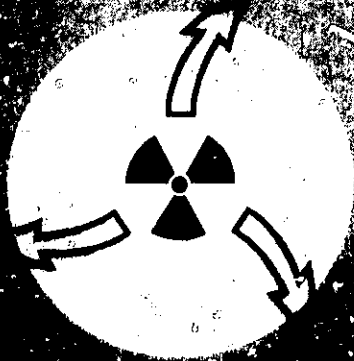


Analyse de la sûreté  
des dépôts de déchets radioactifs



# Les actions humaines futures sur les sites d'évacuation



OECD



OCDE

PARIS

Analyse de la sûreté  
des dépôts de déchets radioactifs

# **Les actions humaines futures sur les sites d'évacuation**

Rapport du Groupe de travail de l'AEN sur l'évaluation des effets  
des activités humaines futures sur les sites d'évacuation de déchets radioactifs

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

## Avant-propos

La gestion des déchets radioactifs et, en particulier, l'évaluation de sûreté des systèmes d'évacuation des déchets radioactifs, sont des thèmes hautement prioritaires du programme de l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE. Bien qu'il existe un consensus général parmi les pays Membres de l'OCDE en faveur de l'utilisation de dépôts dans des formations géologiques pour l'évacuation de déchets radioactifs, il importe, avant de mettre en oeuvre ce concept, d'analyser la sûreté à long terme de ces dépôts au moyen de méthodes d'évaluation quantitatives. De telles méthodes font appel à l'analyse détaillée des possibilités de relâchement de radionucléides par les dépôts vers les eaux souterraines et de leur transport vers l'environnement humain. Les effets d'événements et de processus susceptibles d'amorcer et d'amplifier le rejet et le transport de radionucléides, tels que la production de gaz, les mouvements néotectoniques et les glaciations doivent être également analysés. Une catégorie particulière d'événements perturbateurs est constituée par l'intrusion de l'homme dans un dépôt souterrain ou, plus généralement, par toutes les activités humaines futures susceptibles d'affecter la sûreté à long terme d'un dépôt. Dans certains cas, les éventuelles activités futures constituent la contribution la plus importante au risque global relatif à l'évacuation des déchets radioactifs.

Le Groupe consultatif de l'AEN pour l'évaluation des performances (PAAG), créé en 1986, a été chargé de conseiller le Comité de gestion des déchets radioactifs à propos des aspects techniques de l'évaluation des performances des systèmes d'évacuation des déchets radioactifs et de coordonner les activités de l'AEN dans ce domaine. Le PAAG constitue un forum international où les pays Membres de l'OCDE peuvent débattre et échanger des informations relatives à l'évaluation des performances de ces systèmes. D'une façon générale, l'objectif du PAAG est d'aider à mettre au point des méthodes et des instruments de qualité pour l'évaluation de la sûreté des dépôts de déchets radioactifs et de promouvoir une utilisation équilibrée et cohérente de ces méthodes dans le cadre des programmes nationaux d'évacuation des déchets radioactifs.

En 1990, le PAAG a créé un Groupe de travail sur l'évaluation des effets des activités humaines futures sur les sites d'évacuation des déchets radioactifs. Cette action faisait suite à une réunion de travail initiale, tenue en 1989, dont les comptes rendus sont disponibles auprès de l'OCDE. Le Groupe de travail, dont la liste des membres figure à l'Annexe A, a examiné d'une façon approfondie les démarches utilisées et l'expérience acquise quant à la prise en compte des effets d'activités humaines futures sur les performances à long terme des dépôts. Le présent rapport du Groupe de travail est fondé sur des informations publiées disponibles et sur les travaux des programmes nationaux en cours. En outre, les documents support utilisés par les membres du Groupe de travail et par leurs collègues, lors des présentations et des discussions aux réunions du Groupe, ont constitué un apport des plus précieux à la préparation du rapport. Dans ce rapport, sont passées en revue les principales questions relatives à la façon dont on peut traiter les activités humaines futures. On y trouvera également un cadre général pour la prise en compte quantitative des activités humaines futures dans les programmes d'évacuation des déchets radioactifs ainsi que des discussions sur les moyens de réduire les risques liés à ces activités.

Le présent rapport est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE et il n'engage en aucune manière les pays Membres de l'OCDE.

## **Remerciements**

La version originale de ce document, en langue anglaise, a été rédigée par Daniel A. Galson, Galson Sciences Limited, Royaume-Uni, de la part du Groupe de Travail de l'AEN sur les Actions Humaines Futures sur les Sites d'évacuation de Déchets Radioactifs, dans le cadre d'un contrat de consultant des Laboratoires Nationaux de Sandia (États-Unis).

La version française de ce document a été révisée par Philippe Rimbault, de l'Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA), France.

4.	<b>MESURES DE PROTECTION</b> .....	41
4.1	Introduction .....	41
4.2	Contrôle institutionnel actif.....	42
4.3	Choix du site des dépôts.....	43
4.4	Isolation des déchets de l'environnement humain.....	44
4.5	Critères de conception.....	44
4.6	Conservation des informations .....	45
4.7	Utilisation de systèmes de marqueurs de site.....	47
4.8	Prise en compte des mesures de protection institutionnelles passives dans les évaluations quantitatives.....	49
4.9	Conclusions succinctes.....	50
5.	<b>RÉSUMÉ ET RECOMMANDATIONS</b> .....	53
5.1	Cadre général pour la prise en compte des activités humaines futures.....	53
5.2	Considérations relatives aux analyses quantitatives .....	53
5.3	Mesures de protection .....	54
5.4	Poursuite de la coopération internationale .....	55
	<b>RÉFÉRENCES</b> .....	57
	Annexe A : Liste des participants.....	61
	Annexe B : Éléments de construction de scénarios pour l'élaboration de scénarios d'activités humaines futures .....	65
	Annexe C : Résumé d'évaluations antérieures relatives aux activités humaines .....	73

## **Résumé des principales conclusions**

Ce présent rapport étudie les effets d'activités humaines futures intervenant après la fermeture d'un dépôt de déchets radioactifs et susceptibles de porter atteinte d'une manière appréciable aux propriétés de confinement des systèmes d'évacuation des déchets radioactifs. Pour certains systèmes de dépôt à grande profondeur dans des formations géologiques, les activités humaines futures portant atteinte à l'étanchéité des barrières naturelles et/ou techniques peuvent constituer la contribution la plus importante au risque global relatif à l'évacuation des déchets radioactifs.

### **Informations d'ordre général**

L'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE (AEN) a organisé en 1989 une réunion de travail sur les risques liés à une éventuelle intrusion humaine dans les sites d'évacuation des déchets radioactifs. Cette réunion de travail a permis pour la première fois au niveau international, à des représentants des divers programmes nationaux de débattre ce problème. Les discussions et les recommandations issues de cette réunion de travail ont été présentées aux divers groupes concernés de l'AEN, en particulier au Comité pour la gestion des déchets radioactifs (RWMC) et son Groupe consultatif sur l'évaluation des performances (PAAG). Ultérieurement, il a été décidé de constituer un groupe de travail de l'AEN chargé d'étudier d'une façon plus approfondie les problèmes associés à d'éventuelles interventions humaines dans l'avenir.

Suivant une proposition du PAAG, le RWMC a confié les missions suivantes à ce Groupe de travail :

- Examiner les travaux pertinents déjà exécutés dans ce domaine par des pays Membres de l'OCDE et à l'échelon international.
- Procéder à des échanges d'informations et d'expériences relatives aux méthodes utilisées et aux résultats obtenus dans ce domaine.
- Cerner les problèmes qui appellent une attention particulière et un débat à l'échelon international.
- Examiner ces problèmes en profondeur.
- Examiner la possibilité de définir des méthodes et des démarches génériques pouvant être agréés.
- Préparer un rapport rendant compte des débats et des conclusions du Groupe de travail.

Le présent rapport présente les conclusions du Groupe de travail.

Le présent rapport ne prétend pas présenter un tableau exhaustif du problème. Il entend plutôt mettre l'accent sur un ensemble de problèmes techniques essentiels auxquels doivent faire face tous les programmes nationaux d'évacuation des déchets radioactifs. Les aspects ci-après sont passés en revue :

- L'importance et le rôle des activités humaines futures dans les analyses de sûreté, après fermeture des systèmes d'évacuation des déchets radioactifs à grande profondeur dans des formations géologiques, l'accent étant mis sur les déchets à vie longue. Une attention particulière est portée aux moyens rationnels d'aborder le problème des activités humaines futures, dans les évaluations de sûreté.
- Les démarches et les méthodes utilisées pour évaluer les risques liés aux activités humaines futures.
- Les actions de nature administrative et pratique susceptibles de réduire les conséquences et la probabilité des activités humaines futures préjudiciables.

Le Groupe de travail n'a pas considéré en détail les aspects réglementaires non techniques relatifs aux activités humaines futures, de même qu'il n'a pas tenté de formuler des conclusions anticipées quant à l'acceptabilité des risques liés aux activités humaines futures. L'évaluation de tels risques fera intervenir des jugements d'ordre politique qui sont du ressort des organismes réglementaires nationaux.

En outre, le Groupe de travail n'a pas traité explicitement les dépôts de déchets faiblement radioactifs en surface ou à faible profondeur.

Enfin, le Groupe de travail n'a pas considéré en détail les conséquences à long terme des activités humaines entreprises (ou non entreprises) au cours de la période précédant la fermeture du dépôt, c'est-à-dire avant le scellement définitif de celui-ci.

On trouvera ci-après les principales conclusions et recommandations issues des débats du Groupe de travail.

### **Cadre général pour la prise en compte des activités humaines futures**

Les activités humaines futures peuvent avoir des effets préjudiciables sur les systèmes d'évacuation des déchets radioactifs ; il importe donc de prendre en considération ces activités, tant dans le choix du site et la conception des systèmes d'évacuation des déchets radioactifs que dans l'évaluation de leur sûreté.

On peut subdiviser les activités humaines préjudiciables à l'étanchéité du dépôt en activités intentionnellement perturbatrices et en activités causant des perturbations par inadvertance. Ces dernières sont définies ici comme étant les activités à la suite desquelles le dépôt ou ses barrières sont pénétrées par inadvertance ou leur étanchéité est altérée, soit par ignorance de l'emplacement du dépôt, soit par oubli de sa raison d'être. On peut estimer que la responsabilité des activités humaines donnant lieu à un rejet de radioactivité et entreprises à dessein, plutôt que par mégarde, incombe au groupe social qui a entrepris ces activités. Les interventions affectant intentionnellement l'étanchéité des barrières ne devraient pas être prises en considération dans les évaluations de sûreté. En revanche, les activités perturbant par mégarde le système d'évacuation des déchets radioactifs devraient être prises en considération.

## **Remarques relatives à l'analyse quantitative**

Les activités humaines futures ainsi que des phénomènes naturels peuvent conduire aux mêmes types de conséquences et tous les deux sont importants pour la sûreté. Ainsi, le cadre général quantitatif mis au point pour les analyses de sûreté impliquant des événements et des processus naturels se prête également à l'évaluation des conséquences des activités humaines futures. En particulier, l'élaboration et la modélisation de scénarios, tant d'activités humaines futures que d'événements et processus naturels, doit faire appel à une part importante de jugement subjectif.

L'analyse d'activités humaines ne sera jamais exhaustive et ses résultats ne pourront avoir qu'un caractère illustratif. Dans le meilleur des cas, les techniques d'élaboration de scénarios utilisées dans le cadre de l'analyse des activités humaines futures conduisent à la constitution d'un ensemble de scénarios envisageables plutôt qu'à une liste exhaustive de l'ensemble des scénarios possibles. L'évaluation des probabilités des scénarios d'activités humaines futures comporte nécessairement un élément de subjectivité et ces probabilités devraient être plutôt dénommées «degré de vraisemblance» afin de les distinguer des fréquences déterminées empiriquement. Il est préférable de faire appel à une gamme de scénarios et de probabilités reflétant leurs vraisemblances relatives plutôt qu'à un scénario unique correspondant à une estimation ponctuelle. Dans les analyses d'incertitude et de risque, il est important de représenter l'éventail des possibilités, aussi fidèlement que possible. Il importe également de considérer un éventail de possibilités dans le choix du site et la conception des dépôts, ainsi que dans la prise en compte des mesures de protection à l'encontre des dégradations dues à l'activité humaine future.

Les scénarios d'activités humaines futures doivent être considérés comme des représentations de situations, découlant d'un ensemble d'hypothèses vraisemblables. Les analyses des conséquences doivent donc être vues comme des illustrations de l'impact possible de cet ensemble d'hypothèses. Ces illustrations sont destinées (notamment) aux décideurs, afin de leur montrer les éléments essentiels d'un système de stockage définitif et des risques liés à l'évacuation des déchets.

Le Groupe de travail a tenté de rechercher une démarche d'évaluation quantitative qui permettrait d'éviter une attitude trop spéculative à l'égard de l'avenir et qui pourrait être appliquée uniformément aux divers sites et systèmes de stockage définitif. A cette fin, le Groupe de travail considère que les scénarios applicables à des sites et à des systèmes de stockage particuliers peuvent être basés sur l'hypothèse d'une correspondance des pratiques futures avec les pratiques actuellement en vigueur sur l'emplacement du dépôt ou sur d'autres sites similaires. Cette hypothèse pourrait être appliquée aux caractéristiques et aux fréquences des forages, à l'utilisation des ressources, aux progrès techniques, aux pratiques médicales, à l'évolution démographique, au mode de vie et aux habitudes alimentaires.

Le choix d'une telle hypothèse ne prétend nullement être associé à un jugement relatif à l'évolution possible de la société, mais constitue un choix commode de type de développement sociétal qui permet d'illustrer les risques potentiels liés aux activités humaines futures. Une telle hypothèse relative au développement de la société a été retenue de facto dans la plupart des analyses récentes. Toutefois, il est nécessaire d'approfondir l'étude des principes sous-tendant ces analyses, comme par exemple celui de l'efficacité des contrôles institutionnels passifs.

## **Mesures de protection**

Le Groupe de travail a débattu les méthodes susceptibles de réduire la probabilité et d'atténuer les conséquences des activités humaines futures susceptibles de porter atteinte par mégarde à



**l'efficacité du système d'évacuation des déchets radioactifs. La protection la plus efficace, pour parer à des conséquences perturbatrices involontaires, est le contrôle institutionnel actif de la zone avoisinant l'emplacement. Cette mesure constitue l'une des dispositions figurant dans la procédure d'autorisation applicable aux dépôts de déchets faiblement radioactifs à proximité de la surface. Elle pourrait être applicable également aux installations de stockage à grande profondeur pour une durée aussi longue qu'il est envisageable de concevoir, afin de protéger le dépôt contre toute intrusion involontaire et autres activités humaines potentiellement perturbatrices aux alentours du site d'évacuation.**

**Toutefois, on ne peut compter sur un contrôle institutionnel actif qui s'étendrait sur tout l'intervalle de temps pendant lequel les déchets présenteront un risque potentiel (par exemple 10 fois la période radioactive du Pu-239 ou d'autres radionucléides pertinents). Certaines réglementations nationales prévoient un contrôle actif pendant une période de 100 à 500 ans après la fermeture et la mise hors-service du dépôt. Le Groupe de travail a envisagé d'autres mesures possibles, notamment :**

- Emplacement des dépôts à l'écart de zones dotées de ressources souterraines potentielles.**
- Isolement des déchets de l'environnement humain. S'agissant des dépôts géologiques à grande profondeur, la profondeur même du dépôt constitue en soi un facteur important d'atténuation des effets perturbateurs éventuels des activités humaines.**
- Définition d'autres critères applicables à la conception des dépôts de déchets (par exemple, aux matériaux de remblayage) et à la structure même du déchet (par exemple, faire en sorte qu'il présente une faible tendance à former des poussières en cas d'exposition à l'air libre), susceptibles d'atténuer les conséquences des activités humaines perturbatrices.**
- Conservation et diffusion d'informations relatives à l'emplacement et au contenu du dépôt ainsi qu'aux dangers associés, ces mesures pouvant contribuer à réduire la probabilité d'activités humaines perturbatrices.**
- Mise en place sur le site, ou à proximité de celui-ci, de systèmes de marqueurs physiques durables afin de conserver des informations relatives au dépôt et d'alerter du danger d'éventuels individus procédant à une intrusion.**
- Mise en place de barrières matérielles visant à prévenir une intrusion éventuelle (par exemple la mise en place d'une épaisse dalle de béton au-dessus des déchets déposés ou le confinement de ces derniers dans des conteneurs robustes), susceptibles de diminuer la probabilité d'une intrusion involontaire.**

**Il conviendrait de débattre plus en avant, dans le cadre de chaque programme national de l'évaluation des ressources financières nécessaires pour mettre en oeuvre les différentes mesures de protection présentées ci-dessus.**

### **Poursuite de la coopération internationale**

**Le Groupe de travail a discuté des efforts internationaux qui seraient de nature à renforcer la confiance dans les évaluations de sûreté à long terme des systèmes d'évacuation des déchets radioactifs. Il a identifié notamment un certain nombre d'autres actions possibles dans le domaine de l'évaluation des activités humaines futures, qui sortent du domaine assigné au Groupe de travail :**

- La poursuite de discussions entre les pays intéressés portant sur les mesures réglementaires qu'il serait possible d'édicter afin de prendre en compte les risques liés aux activités humaines futures. La plupart des réglementations nationales n'ont pas encore défini**

clairement la façon de traiter les activités humaines futures. Le Groupe de travail considère, eu égard aux conclusions de son rapport, qu'un débat pourrait être initié entre les pays intéressés quant à la meilleure manière d'aborder ce problème. L'une des possibilités consisterait à évaluer les risques liés aux activités humaines futures de la même façon que les risques liés aux événements et processus naturels. A l'autre extrémité du spectre des possibilités, on pourrait considérer que les risques liés aux activités humaines futures ne devraient pas être pris en compte dans les procédures d'autorisation des dépôts de déchets. Ce problème n'est pas uniquement technique et toute action des pouvoirs publics dans ce domaine devra s'appuyer sur des arguments de nature philosophique et éthique.

- Le développement et l'application, à titre d'essai, d'un ensemble de principes méthodologiques sous-tendant l'élaboration des scénarios d'activités humaines. Ceux-ci pourraient être élaborés à partir d'informations propres au site, sur la base d'une démarche agréée à l'échelon international. Une stratégie possible d'élaboration de scénarios, discutée par le Groupe de travail, serait basée sur l'utilisation de données correspondant aux capacités technologiques et au type de société actuellement en vigueur dans le voisinage du site de stockage ou d'autres sites similaires situés ailleurs, afin d'éviter le recours à des spéculations sur l'avenir de l'humanité.
- La mise en place d'une base de données validée à l'échelon international, répertoriant les caractéristiques, les événements et les processus qui pourraient être pris en considération dans les évaluations de sûreté. Cette base de données pourrait incorporer les résultats des travaux substantiels déjà accomplis au niveau international et pourrait contribuer à susciter la confiance dans la conception des programmes nationaux d'évaluation de sites particuliers. Les activités humaines pourraient faire partie de cette base de données. Une liste préliminaire, dressée par le Groupe de travail, figure en Annexe B. La poursuite de cet effort à l'échelon international a déjà débuté sous les auspices du PAAG de l'AEN.
- La mise en place d'un système international d'archivage relatif aux dépôts de déchets radioactifs. La conservation d'informations à divers niveaux administratifs et à divers emplacements peut contribuer à la préservation des informations sur le dépôt. Une possibilité consisterait à mettre en place un système d'archivage au niveau international.
- La mise en place d'un système de marqueurs. Une démarche cohérente de mise en place de systèmes de marqueurs aiderait la société à garder la mémoire de leur signification et permettrait d'assurer que si la signification des marqueurs a été comprise dans une partie du monde, celle de tout marqueur similaire découvert ailleurs serait plus facile à saisir. Ce principe de marquage pourrait s'appliquer à de nombreux autres produits dangereux utilisés aujourd'hui (par exemple, les substances radioactives et d'autres substances chimiques toxiques).

## Chapitre 1

### Introduction

#### 1.1 Évacuation des déchets radioactifs

L'utilisation de substances radioactives pour la production d'électricité ou à des fins médicales, industrielles ou de recherche, donne lieu inévitablement à des déchets radioactifs qui doivent être gérés d'une manière sûre, tant actuellement que dans l'avenir. Les options de base, applicables aux déchets déjà produits, sont :

- i) La concentration et le confinement des déchets.
- ii) La dilution et la dispersion des déchets dans l'environnement.
- iii) Le recyclage et la réutilisation des déchets.

Exception faite des déchets radioactifs contenant des quantités relativement faibles de radionucléides, c'est la première de ces options qui est actuellement privilégiée par tous les pays Membres de l'OCDE. Accepter de concentrer et de confiner des substances radioactives dans un espace limité implique d'accepter les risques liés à d'éventuelles intrusions humaines dans la zone occupée par les déchets ou dans les zones environnantes. Les procédures d'autorisation, et particulièrement celles relatives aux déchets hautement radioactifs, devront choisir les scénarios d'activités humaines futures et leur donner l'importance qui leur revient dans les réglementations et les évaluations de performances.

Alors que le stockage provisoire des déchets représente une option acceptable à court terme, tous les pays de l'OCDE dotés de programmes d'énergie nucléaire mènent actuellement des études visant à mettre en place des installations d'évacuation. L'objectif de telles installations est d'isoler les déchets de l'environnement humain, pendant un laps de temps suffisamment étendu pour que la désintégration radioactive ramène l'activité du déchet à un niveau acceptable (par exemple le niveau de fond normal). Les méthodes utilisées, et projetées, pour réaliser ce confinement varient en fonction de la nature des déchets. Les déchets à vie courte et faiblement radioactifs peuvent être évacués sans danger en surface ou à faible profondeur. Les déchets à vie longue, fortement ou moyennement radioactifs requièrent des techniques de traitement et de stockage définitif plus complexes. Pour ces types de déchets, on considère que le stockage définitif à grande profondeur dans des formations géologiques stables représente la solution la plus appropriée [49].

La plupart des concepts d'évacuation définitive à grande profondeur assurent le confinement et l'isolement des substances radioactives par une combinaison de barrières naturelles et artificielles. Cet isolement peut être assuré par la résistance et l'insolubilité intrinsèques des déchets, leur encapsulation dans des conteneurs durables, le remblayage d'excavations avec des matériaux dotés de propriétés mécaniques, chimiques et/ou hydrologiques adéquates, ainsi que par la nature des roches et des sols qui freine les mouvements des eaux souterraines et la migration des radionucléides grâce aux phénomènes de sorption.

Il est toutefois possible d'imaginer des situations futures – après la fermeture et la mise hors-service du dépôt – au cours desquelles ce système de barrières serait perturbé ou contourné sous l'effet d'activités humaines. Comment faut-il envisager une telle interaction de l'homme avec les systèmes d'évacuation? Quel rôle doivent jouer les évaluations de risque lié aux activités humaines futures dans le développement des dépôts de déchets radioactifs ?

Tous les programmes nationaux d'évacuation des déchets radioactifs doivent faire face à de telles questions. Pour certains systèmes de stockage définitif, on considère que le niveau d'étanchéité des barrières naturelles et techniques est tellement élevé que la contribution majeure au risque est liée à la possibilité que des activités humaines futures portent atteinte à l'étanchéité des systèmes de barrières naturelles et/ou techniques. De tels effets pourraient être soit intentionnels, soit accidentels.

C'est pour ces diverses raisons que l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE (AEN) a organisé en 1989 une Réunion de travail sur les risques liés aux intrusions futures dans les sites de stockage définitif des déchets radioactifs [1]. Cette réunion de travail a fourni une première occasion aux représentants des divers programmes nationaux de débattre de ce problème à l'échelon international. Les discussions et recommandations issues de cette réunion de travail ont été présentées aux groupes concernés de l'AEN, en particulier au Comité pour la gestion des déchets radioactifs (RWMC) et au Groupe consultatif pour l'évaluation des performances (PAAG). Il a été décidé ultérieurement de créer un groupe de travail de l'AEN chargé d'étudier d'une façon plus approfondie les problèmes liés aux activités humaines futures.

## 1.2 Objectif du Groupe de travail

Suite à une proposition du PAAG, le RWMC a confié au Groupe de travail les tâches ci-après :

- *Passer en revue* les travaux pertinents effectués dans les pays Membres de l'OCDE et dans le monde.
- *Échanger* des informations et des expériences relatives aux méthodes suivies et aux résultats obtenus dans ce domaine.
- *Cerner* les problèmes qui appellent une attention spéciale ou un débat au niveau international.
- *Mener* une analyse approfondie de ces questions.
- *Examiner* la possibilité de définir des méthodes et des approches génériques agréées.
- *Préparer* un rapport reflétant les discussions et les conclusions du Groupe de travail.

Le présent rapport présente les conclusions du Groupe de travail. Au cours des discussions, plusieurs problèmes ont été mis en évidence, et diverses possibilités ont été proposées pour analyser les activités humaines futures. Dans certains cas, un accord a été atteint ou des résolutions ont été exprimées.

Il a été toutefois reconnu que le thème de l'analyse des conséquences associées aux activités humaines futures représente toujours un aspect difficile de l'évaluation des performances des systèmes de stockage définitif des déchets radioactifs. Les difficultés intrinsèques de la prévision des activités humaines et notre propre incapacité de discerner l'avenir à long terme limitera toujours la possibilité d'énoncer des conclusions définitives quant aux risques que fait encourir aux sociétés futures l'évacuation définitive des déchets radioactifs à vie longue. Bien entendu, les déchets radioactifs ne

jouissent pas d'un statut particulier à cet égard ; il existe de nombreuses autres activités humaines susceptibles de conduire à des conséquences importantes dans l'avenir et qui sont difficiles ou impossible à prévoir.

Une approche rationnelle pour évaluer les effets éventuels d'activités humaines futures peut néanmoins faciliter la conception et le choix du site de systèmes d'évacuation définitive, encourager la comparaison avec d'autres systèmes, renforcer l'optimisation d'un système d'évacuation et aider à mettre en regard les performances projetées et les normes et réglementations. Un des objectifs du Groupe de travail est de proposer une structure générale pour une telle approche rationnelle, et de mettre en évidence les aspects particuliers à cette approche qui pourraient être communs à un certain nombre de formations rocheuses potentielles étudiées par les pays Membres.

### 1.3 Conduite de l'étude

Les discussions du Groupe de travail ont porté sur un large éventail de problèmes. Le groupe a apporté, lors de ses quatre réunions, une attention particulière à un certain nombre de questions clés relatives au cadre général, du traitement des activités humaines futures :

- Les activités humaines doivent-elles être évaluées de la même façon que les événements et processus naturels ? Est-il possible d'assigner aux évaluations des activités humaines futures un niveau de légitimité ou d'exhaustivité comparable aux niveaux envisagés dans d'autres domaines ?
- S'agissant des activités humaines, convient-il d'établir une distinction entre les perturbations intentionnelles et les perturbations accidentelles ?
- Quelle est l'échelle de temps applicable à l'évaluation des activités humaines ? Comment se présente cette échelle de temps par rapport à celle de l'exercice d'un contrôle gouvernemental et à la rémanence des informations et des mises en garde au sein de la société ?
- Existe-t-il une base générale pour la création de scénarios d'activités humaines qui peuvent être utilisés pour comparer et évaluer les conceptions et les sites d'éventuels dépôts de stockage ?
- Quelles sont les mesures à prendre en considération afin de réduire le risque lié aux activités humaines futures ?

Outre les discussions sur ces questions, deux réunions du Groupe de travail ont fourni aux participants l'occasion d'observer d'une façon interactive les efforts nationaux effectués dans le domaine de l'évaluation des intrusions humaines. La seconde réunion du Groupe s'est tenue en conjonction avec une réunion de travail du Groupe d'experts sur les marqueurs, créé par les Sandia National Laboratories (SNL) pour aider à mettre au point une stratégie de marquage de l'Installation pilote pour le confinement des déchets (WIPP) (un dépôt à grande profondeur dans des formations géologiques, pour des déchets radioactifs, situé dans le sud-est de l'État du Nouveau-Mexique aux États-Unis). La troisième réunion du Groupe s'est tenue en conjonction avec un séminaire sur l'archivage à long terme organisé par la Commission de la sûreté nucléaire des pays nordiques (NKS).

Enfin, le Groupe de travail a élaboré un catalogue des activités nationales en matière d'évaluation des activités humaines. Ce catalogue a été dressé sous la forme d'un document AEN non officiel [2].

## 1.4 Champ couvert par le rapport

Dans ce rapport, les activités humaines futures sont définies comme suit :

*Les activités humaines futures pertinentes sont celles qui pourraient intervenir après la fermeture du dépôt et qui risqueraient de perturber ou de détériorer de manière appréciable la capacité de confinement des déchets radioactifs par des barrières naturelles ou techniques.*

Le présent rapport ne prétend pas couvrir ce problème d'une façon exhaustive. Il entend plutôt attirer l'attention sur une série de problèmes clés auxquels doivent faire face tous les programmes nationaux de stockage définitif des déchets radioactifs. Le rapport couvre les aspects suivants :

- L'importance et le rôle des activités humaines futures dans l'évaluation de la sûreté, des systèmes d'évacuation des déchets radioactifs à vie longue dans des formations géologiques profondes après leur fermeture. L'accent est mis ici sur les moyens rationnels d'envisager les activités humaines futures dans les évaluations de sûreté, compte tenu des questions pertinentes énoncées dans la section précédente.
- Les approches suivies et les méthodes utilisées pour évaluer les risques liés aux activités humaines futures.
- Les mesures de nature administrative et pratique susceptibles de réduire les conséquences et la probabilité de perturbations dues à des activités humaines futures.

Le Groupe de travail n'a pas envisagé en détail les aspects non techniques des mesures réglementaires relatives aux activités humaines futures, pas plus qu'il n'a tenté d'énoncer des conclusions anticipées relatives à l'acceptabilité des risques liés aux activités humaines futures. L'évaluation des risques de ce genre fait appel à des jugements politiques qui sont du ressort de chaque organisme réglementaire national. Ce domaine bénéficierait particulièrement d'une poursuite au niveau international des débats engagés.

En outre, le Groupe de travail n'a pas pris en considération d'une façon détaillée les conséquences à long terme d'activités humaines menées (ou non menées) au cours de la période antérieure à la fermeture, c'est-à-dire antérieure au scellement définitif du dépôt.

### ***Stockage définitif des déchets faiblement radioactifs à faible profondeur***

Ce rapport ne traite pas explicitement des problèmes posés par l'évacuation définitive de déchets faiblement radioactifs dans des dépôts de surface ou peu profonds. Il est néanmoins admis que l'évaluation des activités humaines joue un rôle très important dans la conception et les critères d'admission des déchets dans de tels systèmes d'évacuation. La sûreté de ces systèmes d'évacuation repose en partie sur la mise en place d'un contrôle institutionnel actif durant un laps de temps bien défini. Ce laps de temps varie généralement d'un siècle à plusieurs siècles, en fonction du pays concerné. Après cette période, il est admis que la surface de sol située au-dessus du dépôt peut être utilisée librement par la société.

Les évaluations des activités humaines futures sont donc nécessaires pour avoir une idée de la capacité radiologique en nucléides à période radioactive intermédiaire (tels que le Sr-90, le Cs-137) que la décroissance radioactive ramènerait à des niveaux acceptables à la fin de la période prescrite de contrôle institutionnel actif. De telles évaluations sont également requises pour assigner des valeurs limites supérieures aux quantités de radionucléides à vie longue qui pourraient être acceptées dans des

dépôts définitifs à faible profondeur. Ces dépôts resteront légèrement radioactifs au-delà de la période de contrôle institutionnel assuré et, en pratique, ces évaluations devraient être étendues pour couvrir des laps de temps de l'ordre de plusieurs siècles.

Nombre d'aspects débattus dans ce rapport à propos des dépôts géologiques profonds sont applicables aux composants radioactifs à vie longue des déchets faiblement radioactifs, stockés définitivement dans des dépôts à faible profondeur, ou à tout autre déchet radioactif à vie longue évacué à faible profondeur.

### ***Résidus de traitement des minerais d'uranium***

Les problèmes liés à l'évacuation des résidus de traitement des minerais d'uranium sortent du cadre du présent rapport. On estime généralement qu'il n'est pas nécessaire d'évacuer ces déchets dans des dépôts à grande profondeur, la stabilisation sur place et le recouvrement des terrils de déchets représentent l'option de gestion privilégiée.

## **1.5 Structure du rapport**

Le rapport est divisé en quatre chapitres principaux, correspondant aux thèmes énumérés à la Section 1.3. Le chapitre 2 est consacré à des généralités sur l'évaluation de sûreté et sur l'importance des activités humaines futures dans les évaluations de sûreté. Le chapitre 3 présente un examen plus détaillé des méthodes quantitatives visant à incorporer les activités humaines futures dans les évaluations de systèmes de stockage et il débat des principes liés au développement et la modélisation des scénarios d'activités humaines futures. Le chapitre 4 met en lumière diverses mesures d'ordre administratif et pratique qui pourraient être appliquées afin de réduire les conséquences et la probabilité d'éventuelles activités humaines futures perturbatrices. Enfin, le chapitre 5 résume les vues du Groupe de travail quant à la façon dont les activités humaines pourraient être prises en considération dans les évaluations de sûreté, d'un point de vue pratique, et énonce des recommandations relatives aux travaux supplémentaires à mener à l'échelon international.

## Chapitre 2

# Évaluation des risques liés aux activités humaines futures

### 2.1 Introduction

La sûreté à long terme de tout système de stockage définitif des déchets radioactifs doit être démontrée de manière convaincante avant la mise en service de ce système. Les activités humaines futures sont susceptibles d'affaiblir les performances des dépôts de déchets radioactifs situés dans des formations géologiques profondes. Comment apprécier les menaces découlant de ces activités ? Dans ce chapitre, on abordera certains problèmes fondamentaux relatifs aux hypothèses retenues dans l'analyse des activités humaines futures. Ces problèmes portent sur :

- Le champ couvert par les évaluations de sûreté.
- Les différences entre les effets d'actions humaines délibérées et les effets d'actions non délibérées.
- L'échelle de temps à prendre en considération dans l'évaluation des activités humaines.
- Les critères applicables à l'évaluation des risques découlant d'activités humaines.
- Les rôles respectifs des exigences qualitatives et des évaluations quantitatives.

### 2.2 Évaluation de sûreté et activités humaines futures

L'évaluation de sûreté a pour objet d'évaluer les performances globales d'un système de stockage définitif des déchets et de mettre en regard les résultats obtenus et les limites réglementaires. Il importe également, afin d'illustrer les incidences radiologiques, de démontrer que les sources possibles d'incertitude ont été systématiquement identifiées et évaluées.

Toutes les réglementations nationales applicables à l'évacuation de déchets radioactifs reposent sur le même principe de base, à savoir qu'il faut faire en sorte que la sûreté du dépôt soit assurée. Les activités humaines futures peuvent affecter l'étanchéité du système de stockage – le plus généralement en portant atteinte aux barrières de confinement – et donner ainsi lieu à des expositions radiologiques. La plupart des programmes ont donc instauré des règles visant à évaluer quantitativement les risques possibles liés à des activités humaines futures.

Les évaluations de sûreté des dépôts de déchets radioactifs reposent souvent sur plusieurs groupes d'hypothèses. Un premier ensemble d'hypothèses, qui conduit à la définition d'un «scénario de référence» ou «scénario central» considère que le fonctionnement du dépôt est exempt de toute perturbation due à des activités humaines ou à des événements naturels peu probables. Il arrive que soient pris en compte dans le scénario de référence des événements résultant de l'activité humaine, sous réserve que ces événements soient dotés d'une forte probabilité. Une analyse plus approfondie nécessite de prendre en compte des hypothèses (ou des scénarios) supplémentaires relatives à des



événements naturels ou à des activités humaines peu probables, mais qui auraient pour effet d'accroître le risque.

On trouvera une synthèse des méthodes globales d'évaluation de la sûreté dans plusieurs documents de l'AEN publiés récemment [par exemple, 43, 48].

### **2.3 Utilisation des évaluations de sûreté**

Une évaluation de sûreté prenant en considération les activités humaines peut viser des objectifs divers :

- Évaluer la robustesse d'un système de dépôt.
- Comparer divers sites ou diverses conceptions de stockage définitif exposés à des activités humaines potentiellement préjudiciables.
- Optimiser le système.
- Constituer un dossier d'autorisation.

#### ***Évaluer la robustesse du système***

La résistance d'un système de stockage définitif à des actions humaines non délibérées est quelquefois évaluée en démontrant sa robustesse (ou, selon le cas, sa vulnérabilité). Cette démonstration fait appel à un ou plusieurs scénarios considérés comme importants, en raison, soit de leur probabilité, soit de la gravité de leurs conséquences.

#### ***Comparer des conceptions et des sites***

Dans plusieurs pays, les critères applicables au choix du site d'un dépôt spécifient la nécessité d'éviter des zones contenant des ressources potentielles souterraines connues (voir Section 2.6). Pour ces pays, les évaluations de sûreté effectuées à des fins de choix des sites incluront, implicitement ou explicitement, les effets d'éventuelles activités humaines futures. Les comparaisons fondées sur des scénarios génériques seront difficiles en raison des différences entre sites. Néanmoins, chaque fois qu'une analyse particulière sera effectuée pour un système ou un site donné, les évaluations prenant en considération des activités humaines pourront contribuer à orienter les décisions en établissant une base de comparaison entre les diverses options.

#### ***Optimiser la conception***

On peut recourir à des techniques de prise de décision afin d'aider à optimiser la conception des systèmes de dépôts en vue de réduire les risques liés à des activités humaines futures. À supposer qu'un scénario spécifique conduise à une détérioration des performances du système de stockage définitif, il serait possible de débattre de la nécessité de revoir la conception et les coûts du système en termes de réduction éventuelle des risques. Par exemple, une mesure de protection utile contre la prospection de ressources naturelles sur le site consiste à conserver les informations relatives au dépôt telles que son emplacement, sa conception et l'inventaire des radionucléides qu'il contient. Cette mesure pourrait être mise en oeuvre par la conservation d'archives et la mise en place de marqueurs – l'une et l'autre générant des coûts à prendre en compte.

Les estimations qualitatives du rapport coût/bénéfice peuvent être utilisées comme des aides à la prise de décision pour des sites dont l'utilisation conduirait à la perte de ressources naturelles connues. La meilleure illustration de ce cas est donnée par les dépôts situés dans des formations de

sel. Dans ce cas, il convient de mettre en regard le «coût» d'une privation de l'accès au sel (ou à toute ressource associée telle que la potasse) et l'accroissement de sûreté lié à l'utilisation de tels sites dans des conditions naturelles.

### **Autorisation**

Une évaluation quantitative de performance est requise dans la procédure d'autorisation étant donné qu'elle représente le principal moyen de démontrer que les performances du système seront probablement satisfaisantes ou qu'elles répondront à certaines normes prises comme référence. Toutefois, une analyse quantitative des performances prenant en compte les activités humaines futures ne pourra jamais être exhaustive car ces activités seront toujours entourées d'une certaine marge d'incertitude et il est impossible de les imaginer toutes. C'est pourquoi, le Groupe de travail considère qu'il n'y a pas lieu d'axer les évaluations requises par les procédures d'autorisation de dépôts géologiques profonds, sur des spéculations relatives aux conditions futures de l'humanité.

Faut-il faire appel à des critères différents pour définir les normes et les réglementations applicables aux risques découlant, d'une part, d'activités humaines et, d'autre part, d'événements et de processus naturels ? Comme mentionné au chapitre 1, le Groupe de travail n'a pas considéré en détail les aspects non techniques des mesures réglementaires relatives aux activités humaines futures ; l'évaluation des risques liés à de telles actions fait appel à des jugements stratégiques qui sont du ressort de chaque organisme réglementaire national. Ce point sera discuté plus loin à la section 2.6.

## **2.4 Activités humaines interférant involontairement ou délibérément avec le dépôt de déchets**

Les activités humaines futures susceptibles d'endommager les systèmes d'évacuation peuvent être considérées comme involontaires ou délibérées, suivant qu'il y a eu ou non connaissance de l'existence du dépôt, de son contenu et des dommages potentiels. Les activités humaines involontaires sont définies comme étant :

*les actions à la suite desquelles le dépôt ou son système de barrières est accidentellement pénétré ou endommagé, soit parce que l'emplacement du dépôt était inconnu, que sa finalité a été oubliée, ou parce que les conséquences des activités entreprises ne pouvaient être prévues.*

A l'inverse, si les auteurs d'intrusions futures sont au courant de l'existence des déchets et des conséquences d'une rupture d'étanchéité du dépôt ou de son système de barrières, leurs actions seront considérées comme délibérées.

Le Groupe de travail est tombé d'accord sur le principe selon lequel la société qui crée un risque radioactif doit assumer la responsabilité de la mise au point d'un système d'évacuation sûr qui tienne compte du comportement futur des sociétés, dans la mesure du possible. Toutefois, la société actuelle n'a pas à protéger les sociétés futures des conséquences de leurs propres actions, dans la mesure où ces sociétés futures seraient informées des conséquences qui en découleraient.

Bien que, dans la plupart des cas, il soit aisé de différencier entre les actes délibérés et des actes involontaires, cette distinction peut être difficile à établir dans certaines situations particulières. Par exemple, dans le cas où suite à une intrusion involontaire dans un dépôt, une communauté s'aperçoit ultérieurement que les matériaux contenus dans le dépôt présentent un danger et est incapable de prendre les précautions nécessaires pour mettre hors d'état de nuire les matériaux radioactifs ou de

refermer le dépôt, faut-il prendre en considération les risques encourus par cette communauté dans une telle situation ?

Deux autres éléments sont à prendre en considération pour distinguer entre les intrusions délibérées et les intrusions involontaires. Il s'agit d'une part de la nécessité d'appliquer des accords de garantie concernant les substances nucléaires à des dépôts contenant des combustibles irradiés, et le souhait, dans certains cas, de faire en sorte que les déchets stockés dans des dépôts géologiques profonds soient récupérables par les sociétés futures.

### ***Garanties***

C'est à l'Agence internationale pour l'énergie atomique (AIEA) qu'incombe la responsabilité de surveiller le respect des garanties applicables aux matériaux fissiles tout au long du cycle de vie de ces matériaux [50]. L'AIEA envisage actuellement la possibilité d'imposer des accords de garantie pour les dépôts de déchets radioactifs [46]. Dans l'attente des résultats de l'étude de l'AIEA, le Groupe de travail n'a pas jugé utile de débattre la question des garanties. Néanmoins, il convient de noter que de telles dispositions pourraient donner lieu à des contrôles institutionnels actifs supplémentaires et encourager l'archivage des informations au sein même de l'AIEA, en ce qui concerne les dépôts de déchets fortement radioactifs. On reviendra sur cette question à la Section 4.2 de ce rapport.

### ***Réversibilité***

Les inquiétudes du public concernant la sûreté à long terme des systèmes d'évacuation des déchets radioactifs ont incité certains pays de l'OCDE à envisager des conceptions de dépôts qui permettraient la restitution à terme des déchets. Ces pays considèrent qu'une société évacuant ses déchets devrait laisser ouverte les options offertes aux sociétés futures. Par exemple, une société future devrait être en mesure d'accéder aux déchets si elle décidait que ce que nous considérons actuellement comme un déchet constitue en fait une ressource potentielle ou si elle décidait d'entreprendre des actions correctives ou de procéder à des réaménagements. C'est à partir de cette notion que des spécialistes suédois ont proposé d'appliquer le principe éthique ci-après à la conception des dépôts souterrains [40] : «Un dépôt devrait être construit de manière à éviter la nécessité de mettre en oeuvre des mesures de contrôle et de correction tout en laissant ouverte la possibilité d'effectuer des contrôles et d'appliquer des mesures correctives». Aucune échelle de temps ne figure dans cette proposition. D'autre part, dans d'autres pays, les réglementations envisagent la possibilité de récupération des déchets pendant un laps de temps déterminé (qui reste à préciser) après la fermeture et l'obturation du dépôt (par exemple aux États-Unis). Enfin divers pays considèrent qu'il n'y a pas lieu de considérer une réversibilité du stockage, estimant qu'une exigence de ce type n'a rien à voir avec la nécessité de garantir la sûreté des sociétés futures.

La réversibilité implique la possibilité d'accéder volontairement aux déchets, ce qui doit être pris en compte dans la conception même du dépôt. Les prescriptions de garantie pourraient également conduire à proposer des systèmes de dépôts se prêtant à un accès contrôlé pour les stockages contenant des combustibles irradiés. Les évaluations de sûreté devraient-elles envisager la possibilité d'une intrusion délibérée si l'intention de faciliter la réversibilité est incorporée à dessein dans la conception du dépôt ? La réponse à une telle question contient un élément de politique que les autorités réglementaires nationales auront à prendre en compte au cas où l'Agence responsable inclurait la réversibilité dans la conception du dépôt.

## 2.5 Échelle de temps à prendre en considération dans les évaluations

L'échelle de temps est un élément important de l'analyse des activités humaines potentiellement perturbatrices. Il convient de prendre en considération aussi bien le laps de temps après lequel le contrôle du dépôt par les pouvoirs publics ne peut plus être garanti, que le laps de temps après lequel il n'est plus nécessaire de tenir compte des activités humaines dans l'évaluation de sûreté.

### *Laps de temps pendant lequel il est possible de tabler sur les contrôles institutionnels*

Les analyses relatives aux activités humaines futures prennent en compte une période de contrôle institutionnel actif, pendant laquelle les actions perturbatrices pourraient être décelées par un système de surveillance du site. La surveillance pourrait être également confiée à une agence internationale dans le cas de combustibles irradiés. Cette période joue un rôle important dans l'évaluation de sûreté car la radioactivité des déchets est maximale immédiatement après l'évacuation et en supposant que les contrôles institutionnels soient efficaces, la probabilité que des activités humaines perturbatrices se produisent au cours de cette période peut être considérée comme nulle.

Cependant, il n'existe pas de consensus sur le laps de temps pendant lequel on peut se fier aux contrôles institutionnels actifs pour prévenir des activités humaines perturbatrices. Certains organismes réglementaires (par exemple ceux du Canada et de la Suisse) stipulent que, dans la mesure du possible, la confiance dans des contrôles institutionnels à long terme ne devraient pas figurer dans les caractéristiques de sûreté nécessaire [3, 14]. D'autres pays limitent la période de contrôle actif prise en compte pour l'évaluation de sûreté; par exemple, l'Agence pour la protection de l'environnement des États-Unis limite cette période à 100 ans après l'évacuation [4]. Une étude [5] propose une courbe de probabilité en fonction du temps pour l'efficacité des contrôles institutionnels actifs, partant de 0 au temps 0, pour atteindre l'unité après 500 ans à dater de la clôture et du déclassement du dépôt.

La probabilité que des activités humaines perturbent involontairement le système de dépôt peut être réduite en avertissant les intrus éventuels de la présence du dépôt et des risques qui y sont liés. Les mesures propres à réduire les risques découlant d'activités humaines futures sont discutées plus en détail au chapitre 4. Bien qu'on s'accorde généralement à reconnaître la nécessité d'opter pour un éventail de telles mesures, il est difficile de quantifier leur efficacité. Tous les scénarios d'évaluation prenant en compte l'occurrence d'activités humaines non délibérées prennent comme hypothèse de départ l'inefficacité de ces mesures.

**Échelle de temps des évaluations :** A l'autre extrémité de l'échelle de temps, on trouve le laps de temps pendant lequel on estime que des activités humaines perturbatrices doivent être prises en compte dans l'évaluation. Le Groupe de travail estime que les évaluations et les décisions devraient être élaborées à partir d'analyses portant sur un intervalle de temps qui reflète avec précision les risques inhérents aux déchets.

## 2.6 Réglementations en vigueur

L'élaboration de critères nationaux de sûreté à long terme applicables aux dépôts de déchets radioactifs est fondée, dans la quasi-totalité des pays, sur les critères internationaux en vigueur applicables à la protection radiologique des personnes et des populations. Toutefois, il n'est pas facile de savoir comment on pourrait démontrer que les dispositions de sûreté à long terme des dépôts sont

conformes aux critères fondamentaux de radioprotection. Les conséquences potentielles d'un dépôt pourraient se faire sentir à très long terme et pourraient dépendre d'événements dont l'occurrence est incertaine. Il est impossible d'estimer avec précision la probabilité de la plupart de ces événements. Ceci est particulièrement vrai pour les activités humaines futures.

Le Tableau 1 résume les critères en vigueur applicables à l'évaluation des risques liés au stockage définitif de déchets radioactifs à vie longue. Ces critères sont fondés sur la limitation des doses individuelles, des risques individuels, des doses collectives ou des rejets radioactifs. Les critères en vigueur au niveau international peuvent être utilisés pour distinguer les doses, les risques professionnels et les risques encourus par le public [7, 8]. Il est peu probable que ces distinctions présentent de l'importance pour évaluer les risques à très long terme découlant d'activités humaines futures dans un avenir lointain.

Le principe de la limitation des doses individuelles est généralement appliqué à l'évacuation des déchets radioactifs, mais ne devrait-on pas appliquer des principes réglementaires de nature différente pour juger des activités humaines futures ? A cet égard, certaines autorités réglementaires estiment, dans le cas de situations présentant une marge d'incertitude très large concernant le comportement humain, qu'il conviendrait d'accorder une importance plus grande à des notions complémentaires telles que la limitation de l'incidence sur la société [par exemple, 13].

Un petit nombre de pays, particulièrement les États-Unis, ont explicitement tenu compte des intrusions humaines dans la législation applicable aux déchets radioactifs (Tableau 1). Les réglementations des États-Unis envisagent explicitement le cas d'intrusions humaines involontaires. L'objectif visé est double : faire en sorte que l'intrusion humaine soit prise en compte dans le choix du site, dans la conception et dans l'évaluation des activités liées à un dépôt de déchets radioactifs et, d'autre part, fournir des lignes directrices quant à la manière de juger l'intrusion humaine involontaire comme source de risque. Par exemple, le règlement 40 CFR Part 191, de l'Agence pour la protection de l'environnement des États-Unis [4] expose une gamme de lignes directrices pour évaluer les effets de futures intrusions humaines non délibérées, probabilité de forage, propriétés des matériaux d'obturation des puits de forage et efficacité des contrôles institutionnels. En outre, le règlement 10 CFR Part 60 de la NRC (Commission de réglementation nucléaire des États-Unis) [16] contient une série de critères applicables au choix du site, assortie d'une proposition préconisant d'éviter les emplacements dont on peut prévoir qu'ils seront le lieu d'actions humaines préjudiciables.

Toutefois, la plupart des réglementations nationales n'ont pas encore défini clairement les principes d'évaluation des risques découlant d'activités humaines futures, dans les procédures d'autorisation. Une possibilité – déjà mise en oeuvre dans la réglementation des États-Unis – consisterait à juger les risques liés aux activités humaines futures de la même manière que les risques liés aux événements et processus naturels. A l'opposé, on pourrait tout simplement considérer qu'il n'y a pas lieu de prendre en compte dans la procédure d'autorisation les risques liés à des activités humaines futures.

Le problème n'est pas de nature purement technique, et toute politique réglementaire devra recourir à des arguments d'ordre éthique ou philosophique. Il conviendrait de débattre plus en profondeur les stratégies réglementaires à appliquer pour évaluer les risques associés à des activités humaines futures. Le Groupe de travail estime qu'un débat, fondé sur les arguments du présent rapport, pourrait être ouvert entre les pays intéressés quant à la meilleure manière d'aborder ce problème.

Tableau 1. Critères et objectifs nationaux et internationaux relatifs au stockage définitif de déchets radioactifs à vie longue

Organisation / pays / référence	Principaux objectifs / critères	Autres éléments importants	Critères de jugement applicables aux scénarios H d'intrusion humaine	Observations
AEN (1984) [7]	Pour les HLW risque indiv. max. $<10^3$ /an (toutes sources):	Risque indiv. / dose – meilleur critère de jugement de l'acceptabilité à long terme		Fas de consensus sur l'ALARA ou l'optimisation
CIPR (Pub. 46, 1985) [8]	Pour les HLW, doses indiv. (toutes sources): 1 mSv/an (scénarios d'évolution normale) ; $10^3$ /an (scénarios probabilistes)	Tant la probabilité que la dose devraient être prises en compte dans l'ALARA	Les activités humaines futures devraient être traitées de manière probabiliste	L'ALARA est utile, notamment pour comparer diverses options, mais n'est pas nécessairement le facteur le plus important dans le choix d'un site
AIEA (Collection Sécurité 99, 1989) [9]	Identiques à ceux de la publication CIPR 46		Les activités humaines futures sont des éléments perturbateurs aléatoires qui font généralement l'objet d'une étude probabiliste	Comporte également des critères techniques qualitatifs applicables aux systèmes de stockage définitif et considère le rôle de l'analyse de sécurité et de l'assurance qualité
CANADA (Document régl. R-104, 1987) [3]	Pour les HLW : objectif de risque indiv. max. : $<10^4$ /an	Laps de temps envisagé pour démontrer la conformité : $10^4$ ans  Pas d'accroissement brusque et considérable après $10^4$ ans	Les critères principaux sont applicables à tous les scénarios d'exposition ; pas de critères particuliers applicables aux scénarios de IH	Dispositions et lignes directrices qualitatives complémentaires non contraignantes dans les documents réglementaires
FINLANDE (Décision du Conseil d'Etat, 1991) [10]	Pour les LLW et ILW : dose indiv. max. $<0.1$ mSv/an, avec une dose indiv. max. $<5$ mSv/an résultent de conditions accidentelles dues à d'éventuels événements naturels ou activités humaines		Dose indiv. max. $<5$ mSv/an résultant d'éventuelles activités humaines	Pour le combustible irradié ou les HLW, le critère proposé pour la dose indiv. max. $<0.1$ mSv/an
FRANCE (Règles fondamentales de sécurité, RFS III.2.f, 1991) [11]	Pour les ILW et HLW: dose indiv. max. $<0.25$ mSv/an pour des scénarios d'évolution normale ; pour des scénarios d'évolution modifiée, le risque peut être pris en considération (produit de la probabilité du scénario par l'incidence de l'exposition)	Au-delà de $10^4$ ans, la limite de dose est considérée comme un niveau de «référence»	Hypothèses (Règles fondamentales de sécurité françaises, Appendice 2):  Date de l'intrusion humaine supérieure à 500 ans  Oubli de l'existence de l'emplacement d'un dépôt  Niveau technologique semblable au niveau actuel	Critères techniques, applicables au choix du site, définis en 1987

Tableau 1 (suite)

<p><b>ALLEMAGNE</b> (Article 45, para. 1 de l'Ordonnance sur la protection radiologique, 1989) [12]</p>	<p>Pour tous les types de déchets : dose indiv. max. &lt;0.3 mSv/an pour tous les scénarios raisonnables</p>	<p>Le calcul des doses indiv. est limité à 10<sup>4</sup> ans, mais le potentiel de confinement au-delà de 10<sup>4</sup> ans peut être évalué</p>		<p>Critères techniques qualitatifs complémentaires dans les lignes directrices et le document réglementaire</p>
<p><b>PAYS NORDIQUES</b> (Document relatif aux critères fondamentaux, 1993) [13]</p>	<p>Pour tous les types de déchets : dose indiv. max. &lt;0.1 mSv/an (scénarios normaux) ; risque indiv. max. &lt;10<sup>-4</sup>/an (événements perturbateurs)</p>	<p>Pour les HLW, critère complémentaire sur l'«apport d'activité totale» limitant les rejets dans la biosphère, fixé en fonction de l'apport de radionucléides naturels alpha</p>		<p>Comprend d'autres critères qualitatifs</p>
<p><b>SUISSE</b> (Document régl. R-21, 1993) [14]</p>	<p>Pour tous les types de déchets : la dose indiv. max. &lt;0.1 mSv/an à tout moment pour des scénarios raisonnablement probables ; risque indiv. max. &lt;10<sup>-4</sup>/an pour des scénarios peu probables</p>	<p>Un dépôt doit être conçu de façon à pouvoir être scellé à tout moment dans l'intervalle de quelques années, sans nécessiter un contrôle institutionnel</p>	<p>Pas de critères pour les scénarios de IH, sauf que pour les conséquences graves il peut être tenu compte des probabilités</p>	
<p><b>ROYAUME-UNI</b> [15]</p>	<p>Pour les L/ILW : atteindre &lt;10<sup>-4</sup>/an pour le risque indiv. provenant d'une seule installation</p> <p>Pour les HLW : pas de critères particuliers, mais vraisemblablement application de principes similaires aux objectifs relatifs aux L/ILW</p>	<p>Pas de calendrier défini pour des évaluations quantitatives</p>	<p>Le critère principal pour les scénarios de IH est généralement le risque individuel</p>	<p>Utiliser dans la mesure du possible le niveau ALARA</p>

Tableau 1 (suite)

<p>ÉTATS-UNIS</p> <p>(EPA 40 CFR Part 191, 1985 ; 1993)</p> <p>[4, 32]</p>	<p>Pour les HLW, le combustible irradié et les déchets transU, limites aux rejets prévus de radionucléides dans l'environnement accessible pour 10<sup>4</sup> ans, en fonction de l'objectif visant à limiter les préjudices graves pour la santé à moins de 10 au cours des 10<sup>4</sup> ans à dater de l'évacuation de chaque tranche de 1000 t de combustible irradié ou de HLW évacués.</p>	<p>Dose indiv. efficace engagée sur 10<sup>4</sup> ans &lt;0.15 mSv/an</p> <p>Autres prescriptions relatives à la contamination de l'eau potable</p>	<p>Les critères principaux sont applicables ; les instructions complémentaires comportent : le recours aux contrôles institutionnels actifs tant qu'ils sont applicables, mais la confiance dans l'évaluation des performances est limitée à 100 ans après la fermeture du dépôt ; les contrôles institutionnels passifs peuvent être fiables (archives, marqueurs), mais ces contrôles ne sont pas censés éliminer la possibilité d'une intrusion involontaire ; le nombre max. d'intrusions involontaires est de 30 forages/km<sup>2</sup> et par 10<sup>4</sup> ans</p>	<p>Les normes EPA de 1985 ont été reconduites et ont été révisées ultérieurement; en outre le Congrès des États-Unis. a récemment demandé d'envisager la révision des normes applicables au site de Yucca Mountain proposé au Nevada</p>
<p>(NRC 10 CFR Part 60, 1983)</p> <p>[16]</p>	<p>Pour les HLW, des niveaux minimums d'efficacité sont spécifiés pour :</p> <p>Les colis de déchets (confinement «pratiquement total» pour 300 à 1000 ans)</p> <p>Le système de barrières techniques (rejets &lt;10<sup>-3</sup> an de l'inventaire à 1000 ans à dater de la fermeture du dépôt)</p> <p>La durée de déplacement des eaux souterraines, avant la mise en place des déchets, entre la «zone perturbée» et l'«environnement accessible» &gt; 1000 ans</p>		<p>Critères de choix d'un site pour la prévention d'activité humaine dommageable prévisible ; prise en considération distincte des processus et événements escomptés (survenant naturellement) et des processus et événements non prévus (survenant naturellement ou suscités par l'homme</p>	<p>Les prescriptions de la NRC applicables à chaque sous-système visent à faciliter la mise en conformité avec les normes EPA ; les révisions seront entreprises si nécessaire afin de se conformer aux normes édictées par l'EPA pour le site de Yucca Mountain</p>

NOTE

- ALARA : niveau le plus bas qu'il soit raisonnablement possible d'atteindre
- HLW : déchets fortement radioactifs
- ILW : déchets moyennement radioactifs
- LLW : déchets faiblement radioactifs
- HI : intervention humaine



## **2.7 Conclusions succinctes**

Les activités humaines futures peuvent contribuer, dans une mesure non négligeable, au risque relatif à l'évacuation à grande profondeur de déchets radioactifs à vie longue. Bien que des analyses de sûreté soient quelquefois effectuées sans prendre en considération les activités humaines, une analyse plus exhaustive pourrait inclure une évaluation des risques liés aux activités humaines futures. Dans ce cas, il conviendrait de n'envisager que les effets involontaires de ces activités.

Les évaluations de sûreté se présentent le plus souvent sous la forme d'évaluations quantitatives. Toutefois, des évaluations qualitatives interviennent aussi dans cette évaluation quantitative – par exemple, dans les jugements portés sur le choix des scénarios, de la conception et de l'emplacement d'un dépôt. Les évaluations d'activités humaines futures peuvent être utilisées pour démontrer la sécurité d'un site, pour prendre en compte les améliorations qu'il est possible d'apporter à la conception du dépôt, pour comparer divers sites et diverses conceptions, et pour la procédure d'autorisation des dépôts. Toutefois, ces évaluations sont, par essence, incomplètes et ne présentent donc qu'un caractère illustratif de l'ensemble des possibilités.

Le laps de temps pris en considération dans l'évaluation des activités humaines futures est souvent limité à deux événements temporels :

- Le laps de temps après lequel le contrôle institutionnel du système de stockage définitif ne peut plus être considéré comme efficace.
- Le moment où le risque imputable aux déchets est moindre que le risque imputable au bruit de fond radioactif naturel. Ce moment peut être atteint après un laps de temps égal à plusieurs fois la période radioactive des radionucléides à vie longue, considérés comme importants pour l'évaluation des performances.

Il conviendrait d'engager des discussions plus approfondies entre les pays intéressés, concernant les stratégies réglementaires applicables au jugement des risques associés aux activités humaines futures.

## *Chapitre 3*

# **Élaboration de scénarios, analyse de conséquences et estimation de probabilités**

### **3.1 Introduction**

Le groupe de travail considère que, dans le contexte de l'étude des risques associés aux activités humaines futures et pour répondre au mieux aux problèmes rencontrés, les calculs des performances du système de stockage devraient être réalisés à partir de principes méthodologiques agréés au niveau international. Compte tenu de l'importance cruciale du choix des activités humaines futures qu'il conviendrait de prendre en compte dans les évaluations quantitatives des performances du système de stockage, ce chapitre débute par un bref examen des études déjà effectuées en matière d'évaluation des activités humaines, suivi d'une discussion succincte des principes permettant de circonscrire le champ d'une évaluation quantitative. Le présent chapitre traite également d'une façon plus approfondie des analyses de conséquences et des estimations de probabilités applicables aux activités humaines futures.

### **3.2 Examen des évaluations des conséquences associées aux activités humaines, déjà réalisées**

L'Annexe C comporte un résumé des études relatives aux activités humaines déjà réalisées, classées en fonction de la nature de la roche pouvant accueillir le dépôt. L'objectif principal de ce résumé est d'identifier les principaux scénarios qui ont déjà fait l'objet d'évaluations quantitatives, en vue de dresser un tableau général des méthodes utilisées dans l'évaluation des actions humaines. L'objet du présent chapitre est de mettre en évidence les points communs à ces diverses études. Il présente le contexte général de ces analyses et reprend les principaux scénarios qui ont fait l'objet d'évaluations quantitatives (voir Tableau 2).

#### **Contexte général des études déjà effectuées**

Dans les études passées en revue, seules les conséquences d'activités humaines non délibérées ont été évaluées. L'hypothèse qui a été retenue est celle d'une ignorance totale de l'existence ou de l'emplacement du dépôt de déchets.

Plusieurs analyses ont fait appel à des choix a priori pour l'élaboration des scénarios. Il est donc difficile de comparer les conclusions des différentes études.

**Tableau 2. Scénarios d'activités humaines analysés dans un choix représentatif d'études antérieures**

Pays	Roche encaissante du dépôt	Référence	Scénario d'intrusion humaine analysé
ALLEMAGNE (PAGIS)	sel	[28]	Exploitation minière d'une cavité de stockage, provoquant la chute de la moitié du contenu d'un seul puits de forage dans le puisard de la cavité. La cavité est ensuite remplie d'eau et scellée. La convergence du sel expulse lentement l'eau contaminée de la cavité vers les nappes aquifères supérieures d'eau potable.
ALLEMAGNE (site Konrad)	mine de fer désaffectée	Procédure d'autorisation	Forage de prospection atteignant le dépôt : <ul style="list-style-type: none"> <li>• exposition des travailleurs ;</li> <li>• exposition du public.</li> </ul> Excavation d'une nouvelle mine en aval du site.
BELGIQUE (PAGIS)	argile	[22]	Forage dans le panache contaminé de la nappe aquifère supérieure : <ul style="list-style-type: none"> <li>• consommation d'eau et de produits provenant d'animaux et de végétaux ayant absorbé l'eau du puits.</li> </ul>
CANADA	roche ignée	[23]	Forage d'un puits d'alimentation en eau dans une zone de fracture recoupant le dépôt : <ul style="list-style-type: none"> <li>• utilisation de l'eau du puits pour la consommation humaine et animale ainsi que pour l'irrigation des cultures.</li> </ul>
CANADA	roche ignée	[5]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forage de prospection pénétrant dans les déchets ;</li> <li>• exposition de membres de l'équipe de forage ;</li> <li>• examen de carottes ;</li> <li>• construction sur le terrain contaminé par les déchets extraits ;</li> <li>• occupation du terrain contaminé par les déchets extraits.</li> </ul>
CANADA	roche ignée	[24]	Utilisation, comme terre de jardin, de sédiments lacustres recouvrant une zone de décharge de produits contaminés. Utilisation, comme sol ou combustible de chauffage, de tourbe recouvrant une zone de décharge de produits contaminés.
ÉTATS-UNIS	sel	[35]	Extraction par lixiviation : <ul style="list-style-type: none"> <li>• consommation de sel.</li> </ul>
ÉTATS-UNIS	formation salifère stratifiée	[36]	Forage recoupant le dépôt ainsi qu'un aquifère le surmontant. Forage recoupant le dépôt et des aquifères adjacents, supérieurs et inférieurs.
ÉTATS-UNIS	formation salifère stratifiée	[37]	Forage recoupant le dépôt et une poche sous-jacente de saumure sous pression : <ul style="list-style-type: none"> <li>• examen de fragments de déchets ;</li> <li>• occupation du terrain à 500 m sous le vent d'un bassin de fluide de forage contaminé, abandonné sur le site ;</li> </ul>

Tableau 2 (suite)

ÉTATS-UNIS	formation salifère stratifiée	[37]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• consommation de viande de boeuf abreuvé par un puits creusé dans une nappe aquifère voisine, contaminée par de la saumure s'écoulant par un trou de forage recoupant la poche de saumure sous pression, le dépôt et la nappe aquifère ;</li> <li>• rejet cumulé de radionucléides pendant 10.000 ans dans l'environnement accessible.</li> </ul>
ÉTATS-UNIS	tuf	[47]	<p>Forage recoupant un conteneur ou une roche contaminée :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• dépôt de surface dans la limite du contenu d'un conteneur ou d'une roche contaminée ;</li> <li>• transfert, dans la limite du contenu d'un conteneur, dans deux aquifères sous-jacents.</li> </ul>
ÉTATS-UNIS	alluvions	[17]	<p>Forage de prospection traversant un trou de sondage contenant des déchets :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• déchets ramenés à la surface par l'écoulement du fluide de forage.</li> </ul>
FINLANDE	roche cristalline	[25]	<p>Forage d'un puits d'alimentation en eau dans le panache radioactif .</p> <p>Forage de prospection traversant les déchets :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• examen de carottes.</li> </ul>
FRANCE (projet PAGIS de la CCE)	granite	[26]	<p>Construction d'une cavité minière de 106 m<sup>3</sup> à 50 m du dépôt :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• modification de l'écoulement des eaux souterraines majorant le transport de radionucléides vers la biosphère ;</li> <li>• exposition du public suite à la consommation de lait provenant de bétail abreuvé par l'eau souterraine contaminée et la consommation de légumes dans une région contaminée par des déblais miniers.</li> </ul>
FRANCE	formation salifère stratifiés	[27]	<p>Extraction par lixiviation recoupant un dépôt :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• consommation humaine de sel.</li> </ul>
PAYS-BAS (OPLA)	sel	[29]	<p>Forage de prospection :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• examen de carottes.</li> </ul> <p>Fuites à partir d'une cavité de stockage :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• voir l'étude PAGIS ci-dessus.</li> </ul> <p>Extraction par lixiviation :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• travailleurs dans une fabrique de sel ;</li> <li>• consommation humaine de sel.</li> </ul> <p>Extraction classique :</p> <p>mineurs dans une mine adjacente.</p>
ROYAUME-UNI (NIREX)	roche cristalline	[20] [33]	<p>Forage de prospection traversant les déchets :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• examen de carottes ;</li> <li>• occupation de terrains contaminés par les déchets extraits.</li> </ul>
ROYAUME-UNI (DOE)	roche cristalline	[34]	<p>Forage de prospection traversant les déchets :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• examen de carottes.</li> </ul>
SUÈDE	roche cristalline	[30] [44]	<p>Forage d'un puits d'alimentation en eau dans le panache radioactif.</p>
SUISSE	roche cristalline marne	[31]	<p>Forage d'un puits d'alimentation en eau dans les aquifères supérieurs.</p> <p>Forages de prospection.</p>

En général, un ou plusieurs scénarios ont été élaborés à partir d'un ensemble d'hypothèses de base :

- Une intrusion humaine se produit directement dans l'avenir et conduit au transport vers la surface des matériaux radioactifs. Les effets sanitaires sont évalués à partir de l'exposition directe à ces matériaux contaminés. L'intrusion directe se produit par hypothèse au cours de la recherche de ressources souterraines telles que des hydrocarbures, des minéraux ou des eaux thermales.
- Après l'intrusion, des matériaux contaminés peuvent être entreposés en surface pendant un certain temps. Les sols contaminés peuvent ensuite être utilisés pour des activités humaines (comme l'agriculture). On peut envisager une gamme de voies d'exposition.
- Un puits est foré dans un aquifère ou dans une zone de fracture contenant des eaux contaminées. Les effets sanitaires correspondent à la consommation directe de l'eau. Cette eau peut également être utilisée à des fins d'irrigation et/ou d'alimentation de réservoirs.

Une attention moindre a été portée à la possibilité que des actions humaines altèrent le comportement des formations rocheuses ou des systèmes de barrières artificielles, sans qu'il y ait rejet immédiat de radionucléides à la surface. Dans la plupart des études, il est postulé que les futurs modes d'intrusion seront identiques à ceux qui pourraient survenir aujourd'hui. L'évolution de la société a pu être envisagée en termes qualitatifs, mais elle n'a pas été spécifiquement prise en compte dans les évaluations quantitatives. Par exemple, on postule généralement dans ces études que les techniques actuelles de forage seront encore longtemps utilisées et que les fréquences de forage dans plusieurs milliers d'années seront identiques à celles constatées au cours du siècle actuel.

A partir de telles hypothèses, plusieurs études ont conduit à élaborer des scénarios pour lesquels des activités humaines intrusives involontaires donnent lieu à des doses non négligeables. Dans certains cas, ces doses peuvent dépasser celles relatives aux scénarios d'évolution normale. Ceci n'a rien de surprenant étant donné que l'objectif du stockage géologique est de confiner des matériaux dangereux dans un espace réduit. Des critères probabilistes de risque peuvent être invoqués pour tenir compte des doses individuelles élevées, même si la démarche d'évaluation est de nature déterministe.

On dispose aujourd'hui de peu d'études portant sur les bénéfices éventuels qui découleraient de l'application de contrôles institutionnels passifs des dépôts de déchets radioactifs. Une exception notable doit être faite pour des travaux récents portant sur les marqueurs à long terme, effectués par le Sandia National Laboratories [45] ou sur l'archivage et la conservation des informations, effectués par la Commission nordique de sûreté nucléaire [39]. Ces travaux seront examinés dans le chapitre suivant.

### **3.3 Principes applicables à l'évaluation quantitative des activités humaines futures**

#### *Élaboration de scénarios*

Un rapport succinct sur l'état des connaissances relatives aux méthodes d'élaboration des scénarios a été publié récemment par un Groupe de travail de l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) chargé d'étudier les méthodologies d'identification et de choix des scénarios pour l'évaluation des performances d'un dépôt de déchets radioactifs [18]. Ce Groupe de l'AEN a défini la procédure d'élaboration des scénarios comme étant : «...l'identification, la description générale et le choix de futurs possibles à prendre en compte pour une évaluation fiable de la sûreté des dépôts de déchets

radioactifs». Un scénario donné représente : «...un ensemble possible d'événements et de processus et il brosse à grands traits un tableau de leurs caractéristiques et de leurs séquences».

Bien que l'examen des hypothèses retenues constitue une étape importante, les spéculations relatives aux activités humaines futures possibles seront toujours nécessairement discutables et les analyses incomplètes. Pour mener à bien des évaluations de sûreté, il importe essentiellement de disposer d'un ensemble raisonnable d'hypothèses permettant d'élaborer des scénarios représentatifs illustrant les calculs de risque. Chacun de ces scénarios peut être considéré comme une représentation imaginaire de l'avenir, utilisée comme base pour des calculs illustrant les performances d'un système d'évacuation.

### *Limitation du champ de l'évaluation*

Les incertitudes relatives à l'avenir, découlant de conjectures imprévisibles aujourd'hui, ne peuvent être traitées qu'en posant certaines hypothèses et en reconnaissant que ces conditions hypothétiques sont susceptibles de ne correspondre à aucune réalité future. Le Groupe de travail estime qu'une évaluation nécessaire pour une demande d'autorisation ne doit pas être axée sur des spéculations relatives aux conditions humaines futures. Il a donc cherché à dégager une approche qui permettrait d'éviter des spéculations sur l'avenir et qui serait uniformément applicable à divers sites et divers systèmes.

### *Principes posés*

Un postulat utilisé par le Groupe de travail consiste à supposer que les conditions de vie des sociétés futures seront essentiellement identiques aux conditions actuelles, dans le voisinage du site de stockage ou d'autres sites similaires situés ailleurs. Ce postulat ne préjuge en rien de l'évolution future possible de la société mais cette hypothèse peut être utilisée car elle fournit un moyen pratique pour estimer les risques potentiels liés aux activités humaines futures. Les variations possibles peuvent être évaluées au moyen d'études de sensibilité et d'analyses stochastiques couvrant les divers écarts par rapport à l'état de référence.

Dans le cadre d'une telle approche, les évaluations quantitatives seront fondées sur l'hypothèse selon laquelle les nombreux paramètres relatifs à l'humanité ou aux interactions futures entre les êtres humains et l'environnement restent identiques à ceux qui régissent le monde actuel, dans la mesure où ils se rapportent aux motivations et aux capacités techniques relatives à des activités susceptibles de porter atteinte à l'étanchéité des systèmes de stockage. Par exemple, on pourrait se baser sur la pérennité des distributions de population actuellement observées. On pourrait également postuler que, dans le voisinage du site de stockage, les caractéristiques liées à l'homme telles que les caractéristiques physiologiques et nutritionnelles, les schémas d'utilisation de l'eau et des terres, les capacités techniques et intellectuelles (en particulier celles qui interviennent dans les capacités d'intrusion directe), les ressources médicales, la structure sociale et l'échelle des valeurs, seraient identiques à celles d'aujourd'hui. Dans certains cas, ces caractéristiques pourraient être propres à la région dans laquelle un site d'évacuation a été choisi (par exemple la répartition de la population ou les schémas d'utilisation de l'eau et des terres).

Il subsiste encore un élément qu'il importe de préciser pour permettre l'élaboration et la modélisation de scénarios impliquant des activités humaines futures. Il s'agit du laps de temps pendant lequel serait sauvegardée la mémoire des caractéristiques et de l'emplacement du site d'évacuation. Ce paramètre joue un rôle important pour évaluer l'efficacité du temps de conservation des archives, d'une part, et la longévité et la possibilité de déchiffrer les systèmes de marqueurs de sites, d'autre part.

L'efficacité des contrôles institutionnels est tributaire, d'une façon critique, de la stabilité des gouvernements nationaux. En définissant une période d'efficacité des contrôles, le Groupe de travail note qu'il convient de prendre en considération la stabilité historique des gouvernements, la récurrence des guerres et des modifications de souveraineté avec les transferts de territoires et/ou de responsabilité associés.

### ***Application des méthodes d'élaboration des scénarios***

Les méthodes présentées dans le document [18] ont été appliquées pour élaborer des scénarios impliquant des activités humaines, soit prises isolément, soit en combinaison avec des processus et événements normaux, ainsi qu'avec les effets dus aux déchets et au dépôt [19]. Des listes couvrant une gamme importante d'activités humaines ont été dressées dans le cadre de ce travail. Le Groupe a regroupé dans l'Annexe B les diverses listes disponibles, en vue d'aider les représentants nationaux à rassembler les éléments de construction des scénarios permettant les évaluations de conséquences.

En définissant et en choisissant des scénarios impliquant des activités humaines futures, on ne peut éviter de se reposer fortement sur le jugement d'experts. Le Groupe de travail propose de faire appel à des experts dans une large gamme de disciplines scientifiques et sociales et il estime que la confiance dans les résultats de l'analyse peut être renforcée par un recours à des méthodes formelles de clarification et à des examens croisés par des pairs. En outre, il conviendrait de prendre en considération les interactions des activités humaines avec d'autres caractéristiques, événements et processus particuliers au site étudié.

Il ressort du résumé des études récentes, présentées à la Section 3.2 et à l'Annexe C, qu'il existe déjà un consensus de facto sur l'idée que les scénarios d'activités humaines futures pourraient être fondés sur l'hypothèse que les pratiques des sociétés futures, dans l'environnement du site du dépôt et sur d'autres sites similaires, seront identiques aux pratiques en cours. Néanmoins, le Groupe de travail plaide pour l'ouverture d'un débat à l'échelon international en vue d'arriver à un accord officiel sur une méthode systématique d'élaboration des scénarios applicables à des activités humaines futures. Il convient de souligner que le ou les scénarios en question, devraient, selon toute attente, varier d'un site à l'autre, en fonction des conditions géologiques et des sociétés humaines – comme l'ont montré les études antérieures.

### ***Remarques récapitulatives***

Les principes mis en évidence ci-dessus, utilisés en conjonction avec des méthodes standards pour l'élaboration de scénarios [18], constituent, dans l'idée du Groupe, une limitation pratique du champ de l'exercice de modélisation des activités humaines futures. La liste des éléments entrant dans l'élaboration des scénarios utilisés aux fins d'évaluation des activités humaines, telles qu'elles figurent dans l'Appendice B, est relativement complète. On peut considérer que cette liste constitue un point de départ valide pour l'élaboration des scénarios d'activités humaines et pour la prise en compte dans les évaluations de sûreté, des activités humaines.

## **3.4 Analyses des conséquences**

Le calcul des conséquences requiert le développement de modèles de calcul. Ceux-ci, à leur tour, sont basés sur des modèles construits à partir des divers scénarios analysés. Les évaluations des conséquences doivent être considérées comme des exemples de cas envisageables et doivent correspondre à ce qui peut être raisonnablement attendu.

Il faut considérer trois types de conséquences dans l'évaluation des risques liés aux activités humaines futures :

- Conséquences découlant d'une détérioration du système de confinement, y compris une modification du comportement de la géosphère ou des barrières artificielles.
- Conséquences frappant les intrus venant au contact direct de matériaux contaminés.
- Conséquences imputables à une large dispersion des matériaux extraits dans l'environnement de surface.

Ces analyses peuvent être soit déterministes, soit probabilistes. Dans le premier cas, les conséquences sont calculées à partir de plusieurs jeu de valeurs de paramètres, les conséquences correspondantes étant obtenues sous la forme de valeurs uniques pour chacun des jeux de valeurs. Dans les analyses probabilistes, la distribution de probabilité des paramètres est généralement utilisée comme entrée dans une simulation de Monte-Carlo, et le résultat est exprimé sous la forme d'une distribution de probabilités des conséquences. Dans l'un et l'autre cas, il y aura lieu d'effectuer des analyses de sensibilité et d'incertitude.

Même dans les analyses déterministes, il conviendra de considérer la probabilité du scénario étudié, par exemple la vraisemblance d'un forage atteignant le dépôt et le transfert de matériaux contaminés à la surface en résultant. Ces estimations de probabilité sont traitées dans le chapitre suivant du rapport. Dans les analyses de Monte-Carlo, les distributions de probabilités des paramètres, comme par exemple le temps passé à examiner un échantillon contaminé, utilisées comme entrées pour le calcul des conséquences doivent également être prises en considération. Indépendamment de l'utilisation de techniques déterministes ou probabilistes, les grandeurs d'entrées requises par les programmes de calcul seront surtout fondées sur des jugements d'experts.

Il faut disposer d'un système de modèles de calcul intégré afin de calculer les conséquences potentielles. On doit normalement élaborer des procédures de calculs applicables aux sous-systèmes suivants :

- Le champ proche du dépôt (le système de barrières artificielles et le volume rocheux immédiatement contigu).
- La géosphère (le système de barrières naturelles – l'intégralité du volume rocheux compris entre le dépôt et la biosphère).
- La biosphère, prenant en compte toutes les voies d'exposition pertinentes.

La modélisation des conséquences des activités humaines futures entraîne des modifications dans la façon dont ces trois sous-systèmes sont pris en considération.

### ***Champ proche***

En l'absence d'intrusion directe dans le dépôt, le champ proche peut être traité comme dans les scénarios d'évolution normale. En cas d'intrusion directe, le modèle du champ proche devrait normalement permettre d'évaluer l'inventaire des radionucléides participant directement au rejet. Il peut s'avérer nécessaire de considérer les modifications des propriétés des composants du système de barrières artificielles.

### ***Géosphère***

Nombre d'activités humaines sont susceptibles de modifier les propriétés de la géosphère : construction de barrages, forages, excavations profondes, etc. Dans la plupart des cas, il devrait être



néanmoins possible d'utiliser les modèles mis au point pour la géosphère non-perturbée, en tenant compte de la brève durée relative de ces activités. Certains paramètres d'entrée, tels que les taux de recharge des aquifères pourraient être modifiés. De plus, il convient de noter que dans le cas d'une intrusion dans le dépôt provoquant des rejets directs vers la biosphère, il n'est pas nécessaire de disposer d'un modèle de géosphère.

### ***Biosphère***

En général, les scénarios d'activités humaines relatifs à des actions visant la biosphère ou intervenant au sein de celle-ci, sont déjà pris en compte dans les analyses d'évolution normale du système d'évacuation. Il pourrait être nécessaire de porter un surcroît d'attention à certains modes de transport de radionucléides ou à certaines voies d'exposition, telles que l'exposition externe directe à des substances fortement radioactives excavées. Pour la plupart de ces voies d'exposition, on peut utiliser directement, ou au prix de légères modifications, les outils de calculs qui auraient été déjà mis au point pour évaluer la sûreté des systèmes de stockage définitif en l'absence d'activité humaine perturbatrice. En outre, on dispose de programmes de calculs déjà mis au point à des fins de radioprotection opérationnelle pour calculer les doses imputables à de petites sources fortement radioactives.

### ***Données d'entrée***

Alors qu'il est généralement possible de concevoir les programmes de calculs utilisés dans les analyses de conséquences à partir de programmes déjà disponibles, il est plus difficile de définir les caractéristiques des données d'entrée. Toutes les situations examinées sont hypothétiques et les valeurs des paramètres que l'on trouve dans les publications pour des situations (scénarios) apparemment similaires montrent des divergences difficilement explicables. Il n'existe parfois pas de moyen de prouver de manière convaincante qu'un ensemble de valeurs ou qu'une distribution de probabilité est plus acceptable qu'une autre. La validation a priori d'un modèle ou d'une valeur de paramètre concernant un comportement futur est impossible pour les échelles de temps considérées.

### ***Mise en garde***

Il est impossible, dans le cadre d'une évaluation à long terme, de prouver, dans le sens strict du terme, la sûreté d'un système d'évacuation des déchets radioactifs. Ces évaluations doivent toujours être assorties de mises en garde appropriées. En présentant les résultats d'analyses de conséquences, il convient de souligner que la quantification des conséquences associées à des comportements humains ne peut pas être donnée avec précision. Les résultats doivent plutôt être considérés comme des indications ou des illustrations sur les possibles activités humaines futures.

### ***Conclusions succinctes***

En résumé, le Groupe de travail considère que :

- Les activités humaines actuelles sont très diverses et change rapidement.
- La prévision d'activités humaines futures est affectée d'incertitudes.
- On doit s'attendre à observer des différences dans les résultats obtenus par des organismes différents.
- Il pourrait s'avérer difficile d'expliquer ces divergences.

Ces conclusions font ressortir la nécessité de définir des principes méthodologiques d'élaboration des scénarios d'activités humaines futures et d'évaluation quantitative de ces scénarios.

Ces principes devraient viser en premier lieu à améliorer la transparence de la démarche d'évaluation quantitative. Une telle méthode devrait permettre à deux individus, analysant le même site et utilisant les mêmes réglementations, d'arriver à des conclusions concordantes quant à la quantification des conséquences associées aux activités humaines futures.

### 3.5 Estimation des probabilités et jugements d'experts

Il est impossible d'établir des probabilités strictement vérifiables pour des activités humaines futures. Il est aussi impossible de concevoir une expérience reproductible dans laquelle un événement ou une action se produirait au cours de certains essais et ne se produirait pas au cours d'autres essais. Le système de stockage définitif ne sera doté que d'un seul avenir et l'événement ou l'action envisagée, soit se produira, ou ne se produira pas. En conséquence, les estimations de «probabilité» seront inévitablement de natures spéculative et subjective, même si elles sont fondées sur des données historiques réelles relatives à la fréquence des forages. On devrait donc plutôt considérer des «degrés de vraisemblance» plutôt que des fréquences relatives (vérifiables). En raison de cet élément de subjectivité, ces probabilités ou degrés de vraisemblance ne pourront avoir qu'une valeur indicative dans le cadre de l'analyse des risques pour un jeu d'hypothèses particulier.

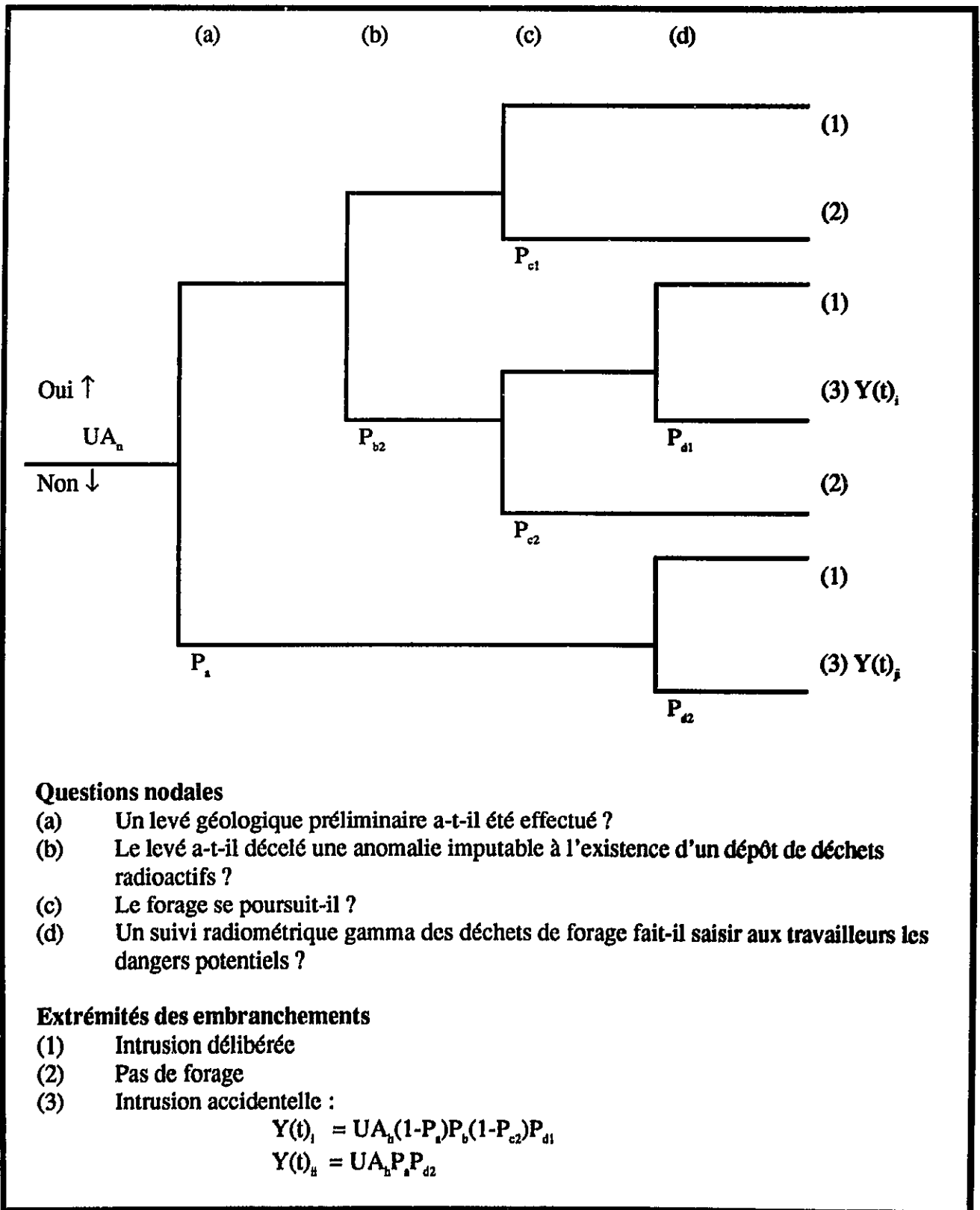
Le Groupe de travail a débattu des similarités et des différences dans la prévision des événements et processus perturbateurs naturels d'une part, et des événements liés à des activités humaines futures, d'autre part. Les estimations de la probabilité d'occurrence des événements des deux types sont fondées, dans une large mesure, sur des jugements d'experts. Elles sont, en outre, entachées de grandes incertitudes. Les membres du Groupe de travail n'ont pas réussi à se mettre d'accord sur la validité relative des jugements d'experts requis pour l'évaluation des risques liés à l'un et l'autre types d'événements perturbateurs potentiels. C'est là un domaine où la poursuite de débats plus approfondis à l'échelon international pourrait s'avérer utile.

Chaque activité humaine future perturbatrice peut être décomposée en une suite d'événements indispensables pour que la situation envisagée se produise. Les probabilités partielles de ces événements sont ensuite agrégées pour calculer la probabilité de la situation envisagée. Ces probabilités peuvent être évaluées au moyen de trois méthodes distinctes : (i) les arbres d'événements utilisés pour générer des scénarios, (ii) la simulation globale de système, et (iii) les modèles markoviens. Il est possible évidemment de recourir à des combinaisons de ces trois méthodes.

#### *Scénarios et arbres d'événements*

L'établissement d'arbres d'événements représente une des approches possibles d'évaluation de la probabilité des scénarios d'activité humaine. Les arbres d'événements sont des graphes représentant une séquence d'événements aboutissant à plusieurs conséquences possibles. Chaque embranchement représente une question à laquelle il faut répondre par oui ou par non. Les états correspondants se voient assigner des probabilités complémentaires qui dépendent des embranchements situés aux noeuds précédents dans l'arbre. La probabilité d'atteindre l'extrémité de n'importe quelle branche de l'arbre est égale au produit des probabilités partielles des embranchements conduisant à l'état final envisagé.

Figure 1. Arbre d'événements applicables à une intrusion humaine



Note : La fréquence annuelle des intrusions humaines non délibérées est, à tout moment, égale à  $Y(t)_i + Y(t)_a$ , où  $U(t)$  représente la fréquence annuelle par unité de surface d'une proposition de forage.  $A_n$  est la surface horizontale des panneaux de déchets et  $P_i$  représente les probabilités d'une réponse NON aux questions nodales (a) - (d).

Par exemple, un scénario d'intrusion dans un dépôt géologique profond lors d'un forage de prospection pourrait comporter les événements suivants :

1. La région du dépôt fait l'objet d'une prospection pour une ressource minérale.
2. Un forage est réalisé au-dessus du dépôt.
3. Le forage est suffisamment profond pour atteindre le dépôt.
4. Aucune substance radioactive n'est décelée au cours du forage ni dans les résidus de forage.

Il est alors possible d'estimer directement les probabilités ou les fréquences correspondant à chaque événement isolé. Considérons par exemple l'événement 2 où un forage est réalisé au-dessus des déchets. Une des méthodes d'évaluation consiste à interroger des experts qualifiés au sujet des probabilités correspondant à l'événement 2. L'expert peut répondre en donnant une probabilité ou une distribution de probabilités correspondant à la densité de forages. Il faudra alors multiplier la densité de forages par la superficie présumée de la projection horizontale du dépôt ou des conteneurs des déchets. Le résultat sera exprimé soit par une valeur unique, soit par une distribution de probabilité donnant la fréquence de forages estimée. Il vaut mieux privilégier la distribution de probabilité parce qu'elle reflète mieux l'incertitude affectant l'événement, mais la méthode retenue doit être adaptée au type de paramètre et au degré de connaissance de ce dernier.

La Figure 1 représente un arbre d'événements utilisé pour calculer la fréquence d'une intrusion, délibérée ou accidentelle, résultant d'un forage de prospection [20]. Les probabilités des diverses conséquences résultantes sont indiquées à l'extrémité des branches.

### *Simulation globale de système*

En principe, des activités humaines futures pourraient être incorporées dans un modèle probabiliste global d'évaluation de systèmes, en conjonction avec d'autres événements et processus normaux non perturbateurs [21]. Les distributions de probabilités relatives aux activités humaines seraient introduites dans un programme informatique permettant des analyses stochastiques, et les conséquences seraient explicitement modélisées pour chaque mode d'intrusion.

Par exemple, le modèle de simulation pourrait échantillonner en premier lieu le moment où le contrôle institutionnel actif n'est plus opératoire. On pourrait alors choisir le type d'intrusion à partir d'une distribution discontinue de types d'intrusions. De même, la durée du contrôle passif des intrusions serait échantillonnée à partir d'une autre distribution. On pourrait ainsi simuler une séquence complète d'intrusions à partir d'échantillonnages successifs.

La réinstauration d'un contrôle institutionnel actif de l'utilisation des sites, après l'intrusion pourrait aussi être échantillonnée. Les paramètres définissant la réinstauration du contrôle pourrait prendre la forme de valeurs déterminées ou de distribution de probabilité et ils pourraient dépendre du type d'intrusion et/ou de la conséquence de l'intrusion.

### *Modèles markoviens*

Il est aussi possible de recourir à des modèles markoviens pour estimer les probabilités d'activités humaines futures [voir par exemple 51]. Dans une chaîne markovienne du premier ordre, par exemple, l'état des connaissances relatives aux déchets radioactifs durant une période donnée dépend uniquement de l'état des connaissances au cours de la période précédente. Au cours des périodes successives, la connaissance du dépôt ira en décroissant, à moins que le dépôt ne soit

redécouvert. Le recours à un modèle markovien du premier ordre exige une estimation des probabilités de passer d'un état de connaissance à un autre, et des probabilités que chaque type d'intrusion rétablisse une partie des informations relatives aux déchets radioactifs stockés.

### ***Assurer la crédibilité***

L'analyse des activités humaines susceptibles d'affecter des dépôts géologiques profonds repose dans une très grande mesure sur des jugements d'experts. Même si les experts ne sont pas habitués à donner directement la probabilité des événements ou la distribution de probabilité correspondant à la fréquence de différentes activités humaines futures, les jugements d'experts joueront toujours un rôle essentiel dans le choix des modèles, des sources de données et des hypothèses à retenir pour l'analyse.

L'argument essentiel à prendre en considération dans l'estimation de la probabilité des événements et des processus intervenant lors d'une intrusion humaine est la crédibilité. Parmi les éléments qui renforceront la crédibilité des estimations de probabilité, on peut citer :

- Une interprétation soignée des données historiques disponibles.
- Une explication claire sur le fait que des probabilités d'intrusion humaine ne représentent que des indicateurs et non des valeurs que l'on puisse valider. En ce qui concerne l'utilisation de données historiques de fréquence, l'analyse est conditionnée par les hypothèses faites sur le comportement futur des sociétés humaines.
- Le recours à la modélisation vise d'une part, à réduire le problème global à un grand nombre d'évaluations plus simples et, d'autre part, à mettre clairement en évidence les facteurs qui permettraient d'accroître ou de réduire les probabilités.

Eu égard au grand nombre d'incertitudes entrant en jeu, une approche, facile à exposer, peut se révéler plus convaincante qu'une analyse complexe difficile à expliquer et à suivre. S'agissant d'évaluation de probabilité d'activités humaines futures, une complexité accrue ne reflète pas nécessairement un réalisme accru et ne sera probablement pas de nature à inspirer une confiance accrue dans les résultats.

Le niveau de confiance est un élément particulièrement important lors du recours à des jugements d'experts. Ce qui importe par dessus tout est de choisir avec soins les experts, de formuler en toute clarté les questions auxquelles ils sont invités à répondre et de documenter aussi bien que possible les procédures, les motifs et les conclusions de leurs travaux.

## Chapitre 4

### Mesures de protection

#### 4.1 Introduction

En raison de leur longue durée de vie, certains radionucléides présents dans les déchets radioactifs peuvent présenter un risque pour les générations futures. Le Groupe de travail estime que c'est à la société qui évacue ces déchets qu'incombe la responsabilité de prendre les mesures propres à réduire les risques relatifs aux activités humaines futures susceptibles d'endommager accidentellement le système de stockage. Aussi bien la probabilité que les conséquences d'activités humaines futures perturbatrices peuvent être réduites en choisissant des sites et des conceptions appropriées et en mettant en oeuvre des mesures institutionnelles. Ces dernières peuvent être soit actives soit passives. Les mesures actives comprennent les limitations à l'accès ou à l'utilisation du site. Les mesures passives font appel à des systèmes organisés de conservation des informations et de marquage des sites.

La mesure de protection la plus efficace pour lutter contre des activités perturbatrices non délibérées est le contrôle institutionnel actif des sols situés à la verticale et aux alentours du site d'évacuation. Cette mesure constitue le fondement des procédures d'autorisation des installations de stockage à faible profondeur pour tous les types de déchets. Elle peut être également appliquée aux dépôts à grande profondeur pendant un laps de temps aussi long que possible pour prévenir les intrusions accidentelles et les autres activités humaines perturbatrices non délibérées, aux alentours du site d'évacuation.

Toutefois, on ne peut compter indéfiniment sur un contrôle institutionnel actif. A titre d'exemple, certaines réglementations nationales prévoient un contrôle actif limité à quelques siècles après la fermeture et la mise hors-service du dépôt. En conséquence, il convient d'envisager d'autres mesures de protection, notamment :

- La construction des dépôts loin des zones renfermant des ressources potentielles. Bien que cette mesure puisse être considérée comme la plus efficace et qu'elle figure dans les lignes directrices tant nationales qu'internationales sur le choix des sites, d'autres facteurs pourraient s'avérer aussi importants comme par exemple la nature des formations géologiques, l'acceptation du dépôt par les populations locales.
- L'isolement des déchets de l'environnement humain. S'agissant des dépôts géologiques profonds, la seule profondeur du dépôt constitue un facteur important de diminution du risque associé aux éventuelles activités humaines perturbatrices. Si toute information sur l'emplacement du dépôt de déchets venait à être perdue, la probabilité d'une intrusion directe diminue si la profondeur du dépôt augmente.
- L'application d'autres critères liés à la conception des dépôts de déchets (par exemple la disposition des déchets, la nature des matériaux de remblayage) et à la forme même des déchets (par exemple la faible tendance à former des poussières en cas d'exposition à l'air

libre) peut aider à réduire la nocivité des conséquences des activités humaines perturbatrices.

- La conservation d'informations à différents niveaux de la société et à différents emplacements peut aider à réduire la probabilité d'activités humaines perturbatrices à court terme (au cours des 500 années suivant le stockage). Il conviendrait de faire appel simultanément à plusieurs systèmes. L'archivage sur papier est actuellement celui qui est doté de la plus grande longévité.
- A plus long terme, des marqueurs physiques de grande dimension disposés sur le site ou à proximité de celui-ci peuvent contribuer à réduire la probabilité d'activités humaines perturbatrices. Il ressort de travaux menés récemment aux États-Unis que des marqueurs bien conçus pourraient rester efficaces pendant plusieurs milliers d'années. Néanmoins, certains font valoir qu'à très long terme, le message concernant le risque lié au dépôt pourrait être mal compris et que les marqueurs auront pour effet principal d'attirer l'intérêt sur le dépôt (voir ci-dessous). En tout état de cause, les systèmes de marqueurs en surface situés dans des zones exposées à d'éventuelles glaciations ont peu de chance de survivre aux prochaines glaciations qui pourraient survenir (dans les dix mille prochaines années environ).
- L'installation de barrières physiques s'opposant aux intrusions (par exemple la mise en place d'un épais voile de béton au-dessus des déchets évacués ou l'utilisation de conteneurs renforcés) peut diminuer la probabilité d'une intrusion non délibérée. Toutefois, cette mesure est probablement la moins efficace et ne sera pas discutée plus avant.

Tant le choix du site du dépôt que la profondeur de ce dernier pourraient être considérés comme des paramètres de conception. Ils font l'objet d'une discussion distincte ici, en raison de leur capacité relativement importante à atténuer le risque lié aux activités humaines non délibérées.

Bien qu'un large éventail de mesures de protection soit examiné plus en détail ci-dessous, les débats menés au sein du Groupe de travail ont largement bénéficié des travaux effectués par les Sandia National Laboratories sur les marqueurs [45] et par la Commission nordique de sûreté nucléaire sur la conservation des informations [39]. Une grande partie des éléments qui ont nourri le débat sur ces thèmes proviennent des travaux menés sous l'égide de ces deux organisations.

## **4.2 Contrôle institutionnel actif**

Le contrôle institutionnel actif est probablement très efficace à court terme pour prévenir les activités humaines futures susceptibles de perturber le stockage définitif. Bien qu'on ne puisse compter sur une pareille mesure pendant un temps illimité, elle pourrait en principe se montrer efficace aussi longtemps que les déchets représentent un risque potentiel.

D'autre part, il existe un principe éthique selon lequel la société qui bénéficie de l'usage d'une certaine technologie devrait assumer entièrement la responsabilité d'une évacuation adéquate des déchets résultants. L'industrie nucléaire s'est toujours préoccupée de démontrer qu'il est possible de gérer les déchets d'une manière telle qu'ils ne représentent qu'une charge négligeable (par exemple, en matière de contrôle institutionnel actif) pour les sociétés futures. Cela a été un des principaux arguments pour l'évacuation précoce des déchets radioactifs dans des dépôts situés à grande profondeur, par opposition au stockage à long terme des déchets en surface.

Le contrôle institutionnel actif implique un contrôle direct du site et/ou l'acquisition du site, par des autorités locales ou centrales, en vue d'en limiter l'accès ou son utilisation. Certaines propositions intéressantes ont été avancées quant aux utilisations possibles du sol situé au-dessus d'un dépôt profond, en vue de prévenir toute action humaine dommageable. On a ainsi proposé, par exemple, de construire sur cette surface un musée consacré à l'utilisation des diverses formes d'énergie par l'homme, ou d'y établir une réserve naturelle.

En outre, les pays signataires du Traité de non-prolifération des armes nucléaires [50] s'engagent à appliquer des mesures de garantie à toutes les installations nucléaires à usage pacifique situées dans leur pays. Ces mesures impliquent la surveillance de ces installations par l'AIEA en vue de déceler toute tentative de détournement de substances nucléaires (fissiles) provenant d'activités nucléaires non-militaires. Comme déjà mentionné à la Section 2.4, l'AIEA a étudié, sans encore les préciser, les possibilités d'appliquer de telles mesures aux installations de stockage définitif du combustible irradié [46]. Ces mesures permettront presque certainement de détecter des forages, ou d'autres formes d'intrusion, sur un site de stockage définitif, après sa fermeture. Elles devraient comprendre en outre, la notification à l'AIEA de toutes informations relatives à la conception et à l'inventaire du système d'évacuation, informations qui seraient ensuite stockées dans une base de données internationale.

Certaines réglementations nationales en vigueur admettent la prise en compte, dans les évaluations de performances, d'un contrôle institutionnel actif s'étendant sur des périodes de plusieurs centaines d'années après la fermeture et la mise hors-service du dépôt. Toutefois, la fiabilité de ce contrôle pourrait s'amenuiser au cours du temps. Au-delà de la période d'exclusion réglementaire, les responsables de l'évaluation des performances (et les concepteurs des dépôts) doivent admettre que les contrôles institutionnels actifs ne suffisent pas à garantir l'absence d'activités humaines perturbatrices.

### 4.3 Choix du site des dépôts

Les lignes directrices, qu'elles soient nationales ou internationales, relatives au choix des sites, stipulent qu'il convient d'éviter de placer des dépôts dans des zones susceptibles de contenir des ressources souterraines potentielles. Ce critère est principalement justifié par l'idée qu'une intrusion accidentelle sera plus probable dans des zones considérées comme susceptibles de renfermer des ressources naturelles. De plus, éviter ces zones réduit la probabilité que ces ressources puissent être un jour contaminées par des substances radioactives, soit par l'intermédiaire des eaux souterraines, soit par une voie de transfert ouverte par l'homme, ce qui se traduirait par l'impossibilité d'utiliser ces ressources (notion quelquefois exprimée par le terme «stérilisation»).

Certains font valoir qu'il conviendrait d'éviter l'évacuation des déchets radioactifs dans des formations salifères, qui peuvent être considérées comme une ressource naturelle. L'abondance des réserves de sel et la grande sûreté garantie par la géologie des formations salifères dans des conditions normales font que les avantages de ce type de site pour l'évacuation des déchets compensent largement la perte résultante d'une ressource exploitable.

Bien que l'on puisse considérer que ces critères sur le choix des sites constituent la mesure de protection la plus efficace pour réduire la probabilité d'une future intrusion humaine non délibérée, on admet que d'autres critères présentent également une grande importance pour le choix de l'emplacement, notamment :



- Des critères liés à la sûreté, comme la sûreté du site en l'absence d'activités humaines perturbatrices. C'est ce critère qui a guidé le choix des formations géologiques salifères pour y creuser des dépôts profonds dans plusieurs pays, tels que les États-Unis (WIPP) et l'Allemagne (Gorleben).
- La nécessité de recueillir l'acceptation du dépôt par les populations locales. Par exemple, les pays de l'OCDE font de plus en plus souvent appel à des négociations pour décider des sites de stockage de déchets dangereux, y compris des déchets radioactifs.
- Coût. Par exemple, dans certains cas, la comparaison des coûts de transport a contribué à prendre la décision de placer les sites de dépôts à proximité de la principale source des déchets.

#### **4.4 Isolation des déchets de l'environnement humain**

S'agissant des dépôts géologiques profonds, la seule profondeur du dépôt constitue un facteur important de diminution des probabilités d'occurrence d'éventuelles activités humaines perturbatrices. C'est l'un des arguments avancés en faveur du principe d'évacuation. Si la mémoire de l'emplacement ou du danger représenté par un dépôt de déchets est perdue, le risque d'une intrusion directe diminue en fonction de l'augmentation de la profondeur du dépôt, en particulier lorsque celui-ci est situé au-dessous des principales cibles potentielles d'une intrusion humaine. La nature de ces cibles et leur profondeur varieront d'un site à l'autre. Néanmoins, une précaution essentielle à prendre en compte pour la plupart des sites est de s'assurer que le dépôt se situe bien au-dessous des nappes souterraines susceptibles d'être exploitées.

La profondeur des cibles potentielles d'une intrusion ne représente qu'un des éléments conduisant au choix de la profondeur d'un dépôt. La plupart des pays envisagent de constituer des dépôts de déchets radioactifs à vie longue à des profondeurs situées entre 200 et 1 000 m, le niveau exact dépendant des conditions géologiques et hydrologiques locales.

#### **4.5 Critères de conception**

Les choix de conception du dépôt et de conditionnement des déchets peuvent contribuer à atténuer les conséquences des activités humaines perturbatrices. Bien sûr, la réduction des conséquences associées à ces activités ne devrait pas être le seul ou même le plus important principe directeur de la conception. Cependant les améliorations de la conception qui n'affecteraient pas la sûreté intrinsèque du dépôt dans des conditions normales d'exploitation doivent être examinées.

Les options de conception qui ont été envisagées comprennent :

- La disposition verticale des colis peut contribuer à réduire la probabilité qu'un forage atteigne directement un colis. L'empilement vertical de colis dans des trous de forage très profonds réduirait au maximum la probabilité d'endommagement de colis. A l'inverse, une disposition horizontale des colis, bien que conduisant à une plus grande surface d'impact direct possible, réduirait les conséquences d'un impact direct éventuel.
- Il serait possible de ralentir le transfert de radionucléides vers un puits de forage qui aurait pénétré le dépôt lui-même ou la formation hôte en limitant la perméabilité de l'ensemble des constructions artificielles et la solubilité des radionucléides dans cet environnement. Cela orientera le choix des matériaux de remblayage et de leur degré de compaction à

l'intérieur du dépôt. Cela pourra gouverner également la disposition des colis de déchets et la conception du colis déchet lui-même.

- Les déchets pourraient être conditionnés de façon à limiter leur tendance à former des poussières s'ils venaient à être involontairement extraits du dépôt et exposés à l'air libre.
- Des écrans métalliques pourraient être installés au-dessus des conteneurs afin de dévier les instruments de forage et de réduire ainsi la probabilité d'une exhumation directe des déchets.
- On pourrait utiliser à l'intérieur du dépôt des matériaux produisant une anomalie magnétique ou toute autre anomalie géophysique détectable à la surface. Ceci pourrait avertir les intrus potentiels de la présence d'un dépôt anormal en profondeur. Toutefois, la question reste posée de savoir si cette anomalie signalant la présence d'un dépôt anormal augmentera ou diminuera la probabilité d'une intrusion.

Chaque pays devrait s'attacher à optimiser la conception du dépôt destiné à un site donné, sur la base de considérations touchant à la sûreté, aux aspects techniques, économiques et éthiques. Un débat approfondi de ces problèmes d'optimisation sort du cadre de ce rapport.

#### **4.6 Conservation des informations**

On peut réduire la probabilité qu'une action humaine non délibérée endommage le système de stockage définitif en avertissant les intrus éventuels de la présence des déchets et des dangers qu'ils représentent. Ceci pourrait être réalisé au moyen de marqueurs ou de monuments érigés sur le site [45], d'archives nationales ou internationales [39] et par divers moyens d'archivage et de réglementation tels que les bases de données relatives aux mines, les contrôles d'utilisation des sols, une réglementation des forages ou encore la propriété publique du site. On a invoqué l'argument selon lequel la mémoire collective en utilisant toutes les formes de communication verbales et écrites, a réussi à préserver efficacement les connaissances du passé pendant plusieurs siècles et qu'elle devrait être encore plus efficace pour préserver les connaissances dans l'avenir [41].

Le but principal d'un système de conservation des connaissances relatives aux dépôts de déchets radioactifs est de prévenir toute intrusion accidentelle et non autorisée. De plus, la société future devrait disposer d'une information suffisante pour prendre en connaissance de cause des décisions relatives aux intrusions délibérées. Les principales questions auxquelles il faut tenter de répondre sont :

- Quels sont les informations les plus importantes qu'il convient de conserver ?
- Sous quelle forme faut-il conserver les informations, tant à court terme qu'à long terme ?
- Quelles sont les mesures à prendre pour faire en sorte de sauvegarder ces informations et pendant combien de temps celles-ci pourront-elles être conservées ?
- Que faire pour assurer la diffusion des informations ?

##### ***Informations à conserver***

Les informations fondamentales à conserver pourraient être notamment :

- L'emplacement exact du dépôt.
- La conception du dépôt, sa forme et les barrières qui le constituent.

- L'inventaire des substances radioactives et chimiques qu'il contient.

Les informations secondaires à préserver pourraient comprendre:

- La législation applicable au stockage définitif des déchets.
- La documentation établie dans le cadre de la procédure d'autorisation du dépôt, y compris l'évaluation de sûreté définitive.
- Les rapports concernant la phase d'exploitation du dépôt, telles que des bases de données sur l'emplacement des colis de déchets et les modifications apportées à la conception.
- Des informations générales relatives à la société responsable du stockage définitif des déchets.

D'après une étude menée par les pays nordiques [39], l'espace occupé par les documents techniques les plus importants concernant un dépôt de déchets devrait être de l'ordre d'un à dix mètres de rayonnage (un mètre de rayonnage équivaut à environ 7 000 pages).

### *Support de l'information*

A l'heure actuelle, les principaux supports de l'information sont le papier, les microfilms et les disques magnétiques et optiques [39]. La durée de vie des archives sur papier peut atteindre mille ans, dans de bonnes conditions. La durée de vie estimée d'un microfilm est comprise entre 200 et 400 ans si l'information est régénérée au moins une fois. A l'opposé, les supports magnétiques et optiques doivent être recopiés après quelques années, étant donné que leur durée de vie actuelle est inférieure à dix ans. En conséquence, l'archivage à long terme fait appel actuellement soit au papier, soit au microfilm pour le stockage de l'information.

### *Sauvegarde de l'information*

Il ressort de l'expérience acquise dans plusieurs pays européens qu'il est possible d'assurer avec succès un contrôle institutionnel sur les matériaux archivés pendant des périodes d'au moins plusieurs centaines d'années. Par exemple, l'Administration des carrières à Paris a été créée par Louis XVI pour prévenir les dommages causés aux bâtiments construits au-dessus des carrières. Cette administration existe toujours et continue à contrôler les différents aspects de l'infrastructure de Paris. S'agissant des dépôts de déchets radioactifs, on pourrait raisonnablement compter, sur une conservation des informations archivées pendant des périodes pouvant atteindre 500 ans. L'histoire de l'humanité donne à penser qu'il n'est pas possible de garantir une stabilité institutionnelle pendant des laps de temps plus prolongés.

De nombreuses menaces pèsent sur l'intégrité d'un système d'archivage unique. Par exemple, en France, les archives de Paris ont été détruites par l'incendie du Palais des Tuileries, au cours de la guerre civile de 1870, et nombreux sont les bâtiments abritant des archives qui ont été bombardés au cours de la deuxième guerre mondiale. La meilleure stratégie pour faire face à de telles menaces est de conserver l'information en plusieurs exemplaires et à des emplacements différents. Par exemple, les Mormons ont décidé de conserver leurs archives en double exemplaire dans des chambres souterraines excavées dans le granite, à proximité de Salt Lake City, dans l'Utah, pour faire en sorte que les informations sur leurs ancêtres soient convenablement conservées.

Un système d'archives relatives aux dépôts de déchets radioactifs devrait être également entretenu au niveau international. Il s'agit d'une condition particulièrement importante, étant donné que les états qui évacuent aujourd'hui des déchets radioactifs sont susceptibles de disparaître ou de changer au cours des laps de temps pris en considération.

## *Diffusion des informations*

Les informations doivent être non seulement conservées mais également diffusées efficacement à l'attention des auteurs éventuels d'intrusions futures. Ceci implique que les informations archivées soient facilement accessibles et qu'elles soient consultées par tout responsable potentiel d'une intrusion. Indépendamment de l'efficacité du système d'archivage des informations lui-même, ce système peut être considéré comme inopérant si les informations nécessaires ne sont pas diffusées du tout ou si elles sont diffusées incorrectement.

Un moyen disponible pour faire en sorte que l'information soit à la fois conservée et diffusée consisterait à indiquer systématiquement l'emplacement des dépôts de déchets sur des cartes.

### **4.7 Utilisation de systèmes de marqueurs de site**

Des marqueurs de site pourraient être placés à la surface du sol ou au-dessous de celle-ci. Ils pourraient être constitués de constructions robustes conçues pour durer plusieurs milliers d'années et être interprétables par les sociétés futures ou ils pourraient, au contraire, être constitués de simples clôtures et de signaux d'avertissement dont la durée de vie ne dépasse pas quelques dizaines d'années. On s'intéressera uniquement ici aux marqueurs à long terme, qui font l'objet de controverses. D'aucuns soutiennent qu'ils serviraient à avertir les sociétés futures de l'emplacement du dépôt et des risques qui lui sont liés. A l'opposé, comme mentionné dans l'introduction de ce chapitre, d'autres font valoir que dans un avenir lointain, le message relatif aux risques liés au dépôt pourrait être mal compris et que les marqueurs auraient essentiellement comme effet d'attirer l'attention sur le dépôt. Cette préoccupation est lourde de conséquences pour la conception des systèmes de marqueurs.

Pour être efficaces, les marqueurs doivent avoir une durée de vie très longue (plusieurs milliers d'années ou plus en principe) et les messages qu'ils sont censés transmettre doivent être interprétables par des sociétés qui vivront dans un avenir lointain. Nous disposons aujourd'hui d'exemples de systèmes de marquage qui ont survécu pendant plus de 5 000 ans et le Groupe de travail estime que la réalisation de cet objectif n'est pas impossible, même si elle paraît très difficile.

#### *Marqueurs de surface*

De tels systèmes de marqueurs ont fait l'objet de nombreux débats aux États-Unis. En outre, des travaux récents menés en France et inspirés par les débats menés au sein du Groupe de travail, ouvrent de nouvelles pistes de réflexion sur la conception des systèmes de marqueurs.

#### *États-Unis*

Aux États-Unis, le marquage des sites fait partie des obligations légales. Des travaux importants sur la conception des marqueurs ont déjà été entrepris il y a plus d'une dizaine d'années par le Département de l'énergie (DOE), dans le cadre du Programme d'évacuation des déchets fortement radioactifs. Plus récemment, les Sandia National Laboratories, (travaillant pour le compte du DOE) ont patronné des travaux sur la conception de marqueurs destinés à l'installation pilote d'isolation des déchets (WIPP).

Des travaux plus récents ont conduit à la mise au point d'un ensemble de critères applicables au développement de marqueurs [38].

- Les marqueurs devraient être constitués de matériaux dénués de valeur intrinsèque et présentant une grande résistance aux processus d'érosion superficiels.

- Etant donné que les sites de stockage définitif seront marqués d'une façon indélébile par l'activité humaine [38] – ou intrinsèquement marqués – les marqueurs devraient être positionnés exactement à la verticale du dépôt. L'idée directrice est que les marqueurs devraient compléter l'empreinte indélébile de l'activité humaine en donnant des renseignements sur la nature du dépôt.
- Les dimensions des marqueurs devraient être telles qu'ils soient visibles des airs, car l'on suppose que les êtres humains continueront à utiliser des moyens de transport aériens.
- Des messages redondants et des messages de niveaux différents doivent être employés sur les marqueurs. Il a été proposé d'utiliser quatre niveaux différents de message correspondant à quatre niveaux différents de communication. Ces niveaux vont de pictogrammes à des avertissements écrits succincts mais univoques, puis à des messages et des documents écrits de plus en plus longs et détaillés relatifs au dépôt. Il a été proposé de rédiger les messages du niveau le plus élevé dans les six langues officielles des Nations Unies et en Navajo, une langue indienne écrite importante dans la région.

L'étude conclut qu'il serait possible d'atteindre une probabilité de dissuasion de 50 pour cent pour une période future atteignant 5 000 ans [45].

### *France*

L'Agence nationale française pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA) a proposé un autre type de système de marqueurs [42]. Ce système est justifié par l'inquiétude que des messages situés immédiatement sur le site puissent être mal compris ou complètement incompris, et puissent susciter la curiosité et accroître effectivement le risque d'intrusion humaine. Un autre ensemble de critères a été proposé pour la mise au point des marqueurs :

- Les marqueurs ne devraient pas être situés immédiatement au-dessus du dépôt, mais plutôt à 10 ou 20 km de distance. Une telle distance devrait limiter les probabilités d'intrusion directe inspirée par la curiosité, tout en permettant de placer les marqueurs dans la même région politique et géographique que celle du dépôt.
- Les marqueurs devraient être d'une dimension suffisamment importante pour ne pas passer inaperçu aux yeux de toute personne vivant au voisinage du site.
- Les marqueurs devraient porter des messages redondants indiquant la position exacte du site de stockage définitif mais cette information devrait être compréhensible seulement par une civilisation connaissant les éléments fondamentaux de la radioactivité ; dans le cas contraire, la situation serait équivalente à celle d'un marqueur érigé directement à la verticale du dépôt. C'est pourquoi, les messages et, en particulier, l'emplacement du site du dépôt devraient être codés en faisant appel par exemple aux symboles et aux grandeurs utilisés en physique nucléaire.

L'idée sous-jacente à cette démarche est que si une société est capable de comprendre le message d'avertissement, elle sera probablement capable de comprendre les risques liés aux déchets et de comprendre aussi qu'il convient de ne pas ignorer le message. Une société moins avancée, motivée par la curiosité pourrait ne pas comprendre le message ou ne pas connaître la nature des déchets mais pourrait être néanmoins capable d'effectuer un forage. Les marqueurs placés hors des limites du site pourraient avoir pour effet de diminuer la probabilité qu'un forage soit réalisé directement au-dessus d'un dépôt avec pour seul motif la curiosité.

### ***Marqueurs souterrains***

Un autre moyen matériel d'enregistrer les informations relatives au dépôt consisterait à utiliser un système de marqueurs souterrains, constitués, par exemple, de plusieurs centaines ou milliers de disques très résistants portant des messages différents. Il a déjà été fait allusion à cette méthode dans la discussion relative aux critères de conception des dépôts (voir Section 4.5 ci-dessus). Des marqueurs souterrains spécifiques ont été proposés dans le cadre du Projet SNL/WIPP [38] :

- Des marqueurs acoustiques ne pouvant échapper à la détection par des techniques sismiques – par exemple des disques ou des sphères de granite pour marquer des dépôts creusés dans des formations sédimentaires.
- Des marqueurs magnétiques.
- Des marqueurs radioactifs – par exemple des échantillons des radio-isotopes contenus dans le déchet.

Ces marqueurs ont tous en commun la propriété d'être détectable à distance (par exemple à partir de la surface) en utilisant des outils géophysiques appropriés. Les marqueurs pourraient être disposés en profondeur d'une manière telle qu'ils indiqueraient la position du dépôt. Evidemment, comme c'était le cas pour les marqueurs de surface, d'aucuns estiment que de tels marqueurs souterrains auraient pour effet principal d'attirer l'attention sur la présence du dépôt.

En résumé, le Groupe de travail estime que les systèmes de marqueurs peuvent constituer une partie utile d'un système d'avertissement aux sociétés futures, précisant l'emplacement et le contenu du dépôt. Bien que des marqueurs bien conçus puissent avoir une longue durée de vie et être interprétables pendant des laps de temps prolongés, le Groupe de travail estime qu'il serait difficile de compter sur une longévité des marqueurs dépassant un à quelques milliers d'années après la fermeture du dépôt.

Comme pour la conservation des informations, le Groupe de travail estime qu'il serait utile de renforcer la collaboration internationale dans le domaine des marqueurs. En particulier, il est probable qu'une coopération internationale plus poussée portant sur les principes sous-tendant les systèmes de marqueurs sera fructueuse. Une démarche cohérente relative aux marqueurs aiderait la société à garder la mémoire de leur signification et permettrait, une fois cette signification comprise dans une partie du monde, d'établir celle de tout marqueur similaire découvert ailleurs.

#### **4.8 Prise en compte des mesures de protection institutionnelles passives dans les évaluations quantitatives**

Comment prendre en compte les mesures institutionnelles passives passées en revue aux Sections 4.6 et 4.7 ci-dessus dans les évaluations de sûreté à long terme ? Deux raisons militent en faveur de la prise en compte de telles mesures. En premier lieu, étant entendu qu'une évaluation de sûreté a pour objet d'évaluer correctement les risques et les incertitudes dont ils sont entourés, elle doit être fondée sur des hypothèses qui ne soient ni trop optimistes ni trop pessimistes. En second lieu, la prise en compte de ces mesures dans les évaluations de sûreté peut inciter les agences chargées de leur mise en oeuvre à en tirer le meilleur parti possible.

Comme mentionné à la Section 4.6, les travaux effectués par les pays nordiques ont mis en évidence l'intérêt des archives comme méthode de conservation des informations pendant de longues périodes [38]. Comme les archives survivent aux gouvernements et ne demandent qu'un minimum de

maintenance, on pense qu'elles peuvent rester efficaces pendant plus longtemps que le contrôle gouvernemental. En outre, comme discuté à la Section 4.7, il ressort d'une étude récemment menée à terme aux États-Unis que des systèmes de marqueurs permanents à grande échelle du site peuvent servir à dissuader des intrusions humaines involontaires pendant un laps de temps relativement prolongé dans le futur [45]. Les systèmes de marqueurs étant passifs, comme les archives, ils sont donc susceptibles de durer plus longtemps que les systèmes de contrôle gouvernemental direct.

On estime que le contrôle gouvernemental direct des sols à la verticale du dépôt ne peut être assuré que pendant des périodes relativement courtes, comprises entre 100 et 500 ans, en raison de la nature essentiellement éphémère des gouvernements et de la constatation que ces derniers sont souvent oublieux de leurs engagements et n'en tiennent plus compte au fil des années. Il en résulte qu'à long terme, les archives et les systèmes de marqueurs peuvent s'avérer plus efficaces que les contrôles gouvernementaux actifs du site. Il serait donc injustifié d'appliquer arbitrairement à un système passif les limites de temps envisagées pour le contrôle gouvernemental actif. Fixer une telle limite dans une évaluation quantitative serait indûment pessimiste. En outre, une telle démarche pourrait détourner l'intérêt porté à la mise au point de ces contre-mesures passives et pourrait décourager les organes responsables de les mettre en oeuvre.

Il importe également de noter que les systèmes de marqueurs et de conservation de l'information auront probablement une efficacité maximale immédiatement après la fermeture du dépôt et que cette efficacité ira en décroissant au fil des ans. Cette diminution de l'efficacité sera contrebalancée par la décroissance naturelle des substances radioactives contenues dans le dépôt de sorte que les systèmes de marqueurs et de conservation de l'information seront les plus efficaces durant la période où les conséquences d'une éventuelle intrusion humaine involontaire pourraient être les plus graves [voir, par exemple, 5].

#### **4.9 Conclusions succinctes**

Le Groupe de travail estime qu'un système de stockage définitif optimal visant à réduire la probabilité et les conséquences d'activités humaines futures perturbatrices devrait répondre aux conditions suivantes :

- Le choix du site et la conception des dépôts devraient reposer sur des procédures prenant en considération les caractéristiques du site et de la conception du dépôt qui seraient susceptibles de réduire la probabilité d'activités humaines futures perturbatrices potentielles, et d'atténuer les conséquences de telles activités, au cas où elles se produiraient.
- Il conviendrait d'adopter des procédures de planification tenant compte de la nécessité de conserver pendant de longues périodes les informations relatives aux dépôts de déchets nucléaires. Ces informations pourraient être conservées dans des archives maintenues, tant au plan national qu'au plan international. On pourrait envisager l'utilisation de systèmes de marqueurs du site, en surface ou souterrains.

L'obligation qui incombe à notre société de protéger et de mettre en garde les sociétés futures requiert la prise en considération de chacune de ces mesures.

Il serait en outre nécessaire de mettre en oeuvre les actions suivantes :

- Un examen permanent de l'état des connaissances relatives aux supports utilisés pour le stockage d'informations.
- L'élaboration d'un cadre juridique applicable à la conservation des informations relatives aux dépôts.
- La mise en oeuvre d'une coopération internationale relative aux archives, au transfert et à l'extraction des informations, aux marqueurs des sites, et à la normalisation des symboles et des avertissements concernant les dépôts de déchets radioactifs.



## Chapitre 5

### Résumé et recommandations

#### 5.1 Cadre général pour la prise en compte des activités humaines futures

Les systèmes d'évacuation des déchets radioactifs sont susceptibles d'être endommagés par certaines activités humaines futures ; il convient donc de prendre en considération de telles activités, tant dans le choix des sites et la conception des systèmes de stockage que dans l'évaluation de leur sûreté.

On peut subdiviser les activités humaines perturbatrices en deux catégories : celles qui visent à endommager délibérément le système de barrières et celles qui ont pour effet d'endommager involontairement ces barrières. Les actions involontaires envisagées dans ce rapport sont celles au cours desquelles le dépôt lui-même ou ses barrières sont pénétrés, ou leurs performances sont altérées, involontairement, parce que la mémoire de l'emplacement du dépôt ou de sa raison d'être est perdue. On peut estimer que la responsabilité d'activités humaines délibérées et non involontaires donnant lieu à un rejet de radioactivité, incombe à la société qui a entrepris ces activités. Les activités délibérément perturbatrices ne doivent pas être prises en considération dans les évaluations de sûreté. A l'opposé, ces dernières doivent prendre en considération les activités qui ont pour effet d'endommager accidentellement le système de dépôt.

#### 5.2 Considérations relatives aux analyses quantitatives

Les activités humaines et les événements naturels perturbateurs peuvent donner lieu aux mêmes types de conséquences et représentent tous deux des risques potentiels. C'est pourquoi, le cadre général d'évaluation quantitative mis au point pour les analyses de sûreté impliquant des événements ou des processus naturels est également valable pour l'analyse des activités humaines futures. Un jugement pondéré est nécessaire à l'élaboration et à la modélisation des scénarios concernant aussi bien les activités humaines futures que les événements et processus normaux.

L'analyse d'activités humaines ne peut avoir qu'une portée illustrative et ne pourra jamais être exhaustive. Dans le meilleur des cas, les techniques de scénario appliquées aux activités humaines futures ne peuvent conduire qu'à l'élaboration d'un ensemble représentatif de scénarios décrivant des avènements raisonnablement possibles et non à une prévision assurée. Les probabilités des scénarios d'activités humaines futures sont des grandeurs intrinsèquement subjectives et devraient être plutôt dénommées «degrés de conviction», pour les distinguer des fréquences déterminées empiriquement. L'utilisation d'une gamme de scénarios et de probabilités reflétant leurs vraisemblances relatives par l'intermédiaire de degrés de conviction doit être préférée au recours à un scénario unique représentant une estimation ponctuelle. Il importe, dans les analyses de risque et d'incertitude de rendre compte le mieux possible de l'éventail des possibilités. Il importe également de considérer une gamme de possibilités dans le choix des sites et la conception des dépôts ainsi que dans le choix des mesures de protection.

Les scénarios d'activités humaines futures doivent être considérés comme des représentations de situations virtuelles possibles, fondées sur un ensemble d'hypothèses. Il faut donc prendre les analyses de conséquence comme autant d'illustrations des conséquences potentielles découlant de cet ensemble d'hypothèses. Ces démonstrations sont destinées aux décideurs (entre autres), afin de leur donner une idée générale du système d'évacuation et des risques liés au stockage des déchets.

On a cherché à définir une méthode d'évaluation quantitative qui ne serait pas trop tributaire de spéculations sur l'avenir et qui serait applicable uniformément aux divers types de sites et de systèmes de stockage. Le Groupe de travail a estimé à cet effet que les scénarios applicables à des sites et à des systèmes particuliers pourraient être fondés sur l'hypothèse que les sociétés futures continueront à se comporter comme les sociétés actuelles vivant aux alentours de l'emplacement d'un dépôt ou sur des emplacements similaires situés ailleurs. Une telle hypothèse pourrait être retenue pour les caractéristiques et les fréquences des forages, l'utilisation des ressources, les développements techniques, les pratiques médicales, la démographie, les modes de vie et les besoins alimentaires.

L'adoption d'une telle hypothèse ne prétend nullement refléter une quelconque connaissance sur l'évolution future possible de la société mais elle représente un choix commode de prise en compte de l'évolution de la société qui permet de montrer les risques potentiels liés aux activités humaines futures. Cette hypothèse de base relative à l'évolution de la société a été admise de facto dans la plupart des évaluations récentes. Toutefois, il serait nécessaire de poursuivre et d'approfondir l'examen des autres hypothèses de base de l'évaluation – par exemple en ce qui concerne l'efficacité des contrôles institutionnels passifs.

### **5.3 Mesures de protection**

Le Groupe de travail a discuté les mesures qui permettraient d'abaisser la probabilité et d'atténuer les conséquences d'activités humaines futures susceptibles d'endommager involontairement le système d'évacuation. La plus efficace de ces mesures est le contrôle institutionnel actif de la surface et des alentours du site de stockage. Cette mesure de protection est l'une des bases des procédures d'autorisation des dépôts d'évacuation de déchets faiblement radioactifs situés à proximité de la surface. Elle pourrait être appliquée tout aussi bien aux dépôts profonds pour une période aussi longue qu'il est possible d'envisager, pour prévenir toute intrusion involontaire ou toute autre action humaine potentiellement perturbatrice dans le voisinage du site du dépôt.

Toutefois, on ne peut pas compter sur un contrôle institutionnel actif pour des laps de temps correspondant aux durées pendant lesquelles les déchets présentent un danger potentiel (par exemple 10 fois la période radioactive du Pu-239 ou d'autres radionucléides pertinents). Certaines réglementations nationales prescrivent un contrôle actif pendant une durée comprise entre 100 et 500 ans, à compter de la clôture et de la mise hors-service du dépôt. Le Groupe de travail a envisagé d'autres mesures de protection possibles, notamment :

- La mise en place des dépôts loin de zones dont on sait qu'elles sont susceptibles de renfermer des ressources souterraines potentielles.
- L'isolation des déchets de l'environnement humain. Pour les dépôts géologiques profonds, la profondeur même du dépôt constitue un facteur important de diminution des risques d'activités humaines potentiellement perturbatrices.
- L'adoption de critères de conception des dépôts de déchets (applicables, par exemple, aux matériaux de remblayage et au conditionnement du déchet, en vue de réduire sa tendance à

former des poussières en cas d'exposition à l'air libre), de nature à atténuer les conséquences d'éventuelles activités humaines perturbatrices.

- La conservation et la communication d'informations relatives à l'emplacement, au contenu du dépôt et aux risques qui y sont liés, peuvent contribuer à réduire la probabilité de perturbations par des activités humaines.
- La mise en place sur le site du dépôt, ou à proximité de celui-ci, de systèmes de marqueurs matériels porteurs d'informations relatives au dépôt et de mises en garde contre les dangers qu'il présente, destinés aux éventuels intrus.
- L'édification de barrières artificielles visant à dissuader les essais d'intrusion (la mise en place d'un voile épais de béton au-dessus du dépôt de déchets ou l'utilisation de conteneurs robustes) peut abaisser la probabilité d'une intrusion accidentelle.

Un débat approfondi, dans le cadre de chaque programme national, s'impose afin de déterminer un niveau de dépense approprié pour chaque mesure de protection.

#### **5.4 Poursuite de la coopération internationale**

Le Groupe de travail a discuté des efforts qu'il conviendrait de mener à l'échelon international en vue d'inspirer confiance dans les évaluations de la sûreté à long terme des systèmes de d'évacuation des déchets radioactifs. Le Groupe a notamment circonscrit un certain nombre d'actions applicables aux évaluations des activités humaines futures, qui dépassent le cadre des activités du Groupe :

- Poursuite des débats entre pays intéressés quant aux stratégies réglementaires permettant de juger des risques liés à des activités humaines futures. La plupart des réglementations nationales n'ont pas encore clairement pris position quant à la façon de traiter des activités humaines futures. Le Groupe de travail estime, qu'à partir de son rapport, il serait possible de lancer une discussion entre les pays intéressés sur la meilleure manière d'aborder ce problème. Une possibilité consisterait à évaluer les risques liés aux activités humaines futures de la même façon que les risques liés à des événements ou à des processus naturels. A l'autre extrémité du spectre des possibilités, on pourrait considérer qu'il n'y a pas lieu de prendre en compte les risques liés aux activités humaines futures dans la procédure d'autorisation des dépôts de déchets. Le problème n'est pas de nature purement technique et toute politique réglementaire devra être justifiée par des arguments d'ordres philosophique et éthique.
- Développement et application probatoire d'un ensemble de principes méthodologiques pour l'élaboration de scénarios d'actions humaines. Ces scénarios pourraient être élaborés à partir d'informations spécifiques au site, et basés sur une méthode internationalement agréée. Une méthode possible d'élaboration de scénarios, débattue par le Groupe de travail, prendrait comme point de départ les capacités et pratiques des sociétés aujourd'hui au voisinage du site d'évacuation ou dans d'autres sites similaires situés ailleurs, afin d'éviter de recourir à des spéculations relatives à l'avenir des entreprises humaines.
- Mise sur pied d'une base de données révisée internationalement, relative aux caractéristiques, aux événements et aux processus qui pourraient être pris en considération dans des évaluations de sûreté. Cette base de données serait construite à partir des travaux substantiels déjà accomplis au niveau international et contribuerait à inspirer confiance dans l'exhaustivité des programmes nationaux d'évaluation de sites donnés. Les activités

humaines pourraient faire partie de cette base de données. Le Groupe de travail a dressé une liste préliminaire de ces activités, qui figure à l'Annexe B. Des travaux dans ce sens ont déjà été entamés au niveau international, sous les auspices du PAAG de l'AEN.

- Développement d'un système d'archivage à l'échelon international se rapportant aux dépôts de déchets radioactifs. La conservation d'informations recueillies à différents niveaux administratifs et en divers emplacements peut faire en sorte que les informations relatives à un dépôt ne soient pas perdues. Une possibilité serait de mettre en place un tel système d'archivage à l'échelon international.
- Mise au point de systèmes de marqueurs. Une démarche coordonnée pour promouvoir l'utilisation de systèmes de marqueurs aiderait la société à garder la mémoire de leur signification et à faire en sorte qu'une fois que la signification de ces marqueurs aurait été comprise dans une région du monde, celle de marqueurs similaires découverts n'importe où ailleurs pourrait être plus facile à saisir. Cette réflexion pourrait s'appliquer aux substances artificielles dangereuses utilisées actuellement, par exemple les substances radioactives et d'autres substances chimiques toxiques.

## Références

- [1] OECD Nuclear Energy Agency (NEA), *Proceedings of an NEA Workshop on Risks Associated with Human Intrusion at Radioactive Waste Disposal Sites* (Paris, 5-7 June 1989), OECD/NEA, Paris, 1989.
- [2] OECD Nuclear Energy Agency (NEA), *Catalogue of Future Human Action Assessments in Radioactive Waste Repository Safety Assessments undertaken by OECD Member Countries*, OECD/NEA, Paris, 1993.
- [3] Atomic Energy Control Board (AECB), *Regulatory Policy Statement, Regulatory Objectives, Requirements and Guidelines for the Disposal of Radioactive Wastes – Long-Term Aspects*, Atomic Energy Control Board Regulatory Document R-104, Ottawa, 1987.
- [4] US Environmental Protection Agency (EPA), "Environmental standards for management and disposal of spent nuclear fuel, high-level and transuranic radioactive wastes"; Final Rule, 40 CFR Part 191, Federal Register, 50, 182, pp. 38066-38089, 1985.
- [5] D.M. Wuschke, *Assessment of the Long Term Risks of Human Intrusion into a Proposed Canadian Nuclear Fuel Waste Disposal Vault in Deep Plutonic Rock*, Report No. AECL-10279, 1991.
- [6] OECD Nuclear Energy Agency (NEA), *Proceedings of an NEA Workshop on Radiation Protection and Safety Criteria* (Paris, 5-7 November 1991), OECD/NEA, Paris, 1992.
- [7] OECD Nuclear Energy Agency (NEA), *Long Term Radiation Protection Objectives for Radioactive Waste Disposal*, OECD/NEA, Paris, 1984.
- [8] International Commission on Radiological Protection (ICRP), *Radiation protection principles for the disposal of solid radioactive waste*, Annals of the ICRP, 15 (4), 1985.
- [9] International Atomic Energy Agency (IAEA), *Safety Principles and Technical Criteria for the Underground Disposal of High-Level Radioactive Wastes*, Safety Series No. 99, IAEA, Vienna, 1989.
- [10] Finnish Basic Safety Rules, *Decision of the Council of State* (in Finnish), Helsinki, 1991.
- [11] French Basic Safety Rules, "Determination of the objectives to be adopted in the design and construction phases of the creation of a deep geological formation radioactive waste repository to ensure safety after the repository has been closed", *Basic Safety Rules*, Rule No. III.2.f, 1992.
- [12] German Basic Safety Rules, *Radiation Protection Ordinance* (in German), Section 45, Para. 1, Bonn, 1989.

- [13] The Radiation Protection and Nuclear Safety Authorities in Denmark, Finland, Iceland, Norway and Sweden, *Disposal of High Level Radioactive Waste. Consideration of Some Basic Criteria*, SKI, Stockholm, 1993.
- [14] Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate (HSK) and Federal Commission for the Safety of Nuclear Installations (KSA), *Guideline for Swiss Nuclear Installations R-21: Protection Objectives for the Disposal of Radioactive Wastes*, HSK, Villigen, 1993.
- [15] U.K. Department of the Environment (DoE), *Disposal Facilities on Land for Low and Intermediate Level Radioactive Wastes: Principles for the Protection of the Human Environment*, HMSO, London, 1984.
- [16] US Nuclear Regulatory Commission (NRC), "Disposal of high-level radioactive wastes in geologic repositories", *Code of Federal Regulations*, Title 10, Part 60, 1983.
- [17] L.L. Price *et al.*, *Preliminary Performance Assessment of the Greater Confinement Disposal Facility at the Nevada Test Site*, SAND91-0047, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 1993.
- [18] OECD Nuclear Energy Agency (NEA), *Systematic Approaches to Scenario Development*, OECD/NEA, Paris, 1992.
- [19] International Atomic Energy Agency (IAEA), *Safety Assessment for the Underground Disposal of Radioactive Wastes*, Safety Series No. 56, IAEA, Vienna, 1981.
- [20] J. Jowett and N.A. Chapman, "U.K. Nirex studies of intrusion frequency", in *Proceedings of an NEA Workshop on Risks Associated with Human Intrusion at Radioactive Waste Disposal Sites* (Paris, 5-7 June 1989), OECD/NEA, Paris, 1989.
- [21] B.G.J. Thompson, *A Method of Overcoming the Limitations of Conventional Scenario Based Risk Assessments by Using Monte-Carlo Simulation of Possible Future Environmental Changes*, TRDoE12 [also, PAAG/DOC(88)11], DoE/HMIP, London, 1988.
- [22] J. Marivoet and A. Bonne, *Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste, Disposal in Clay Formations*, EUR 11776 EN, Brussels, 1988.
- [23] J.A.K. Reid *et al.*, "Effects of a domestic well on assessed performance of a nuclear fuel waste disposal system", in *Proceedings of an NEA Workshop on Risks Associated with Human Intrusion at Radioactive Waste Disposal Sites* (Paris, 5-7 June 1989), OECD/NEA, Paris, 1989.
- [24] P.A. Davis, R. Zach, M.E. Stephens, B.D. Amiro, G.A. Bird, J.A.K. Reid, M.I. Sheppard, S.C. Sheppard and M. Stephenson, *The Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste: The Biosphere Model, BIOTRAC, for Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste*, Atomic Energy of Canada Limited Report, AECL-10720, COG-93-10, 1993.
- [25] H. Nordman and T. Vieno, "Consideration of human actions in the Finnish performance assessments of nuclear waste disposal", in *Proceedings of an NEA Workshop on Risks Associated with Human Intrusion at Radioactive Waste Disposal Sites* (Paris, 5-7 June 1989), OECD/NEA, Paris, 1989.
- [26] M.J. Mejón-Goula and A. Cernes, "Assessment of the radiological consequence of human intrusion into repositories located in granite", *Ibid.*

- [27] P. Jacquier and P. Raimbault, "Radiological consequences associated with human intrusion into radioactive waste repositories in salt formation", *Ibid.*
- [28] R.P. Hirsekorn, "Post-operational leakage of a storage cavern constructed by solution mining in a former HLW repository area in a salt dome", *Ibid.*
- [29] J. Prij and P. Glasbergen, "The role of human intrusion in the Dutch safety study", *Ibid.*
- [30] T. Eng, "The undersea location of the Swedish Final Repository for Reactor Waste, SFR-human intrusion aspects", *Ibid.*
- [31] F. van Dorp and J.O. Vigfusson, "Overview of Swiss work concerning human effect scenarios", *Ibid.*
- [32] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), "Environmental radiation protection standards for management and disposal of spent nuclear fuel, high-level and transuranic radioactive wastes"; Final Rule, 40 CFR Part 191, Federal Register, 58, 242, pp. 66398-66416, 1993.
- [33] M.J. Egan, "U.K. Nirex studies of intrusion consequence", in *Proceedings of an NEA Workshop on Risks Associated with Human Intrusion at Radioactive Waste Disposal Sites* (Paris, 5-7 June 1989), OECD/NEA, Paris, 1989.
- [34] G.M. Smith *et al.*, *Calculations of the Radiological Impact of Disposal of Unit Activity of Selected Radionuclides*, NRPB-R205, 1987.
- [35] U.S. Department of Energy, *Preliminary Evaluation of Solution-Mining Intrusion into a Salt Dome Repository*, Report No. ONWI-320-1, 1981.
- [36] U.S. Department of Energy, *Performance Assessment Plans and Methods for the Salt Repository Project*, Report No. BM1/PWW1-545, 1985.
- [37] D.R. Anderson *et al.*, "WIPP performance, Impacts of human intrusion", in *Proceedings of an NEA Workshop on Risks Associated with Human Intrusion at Radioactive Waste Disposal Sites* (Paris, 5-7 June 1989), OECD/NEA, Paris, 1989.
- [38] D.G. Ast, M. Brill, W. Goodenough, M. Kaplan, F. Newmeyer and W. Sullivan, *Marking the Waste Isolation Pilot Plant for 10,000 Years*, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 1991.
- [39] Nordic Nuclear Safety Research Program Working Group, *Conservation and Retrieval of Information – Elements of a Strategy to Inform Future Societies about Nuclear Waste Repositories*, Final Report of Project KAN-1.3, Nordiske Seminar- og Arbejdsrapporter 1993:596, NKS, Roskilde, 1993.
- [40] Swedish National Board for Spent Nuclear Fuel (SKN), "Ethical aspects on nuclear waste – Some salient points", in *Seminar on Ethical Action in the Face of Uncertainty* (Stockholm, 8-9 September 1987), SKN Report 29, Stockholm, 1987.
- [41] F.X. Cameron, "The Problem of Human Intrusion: Towards a Resolution of Uncertainty", in *Proceedings of the Symposium on Uncertainties in Regulation of the Geologic Disposal of High-Level Radioactive Waste* (Gatlinburgh), pp. 257-265, 1981.

- [42] P. Raimbault and C. Valentin-Ranc, "How to mark repositories in geological formations?", in *Proceedings of SAFEWASTE 93* (Avignon, 13-18 June 1993), Vol. 3, pp. 212-221, SFEN, Paris, 1993.
- [43] OECD Nuclear Energy Agency (NEA), *Review of Safety Assessment Methods*, OECD/NEA, Paris, 1991.
- [44] Swedish Nuclear Power Inspectorate (SKI) and Swedish Radiation Protection Institute (SSI), *Granskning av SKBs Fördjupade Säkerhetsanalys av SFR-1*, SKI TR 92:16, SKI, Stockholm, 1992.
- [45] K. Trauth, S.C. Hora and R.V. Guzowski, *Expert Judgment on Markers to Deter Inadvertent Human Intrusion into the Waste Isolation Pilot Plant*, SAND92-1381, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 1992.
- [46] International Atomic Energy Agency (IAEA), *Safeguards for Final Disposal of Spent Fuel in Geological Repositories*, IAEA Consultants Report STR-274, IAEA, Vienna, 1991.
- [47] P.W. Eslinger *et al.*, *Preliminary Total-System Analysis of a Potential High-Level Nuclear Waste Repository at Yucca Mountain*, PNL-8444, Pacific Northwest Laboratory, Richland, WA, 1993.
- [48] OECD Nuclear Energy Agency (NEA), *Can Long-Term Safety be Evaluated – An International Collective Opinion*, OECD/NEA, Paris, 1991.
- [49] OECD Nuclear Energy Agency (NEA), *Technical Appraisal of the Current Situation in the Field of Radioactive Waste Management – A Collective Opinion by the Radioactive Waste Management Committee*, OECD/NEA, Paris, 1985.
- [50] International Atomic Energy Agency (IAEA), *Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons*, signed at London, Moscow and Washington on 1 July 1968, entered into force on 5 March 1970, IAEA Information Circular INFCIRC/140, IAEA Vienna, 1970.
- [51] G. Woo, "Is the risk of human intrusion exaggerated?", in *Proceedings of an NEA Workshop on Risks Associated with Human Intrusion at Radioactive Waste Disposal Sites* (Paris, 5-7 June 1989), OECD/NEA, Paris, 1989.



*Annexe A*

## Liste des participants

Cette liste comporte les noms de tous les représentants ayant participé à l'une au moins des quatre réunions plénières (1, 2, 3 et/ou 4) du Groupe.

Jesus ALONSO (1,2,3,4)  
ENRESA  
Calle Emilio Vargas, 7  
E-28043 Madrid  
Espagne

D. Richard «Rip» ANDERSON (1,2,3,4),  
Chairman  
Department 6342  
Sandia National Laboratories, MS 1328  
P.O. Box 5800  
Albuquerque, NM 87185-1328  
États-Unis

Johan ANDERSSON (3)  
Swedish Nuclear Power Inspectorate (SKI)  
Schlstedtsgratan 11  
Box 27106  
S-102 52 Stockholm  
Suède

Andrew J. BAKER (3,4)  
AEA Technology  
Decommissioning & Waste Management  
424.4 Harwell  
Didcot  
Oxfordshire OX11 0RA  
Royaume-Uni

Arnold BONNE (1,2,3),  
actuellement à l'AIEA, Vienne  
SCK/CEN  
Boeretang 200  
B-2400 Mol  
Belgique

Christine BRUN-YABA (1,2)  
CEA/IPSN  
CEN-FAR  
B.P. No. 6  
F-92265 Fontenay-aux-Roses Cedex  
France

Geoff DURANCE (1)  
Australian High Commission  
Strand  
London WC2B 4LA  
Royaume-Uni

Torsten ENG (1,2,3,4)  
Swedish Nuclear Fuel and Waste  
Management Co. (SKB)  
Box 5864  
S-102 487 Stockholm  
Suède

Pierre ESCALIER DES ORRES (3)  
IPSN/DES/SESID  
CEN-FAR  
B.P. No 6  
F-92265 Fontenay-aux-Roses Cedex  
France

Daniel A. GALSON (1,2,3,4)  
Galson Sciences Ltd.  
35 Market Place  
Oakham  
Leics. LE15 6DT  
Royaume-Uni  
(Note: Assista à la 1<sup>re</sup> réunion en tant que  
représentant de l'AEN)

Robert V. GUZOWSKI (2,3,4)  
SAIC  
2109 Air Park Road, S.E.  
Albuquerque, NM 87106  
États-Unis

John HARRIES (2)  
Counsellor (Nuclear)  
Embassy of Australia  
1601 Massachusetts Ave, N  
Washington, DC 20036  
États-Unis

René HEREMANS (3)  
ONDRAF/NIRAS  
Place Madou 1 (B24/25)  
B-1030 Brussels  
Belgique

Peter HIRSEKORN (2,3,4)  
GSF - Forschungszentrum für Umwelt und  
Gesundheit, GmbH  
Institut für Tieflagerung  
Postfach 2163  
D-38011 Braunschweig  
Allemagne

Stephen C. HORA (1,2,3,4)  
University of Hawaii at Hilo  
Division of Business  
Administration & Economics  
College of Arts & Sciences  
Hilo, Hawaii 96720-4091  
États-Unis

W. HUND (1)  
Federal Office for Radiation Protection (BfS)  
P.O. Box 100149  
D-38201 Salzgitter  
Allemagne

Masaru ITO (1)  
Power Reactor and Nuclear Fuel  
Development Co. (PNC)  
1-9-13 Akasaka  
Minato-ku  
Tokyo 107  
Japon

Mikael JENSEN (1,2,3,4)  
Swedish Radiation Protection Institute (SSI)  
Box 60204  
S-104 01 Stockholm  
Suède

John JOWETT (1,2)  
AEA Thermal Reactor Services  
Wigshaw Lane Culcheth  
Warrington  
Cheshire WA3 4NE  
Royaume-Uni

Gordon LINSLEY (1)  
Division of Nuclear Fuel Cycle  
and Waste Management  
International Atomic Energy Agency  
P.O. Box 100  
A-1400 Vienna  
Autriche

Morimasa NAITO (4)  
Power Reactor and Nuclear Fuel  
Development Co. (PNC)  
1-9-13 Akasaka  
Minato-ku  
Tokyo 107  
Japon

Hideaki OHSAWA (3)  
Power Reactor and Nuclear Fuel  
Development Co. (PNC)  
Chubu Works  
959-31 Sonodo-Jorinji  
Tokishi-Gifu 509-51  
Japon

Jean-Pierre OLIVIER (1)  
OECD/NEA  
Le Seine-Saint Germain  
12, boulevard des Îles  
F-92130 Issy-les-Moulineaux  
France

Edward S. PATERA (2,3,4)  
OECD/NEA  
Le Seine-Saint Germain  
12, boulevard des Îles  
F-92130 Issy-les-Moulineaux  
France

Jean-Marc PERES (1)  
ANDRA  
Route du Panorama Robert Schuman  
B.P. No. 38  
F-92266 Fontenay-aux-Roses Cedex  
France

Jan PRIJ (1,2,3)  
ECN  
P.O. Box 1  
NL-1755 ZG Petten  
Pays-Bas

Philippe RAIMBAULT (2,4)  
ANDRA  
Route du Panorama Robert Schuman  
B.P. No. 38  
F-92266 Fontenay-aux-Roses Cedex  
France

Klaus-Jürgen RÖHLIG (3,4)  
Gesellschaft für Anlagen-und  
Reaktorsicherheit (GRS) mbH  
Schwertnergasse 1  
D-50667 Köln  
Allemagne

Claes THEGERSTRÖM (1),  
actuellement à SKB, Suède  
OECD/NEA  
Le Seine-Saint Germain,  
12, boulevard des Îles,  
F-92130 Issy-les-Moulineaux,  
France

Catherine VALENTIN-RANC (3)  
ANDRA  
Route du Panorama Robert Schuman  
B.P. No. 38  
F-92266 Fontenay-aux-Roses Cedex  
France

Frits VAN DORP (1,2,3,4)  
NAGRA  
Hardstrasse 73  
CH-5430 Wettingen  
Suisse

Abraham VAN LUIK (4)  
INTERA  
101 Convention Center Drive  
Suite P-110  
Las Vegas, NV 89109  
États-Unis

Leo H. VONS (1)  
ECN  
P.O. Box 1  
NL-1755 ZG Petten  
Pays-Bas

Jürgen WOLLRATH (3)  
Federal Office for Radiation Protection (BfS)  
P.O. Box 100149  
D-38201 Salzgitter  
Allemagne

Donna M. WUSCHKE (1,2,3,4)  
AECL Research  
Whiteshell Laboratories  
Pinawa  
Manitoba ROE 1LO  
Canada

## Annexe B

### Éléments de construction de scénarios pour l'élaboration de scénarios d'activités humaines futures

#### B.1 Introduction

La liste d'éléments de construction de scénario présentée ici se rapporte à des scénarios d'interventions postérieures à la fermeture, impliquant des activités de surface ou souterraines. Plusieurs scénarios, quelquefois considérés comme des scénarios d'activité humaine ont été omis de cette liste. Il s'agit de scénarios représentant des tentatives délibérées de récupération des déchets et de scénarios relatifs à des actions ou à des échecs enregistrés au cours du choix du site, ou au cours des travaux de conception, d'exploitation et de fermeture d'un dépôt. Les premiers sont considérés comme étant hors du champ des scénarios d'intrusion nécessitant une analyse ; les derniers font généralement partie des évaluations de performance précédant la fermeture du dépôt, ou des scénarios de transport par les eaux souterraines et n'ont pas été pris en considération par le Groupe de travail.

#### B.2 Activités souterraines

##### Activités de forage

	Activité	Références
B2.1.1	Forage d'un puits pour l'alimentation en eau	B1-B12
B2.1.2	Forage de prospection de ressources naturelles	B1-B9,B11-B13
B2.1.3	Forage d'exploitation de ressources naturelles (y compris l'eau)	B1-B2,B5,B7-B9, B11-B12
B2.1.4	Forage (Objectif non précisé)	B10,B14-B15
B2.1.5	Forage de puits de confinement	B14,B16
B2.1.6	Forage de recherche ou caractérisation d'un site	B3,B17
B2.1.7	Forage pour le stockage	B5

## Mines et autres excavations

	Activité	Références
B2.2.1	Extraction de ressources souterraines (y compris par lixiviation)	<b>B1-B3,B5-B6,B8 B11-B14</b>
B2.2.2	Creusement d'un puits de mine	<b>B7</b>
B2.2.3	Aménagement d'un dépôt souterrain de stockage ou d'évacuation (y compris par lixiviation)	<b>B3,B5-B7,B12 B18,B22</b>
B2.2.4	Excavation à des fins militaires	<b>B5-B6</b>
B2.2.5.	Excavation à des fins industrielles	<b>B5</b>
B2.2.6	Récupération de matériaux entreposés dans un dépôt	<b>B1,B4,B8,B11</b>
B2.2.7	Recherche scientifique ou archéologique	<b>B1-B3,B7-B8,</b>
B2.2.8	Echantillonnage du sous-sol	<b>B7</b>
B2.2.9	Creusement d'un tunnel	<b>B1,B3,B5 B7-B8,B11</b>
B2.2.10	Construction souterraine	<b>B1</b>
B2.2.11	Essai nucléaire souterrain	<b>B1,B8,B11-B12</b>
B2.2.12	Intrusion malveillante, sabotage ou guerre	<b>B1,B4-B5,B7-B9, B11-B12</b>
B2.2.13	Production énergie géothermique	<b>B1-B2,B5,B7-B8 , B11-B12</b>
B2.2.14	Injection de déchets liquides ou d'autres fluides	<b>B1-B3,B5-B6,B8, B11-B12,B14</b>

### B.3 Activités de surface

Bien que les activités menées en surface ne sont pas susceptibles d'endommager l'enceinte d'un dépôt, elles pourraient, néanmoins, donner lieu à une exposition au rayonnement dans le cas où les personnes exerçant des activités en surface se trouveraient sur un site contaminé par des déchets radioactifs, soit à la suite d'une intrusion du dépôt, soit par la circulation normale des eaux souterraines contaminées. Une exposition au rayonnement peut se produire par la suite, si les activités de surface perturbent ou diminuent les performances du système de barrières naturelles et/ou artificielles.

#### Activités de génie civil

	Activité	Références
B3.1.1	Construction d'un barrage	B2-B3,B5,B8, B11-B12,B14
B3.1.2	Drainage d'un barrage	B1,B8,B11
B3.1.3	Travaux de carrière	B1,B8,B11
B3.1.4	Rectification d'un cours d'eau	B1,B8,B11
B3.1.5	Fouilles	B7
B3.1.6	Analyses chimiques de sols altérés ou d'eaux de surface	B1,B8,B11
B3.1.7	Amélioration du site	B1,B8
B3.1.8	Altération de l'état des eaux souterraines, variation de la nappe phréatique	B1-B2,B4-B6, B8,B21
B3.1.9	Echantillonnage de la surface	B7
B3.1.10	Excavation à des fins de construction	B1,B3,B8,B11
B3.1.11	Pilier de fondation	B7
B3.1.12	Construction résidentielle	B1,B7,B11
B3.1.13	Construction industrielle	B1,B7,B11
B3.1.14	Construction d'infrastructures pour les transports	B7
B3.1.15	Agriculture, irrigation	B1-B2,B5-B7, B11-B12,B14,B21
B3.1.16	Chute d'aéronef sur le site d'un dépôt	B7,B10
B3.1.17	Explosions	B3,B14-B15
B3.1.18	Construction routière	B17

<b>B3.1.19</b>	<b>Jeux d'enfants en plein air</b>	<b>B17</b>
<b>B3.1.20</b>	<b>Examen de carottes de sondage</b>	<b>B17,B19</b>
<b>B3.1.21</b>	<b>Occupation du site</b>	<b>B17</b>
<b>B3.1.22</b>	<b>Exploitation d'une installation de forage</b>	<b>B17</b>
<b>B3.1.23</b>	<b>Ingestion de sel</b>	<b>B20,B21</b>
<b>B3.1.24</b>	<b>Travail dans une usine de sel</b>	<b>B21</b>
<b>B3.1.25</b>	<b>Utilisation de sédiments lacustres contaminés comme sol ou comme matériau de construction</b>	<b>B23</b>
<b>B3.1.26</b>	<b>Combustion de tourbe ou de biomasse contaminée</b>	<b>B23</b>
<b>B3.1.27</b>	<b>Utilisation de bois contaminé comme matériau de construction</b>	<b>B23</b>

## Activités sociales et institutionnelles

	Activité	Références
B3.2.1	Changement démographique, développement urbain	B1,B8
B3.2.2	Modification des méthodes d'agriculture et de pêche	B1,B5
B3.2.3	Modification du schéma d'utilisation des sols	B1,B3,B8,B10
B3.2.4	Perte d'informations écrites	B1,B8,B11,B17
B3.2.5	Levé topographique du site	B7
B3.2.6	Audit environnemental	B17,B19
B3.2.7	Perte des barrières ou des marqueurs érigés sur le site	B17
B3.2.8	Perte d'archives ou de de base de données relatives au site	B17
B3.2.9	Levé géophysique	B19
B3.2.10	Détection et identification de fragments de déchets radioactifs ou de constituants du dépôt	B17,B19
B3.2.11	Suivi gammamétrique des débris de forage	B19
B3.2.12	Perte de mémoire collective	B9
B3.2.13	Intérêt pour les activités minières	B9
B3.2.14	Évacuation des déchets de forage sur le site d'une décharge	B19



## Références

- [B1] OECD Nuclear Energy Agency (NEA). *Systematic Approaches to Scenario Development*, OECD/NEA, Paris, 1992.
- [B2] International Atomic Energy Agency. *Safety Assessment for the Underground Disposal of Radioactive Wastes*. Safety Series No. 56, IAEA, Vienna, 1981.
- [B3] S.C. Hora, D. von Winterfeldt and K.M. Trauth, *Expert Judgement on Inadvertent Human Intrusion into the Waste Isolation Pilot Plant.*, SAND90-3063, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 1991.
- [B4] H. Nordman and T. Vieno, "Consideration of human actions in the Finnish performance assessments of nuclear waste disposal", in *Proceedings of an NEA Workshop on Risks Associated with Human Intrusion at Radioactive Waste Disposal Sites* (Paris, 5-7 June 1989), OECD/NEA, Paris, 1989.
- [B5] F. van Dorp and J.O. Vigfusson, "Overview of Swiss work concerning human effect scenarios", *Ibid.*
- [B6] L.D. Rickertsen and D.H. Alexander, "Treatment of human interference in USDOE repository system postclosure performance assessments", *Ibid.*
- [B7] R.B. Whittingham, "Human intrusion into nuclear waste repositories: a systematic approach to the definition of scenarios using human reliability modelling", *Ibid.*
- [B8] J. Prij *et al.*, PROSA: *Probabilistisch Onderzoek aan de veiligheid van in Steenzout opgeborgen radioactief Afval*, Concept Tussenrapport 4, Scenario Selectie, Petten, 1991.
- [B9] M. D'Alessandro and A. Bonne, *Radwaste Disposal into a Plastic Clay Formation*, CEC Report EUR 7111, Brussels, 1981.
- [B10] B.G.J. Thompson, *A Method of Overcoming the Limitations of Conventional Scenario-Based Risk Assessments by Using Monte-Carlo Simulation of Possible Future Environmental Changes*, TR-DoE-12 [also, PAAG/DOC(88)11], DoE/HMIP, London, 1988.
- [B11] D.P. Hodgkinson and T.J. Sumerling, "A review of approaches to scenario analysis for repository safety assessment", in *Proceedings of the CEC/IAEA/NEA Symposium on Safety Assessment of Radioactive Waste Repositories* (Paris, September 1989), OECD/NEA, Paris, 1990.
- [B12] R.V. Guzowski and J.C. Helton, "Scenarios for compliance assessment", in *Preliminary Comparison with 40 CFR Part 191, Subpart B, for the Waste Isolation Pilot Plant, December 1991*, WIPP Performance Assessment Division, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 1991.

- [B13] P. Raimbault, C. Izabel and J.M. Peres, *Methodology Developed by the French National Nuclear Waste Management Agency (ANDRA) for the Performance Assessment of a Deep Geological Repository*, ANDRA, Fontenay-aux-Roses, 1992.
- [B14] R.M. Cranwell *et al.*, *Risk Methodology for Geological Disposal of Radioactive Waste: Scenario Selection Procedure*, NUREG/CR-1667, SAND80-1429, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 1982, revised 1990.
- [B15] F.W. Bingham and G.E. Barr, *Scenarios for Long-Term Release of Radionuclides From a Nuclear Waste Repository in the Los Medanos Region of New Mexico*, SAND78-1730, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 1979.
- [B16] J.A.K. Reid *et al.*, "Effects of a domestic well on assessed performance of a nuclear fuel waste disposal system", in *Proceedings of an NEA Workshop on Risks Associated with Human Intrusion at Radioactive Waste Disposal Sites* (Paris, 5-7 June 1989), OECD/NEA, Paris, 1989.
- [B17] D.M. Wuschke, *Assessment of the Long Term Risks of Human Intrusion into a Proposed Canadian Nuclear Fuel Waste Disposal Vault in Deep Plutonic Rock*, Report No. AECL-10279, 1991.
- [B18] R.P. Hirsekorn, "Post-operational leakage of a storage cavern constructed by solution mining in a former HLW repository area in a salt dome", in *Proceedings of an NEA Workshop on Risks Associated with Human Intrusion at Radioactive Waste Disposal Sites* (Paris, 5-7 June 1989), OECD/NEA, Paris, 1989.
- [B19] J. Jowett and N.A. Chapman, "U.K. Nirex studies of intrusion frequency", *Ibid.*
- [B20] P. Jacquier and P. Raimbault, "Radiological consequences associated with human intrusion into radioactive waste repositories in salt formation", *Ibid.*
- [B21] J. Prij and P. Glasbergen, "The rôle of human intrusion in the Dutch safety study", *Ibid.*
- [B22] F. van Kote, J.M. Peres and M. Olivier (CEA/ANDRA) and J. Lewi, M. Assouline and M.J. Mejon-Goula (CEA/IPSN), PAGIS, *Etude des Performances de Systemes d'Isollement Geologique pour Dechets Radioactifs: Enfouissement dans des Formations Granitiques*, CEC Report, EUR 11777 EN, Brussels-Luxembourg, 1988.
- [B23] P.A. Davis, R. Zach, M.E. Stephens, B.D. Amiro, G.A. Bird, J.A.K. Reid, M.I. Sheppard, S.C. Sheppard and M. Stephenson, *The Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste: The Biosphere Model, BIOTRAC, for Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste*, Atomic Energy of Canada Limited Report, AECL-10720, COG-93-10, 1993.

## **Résumé d'évaluations antérieures relatives aux activités humaines**

### **C.1 Introduction**

Il convient de noter que le résumé présenté ici n'est pas exhaustif. Il mentionne néanmoins un grand nombre d'études importantes qui ont été menées jusqu'ici, répertoriées en fonction des types de roches étudiées. D'autres études sont résumées dans la référence [C1].

Ce résumé est axé sur la présentation des principaux scénarios qui ont fait l'objet d'une évaluation quantitative, afin de donner un aperçu général des démarches utilisées. Les modèles de calcul détaillés ne sont pas discutés, pas plus que les résultats exprimés sous forme de doses, de fréquences d'intrusion ou de risques encourus. Le lecteur intéressé est renvoyé aux publications citées en référence, ainsi qu'au catalogue dressé par l'AEN [C2].

### **C.2 Dépôts dans des roches cristallines**

Les pays Membres de l'OCDE, énumérés ci-après, ont étudiés activement l'aptitude des formations de roches cristallines à accueillir des déchets radioactifs disposés dans des dépôts profonds spécialement conçus à cet effet : Canada, Espagne, États-Unis, Finlande, France, Japon, Royaume-Uni, Suède et Suisse. La Finlande et la Suède disposent, d'ores et déjà, de dépôts profonds mis en service pour l'évacuation des déchets faiblement et moyennement radioactifs. Il n'existe pas encore de dépôts autorisés pour le stockage de déchets hautement radioactifs. On trouvera ci-après des études entreprises par des chercheurs de ces pays sur les activités humaines futures.

#### ***Canada***

Les travaux canadiens sur le stockage des HLW sont axés sur la mise au point de dépôts situés à une profondeur comprise entre 500 et 1 000 mètres, dans des roches ignées du bouclier canadien. La firme Énergie atomique du Canada limitée (EACL) a évalué les doses imputables à l'utilisation de l'eau pompée d'un puits foré dans une zone de fractures hypothétique qui s'étendrait du champ proche du dépôt à la surface [C3]. Il est postulé que l'eau extraite de ce puits serait utilisée par une collectivité de petite taille, à des fins domestiques et d'irrigation de jardins.

En outre, le modèle de l'EACL prend en considération diverses autres activités humaines qui seraient susceptibles d'avoir des conséquences négatives : l'utilisation de sédiments lacustres contaminés comme matériaux d'assise ou de construction, la combustion à des fins de chauffage ou de défrichage de tourbes ou de biomasse contaminées ainsi que l'utilisation de bois contaminé comme matériau de construction.

Des études menées plus récemment au Canada sur l'évaluation des performances des systèmes d'évacuation des déchets fortement radioactifs, ont pris en considération des scénarios de forage de prospection [C4]. Les calculs ont porté sur l'évaluation des risques encourus par un géotechnicien examinant des carottes de sondage contaminées et par un technicien de forage passant une partie importante de son temps à proximité du bassin de décharge des fluides de forage. Il ressort de cette étude que les deux plus importantes voies d'irradiation de ces individus sont l'irradiation externe et l'inhalation de poussières.

Des calculs de risque ont été également effectués dans le cadre de deux scénarios de dispersion de déchets provenant d'opérations de forage [C4]. Ces scénarios impliquent l'exposition d'un travailleur participant à la construction d'un bâtiment sur un sol contaminé et l'exposition de résidents dont une partie de l'alimentation provient de sols contaminés.

Les travaux canadiens se caractérisent notamment par le recours à un arbre d'événements afin de déterminer la fréquence des scénarios envisagés. À la différence des travaux de Nirex menés au Royaume-Uni, il a été fait appel à des experts afin de définir explicitement des probabilités nodales dépendantes du temps.

### *Finlande*

La Finlande (après la Suède) est le second pays exploitant un dépôt profond de déchets faiblement et moyennement radioactifs aménagé dans une formation rocheuse cristalline. Il a été construit par la TVO (Compagnie d'électricité industrielle de Finlande), sur le site nucléaire de Olkiluoto, à des profondeurs comprises entre 50 et 125 mètres. Un seul scénario d'intrusion a été pris en considération, celui du forage d'un puits dans le panache radioactif d'une nappe souterraine surmontant le dépôt [C5].

Les experts finlandais ont également évalué le risque encouru par un technicien de forage manipulant une carotte d'un forage ayant pénétré directement un colis de déchets fortement radioactifs disposé à des profondeurs dépassant 500 mètres dans une formation de roches cristallines. La dose et la fréquence ont été évaluées.

### *France*

Le Projet international patronné par la Commission des Communautés européennes (CCE), connu sous le sigle de PAGIS – Évaluation des performances de systèmes de confinement géologique – a choisi le site d'Auriat en France, pour en faire le site de référence dans une formation granitique. PAGIS avait pour objectif d'évaluer la capacité de confinement de diverses formations géologiques pour des déchets fortement radioactifs vitrifiés. La conception du dépôt est basée sur un ensemble de colis de déchets disposés dans des puits verticaux forés à partir de galeries horizontales creusées à des profondeurs comprises entre 500 et 1 000 mètres.

Le scénario d'intrusion retenu implique la construction d'une salle souterraine de 106 m<sup>3</sup> à 50 mètres du dépôt [C6]. L'ouverture directe d'une brèche dans l'enceinte du dépôt n'a pas été envisagée. Un pompage modifiant l'écoulement des eaux souterraines et amplifiant le flux de radionucléides vers la biosphère a été envisagé pour une période de 50 ans. Les doses reçues par les travailleurs de la mine liées à l'irradiation externe et à l'inhalation de poussières, ainsi que la dose reçue par le public ont été calculées. Elles résultent : (i) de la consommation de lait provenant de bêtes buvant l'eau contaminée de la mine et (ii) de la consommation de légumes cultivés dans une zone dont un dixième du sol est

constitué de déblais miniers. La probabilité de construction d'une mine n'a pas été prise en considération.

### *Suède*

La Société suédoise de gestion des déchets radioactifs (SKB) effectue des analyses des performances sur les dépôts de déchets hautement radioactifs et de déchets faiblement et moyennement radioactifs [C7] (depuis 1977). Le dépôt suédois de stockage définitif (SFR) de déchets faiblement et moyennement radioactifs est en service depuis 1988. Le SFR est situé à une profondeur de 60 mètres dans le socle granitique en dessous du niveau de la mer Baltique. Il est relié par un tunnel au site nucléaire de Forsmark.

Toutes les études suédoises ont pris en considération l'hypothèse du forage d'un puits dans un panache radioactif de la nappe aquifère. Pour le SFR, on a également examiné les conséquences de la pénétration du puits dans divers dépôts de déchets [C8]. Une des raisons qui ont guidé le choix de l'emplacement du SFR au large des côtes est de garantir qu'aucun puits ne sera foré directement dans le dépôt au cours du premier millier d'années.

### *Suisse*

Le Projet Gewähr, entrepris par la NAGRA (Coopérative suisse pour le l'évacuation des déchets radioactifs) comporte une évaluation de performance relative à un dépôt générique de déchets fortement radioactifs, situé à une profondeur comprise entre 500 et 1 000 mètres dans le socle rocheux de la Suisse septentrionale [C9]. L'éventualité d'un forage accidentel dans le dépôt a été considéré comme très peu plausible car le site réel de stockage sera choisi dans une zone dépourvue de ressources connues. On a également exclu la possibilité d'un forage profond pour assurer l'alimentation en eau en raison du très faible débit d'eau disponible à grande profondeur. Le seul scénario pour lequel des doses ont été calculées est celui d'un forage pour la recherche d'eau potable dans un aquifère surmontant le niveau du dépôt.

### *Royaume-Uni*

Les travaux poursuivis par le maître d'oeuvre, la UK Nirex Limited, sont actuellement axés sur l'évaluation des propriétés des couches géologiques profondes situées sous le site de Sellafield, dans le Cumberland, afin de vérifier leur aptitude à abriter un dépôt de stockage définitif de déchets de faible et moyenne radioactivités. Des études sur les risques d'intrusion humaine ont été entreprises dans le cadre de la procédure de sélection du site. Ces études mettent l'accent sur l'évaluation du risque encouru par les géotechniciens examinant les carottes qui seraient prélevées lors d'un forage de prospection pénétrant directement dans les déchets, ainsi que le risque encouru par les habitants d'un terrain contaminé par la décharge de déchets extraits au cours de forages de prospection antérieurs [C10, C11]. L'analyse de probabilité du scénario a fait appel à un arbre d'événements pour représenter les divers facteurs susceptibles d'atténuer la fréquence des radioexpositions les plus graves. Les probabilités nodales se sont avérées difficiles à calculer, aussi a-t-on attribué à ces probabilités des valeurs conservatives correspondant aux limites supérieures. Même avec une approche basée sur les maxima, le recours à un arbre d'événements est avantageux car il aide à mettre en évidence les éléments de conservatisme inclus dans l'analyse. On trouvera dans la référence [C10] des valeurs de fréquence de forage en fonction de la profondeur au Royaume-Uni, dans des zones de roches dures.

L'instance réglementaire impliquée, le Département de l'Environnement du Royaume-Uni, a mené une étude sur les meilleures options pour l'évacuation des déchets de faible et de moyenne radioactivités. Dans le cadre de cette étude, on a calculé [C12] les doses et les risques liés à un forage de prospection qui pénétrerait un dépôt profond. Ces calculs ne se rapportaient pas spécifiquement à un dépôt situé dans des roches cristallines, bien que les fréquences de forage applicables à ce type de roches aient été utilisées dans l'étude. Le scénario envisagé prenait en considération l'exposition d'un géotechnicien examinant les matériaux contaminés d'une carotte. On a évalué les doses imputables à l'irradiation externe, ainsi qu'à l'inhalation et l'ingestion de poussières.

### **C.3 Dépôts dans des formations salifères**

Parmi les pays Membres de l'OCDE, l'Allemagne, l'Espagne, les États-Unis, la France et les Pays-Bas ont étudié activement la possibilité de placer des dépôts profonds de déchets radioactifs dans des formations stratifiées salifères ou dans des dômes de sel. Les études sur les activités humaines, entreprises par les chercheurs de ces pays, sont décrites ci-après.

Il convient de noter que les dépôts dans des formations de sel ont été également examinés dans le cadre du Projet PAGIS de la CCE [C13]. L'évacuation dans des dômes de sel a été étudiée par l'Allemagne tandis que la France a axé ses recherches sur les formations salifères stratifiées. Des études ultérieures de la CCE ont pris en considération l'évacuation de déchets contaminés par des émetteurs alpha et de déchets de faible activité dans des dômes de sel en Allemagne [C14] et l'évacuation de déchets faiblement et moyennement radioactifs dans divers types de formations salifères aux Pays-Bas [C15].

#### ***France***

Les études françaises ont envisagé un scénario impliquant la consommation de sel contaminé extrait par lixiviation dans une galerie traversant un dépôt de déchets fortement radioactifs ou un réservoir en ciment de déchets faiblement radioactifs (contenant des émetteurs alpha), situés dans une formation salifère stratifiée [C16]. Les doses résultant d'une consommation quotidienne de 6 g de sel ont été évaluées, l'extraction du sel ayant lieu soit 500 ans, soit 2 500 ans après la fermeture du dépôt. La probabilité d'un tel scénario n'a pas été évaluée.

#### ***Allemagne***

Dans les études allemandes [C14,C17], le scénario principal d'intrusion fait intervenir l'excavation par lixiviation d'une cavité de stockage, mille ans après la fermeture du dépôt. Les activités d'excavation ont pour effet d'exposer la moitié du contenu d'un colis de déchets qui est supposé s'effondrer à l'intérieur de la cavité. Après 50 années d'utilisation à des fins de stockage, la cavité est remplie d'eau et est obturée. Toutefois, le processus de convergence saline engendre une pression suffisante pour endommager l'obturation de la cavité, ce qui donne lieu à une lente expulsion des eaux contaminées vers les aquifères supérieurs utilisés pour l'alimentation en eau potable. L'étude présente les débits de dose annuels pour un éventail de radionucléides, mais ne comporte pas d'évaluation de la fréquence d'intrusion.

#### ***Pays-Bas***

Aux Pays-Bas, un projet de recherches, dénommé OPLA, a passé en revue une gamme d'options d'évacuation de déchets fortement radioactifs dans des formations salifères, y compris des

formations stratifiées, des dômes de sel et des formations en coussins de sel. Quatre scénarios d'intrusion ont été envisagés [C15,C18] :

- Prospection de forage. On a évalué la dose et le risque encourus par un travailleur de laboratoire examinant un segment d'un mètre de longueur d'une carotte contaminée.
- Extraction par lixiviation. On a évalué les doses reçues par des travailleurs d'une fabrique de sel suite à l'inhalation de poussières de sel produites au cours de l'évaporation, ainsi que les doses liées à la consommation de sel.
- Fuite à partir d'une cavité de stockage. Ce scénario d'intrusion est identique à celui qui figure dans l'étude allemande.
- Extraction minière classique. Ce scénario est basé sur l'excavation d'une galerie de mine classique adjacente au dépôt, dont elle n'est séparée que par une épaisseur de 50 cm de sel dissimulant la présence du dépôt. On a évalué la dose d'irradiation externe délivrée à des mineurs passant par ce point.

La probabilité de ces trois derniers scénarios n'a pas été évaluée.

### *États-Unis*

L'analyse de scénarios d'intrusion figure dans un nombre considérable d'études effectuées aux États-Unis pour des dépôts hypothétiques de déchets fortement ou faiblement et moyennement radioactifs situés dans des formations salifères. Une étude a évalué les doses reçues du fait de la consommation de sel extrait par lixiviation sur l'emplacement d'un dépôt de déchets fortement radioactifs [C19]. La mine est constituée, par hypothèse, d'un ensemble de 12 puits, où sont effectués 3 ou 4 pompages à n'importe quel instant. Une durée d'exploitation de 50 ans a été retenue, durant laquelle 2 à 5 pour cent du volume du dépôt pourraient tomber dans la saumure. Les résultats présentés comportent une série exhaustive de valeur de dose mais aucune valeur de fréquence (et donc de risque).

Au cours des années 80, le Département de l'énergie des États-Unis (DOE) a lancé le Salt Repository Project (Projet de dépôt dans des formations salifères), dont l'objectif était d'examiner la faisabilité de construction d'un dépôt de déchets fortement radioactifs au sein d'une formation salifère [C20]. Des formations stratifiées et des dômes de sel ont été étudiés dans le cadre de ce projet avant qu'il ne s'achève à la mi-1988. Les scénarios d'intrusion examinés impliquaient la migration de radionucléides le long d'un trou de sondage qui mettait le dépôt en relation avec un aquifère le surmontant ou encore avec deux aquifères situés respectivement au-dessous et au-dessus du dépôt.

L'installation pilote de confinement des déchets (Waste Isolation Pilot Plant – WIPP) est une installation de recherche et développement qui pourrait devenir le premier dépôt géologique de stockage de déchets contenant des transuraniens (moyennement radioactifs contenant des émetteurs alpha) provenant de programmes militaires. Le dépôt serait situé à une profondeur de 650 mètres au sein d'une formation salifère stratifiée. Depuis 1989, les Sandia National Laboratories (SNL), dans le cadre d'un contrat du Département de l'énergie, ont effectué des calculs préliminaires relatifs aux conséquences d'un nombre limité de scénarios d'intervention humaine, tous liés à des cas de forage [C21]. Toutes les analyses retenaient l'hypothèse d'un ou plusieurs sondages pénétrant dans un colis de déchets ou passant à travers un colis de déchets et interceptant une poche de saumure sous-pression située sous le dépôt. Les calculs ont porté sur les valeurs suivantes :

- La dose de rayonnement externe reçue par un géologue examinant des débris de forage pendant une heure.
- La dose reçue par une famille d'agriculteurs vivant à 500 mètre sous le vent d'un bassin contenant des fluides de forage abandonnés après la fin du sondage.
- La dose reçue par un individu consommant de la viande de bœuf contaminée à la suite de l'absorption par le bétail de fourrage irrigué par un puits creusé dans un aquifère voisin. La contamination est due à un courant ascendant de saumure parcourant le trou de sondage qui relit la poche de saumure sous-pression, le dépôt lui-même et l'aquifère.
- Les rejets de radionucléides cumulés sur 10 000 ans dans l'«environnement accessible», défini par l'Agence pour la protection de l'environnement des États-Unis.

Il ressort des calculs de l'évaluation de performance préliminaire qu'une intrusion humaine est probablement le mécanisme le plus significatif de rejet de radionucléides dans l'environnement accessible, sur le site de la WIPP. Cette conclusion a été à l'origine d'un nouveau programme de travail important, axé sur le recours à des jugements d'experts, afin de cerner les modes d'intrusion possibles, d'estimer les fréquences de ces modes d'intrusion et de mettre au point des critères applicables à la construction de barrières et de marqueurs destinés à prévenir toute intrusion future [C21].

#### **C.4 Dépôts dans des formations argileuses**

Plusieurs pays Membres de l'OCDE étudient activement les possibilités d'évacuer les déchets radioactifs dans des dépôts profonds creusés dans des formations argileuses. C'est le programme belge qui a joué un rôle de pionnier dans les efforts visant à établir des évaluations quantitatives de scénarios d'intervention humaine. Des études sur les formations argileuses ont été également menées par le Canada, l'Espagne, la France, le Japon, le Royaume-Uni et la Suisse.

##### ***Belgique***

Le site nucléaire de Mol, en Belgique, a été choisi comme site de référence pour l'option d'évacuation dans des formations argileuses du programme PAGIS. Par hypothèse, le dépôt est constitué de galeries horizontales situées à une profondeur de 200 mètres dans une couche d'argile épaisse de 100 mètres. La couche d'argile est comprise entre deux aquifères, le plus proche de la surface pouvant servir à l'alimentation en eau potable. Le scénario d'intrusion retenu correspond au forage d'un puits atteignant par mégarde un panache radioactif formé dans l'aquifère supérieur [C23]. Tant l'absorption directe de l'eau tirée du puits que la consommation de produits alimentaires provenant d'animaux et de végétaux ayant absorbé l'eau du puits ont été pris en compte dans l'analyse.

Après l'achèvement du programme PAGIS, la Fondation belge de recherche sur l'énergie nucléaire (SCK/CEN) a entrepris une réévaluation des caractéristiques, des événements et des processus susceptibles d'avoir des conséquences importantes pour l'évacuation des déchets radioactifs en profondeur sous le site de Mol [C24]. Ces travaux ont identifié une série d'activités humaines et leurs conséquences qui seront prises en compte dans les futures évaluations de performance belges.



## *Royaume-Uni*

Dans le cadre de l'option d'évacuation dans des formations argileuses du programme PAGIS, le cas d'un dépôt situé à une profondeur de 275 mètres dans l'argile d'Oxford sous le site d'Harwell, au Royaume-Uni a été étudié [C23]. Le seul scénario d'intrusion pris en considération correspondait à l'utilisation d'eau provenant d'un puits aménagé dans un aquifère surmontant la formation argileuse.

### **C.5 Dépôts dans des formations de tuf**

#### *États-Unis*

Les États-Unis est actuellement le seul pays envisageant la possibilité d'évacuer des déchets radioactifs dans des formations de tuf. Le Département de l'énergie des États-Unis (DOE) est en train d'évaluer la possibilité d'aménager un dépôt définitif de déchets fortement radioactifs dans une formation de tuf non saturée à Yucca Mountain (Nevada). Une analyse de deux scénarios de forage a été récemment menée à terme [C25]. Le premier scénario implique un transfert direct de déchets vers la surface par l'intermédiaire d'une contamination des fluides de forage. Deux cas sont considérés dans ce scénario : une perforation directe des conteneurs de déchets, d'une part, et le passage du forage dans la zone proche du conteneur, d'autre part. Le second scénario envisage le transfert de déchets vers le bas, par le trou de sondage, jusqu'à la zone saturée et le transport consécutif de radionucléides par les eaux souterraines dans cette zone. La valeur 1 a été assignée à la probabilité d'une intrusion humaine sur ce site au cours des prochains 10 000 ans.

Une étude connexe a été menée sur la base des mêmes scénarios en postulant la présence simultanée de conteneurs renfermant des déchets fortement radioactifs et des combustibles irradiés [C26]. En général, les conséquences d'intrusions dans les conteneurs de déchets fortement radioactifs étaient plus faibles d'un ordre de grandeur que les conséquences d'intrusions dans des conteneurs de combustible irradié. Des variations des propriétés de l'aquifère ont été prises en compte et ont mené à des variations importantes des résultats concernant les rejets cumulés dans l'environnement accessible.

### **C.6 Dépôts dans des formations de sédiments meubles**

#### *États-Unis*

La grande installation d'évacuation et de confinement, dite "The Greater Confinement Disposal - GCD" est constituée de 13 puits de sondage creusés dans un bassin sédimentaire situé dans la Zone 5 du site d'essai du Nevada. Les puits sont d'un diamètre approximatif de 3 mètres et atteignent une profondeur de 37 mètres. Les déchets sont disposés dans les derniers 17 mètres des puits. Quatre de ces puits contiennent des déchets renfermant des éléments transuraniens, cinq contiennent des déchets de faible activité et quatre sont encore inutilisés. A deux exceptions près, tous les puits contenant des déchets ont été remblayés avec des matériaux sédimentaires.

Dans une évaluation de performance préliminaire [C27] on a analysé le cas d'un forage de prospection atteignant un puits contenant des déchets renfermant des transuraniens. On a calculé la quantité de radionucléides amenée à la surface par la circulation des fluides de forage.

## Références

- [C1] D.J. Nancarrow, R.H. Little, J. Ashton and G.M. Staunton, *The Assessment of Human Intrusion into Underground Repositories for Radioactive Waste*, CEC Report EUR 12691/1 EN, Brussels, 1992.
- [C2] OECD Nuclear Energy Agency (NEA), *Catalogue of Future Human Action Assessments in Radioactive Waste Repository Safety Assessments undertaken by OECD Member Countries*, OECD/NEA, Paris, 1993.
- [C3] J.A.K. Reid *et al.*, "Effects of a domestic well on assessed performance of a nuclear fuel waste disposal system", in *Proceedings of an NEA Workshop on Risks Associated with Human Intrusion at Radioactive Waste Disposal Sites* (Paris, 5-7 June 1989), OECD/NEA, Paris, 1989.
- [C4] D.M. Wuschke, *Assessment of the Long Term Risks of Human Intrusion into a Proposed Canadian Nuclear Fuel Waste Disposal Vault in Deep Plutonic Rock*, Report No. AECL-10279, 1991.
- [C5] H. Nordman and T. Vieno, "Consideration of human actions in the Finnish performance assessments of nuclear waste disposal", in *Proceedings of an NEA Workshop on Risks Associated with Human Intrusion at Radioactive Waste Disposal Sites* (Paris, 5-7 June 1989), OECD/NEA, Paris, 1989.
- [C6] M.J. Mejon-Goula and A. Cemes, "Assessment of the radiological consequence of human intrusion into repositories located in granite", *Ibid.*
- [C7] Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, *Handling of Spent Nuclear Fuel and Final Storage of Vitrified High Level Reprocessing Waste*, KBS Report, 1977.
- [C8] T. Eng, "The undersea location of the Swedish Final Repository for Reactor Waste, SFR-human intrusion aspects", in *Proceedings of an NEA Workshop on Risks Associated with Human Intrusion at Radioactive Waste Disposal Sites* (Paris, 5-7 June 1989), OECD/NEA, Paris, 1989.
- [C9] F. van Dorp and J.O. Vigfusson, "Overview of Swiss work concerning human effect scenarios", *Ibid.*
- [C10] J. Jowett and N.A. Chapman, "U.K. Nirex studies of intrusion frequency", in *Proceedings of an NEA Workshop on Risks Associated with Human Intrusion at Radioactive Waste Disposal Sites* (Paris, 5-7 June 1989), OECD/NEA, Paris, 1989.
- [C11] M.J. Egan, "U.K. Nirex studies of intrusion consequence", *Ibid.*
- [C12] G.M. Smith *et al.*, *Calculations of the Radiological Impact of Disposal of Unit Activity of Selected Radionuclides*, NRPB-R205, 1987.
- [C13] R. Storck, J. Aschenbach, R.P. Hirsekorn, A. Nies and N. Stelle, *Performance Assessment of Geological Isolation Systems, Disposal in Salt Formations*, CEC Report, EUR 11778 EN, Brussels, 1988.

- [C14] R.P. Hirsekorn, A. Nies, H. Rausch and R. Storck, *Performance Assessment of Confinements for Medium-level and a-contaminated Waste*, CEC Report, EUR 13634 EN, Brussels, 1991.
- [C15] J. Prij, A. van Dalen, H.A. Roodbergen, W. Slagter, A.W. van Weers, D.A. Zanstra, P. Glasbergen, H.W. Koster, J.F. Lembrechts, I. Nijhof-Pan and A.F.M. Slot, *Safety Evaluation of Geological Disposal Concepts for Low and Medium-level Wastes in Rock Salt (Pacoma Project)*, CEC Report, EUR 13178 EN, Brussels, 1991
- [C16] P. Jaquier and P. Rimbault, "Radiological consequences associated with human intrusion into radioactive waste repositories in salt formation", in *Proceedings of an NEA Workshop on Risks Associated with Human Intrusion at Radioactive Waste Disposal Sites* (Paris, 5-7 June 1989), OECD/NEA, Paris, 1989.
- [C17] R.P. Hirsekorn, "Post-operational leakage of a storage cavern constructed by solution mining in a former HLW repository area in a salt dome", *Ibid.*
- [C18] J. Prij and P. Glasbergen, "The role of human intrusion in the Dutch safety study", *Ibid.*
- [C19] US Department of Energy, *Preliminary Evaluation of Solution-Mining Intrusion into a Salt Dome Repository*, Report No. ONWI-320-1, 1981.
- [C20] US Department of Energy, *Performance Assessment Plans and Methods for the Salt Repository Project*, Report No. BM1/PWW1-545, 1985.
- [C21] D.R. Anderson *et al.*, "WIPP performance, impacts of human intrusion", in *Proceedings of an NEA Workshop on Risks Associated with Human Intrusion at Radioactive Waste Disposal Sites* (Paris, 5-7 June 1989), OECD/NEA, Paris, 1989.
- [C22] D.R. Anderson and S. Hora, "Update of the US WIPP program", Paper presented at the First Meeting of the NEA Working Group on the Assessment of Future Human Actions at Radioactive Waste Disposal Sites, Paris, 3-5 April 1991.
- [C23] J. Marivoet and A. Bonne, *Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste, Disposal in Clay Formations*, EUR 11776 EN, Brussels, 1988.
- [C24] A. Bonne *et al.*, "Overview of considerations and assessments related to human intrusion in SCK/CEN's performance assessments", Paper presented at the First Meeting of the NEA Working Group on the Assessment of Future Human Actions at Radioactive Waste Disposal Sites, Paris, 3-5 April 1991.
- [C25] R.W. Barnard, M.L. Wilson, H.A. Dockery, J.H. Gauthier, P.G. Kaplan, R.R. Eaton, F.W. Bingham and T.H. Robey, *TSPA 1991: An Initial Total-System Performance Assessment for Yucca Mountain*, SAND-91-2795, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 1991.
- [C26] P.W. Eslinger *et al.*, *Preliminary Total-System Analysis of a Potential High-Level Nuclear Waste Repository at Yucca Mountain*, PNL-8444, Pacific Northwest Laboratory, Richland, WA, 1993.
- [C27] L.L. Price *et al.*, *Preliminary Performance Assessment of the Greater Confinement Disposal Facility at the Nevada Test Site*, SAND91-0047, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 1993.

**MAIN SALES OUTLETS OF OECD PUBLICATIONS  
PRINCIPAUX POINTS DE VENTE DES PUBLICATIONS DE L'OCDE**

- ARGENTINA - ARGENTINE**  
Carlos Hirsch S.R.L.  
Galería Güemes, Florida 165, 4° Piso  
1333 Buenos Aires Tel. (1) 331.1787 y 331.2391  
Telefax: (1) 331.1787
- AUSTRALIA - AUSTRALIE**  
D.A. Information Services  
648 Whitehorse Road, P.O.B 163  
Mitcham, Victoria 3132 Tel. (03) 873.4411  
Telefax: (03) 873.5679
- AUSTRIA - AUTRICHE**  
Gerold & Co.  
Graben 31  
Wien I Tel. (0222) 533.50.14
- BELGIUM - BELGIQUE**  
Jean De Lannoy  
Avenue du Roi 202  
B-1060 Bruxelles Tel. (02) 538.51.69/538.08.41  
Telefax: (02) 538.08.41
- CANADA**  
Renouf Publishing Company Ltd.  
1294 Algoma Road  
Ottawa, ON K1B 3W8 Tel. (613) 741.4333  
Telefax: (613) 741.5439
- Stores:  
61 Sparks Street  
Ottawa, ON K1P 5R1 Tel. (613) 238.8985  
211 Yonge Street  
Toronto, ON M5B 1M4 Tel. (416) 363.3171  
Telefax: (416) 363.59.63
- Les Éditions La Liberté Inc.  
3020 Chemin Sainte-Foy  
Sainte-Foy, PQ G1X 3V6 Tel. (418) 658.3763  
Telefax: (418) 658.3763
- Federal Publications Inc.  
165 University Avenue, Suite 701  
Toronto, ON M5H 3B8 Tel. (416) 860.1611  
Telefax: (416) 860.1608
- Les Publications Fédérales  
1185 Université  
Montréal, QC H3B 3A7 Tel. (514) 954.1633  
Telefax: (514) 954.1635
- CHINA - CHINE**  
China National Publications Import  
Export Corporation (CNPIEC)  
16 Gongti E. Road, Chaoyang District  
P.O. Box 88 or 50  
Beijing 100704 PR Tel. (01) 506.6688  
Telefax: (01) 506.3101
- CZECH REPUBLIC - RÉPUBLIQUE  
TCHÈQUE**  
Artia Pegas Press Ltd.  
Národní Tržda 25  
POB 825  
111 21 Praha 1 Tel. 26.65.68  
Telefax: 26.20.81
- DENMARK - DANEMARK**  
Munksgaard Book and Subscription Service  
35, Nørre Søgade, P.O. Box 2148  
DK-1016 København K Tel. (33) 12.85.70  
Telefax: (33) 12.93.87
- EGYPT - ÉGYPTE**  
Middle East Observer  
41 Sherif Street  
Cairo Tel. 392.6919  
Telefax: 360-6804
- FINLAND - FINLANDE**  
Akateeminen Kirjakauppa  
Keskuskatu 1, P.O. Box 128  
00100 Helsinki  
Subscription Services/Agence d'abonnements :  
P.O. Box 23  
00371 Helsinki Tel. (358 0) 12141  
Telefax: (358 0) 121.4450
- FRANCE**  
OECD/OCDE  
Mail Orders/Commandes par correspondance:  
2, rue André-Pascal  
75775 Paris Cedex 16 Tel. (33-1) 45.24.82.00  
Telefax: (33-1) 49.10.42.76  
Telex: 640048 OCDE
- Orders via Minitel, France only/  
Commandes par Minitel, France exclusivement :  
36 15 OCDE
- OECD Bookshop/Librairie de l'OCDE :  
33, rue Octave-Feuillet  
75016 Paris Tel. (33-1) 45.24.81.67  
(33-1) 45.24.81.81
- Documentation Française  
29, quai Voltaire  
75007 Paris Tel. 40.15.70.00
- Gibert Jeune (Droit-Économie)  
6, place Saint-Michel  
75006 Paris Tel. 43.25.91.19
- Librairie du Commerce International  
10, avenue d'Iéna  
75016 Paris Tel. 40.73.34.60
- Librairie Dunod  
Université Paris-Dauphine  
Place du Maréchal de Lattre de Tassigny  
75016 Paris Tel. (1) 44.05.40.13
- Librairie Lavoisier  
11, rue Lavoisier  
75008 Paris Tel. 42.65.39.95
- Librairie L.G.D.J. - Montchrestien  
20, rue Soufflot  
75005 Paris Tel. 46.33.89.85
- Librairie des Sciences Politiques  
30, rue Saint-Guillaume  
75007 Paris Tel. 45.48.36.02
- P.U.F.  
49, boulevard Saint-Michel  
75005 Paris Tel. 43.25.83.40
- Librairie de l'Université  
12a, rue Nazareth  
13100 Aix-en-Provence Tel. (16) 42.26.18.08
- Documentation Française  
165, rue Garibaldi  
69003 Lyon Tel. (16) 78.63.32.23
- Librairie Decitre  
29, place Bellecour  
69002 Lyon Tel. (16) 72.40.54.54
- GERMANY - ALLEMAGNE**  
OECD Publications and Information Centre  
August-Bebel-Allee 6  
D-53175 Bonn Tel. (0228) 959.120  
Telefax: (0228) 959.12.17
- GREECE - GRÈCE**  
Librairie Kauffmann  
Mavrokordatou 9  
106 78 Athens Tel. (01) 32.55.321  
Telefax: (01) 36.33.967
- HONG-KONG**  
Swindon Book Co. Ltd.  
13-15 Lock Road  
Kowloon, Hong Kong Tel. 2376.2062  
Telefax: 2376.0685
- HUNGARY - HONGRIE**  
Euro Info Service  
Margitsziget, Európa Ház  
1138 Budapest Tel. (1) 111.62.16  
Telefax: (1) 111.60.61
- ICELAND - ISLANDE**  
Mál Mog Menning  
Laugavegi 18, Pósthólf 392  
121 Reykjavik Tel. 162.35.23
- INDIA - INDE**  
Oxford Book and Stationery Co.  
Scindia House  
New Delhi 110001 Tel. (11) 331.5896/5308  
Telefax: (11) 332.5993
- 17 Park Street  
Calcutta 700016 Tel. 240832
- INDONESIA - INDONÉSIE**  
Pdii-Lipi  
P.O. Box 4298  
Jakarta 12042 Tel. (21) 573.34.67  
Telefax: (21) 573.34.67
- IRELAND - IRLANDE**  
Government Supplies Agency  
Publications Section  
4/5 Harcourt Road  
Dublin 2 Tel. 661.31.11  
Telefax: 478.06.45
- ISRAEL**  
Praedicta  
5 Shatner Street  
P.O. Box 34030  
Jerusalem 91430 Tel. (2) 52.84.90/12  
Telefax: (2) 52.84.93
- R.O.Y.  
P.O. Box 13056  
Tel Aviv 61130 Tél. (3) 49.61.08  
Telefax (3) 544.60.39
- ITALY - ITALIE**  
Libreria Commissionaria Sansoni  
Via Duca di Calabria 1/1  
50125 Firenze Tel. (055) 64.54.15  
Telefax: (055) 64.12.57
- Via Bartolini 29  
20155 Milano Tel. (02) 36.50.83
- Editrice e Libreria Herder  
Piazza Montecitorio 120  
00186 Roma Tel. 679.46.28  
Telefax: 678.47.51
- Libreria Hoepli  
Via Hoepli 5  
20121 Milano Tel. (02) 86.54.46  
Telefax: (02) 805.28.86
- Libreria Scientifica  
Dott. Lucio de Biasio 'Aeiu'  
Via Coronelli, 6  
20146 Milano Tel. (02) 48.95.45.52  
Telefax: (02) 48.95.45.48
- JAPAN - JAPON**  
OECD Publications and Information Centre  
Landic Akasaka Building  
2-3-4 Akasaka, Minato-ku  
Tokyo 107 Tel. (81.3) 3586.2016  
Telefax: (81.3) 3584.7929
- KOREA - CORÉE**  
Kyobo Book Centre Co. Ltd.  
P.O. Box 1658, Kwang Hwa Moon  
Seoul Tel. 730.78.91  
Telefax: 735.00.30
- MALAYSIA - MALAISIE**  
University of Malaya Bookshop  
University of Malaya  
P.O. Box 1127, Jalan Pantai Baru  
59700 Kuala Lumpur  
Malaysia Tel. 756.5000/756.5425  
Telefax: 756.3246
- MEXICO - MEXIQUE**  
Revistas y Periódicos Internacionales S.A. de C.V.  
Floresca 57 - 1004  
Mexico, D.F. 06600 Tel. 207.81.00  
Telefax: 208.39.79

**NETHERLANDS – PAYS-BAS**

SDU Uitgeverij Plantijnstraat  
Externe Fondsen  
Postbus 20014  
2500 EA's-Gravenhage Tel. (070) 37.89.880  
Voor bestellingen: Telefax: (070) 34.75.778

**NEW ZEALAND  
NOUVELLE-ZELANDE**

Legislation Services  
P.O. Box 12418  
Thorndon, Wellington Tel. (04) 496.5652  
Telefax: (04) 496.5698

**NORWAY – NORVÈGE**

Narvesen Info Center – NIC  
Bertrand Narvesens vei 2  
P.O. Box 6125 Etterstad  
0602 Oslo 6 Tel. (022) 57.33.00  
Telefax: (022) 68.19.01

**PAKISTAN**

Mirza Book Agency  
65 Shahrah Quaid-E-Azam  
Lahore 54000 Tel. (42) 353.601  
Telefax: (42) 231.730

**PHILIPPINE – PHILIPPINES**

International Book Center  
5th Floor, Filipinas Life Bldg.  
Ayala Avenue  
Metro Manila Tel. 81.96.76  
Telex 23312 RHP PH

**PORTUGAL**

Livraria Portugal  
Rua do Carmo 70-74  
Apart. 2681  
1200 Lisboa Tel.: (01) 347.49.82/5  
Telefax: (01) 347.02.64

**SINGAPORE – SINGAPOUR**

Gower Asia Pacific Pte Ltd.  
Golden Wheel Building  
41, Kallang Pudding Road, No. 04-03  
Singapore 1334 Tel. 741.5166  
Telefax: 742.9356

**SPAIN – ESPAGNE**

Mundi-Prensa Libros S.A.  
Castelló 37, Apartado 1223  
Madrid 28001 Tel. (91) 431.33.99  
Telefax: (91) 575.39.98

**Libreria Internacional AEDOS**

Consejo de Ciento 391  
08009 – Barcelona Tel. (93) 488.30.09  
Telefax: (93) 487.76.59

**Libreria de la Generalitat**

Palau Moja  
Rambla dels Estudis, 118  
08002 – Barcelona  
(Subscriptions) Tel. (93) 318.80.12  
(Publications) Tel. (93) 302.67.23  
Telefax (93) 412.18.54

**SRI LANKA**

Centre for Policy Research  
c/o Colombo Agencies Ltd.  
No. 300-304, Galle Road  
Colombo 3 Tel. (1) 574240, 573551-2  
Telefax: (1) 575394, 510711

**SWEDEN – SUÈDE**

Fritzes Information Center  
Box 16356  
Regeringsgatan 12  
106 47 Stockholm Tel. (08) 690.90.90  
Telefax: (08) 20.50.21

Subscription Agency/Agence d'abonnements :  
Wennergren-Williams Info AB  
P.O. Box 1305  
171 25 Solna Tel. (08) 705.97.50  
Téléfax : (08) 27.00.71

**SWITZERLAND – SUISSE**

Maditec S.A. (Books and Periodicals - Livres  
et périodiques)  
Chemin des Palettes 4  
Case postale 266  
1020 Renens VD 1 Tel. (021) 635.09.65  
Telefax: (021) 635.07.80

**Librairie Payot S.A.**

4, place Pépinet  
CP 3212  
1002 Lausanne Tel. (021) 341.33.47  
Telefax: (021) 341.33.45

**Librairie Unilivres**

6, rue de Candolle  
1205 Genève Tel. (022) 320.26.23  
Telefax: (022) 329.73.18

**Subscription Agency/Agence d'abonnements :**

Dynapresse Marketing S.A.  
38 avenue Vibert  
1227 Carouge Tel.: (022) 308.07.89  
Telefax : (022) 308.07.99

**See also – Voir aussi :**

OECD Publications and Information Centre  
August-Bebel-Allee 6  
D-53175 Bonn (Germany) Tel. (0228) 959.120  
Telefax: (0228) 959.12.17

**TAIWAN – FORMOSE**

Good Faith Worldwide Int'l. Co. Ltd.  
9th Floor, No. 118, Sec. 2  
Chung Hsiao E. Road  
Taipei Tel. (02) 391.7396/391.7397  
Telefax: (02) 394.9176

**THAILAND – THAÏLANDE**

Suksit Siam Co. Ltd.  
113, 115 Fuang Nakhon Rd.  
Opp. Wat Rajbhophit  
Bangkok 10200 Tel. (662) 225.9531/2  
Telefax: (662) 222.5188

**TURKEY – TURQUIE**

Kültür Yayınları Is-Türk Ltd. Str  
Atatürk Bulvarı No. 191/Kat 13  
Kavaklıdere/Ankara Tel. 428.11.40 Ext. 2458  
Dolmabahçe Cad. No. 29  
Besiktas/Istanbul Tel. 260.71.88  
Telex: 43482B

**UNITED KINGDOM – ROYAUME-UNI**

HMSO  
Gen. enquiries Tel. (071) 873 0011  
Postal orders only:  
P.O. Box 276, London SW8 5DT  
Personal Callers HMSO Bookshop  
49 High Holborn, London WC1V 6HB  
Telefax: (071) 873 8200  
Branches at: Belfast, Birmingham, Bristol, Edinburgh, Manchester

**UNITED STATES – ÉTATS-UNIS**

OECD Publications and Information Centre  
2001 L Street N.W., Suite 700  
Washington, D.C. 20036-4910 Tel. (202) 785.6323  
Telefax: (202) 785.0350

**VENEZUELA**

Libreria del Este  
Avda F. Miranda 52, Aptdo. 60337  
Edificio Galipán  
Caracas 106 Tel. 951.1705/951.2307/951.1297  
Telegram: Librestre Caracas

Subscription to OECD periodicals may also be placed through main subscription agencies.

Les abonnements aux publications périodiques de l'OCDE peuvent être souscrits auprès des principales agences d'abonnement.

Orders and inquiries from countries where Distributors have not yet been appointed should be sent to: OECD Publications Service, 2 rue André-Pascal, 75775 Paris Cedex 16, France.

Les commandes provenant de pays où l'OCDE n'a pas encore désigné de distributeur peuvent être adressées à : OCDE, Service des Publications, 2, rue André-Pascal, 75775 Paris Cedex 16, France

1-1995

---

Analyse de la sûreté  
des dépôts de déchets radioactifs

## **Les actions humaines futures sur les sites d'évacuation**

**L'analyse de la sûreté à long terme des dépôts de déchets radioactifs comprend l'examen des événements perturbateurs d'origine naturelle ou humaine, et l'évaluation de leur impact. Ce rapport passe en revue les questions principales soulevées par les actions futures éventuelles de l'homme sur les sites de ces dépôts, présente un cadre général pour l'analyse quantitative de telles actions et examine les moyens d'en réduire les risques.**

