- le recensement des infiltrations et des recharges en eaux souterraines (dans le cas du projet de Yucca Mountain, aux États-Unis) ;
- la détermination de l'influence des gaz produits à l'intérieur du dépôt sur les propriétés de confinement des formations hôtes ;
- la caractérisation des colloïdes naturels ;
- la quantification des effets des matières organiques, en tant qu'agents complexants, sur la migration des radionucléides ;
- l'évaluation des effets des modifications naturelles et induites de la géosphère ;
- l'identification des caractéristiques du site qui présentent de l'intérêt pour l'optimisation du concept de dépôt.

Laboratoires de recherche souterrains

La portée des travaux sur les laboratoires de recherches génériques est en train d'évoluer. Les études fondamentales de faisabilité et l'accumulation de données géologiques cèdent progressivement la place à l'optimisation des méthodologies et à l'expérimentation des principaux modèles d'évaluation des performances. La plupart des travaux effectués dans les laboratoires de recherche spécifiques à un site visent plus directement à modéliser les performances du système à cet endroit précis. On prépare actuellement des expériences de démonstration en vraie grandeur sur des systèmes de barrières ouvragées destinés aux déchets de haute activité et au combustible usé. Cela traduit l'accent mis actuellement sur les systèmes de barrières ouvragées dans certaines évaluations des performances, que nous avons évoqué précédemment.

Évaluations des performances

Les travaux futurs concernant l'évaluation des performances, sur laquelle repose le dossier technique de sûreté, devraient comprendre :

- des études de la sorption des radionucléides par les produits de corrosion des conteneurs, phénomène qui peut contribuer pour beaucoup à la sûreté de certains concepts de dépôts mais que l'on ne peut pas encore prendre en compte dans l'évaluation des performances, faute de données suffisantes ;
- l'approfondissement des événements et changements géologiques et climatiques, maintenant que l'on sait mieux mesurer l'incidence des événements climatiques, volcaniques et sismiques sur les performances d'un système ;
- le traitement des phénomènes couplés (thermiques, chimiques, mécaniques et hydrologiques) pouvant influencer, par exemple, sur les caractéristiques d'un remblayage et sur son comportement à long terme ;
- des travaux sur l'impact des gaz produits par les matériaux du dépôt, y compris les déchets, sur les performances du système ;
- des travaux sur la capacité des colloïdes de favoriser la migration des radionucléides.

Si les progrès de la connaissance de ces différents aspects contribuent évidemment à asseoir la confiance dans la sûreté d'un dépôt, on est en droit de se demander quand cette confiance sera jugée suffisante. L'évaluation

quantitative des dépôts comporte inévitablement des incertitudes, en particulier sur les très longues périodes de temps concernées, à savoir des milliers, voire des millions, d'années. Par conséquent, il est de plus en plus admis que, pour être digne de confiance, une évaluation des performances doit respecter les deux principes suivants :

- Le système de dépôt doit posséder une sûreté intrinsèque, reposant sur une conception simple mais robuste et sur le choix d'un site judicieux, de sorte que les incertitudes relatives aux caractéristiques d'un composant spécifique quelconque n'aient qu'une influence marginale sur les performances à long terme du dépôt.
- L'évaluation des performances doit présenter le niveau requis de qualité et de fiabilité. Pour ce faire, il est possible de recourir, par exemple, à des modèles d'évaluation des performances suffisamment éprouvés intégrant des hypothèses prudentes en cas d'incertitude, ainsi qu'à des bases de données provenant de mesures vérifiables.

Chaque fois que, pour obtenir davantage de garanties et améliorer la sûreté, seront proposés des systèmes de barrières ouvragées, avancés et plus complexes, il s'agira de déterminer si les marges de sûreté supplémentaires que devraient apporter de tels systèmes compensent les incertitudes supplémentaires que présente l'évaluation du comportement de ces barrières et de leurs interactions avec d'autres composants du système. On en trouve une illustration dans l'idée d'utiliser un système complexe de barrières ouvragées à multiples composantes – des conteneurs composites, un remblayage en bentonite spécialement traitée et des couches intermédiaires en matériaux différents – pour des déchets destinés à un environnement saturé. Il conviendra de bien peser l'intérêt de ces concepts par rapport à des structures présentant des comportements physiques et chimiques plus simples.

Analogues naturels

L'intérêt majeur de l'observation des analogues naturels tient à son effet positif sur la confiance des spécialistes étant donné les périodes extrêmement longues sur lesquelles ces systèmes ont évolué. On peut prévoir, dans ce domaine, une multiplication des comparaisons quantitatives entre les prévisions effectuées à partir de modèles et les observations, ainsi qu'une meilleure intégration des analogues naturels dans les évaluations des performances. Les États-Unis ont pour projet d'utiliser des données sur des analogues naturels, tirées, par exemple, de nouvelles études à Pena Blanca, au Mexique, durant les phases d'autorisation et les étapes ultérieures de l'aménagement de dépôts. Les

observations d'artefacts archéologiques peuvent servir à démontrer la durabilité de certains des matériaux utilisés pour construire les structures ouvragées d'un dépôt. Des études sur le cuivre et l'acier, la bentonite et divers types de ciment et de béton ont permis d'acquiescer davantage de confiance dans la capacité de ces matériaux de garantir le confinement à long terme des déchets dans les conditions représentatives d'un dépôt.

Dépôts mixtes

Dans certains pays, les concepts de dépôts ont été appliqués à l'évacuation des déchets de haute activité et du combustible usé, voire à d'autres flux de déchets à vie longue. La gamme des différents types de déchets étudiés inclut, de ce fait, les déchets entreposés depuis de nombreuses années et les déchets issus du déclassement. Le Royaume-Uni, par exemple, a lancé un programme pour reprendre, conditionner et enrober les déchets résultant des premiers programmes de recherche nucléaire, et les États-Unis ont, pour leur part, engagé un vaste programme concernant les déchets nucléaires et chimiques hérités de plus de 50 ans de production d'armes et de recherche nucléaire et dont certains devront être stockés dans un dépôt de déchets de haute activité. Aux États-Unis, les excédents de matières nucléaires de qualité militaire devront également être traités et évacués après la réduction de l'arsenal nucléaire.

Réglementation

La mise en place de cadres politiques et juridiques nationaux stables, définissant les processus de décision sur les longues périodes nécessaires à l'aménagement d'un dépôt géologique, constitue un facteur de confiance fondamental. Plusieurs pays disposent déjà de ces cadres, notamment les États-Unis, la France et la Finlande. Ailleurs, la situation est moins claire. La Convention commune sur la sûreté de la gestion du combustible usé et sur la sûreté de la gestion des déchets radioactifs, conclue en 1997 sous les auspices de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), peut contribuer à relancer, si besoin est, l'établissement de politiques nationales.

Gagner la confiance de la société civile

Les opinions exprimées par un large échantillon de spécialistes de la gestion des déchets viennent confirmer l'idée qu'aujourd'hui, et dans un avenir prévisible, l'évacuation géologique est la seule option réellement disponible qui

puisse garantir la sûreté et la sécurité des déchets pendant plusieurs dizaines de milliers d'années, voire plus.

Ces dernières années, les gestionnaires de déchets ont parfaitement compris qu'il ne suffisait pas de tabler sur leur savoir et sur leurs convictions techniques pour justifier, aux yeux du public, la solution de l'évacuation géologique ou réussir sa mise en œuvre. Étant donné la sensibilité de ce dernier vis-à-vis de tout ce qui concerne la protection de l'environnement, l'énergie nucléaire et, tout particulièrement, les déchets nucléaires, mais aussi l'impératif de longévité qui s'attache au concept de dépôt, les décisions à prendre, à savoir procéder ou non à la mise en dépôt, quand et comment le faire, passent par une consultation approfondie du public et par sa participation accrue au processus.

L'acceptabilité d'une stratégie de gestion des déchets à long terme telle que l'évacuation géologique a des dimensions éthique, économique, politique et technique. C'est à la société ou aux gouvernements qu'il revient de prendre une décision, après consultation d'une variété d'organisations concernées et en tenant compte des points de vue exprimés par le public. La certitude de la valeur morale, économique et politique du concept d'évacuation géologique ne peut s'acquiescer hors contexte. Elle s'inscrit dans un examen général du concept qui ne saurait exclure l'évaluation d'autres stratégies.

Le jugement doit s'appuyer sur une vision globale des solutions ne négligeant pas les données pratiques du problème. Aucune société ne parviendra à un consensus général. Il incombe en dernier ressort aux gouvernements de prendre des décisions qui jouissent d'un soutien suffisant du public et définissent le cadre dans lequel seront adoptées les mesures qui s'imposent.

Outre la conviction technique de la sûreté du dépôt, évaluée par les décideurs des organismes de gestion des déchets et des autorités réglementaires, la mise en œuvre de l'évacuation géologique exige :

- que le public soit assuré que la structure organisationnelle, le cadre juridique et les procédures d'examen réglementaires contribuent à la mise en place d'un processus de décision bien défini, logique et fiable ;
- que la communauté technique élargie et le public soient convaincus de l'éthique, tout comme de l'intérêt économique et social, de l'évacuation en formation géologique ;
- que l'on soit sûr de pouvoir disposer de financements suffisants à toutes les étapes de l'évacuation.

Approche par étapes de la planification, de la délivrance des autorisations et de la mise en œuvre

La planification, la mise au point technique et les recherches associées, la recherche d'un site, la construction et, finalement, l'autorisation d'exploitation d'un dépôt en formation géologique devraient prendre plusieurs dizaines d'années. On sait depuis longtemps que le dossier de sûreté du dépôt sera constitué progressivement, par étapes, au cours de cette période, à mesure que la conception se précisera, que les phénomènes influant sur la sûreté du dépôt seront mieux connus et que les données s'accumuleront.

Il est de plus en plus admis que la décision de consacrer des ressources à chaque étape du développement d'un dépôt ne peut intervenir si le dossier de sûreté n'a pas atteint un niveau de fiabilité suffisant. La mise au point progressive du dépôt et du dossier de sûreté correspondant est aussi l'occasion de mettre en place un système graduel de contrôle réglementaire et de réflexion sociale. Des étapes discrètes, aisément contrôlables, facilitent la traçabilité des décisions, permettent aux responsables de la réglementation ou au public d'intervenir et sont de nature à convaincre le public et les décideurs politiques de la sûreté des installations et de la compétence des responsables de la réglementation et des gestionnaires de déchets. La confiance que suscite une approche par étapes peut aussi, dans une certaine mesure, résulter de l'observation du comportement du système sur des périodes plus longues.

Confiance dans les décisions concernant les dépôts

- Certitude généralement partagée de la valeur morale, économique et politique de l'option de l'évacuation géologique
- Confiance dans la faisabilité et la sûreté à long terme de l'évacuation (dossier de sûreté et justification de la confiance)
- Confiance dans les structures organisationnelles, le cadre juridique et les procédures d'instruction réglementaire des projets de dépôts, y compris accord sur les étapes de ce processus.

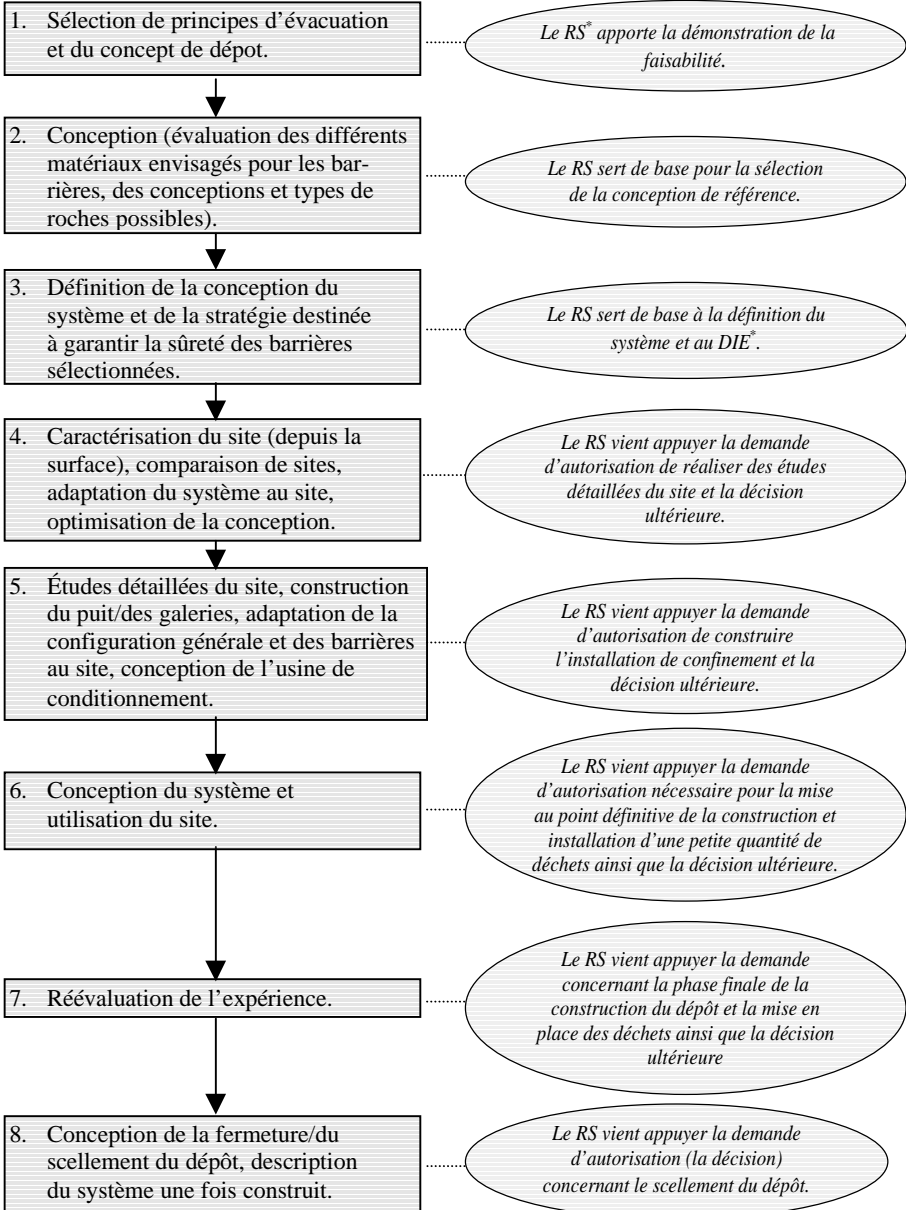
Il est également possible d'appliquer l'approche par étapes à l'exploitation de l'installation. Dans ce cas, la mise en place de la configuration définitive, une fois tous les déchets en place et le dépôt scellé de façon à offrir une sûreté passive maximale, s'effectue pas à pas, ou avec souplesse, de façon à reporter les étapes difficilement réversibles. En Suède, par exemple, on propose de ne stocker dans un premier temps que 10 % du combustible nucléaire utilisé, puis de marquer une pause de quelques années afin de faire le bilan de l'expérience ainsi acquise et de surveiller les déchets stockés. D'autres pays ont considéré la possibilité de placer les déchets dans les dépôts, puis d'attendre pour remblayer ou fermer les galeries souterraines (par exemple, la Suisse, le Royaume-Uni et les États-Unis). Cette solution permet de créer des stockages souterrains d'où les déchets pourront être facilement retirés, le cas échéant, ou qui, au contraire, seront fermés sans difficulté, si l'on en décide ainsi.

Cette démarche est illustrée sur la Figure qui décrit la série d'étapes envisagée en Suède.

L'approche graduelle trouve sa source dans une aversion prononcée du public pour les grandes étapes irréversibles. En Suisse, par exemple, l'une des principales raisons du résultat négatif du référendum concernant le site du Wellenberg tient à ce que le public aurait préféré que le permis de construction soit délivré, dans un premier temps, pour une galerie d'exploration, et non pour le dépôt final.

L'intérêt d'un mécanisme de contrôle graduel, ouvert et conduit par une autorité respectée, est que les propositions du maître d'œuvre du dépôt sont soumises à une vérification technique approfondie, au nom du public. À certaines étapes importantes, il faudra peut-être associer plus directement le public. Son intervention pourrait prendre des formes diverses : vastes consultations avec des organisations nationales portant sur des thèmes stratégiques, débats approfondis avec les communautés directement concernées et leurs représentants s'il s'agit d'examiner des évolutions concernant un site donné, ou un débat au Parlement pour juger des progrès accomplis et prendre des décisions engageant l'avenir.

Les diverses étapes du développement d'un système de dépôt profond (un exemple suédois)



* RS = Rapport de sûreté; DIE = Dossier d'impact sur l'environnement

Réversibilité du dépôt et possibilité de reprise des déchets

Le message important que les gestionnaires de déchets ont du mal à faire passer est que les déchets ne seront jamais installés dans des dépôts souterrains si leur sûreté n'est pas garantie et, de plus, que le stockage géologique est réversible. La réversibilité peut être l'un des objectifs à toutes les étapes de la gestion des déchets :

- dans la mesure du possible, les déchets ne doivent pas être conditionnés sous une forme qui interdise de profiter des progrès technologiques futurs ;
- il convient de ne pas choisir définitivement un site, tant que différentes options n'ont pas été explorées ;
- la conception du dépôt ne doit pas être gelée trop tôt ;
- la mise en service, l'exploitation et la fermeture d'un dépôt doivent toutes s'effectuer par petites étapes, autorisant un examen complet des conséquences de ces opérations.

La reprise de déchets qu'on avait évacués, soit un retour complet en arrière du processus de mise en dépôt, constitue peut-être le problème le plus ardu et le plus controversé. Dans la pratique, c'est-à-dire du point de vue technique, il peut y avoir incompatibilité entre une reprise facile et un confinement maximal. Sous l'angle économique, prévoir une future reprise nécessite de provisionner des fonds pour financer les technologies d'évacuation que l'on utilisera ultérieurement en remplacement. Néanmoins, depuis que s'impose l'idée qu'il faut laisser ouvertes toutes les options, les responsables de la gestion des déchets se préoccupent davantage d'évaluer les possibilités de reprise.

La difficulté et le coût de la récupération des déchets en toute sécurité dépendent des spécificités du concept de dépôt et des matériaux utilisés. Au Royaume-Uni et en Suisse, par exemple, la faible résistance du matériau de remblayage à base de ciment auquel il est fait référence ci-dessus pourrait faciliter la reprise des déchets au cas où celle-ci se révélerait nécessaire.

Pour ce qui concerne les déchets à vie longue, les gouvernements des Pays-Bas, de la France et des États-Unis ont recommandé ou exigent un examen des possibilités de reprise des déchets (sur une période limitée après la mise en dépôt des déchets). Dans des pays comme la Suède, la Suisse, le Canada et le Royaume-Uni, les gestionnaires de déchets ont compris le message que

cherchaient à faire passer le public et les hommes politiques et ont eux-mêmes prévu des dispositions garantissant la possibilité de récupérer les déchets sur des délais plus longs qu'ils ne l'avaient envisagé au départ. Les périodes explicitement considérées couvrent la durée d'exploitation du dépôt et un laps de temps de l'ordre d'une centaine d'années environ au-delà.

Toutefois, l'opinion qui prévaut dans la communauté technique est la suivante : l'évacuation des déchets suppose leur mise en dépôt sans intention de les reprendre, et le fait de prévoir leur récupération ne doit pas compromettre les performances à long terme du dépôt. À l'heure actuelle, cette récupération est cependant considérée comme extrêmement improbable et exigerait en tout cas que l'on en mesure les conséquences par rapport aux avantages, le moment venu.

La réversibilité du dépôt et la reprise des déchets, leur sûreté et leur sécurité ainsi que leurs dimensions éthique, sociologique et technique, représentent certainement, d'après le membre de la CE qui a répondu à un questionnaire de l'AEN, « une question qui mobilise l'attention » depuis quelques années et justifieraient que la communauté internationale se prononce clairement sur leurs implications.

Problèmes de société

L'évacuation en formations géologiques soulève des problèmes de société tels qu'il est indispensable de tenir le public pleinement informé des enjeux et de l'associer le plus largement possible à la prise de décisions. Si la responsabilité des affaires publiques et de la politique revient en dernier ressort à la société et aux gouvernements, il faut que les spécialistes de la gestion des déchets soient disposés à s'engager dans des activités à la frontière entre le technique, la chose publique et le politique et à admettre que les échanges se fassent à double sens. En d'autres termes, le technicien doit informer sur les exigences, contraintes et options pratiques, mais aussi être à l'écoute et s'efforcer de répondre aux attentes du public et aux préoccupations politiques, ce qui l'amènera à aborder des sujets ne relevant pas de la technique.

La mise en œuvre de contrôles institutionnels, notamment la protection et la surveillance des sites, illustre les possibilités d'intervention de la société dans le processus de décision. Si l'évacuation géologique est conçue comme un dispositif dont la sûreté est garantie de façon passive, sans nécessiter de contrôle à long terme, cela ne veut pas dire que la génération actuelle et les prochaines seront dispensées de surveiller les dépôts et d'en assurer la maintenance. Il appartient aux responsables de l'évacuation des déchets de mettre en place les

mesures qui pourraient s'avérer nécessaires et de s'assurer qu'elles fonctionnent correctement, mais ce sont les sociétés futures qui décideront s'il convient de les maintenir et pour combien de temps. Ces mesures sont effectivement de nature à rassurer. Pourtant, en choisissant l'évacuation géologique, on cherche essentiellement à faire en sorte que l'homme et l'environnement soient protégés quand bien même ces contrôles seraient inefficaces.

La part de consultation publique à prévoir dans l'élaboration des politiques ou les décisions relève de choix nationaux. Tous les pays doivent cependant être conscients de l'internationalisation du débat sur les déchets radioactifs et sur d'autres questions environnementales. Le débat scientifique et public s'établira dans des enceintes internationales, qu'il existe ou non des cadres de discussion nationaux, et, de plus, il a le pouvoir d'influer sur les points de vue nationaux.

Au niveau international, on note une prise de conscience du contexte dans lequel s'inscrit la gestion des déchets. Les discussions au sein des organismes nationaux et internationaux, et dans des cercles proches, montrent qu'il faudrait accorder davantage d'attention à des questions comme la durabilité, problème de société beaucoup plus vaste, qui exige une vision globale de la production et de l'utilisation de l'énergie et de l'évacuation des déchets et de leur traitement.

Éthique

L'évacuation en formations géologiques répond au principe moral qui veut que la génération qui a bénéficié de l'énergie nucléaire et des autres applications de la radioactivité trouve un moyen d'évacuer les déchets qui en résultent de façon définitive et sûre. Il s'agit du principe d'équité entre générations. Récemment est apparu l'argument, tout aussi valable, selon lequel une génération donnée n'aurait pas le droit de restreindre le champ des possibilités ouvertes aux générations futures, ni leurs capacités de décision. Certains détracteurs laissent entendre que l'évacuation géologique limite les possibilités de choix des générations futures. À l'inverse, les spécialistes de la gestion des déchets font valoir qu'il s'agit avant tout d'offrir aux générations futures au moins une solution à sûreté passive qui n'exige pas l'intervention de ces générations, et que le principe même de la mise en œuvre par étapes laissera longtemps encore ouvertes toutes les solutions.

Se pose également la question de l'équité au sein d'une même génération. En d'autres termes, il s'agit pour la société actuelle de régler, dans le respect de l'éthique, le problème des ressources et de la participation du public aux décisions. Si l'on considère, par exemple, la répartition des ressources, les

dépenses nécessaires pour garantir l'évacuation des déchets radioactifs dans des conditions sûres doivent être comparées aux coûts de projets concurrents dans les domaines de la santé et de l'environnement. Doivent également intervenir l'équité et la justice vis-à-vis des communautés que l'on estime touchées par la construction et l'exploitation d'une installation nationale centralisée telle qu'un dépôt aménagé dans une formation géologique.

Le point de vue des spécialistes de la gestion des déchets dans ce domaine n'a pas changé depuis l'Opinion collective que le Comité de la gestion des déchets radioactifs de l'AEN a publiée en 1995 et dans laquelle les membres de ce comité :

- confirment que l'évacuation définitive des déchets radioactifs dans les formations géologiques peut être conçue et appliquée de façon à prendre en compte et à respecter les considérations éthiques et environnementales fondamentales ;
- concluent qu'il est justifié, du point de vue de la protection de l'environnement comme de l'éthique, de poursuivre la mise au point des dépôts en formations géologiques destinés à recevoir les déchets radioactifs à vie longue qu'il convient d'isoler de la biosphère sur des périodes supérieures à quelques siècles ;
- concluent que la mise en œuvre graduelle des projets d'évacuation des déchets en formations géologiques laisse ouverte la possibilité d'adaptations permettant de prendre en compte les progrès de la science ainsi que l'évolution de l'attitude de la société sur plusieurs décennies, et qu'elle n'exclut pas la possibilité d'autres solutions qui pourraient voir le jour ultérieurement.

Économie

L'application du principe « pollueur-payeur » au financement de la gestion des déchets gagne du terrain. En vertu de ce principe, le coût de la gestion des déchets radioactifs, notamment leur évacuation définitive, est à la charge des organisations dont les activités produisent ces déchets. Ce principe a été introduit dans la législation suédoise au cours des années 1970 et, plus récemment, dans la Loi de 1992 sur le financement des dépenses futures afférentes à la gestion des combustibles nucléaires irradiés et dans les réformes financières de 1996. Les États-Unis appliquent depuis longtemps un système de redevance prélevée sur l'électricité d'origine nucléaire pour financer les activités du Ministère de l'énergie dans le domaine de la gestion des déchets provenant de l'exploitation des réacteurs. L'Allemagne, le Canada, la Hongrie

et la République tchèque ont rejoint les nombreux pays qui ont déjà inscrit ce principe dans leur législation. Dans d'autres pays, comme la Belgique et la Suisse, des mesures officielles ont été prises afin de garantir le financement de l'aval du cycle du combustible.

Cependant, une étude récente de la CE a révélé qu'il existait des divergences considérables d'un pays à l'autre en matière de plans de financement. On distingue deux catégories de pays : ceux qui recourent à une redevance prélevée sur la production d'électricité et ceux qui perçoivent des sommes calculées en fonction des caractéristiques des déchets. Chaque plan a cependant ses spécificités. L'étude de la CE a établi que tous les plans devraient, en principe, satisfaire à trois critères – possibilité de financer le projet, équité et efficacité – mais qu'il existait, en pratique, certaines incompatibilités entre ces critères, rendant malaisée la formulation d'un système idéal.

Globalement, cette étude concluait que tous les pays étudiés avaient constitué des fonds destinés à couvrir le coût de la gestion ultérieure des déchets radioactifs. En général, les plans faisant appel au prélèvement d'une redevance sur la production d'électricité paraissent les plus susceptibles de garantir la disponibilité des fonds le moment venu, mais ils enverraient les signaux économiques les moins efficaces. Quant aux plans fixant le montant des versements en fonction des caractéristiques des déchets, ils seraient plus équitables, mais plus complexes à administrer que ceux qui n'utilisent qu'un paramètre, par exemple le volume. Tous les pays étudiés ont, d'après cette étude, adopté une politique d'investissement très prudente.

La recherche d'autres options pour la gestion des déchets

Pour les déchets à vie longue, le concept d'évacuation dans un dépôt en formation géologique profonde est une solution sûre qui assure une protection contre des actes de malveillance. Ce concept n'exclut pas la surveillance, la maintenance, ni la réversibilité du dépôt ou la reprise des déchets, mais ces mesures visent essentiellement à inspirer confiance et ne devraient pas être nécessaires pour garantir la sûreté. De même, la société peut opter pour des outils de gestion tels que les contrôles institutionnels à long terme, ce qui n'empêche pas que la santé humaine et l'environnement naturel soient préservés au cas où ces contrôles échoueraient.

L'évacuation géologique représente ainsi l'aboutissement de la gestion des déchets radioactifs et garantit la sécurité et la sûreté sans qu'il soit nécessaire de prévoir une surveillance, une maintenance ou des contrôles

institutionnels. Malgré la confiance que les spécialistes accordent à l'évacuation géologique, les pressions en faveur de l'identification et de l'évaluation d'autres filières de gestion des déchets, qui soient plus acceptables du point de vue politique et social, ne faiblissent pas.

Plusieurs voies d'évacuation originales ont été étudiées de manière assez approfondie au cours des années 1970 et ne sont plus envisagées sérieusement, du moins par les spécialistes de la gestion des déchets. L'enfouissement dans les fonds sous-marins a également été étudié (par exemple, dans le cadre de l'étude PAGIS de l'UE) et a été jugé prometteur du point de vue de la sûreté, mais la réalisation de dépôts sous-marins exige un accord international et la mise au point d'un cadre réglementaire approprié. Actuellement, la plupart des pays interpréteraient leurs obligations aux termes de la Convention de Londres sur l'immersion comme interdisant l'évacuation de déchets nucléaires sous les fonds marins.

Les solutions de remplacement le plus souvent évoquées aujourd'hui dans le débat public sur l'évacuation des déchets de même que par les gestionnaires de déchets et les responsables de la réglementation soucieux d'examiner toute la gamme des options, sont l'entreposage de longue durée, ou sur des durées indéterminées, et la séparation et la transmutation des radionucléides à vie longue contenus dans les déchets. Pourtant, bien que ces options puissent être intégrés à une stratégie de gestion globale – certains pays prévoient déjà un entreposage de plusieurs décennies au moins – aucune ne peut être considérée comme une solution capable de se substituer à l'évacuation.

La loi française prescrit une étude parallèle du stockage, de l'entreposage et de la transmutation. Aux Pays-Bas, les dépôts souterrains doivent être conçus de telle manière que les déchets puissent être récupérés si cela était jugé nécessaire dans le futur. La commission indépendante qui a récemment examiné le programme canadien a recommandé, pour le combustible usé, le lancement d'une étude des modes de gestion autres que le concept d'évacuation géologique qui faisait l'objet de l'examen.

Entreposage en surface de longue durée

Tous les pays ou presque ont, depuis toujours, jugé nécessaire ou utile de stocker provisoirement les déchets en surface pour permettre leur décroissance radioactive et leur refroidissement. Souvent l'entreposage est centralisé, mais on peut également stocker les déchets dans des installations séparées. Le choix du site reflète parfois davantage des problèmes d'adhésion politique ou sociale que des considérations plus techniques ou économiques. L'entreposage se

différence de l'évacuation par le fait que la sécurité et la sûreté de l'installation exigent une surveillance, une maintenance et des contrôles institutionnels.

Le recours à l'entreposage prolongé est une conséquence inévitable des retards pris par la réalisation des dépôts de déchets de haute activité et de combustible nucléaire usé. Il existe en outre des arguments en faveur de l'entreposage en surface de longue durée (mais non sur des durées indéterminées) :

- Certains scientifiques et décideurs, convaincus qu'il faut du temps pour que le concept d'évacuation géologique fasse totalement ses preuves ou pour que la confiance du public soit suffisante, préconisent d'en différer la mise en route. Comme la loi le prescrit, et aussi pour répondre à l'intérêt du public, la Suède, par exemple, envisage la poursuite de l'entreposage en surface, afin de pouvoir procéder à une comparaison générale des options pour les prochaines décennies.
- Avec l'ouverture du marché de l'électricité, les pressions économiques sur les compagnies d'électricité productrices de déchets s'accroissent. L'entreposage peut présenter des attraits pour certaines entreprises d'électricité, dans la mesure surtout où il leur permet de reporter des investissements lourds dans des dépôts coûteux. Ce sont aussi des considérations financières, telles que l'obligation pour les entreprises d'électricité de constituer des fonds séparés pour les futurs dépôts, qui détermineront si la filière de l'entreposage est plus économique sur des échelles de temps intermédiaires.
- L'augmentation des réserves de minerai d'uranium et la baisse de la demande de matières fissiles recyclées rendent plus intéressante la mise en dépôt directe du combustible usé. Ce combustible reste néanmoins une ressource énergétique et, à l'heure du développement durable, on peut faire valoir que l'entreposage de longue durée permet de disposer facilement de cette ressource. Cette disponibilité sera, au contraire, jugée négativement si l'on se place du point de vue de la non-prolifération des matières fissiles.

Bien que prôné par des sources étrangères aux programmes de gestion des déchets, l'entreposage sur des durées indéterminées n'est pas considéré comme une véritable alternative à l'évacuation dans des dépôts géologiques profonds, notamment parce qu'il est impossible de garantir la surveillance de ces installations indéfiniment, avec toutes les conséquences sur la sûreté que cela suppose. D'un point de vue rationnel, donc, la poursuite de l'entreposage en surface n'est pas une solution, mais un moyen de différer l'évacuation. Continuer d'investir dans la construction, la surveillance à long terme et le

remplacement périodique des dépôts de surface, alors qu'il existe un mode d'évacuation sûr et acceptable, reviendrait à détourner des ressources qui pourraient être utilisées plus efficacement pour l'évacuation. Dans quelques pays, on considère que la poursuite de l'entreposage en surface présente des risques faibles, mais non insignifiants, qui pourraient être évités en plaçant les déchets dans un environnement plus stable, à grande profondeur.

Séparation et transmutation

On a présenté la séparation et la transmutation comme l'approche qui bouleverserait l'avenir de l'évacuation géologique. Cette méthode comprend deux étapes. La première consiste à séparer les radionucléides à vie longue contenus dans les déchets de ceux qui ont une période plus courte et sont donc moins difficiles à confiner dans un dépôt profond. La deuxième consiste à transmuter les radionucléides séparés en les convertissant en radionucléides à vie courte, en général par bombardement neutronique dans un réacteur nucléaire ou un accélérateur. L'intérêt éventuel de cette solution est de raccourcir la durée de confinement des déchets. Cependant, pour obtenir une conversion complète, il faudrait multiplier les cycles de séparation et de transmutation, ce qui ne va pas sans créer d'autres types de risques.

Le Japon, l'Espagne, la France, les États-Unis ont beaucoup investi dans ces techniques, la Belgique, l'Allemagne et la Suède beaucoup moins, et surtout dans la recherche. Ces techniques en sont aux tout premiers stades du développement. La plupart des travaux entrepris sont des recherches analytiques ou des études prototypes, destinées à évaluer l'intérêt de poursuivre dans cette voie. La séparation et la transmutation peuvent offrir une solution pour des déchets concentrés, bien caractérisés, mais paraissent difficilement praticables dans le cas de déchets hétérogènes présentant une contamination diffuse. Les pressions en faveur de recherches sur ce sujet semblent souvent venir des gouvernements ou des échelons consultatifs plutôt que des techniciens de la gestion des déchets. Les États-Unis et la CE, qui ont la démarche la plus « technique », ne considèrent pas cette technologie comme une solution de remplacement pour l'évacuation en formations géologiques. Cette filière permettrait, au mieux, d'abaisser la teneur en radionucléides à vie longue de l'inventaire à mettre en dépôt.

Chapitre 6

LA DIMENSION INTERNATIONALE

Au cours des dernières décennies, la communauté internationale a pris conscience que la gestion sûre de déchets susceptibles de constituer une menace pour l'environnement ou la santé pouvait rarement se réduire à un problème purement national, car la pollution ne respecte pas les frontières. Ce constat concerne évidemment des polluants comme le dioxyde de soufre et les oxydes d'azote, certains rejets gazeux et liquides d'effluents radioactifs ainsi que les matières libérées lors d'accidents majeurs tels que Tchernobyl. Il est impossible, toutefois, que des substances radioactives provenant d'un dépôt géologique de déchets radioactifs parviennent à la surface à plus de quelques dizaines de kilomètres du site de stockage, même après de très longues périodes. Aussi, l'apparition de problèmes transfrontières paraît-elle improbable à moins que le dépôt en question ne soit installé très près d'une frontière. Toutefois, la durée d'un dépôt géologique dépasse de beaucoup la période durant laquelle les frontières sont susceptibles de demeurer stables.

Néanmoins, l'évacuation en formations géologiques a assurément des dimensions internationales. D'un côté, il existe des possibilités d'aménager des dépôts internationaux (Encadré xx), de l'autre, le combustible usé est transporté à l'étranger pour y être retraité puis renvoyé dans son pays d'origine afin d'être placé dans un dépôt national. Certes, ces transports ont suscité quelques protestations d'un public préoccupé, mais il existe une réglementation complète, nationale et internationale, des transports, conçue pour que les risques soient réduits au minimum, et l'expérience a démontré que le niveau de sûreté atteint est très élevé.

La façon dont les programmes d'évacuation en formations géologiques sont planifiés et exécutés dépend essentiellement de la situation nationale – c'est-à-dire du cadre juridique et réglementaire, de facteurs culturels, de l'existence de sites géologiques appropriés et de l'inventaire des radionucléides dans les déchets. Chaque pays adopte une démarche qui lui est propre pour établir des procédures et des méthodes, former son personnel et financer ses travaux. Les contacts et les échanges d'idées et d'expérience dans un cadre

international, ou encore les programmes en coopération, tels que les recherches réalisées dans les laboratoires souterrains ou les études des analogues naturels ou d'autres projets techniques encore, peuvent toutefois contribuer de façon notable à faire progresser les programmes nationaux.

Dépôts internationaux

D'après certains milieux, le moyen le plus direct de porter la question de l'évacuation géologique au rang des grandes questions internationales consisterait à créer un dépôt international susceptible d'abriter les déchets d'un certain nombre de pays. Les quantités de déchets nécessitant une évacuation géologique, en particulier les déchets des pays aux programmes nucléaires modestes ou inexistantes, sont suffisamment peu importantes pour rendre séduisant le principe d'un dépôt unique desservant plusieurs pays. Cette idée pourrait bien intéresser les pays qui n'ont pas les ressources nécessaires pour un réaliser un dépôt dans de bonnes conditions (par exemple, certains membres de l'ancien bloc de l'Est) et ceux dont les conditions géologiques ou environnementales l'interdisent. D'après les études réalisées à ce jour, il n'y a pas de raison de penser que des difficultés techniques ou économiques importantes s'opposent à l'aménagement d'un dépôt international. Toutefois, les problèmes politiques et éthiques associés aux choix du site, ainsi que l'opposition probable d'un public peu enclin à accepter des déchets en provenance d'un pays étranger devraient constituer des obstacles majeurs, du moins dans un avenir proche.

L'échange d'idées et le partage des ressources dans le cadre des projets en coopération ont démontré leur intérêt pour les législateurs, pour les responsables de la réglementation et pour les gestionnaires de déchets, en :

- mettant en évidence le large consensus qui existe au plan technique ;
- favorisant l'optimisation des ressources techniques et financières ;
- clarifiant les principaux concepts sur lesquels repose l'aménagement des dépôts ;
- garantissant que le processus de développement des dépôts respecte le principe d'équité et est perçu comme tel par toute personne étrangère à la communauté des spécialistes ;

- rationalisant les différences qui existent entre les consignes réglementaires nationales ;
- harmonisant les réglementations relatives aux différents types risques environnementaux.

Le rôle des organisations internationales a été abordé au chapitre 2. Grâce aux activités de l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN), et en particulier à celles du Comité de la gestion des déchets radioactifs, les pays Membres de l'OCDE, entre autres, ont peu à peu pris confiance dans la connaissance scientifique des processus en jeu lors de la mise en dépôt des déchets ainsi que dans l'évaluation des performances de systèmes d'évacuation fondés sur ces connaissances. Dans le domaine de la gestion des déchets radioactifs, l'AEN organisé des débats sur les aspects techniques et stratégiques et l'action des pouvoirs publics entre des décideurs, des responsables de la réglementation et des gestionnaires de déchets, et c'est ce qui fait l'originalité de son travail. Il est probable que les forums de ce type conserveront leur importance pour tous ceux qui participent à la gestion des déchets ou qui sont amenés à communiquer avec des publics plus larges. À ce titre, l'importance des Opinions collectives élaborées et publiées par l'AEN doit être soulignée. Cette série de documents internationaux, maintes fois citée, a apporté une contribution majeure au débat sur l'évacuation dans des dépôts géologiques.

L'intérêt vital de ces activités internationales de l'AEN, notamment l'expression d'une opinion commune reflétant les points de vue des responsables de l'élaboration des politiques, des autorités de réglementation et des gestionnaires de déchets, ne devrait pas se démentir.

BIBLIOGRAPHIE

- AEN (1991), *Évacuation des déchets radioactifs : Peut-on évaluer la sûreté à long terme ? Une opinion collective internationale*, OCDE/AEN, Paris, France.
- AEN (1995), *Fondements environnementaux et éthiques de l'évacuation géologique : Opinion collective du comité de la gestion des déchets radioactifs de l'AEN*, OCDE/AEN, Paris, France.
- AEN (1996), *Les charges financières futures liées aux activités nucléaires*, OCDE/AEN, Paris, France.
- AEN (1997), *Lessons Learnt from Ten Performance Assessment Studies*, OCDE/AEN, Paris, France.
- AEN (1999), *Confidence in the Long-term Safety of Deep Geological Repositories: Its Development and Communication*, OCDE/AEN, Paris, France.
- AEN (1999), *Évacuation géologique des déchets radioactifs : Bilan des dix dernières années*, OCDE/AEN, Paris, France.
- AEN (1999), *Dépôts de déchets radioactifs de faible activité : Une analyse des coûts*, OCDE/AEN, Paris, France.
- AEN (1999), *Où en est l'évacuation des déchets radioactifs en formations géologiques ? Une évaluation internationale des progrès récents*, OCDE/AEN, Paris, France.
- AEN (2000), *Évaluation des dépôts géologiques profonds dans un contexte réglementaire : Enseignements tirés*, OCDE/AEN, Paris, France.

L'AEN remercie le Gouvernement du Japon pour avoir facilité
la production de ce rapport.

本報告書の作成に関し、日本政府の協力を謝意を表す。

ÉGALEMENT DISPONIBLE

Publications de l'AEN d'intérêt général

Rapport annuel 1999 (2000)

Gratuit sur demande.

AEN Infos

ISSN1605-959X

Abonnement annuel : FF 240 US\$ 45 DM 75 £ 26 ¥ 4 800

Le Point sur les rayonnements – Applications, risques et protection (1997)

ISBN 92-64-25483-8

Prix : FF 135 US\$ 27 DM 40 £ 17 ¥ 2 850

Le Point sur la gestion des déchets radioactifs (1996)

ISBN 92-64-24692-4

Prix : FF 310 US\$ 63 DM 89 £ 44

Programmes de gestion des déchets radioactifs des pays Membres de l'AEN/OCDE (1998)

ISBN 92-64-26033-1

Prix : FF 195 US\$ 33 DM 58 £ 20 ¥ 4 150

Gestion des déchets radioactifs

Évaluation des dépôts géologiques profonds dans un contexte réglementaire – Enseignements tirés (2000)

ISBN 92-64-05886-9 Bilingue

Prix : FF 210 US\$ 32 DM 63 £ 20 ¥ 3 400

Évacuation géologique des déchets radioactifs – Bilan des dix dernières années (1999)

ISBN 92-64-27194-5

Prix : FF 190 US\$ 31 DM 57 £ 19 ¥ 3 300

Water-conducting Features in Radionuclide Migration

ISBN 92-64-17124-X

Prix : FF 600 US\$ 96 DM 180 £ 60 ¥ 11 600

Fluid Flow through Faults and Fractures in Argillaceous Formations (1998)

ISBN 92-64-16021-3

Prix : FF 400 US\$ 67 DM 119 £ 41 ¥ 8 100

Confidence in the Long-term Safety of Deep Geological Repositories – Its Development and Communication (1999)

Gratuit : papier ou Web.

Où en est l'évacuation des déchets radioactifs en formations géologiques ?

Gratuit : papier ou Web.

Lessons Learnt from Ten Performance Assessment Studies (1997)

Gratuit : papier ou Web.

Bon de commande au dos.

ORDER FORM

OECD Nuclear Energy Agency, 12 boulevard des Îles, F-92130 Issy-les-Moulineaux, France
 Tel. 33 (0)1 45 24 10 15, Fax 33 (0)1 45 24 11 10, E-mail: nea@nea.fr; Internet: <http://www.nea.fr>

Qty	Title	ISBN	Price	Amount
Postage fees*				
Total				

*European Union: FF 15 – Other countries: FF 20

- Payment enclosed (cheque or money order payable to OECD Publications).
 Charge my credit card VISA Mastercard Eurocard American Express
(N.B.: You will be charged in French francs).

Card No. Expiration date Signature

Name

Address Country

Telephone Fax

E-mail

LES ÉDITIONS DE L'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16
IMPRIMÉ EN FRANCE
(66 2000 28 2 P) ISBN 92-64-28425-7 – n° 51436 2000