

**Gestion des échelles de temps
dans l'évaluation de la sûreté
en phase post-fermeture**

**Enseignements tirés de l'atelier
d'avril 2002 à Paris, France**

© OCDE 2004
NEA n° 5148

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

ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

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

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

Les pays membres originaires de l'OCDE sont : l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la France, la Grèce, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Luxembourg, la Norvège, les Pays-Bas, le Portugal, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Turquie. Les pays suivants sont ultérieurement devenus membres par adhésion aux dates indiquées ci-après : le Japon (28 avril 1964), la Finlande (28 janvier 1969), l'Australie (7 juin 1971), la Nouvelle-Zélande (29 mai 1973), le Mexique (18 mai 1994), la République tchèque (21 décembre 1995), la Hongrie (7 mai 1996), la Pologne (22 novembre 1996), la Corée (12 décembre 1996) et la République slovaque (14 décembre 2000). La Commission des Communautés européennes participe aux travaux de l'OCDE (article 13 de la Convention de l'OCDE).

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

L'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN) a été créée le 1^{er} février 1958 sous le nom d'Agence européenne pour l'énergie nucléaire de l'OECE. Elle a pris sa dénomination actuelle le 20 avril 1972, lorsque le Japon est devenu son premier pays membre de plein exercice non européen. L'Agence compte actuellement 28 pays membres de l'OCDE : l'Allemagne, l'Australie, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la Finlande, la France, la Grèce, la Hongrie, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Japon, le Luxembourg, le Mexique, la Norvège, les Pays-Bas, le Portugal, la République de Corée, la République slovaque, la République tchèque, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Turquie. La Commission des Communautés européennes participe également à ses travaux.

La mission de l'AEN est :

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

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

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

© OCDE 2004

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

AVANT-PROPOS

L'enfouissement en formation géologique profonde de déchets radioactifs à vie longue consiste à mettre en place des colis de déchets dans un stockage souterrain en profondeur, conçu et implanté de façon à assurer un confinement de longue durée. Le dossier de sûreté portant sur la période post-fermeture d'un tel stockage doit prendre en compte des échéances très éloignées dans le temps ainsi que des incertitudes et des phénomènes caractérisés par des échelles de temps très diverses. La gestion des questions liées aux échelles de temps utilisées pour évaluer la sûreté après la fermeture d'un stockage présente un intérêt pour l'ensemble des programmes nationaux en matière de gestion des déchets radioactifs.

Les moyens d'évaluation des performances ou de la sûreté et les phénomènes et incertitudes associées peuvent varier en fonction du temps selon l'évolution du stockage et de son environnement. Les indicateurs de sûreté les plus courants sont la dose et le risque, mais, après un certain délai, ils peuvent être utilement complétés par un certain nombre d'autres indicateurs quantitatifs et d'arguments qualitatifs applicables à la sûreté. C'est pourquoi, il peut être commode de subdiviser la période de post-fermeture en un certain nombre de périodes de temps qui se caractérisent par des phénomènes ou incertitudes associés et par des indicateurs ou arguments les plus adaptés. Cette démarche pourrait faciliter la présentation à, et l'examen du dossier de sûreté par, un large public.

Pour tous ces motifs le Groupe d'intégration pour le dossier de sûreté (IGSC) de l'AEN a décidé d'organiser un atelier intitulé « The Handling of Timescales in Assessing Post-closure Safety », qui s'est déroulé à Paris du 16 au 18 avril 2002 avec le soutien de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN). Il avait pour principal objectif de recenser et d'analyser les méthodes appliquées et les travaux consacrés aux problèmes des échelles de temps qui se posent dans le cadre des programmes nationaux de gestion des déchets radioactifs lorsque l'on évalue la sûreté des stockages géologiques après leur fermeture.

Ce rapport présente les enseignements tirés de cet atelier et a pour but d'aider à la réflexion sur les questions liées à la gestion des échelles de temps dans un dossier de sûreté.

Remerciements

Le rapport a été préparé par M. Paul Smith, SAM Ltd., Royaume Uni, en collaboration avec M. Peter De Preter (président de l'atelier, ONDRAF/NIRAS, Belgique), Mme Sylvie Voinis (AEN, France) et M. Trevor Sumerling (SAM Ltd., Royaume-Uni). Il est en grande partie inspiré des idées formulées dans les communications écrites et les exposés oraux présentés ainsi que pendant les débats durant l'atelier sur la gestion des échelles de temps dans le cadre de l'évaluation de la sûreté après fermeture d'un stockage. Cet atelier, accueilli par l'*Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire*, France (IRSN), s'est déroulé du 16 au 18 avril 2002 à Paris. Les points de vue exposés dans cette brochure ne sont pas, tous, accompagnés d'une référence aux communications, documents ou exposés présentés à l'atelier dont ils émanent.

Ce rapport a été revu par Lucy Bailey (UK Nirex Ltd), Lise Griffault (Andra, France), Alan Hooper (UK Nirex Ltd, Royaume-Uni), Philippe Raimbault (DGSNR, France), Klaus-Jürgen Röhlig (GRS, Allemagne), David Sevougian (US-DOE-YM, États-Unis), Jürg Schneider (Nagra, Suisse), Hiroyuki Umeki (NUMO, Japon), Abe van Luik (US-DOE-YM, États-Unis) et Johannes Vigfusson (HSK, Suisse)

Le rapport final a été approuvé par le Groupe d'intégration pour le dossier de sûreté (IGSC).

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos.....	3
1. Introduction	7
2. Quelles échelles de temps doit couvrir le dossier de sûreté ?.....	9
3. Quelles sont les limites de la prédictabilité du dépôt et de son environnement ?	13
4. Quels types d'arguments peuvent prendre en compte les modifications et les incertitudes associées à de longues échelles de temps ?	17
4.1 Considérations générales	17
4.2 Traitement des incertitudes.....	21
4.3 Approche stylisée.....	23
4.4 Scénarios de l'évolution à long terme de l'environnement géologique.....	24
4.5 Indicateurs de sûreté et de performance complémentaires	25
4.6 L'apport des arguments selon les échelles et périodes de temps considérés	33
5. Comment le public peut-il influencer le choix des argumentaires à différents moments ?	39
6. Principaux enseignements.....	41
Références	45
Acronymes	49

1. INTRODUCTION

Les stockages géologiques sont implantés, conçus et exploités afin de protéger l'homme et son environnement des dangers associés aux déchets radioactifs. Ils ont pour objectifs de fournir une protection après leur fermeture sur une échelle de temps qui dépasse considérablement celle envisagée pour la plupart des projets industriels. Ce besoin est spécifié dans les directives internationales et dans de nombreuses réglementations nationales.

Cette protection est assurée par l'enfouissement des déchets radioactifs dans une formation géologique profonde, de manière à isoler les déchets de l'environnement humain. En outre, les conceptions et les sites choisis constituent des barrières passives extrêmement efficaces faisant ainsi obstacle au relâchement et à la migration des substances radioactives, de manière à maintenir à un niveau aussi faible que possible la radioactivité éventuellement libérée dans l'environnement humain.

Dans le cadre de la démarche d'optimisation couramment adoptée pour trouver un site et une conception adéquate [1], la réglementation définit la procédure permettant d'assurer la protection en optimisant la conception et en adoptant des pratiques rationnelles de gestion et d'ingénierie. Elle définit aussi les conséquences radiologiques maximales acceptables en matière de critères de risque ou de dose applicables à des individus hypothétiques vivant dans le futur. La sélection du site, la conception et la réalisation du stockage se font étape par étape. À chaque étape, il est indispensable de constituer un dossier de sûreté pour la durée de la construction et de l'exploitation du dépôt ainsi que pour la période postérieure à sa fermeture. Ce dossier doit pouvoir être utilisé à l'appui des décisions à prendre et des demandes d'autorisation. Pour la période postérieure à la fermeture du stockage, le dossier de sûreté se définit comme [2] :

« ...un ensemble d'arguments...en faveur de la sûreté à long terme... »

Les arguments sont énoncés dans une procédure appelée « évaluation de sûreté ». Plusieurs processus et événements peuvent influencer sur l'évolution d'un

stockage et de son environnement et, donc, sur le confinement, le relâchement éventuel et la migration jusqu'à la surface de substances radioactives. Ces processus et événements se caractérisent par des échelles de temps variant de quelques dizaines ou centaines d'années pour des processus transitoires (associés par exemple à la resaturation du dépôt et de son environnement immédiat après la fermeture), à éventuellement des millions d'années pour l'évolution de l'environnement géologique. Les évaluations de sûreté doivent également vérifier si le relâchement de substances radioactives risque de se traduire par des conséquences dépassant les objectifs fixés par la réglementation. Il est donc nécessaire, pour évaluer la conformité aux critères de dose ou de risque, d'émettre des hypothèses sur les habitudes de groupes potentiellement exposés (par exemple sur leur régime alimentaire, style de vie et l'aménagement des sols), sachant que ces hypothèses risquent d'être différentes sur des périodes ne dépassant pas quelques années.

La nécessité de prendre en compte des échelles de temps aussi grandes est un point important lors de l'établissement des méthodes et de la présentation des évaluations de sûreté. Ce document présente les différents aspects liés à la prise en compte des échelles de temps, en particulier en répondant aux questions suivantes :

- Est-il vraiment nécessaire de tenter de démontrer la sûreté d'un stockage à un horizon aussi lointain qu'un million d'années voire plus ? Et dans ce cas,
- Est-il vraiment possible de prédire l'évolution du stockage et de son environnement sur de si longues échelles de temps ?
- Quels types d'arguments existe-il prenant en compte les modifications inéductibles sur des périodes aussi longues ainsi que les incertitudes associées ?
- Quelle influence peut avoir le public sur la nature des arguments à prendre en compte à des périodes différentes ?

Ces questions communes à tous les programmes nationaux ont incité l'IGSC à organiser un atelier intitulé « Handling of timescales in assessing post-closure safety » consacré à la gestion des échelles de temps dans le cadre de l'évaluation de la sûreté après fermeture d'un stockage. Cet atelier accueilli par l'Institut français de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) s'est tenu à Paris du 16 au 18 avril 2002 [3]. Les enseignements tirés de cet atelier appelé ci-après « l'atelier sur la gestion des échelles de temps » font l'objet de ce document.

2. QUELLES ECHELLES DE TEMPS DOIT COUVRIR LE DOSSIER DE SURETE ?

Un principe éthique veut que le niveau de protection assuré à l'homme et à l'environnement aujourd'hui soit également assuré à l'homme et à l'environnement dans le futur. Ce principe est mentionné dans le document sur les principes fondamentaux de sûreté de l'AIEA [4] qui stipulent que les déchets radioactifs seront gérés de manière à ce que les incidences prévues sur la santé des générations futures ne dépassent pas les niveaux jugés acceptables aujourd'hui. Conformément à ce principe, il est indispensable d'évaluer ces incidences pendant toute la période où les déchets continuent à présenter un danger et qu'il n'existe aucune raison d'un point de vue éthique de restreindre la prise en compte des incidences sur la santé à une période plus courte en dépit des difficultés techniques que cela entraîne pour ceux qui réalisent les évaluations de sûreté.

Malgré les incertitudes inévitables lorsque l'on doit prévoir le niveau réel de protection dont bénéficieront les personnes susceptibles de vivre sur le site d'un stockage à un moment donné dans un avenir lointain, on peut, néanmoins, se fixer pour objectif de laisser aux générations futures un environnement bénéficiant d'une protection qui serait acceptable pour nos propres générations. Notons également que ce niveau de protection garantira que l'éventuel impact radiologique du stockage des déchets n'aura pas pour effet d'augmenter les niveaux de rayonnement au-dessus des niveaux que l'on peut observer habituellement dans la nature.

Ces considérations éthiques sur la protection de l'homme et de l'environnement ne s'appliquent pas simplement aux dépôts de stockage de déchets radioactifs en formations géologiques mais également aux installations destinées à recevoir d'autres types de déchets. Dans la pratique, l'évaluation de l'impact sur l'environnement réalisé pour ces installations prend le plus souvent en compte des périodes plus courtes : en général, des périodes de quelques dizaines ou parfois centaines d'années, même si les substances enfouies peuvent dans certains cas rester indéfiniment toxiques. Paradoxalement, ce sont les périodes radioactives, délimitées dans le temps bien que parfois longues, des isotopes contenus dans les déchets radioactifs qui semblent avoir servi à définir

les échelles de temps pour de nombreuses évaluations de sûreté. Un autre critère est l'extrême efficacité de confinement de la radioactivité que l'on attend des installations de stockage en formations géologiques profondes. Même si l'installation a été implantée dans un site bien choisi et a été bien conçue, le relâchement de substances radioactives résiduelles est inévitable mais il n'interviendra que dans un avenir très lointain lorsque leur radioactivité aura en grande partie décliné. Les études de sûreté réalisées pour des stockages en formations géologiques profondes ont eu tendance à porter pour le moment, dans un avenir très éloigné, où le relâchement de la radioactivité risque éventuellement de se produire. Les impératifs réglementaires en sont peut-être la raison. Dans plusieurs pays, la réglementation recommande que la dose ou le risque soient calculés au moins jusqu'au moment où ces indicateurs de sûreté atteignent leur valeur maximale, ceci quel que soit ce moment. La réglementation suisse [5] précise, par exemple que la dose et le risque ne devront à aucun moment dépasser des valeurs fixées.

De plus en plus les exploitants et les autorités de sûreté sont d'avis qu'il est inutile, dans le cadre des évaluations de sûreté, de calculer la dose ou le risque à des horizons tellement lointains qu'il n'est plus possible de justifier les hypothèses sur lesquelles reposent les modèles et les données utilisés. Du moins, convient-il de reconnaître les limites d'applicabilité de ces modèles et données en présentant le dossier de sûreté. Compte tenu de l'augmentation des incertitudes avec le temps ou simplement pour des raisons pratiques, on utilisera inévitablement une troncature temporelle pour le calcul de dose et de risque. Son choix sera peut-être dicté par la réglementation, résulter de la décision de l'exploitant, ou d'échanges entre autorités de sûreté et exploitants. Au Royaume Uni [6] :

« Il revient à l'exploitant de réfléchir à l'échelle de temps qu'il choisira pour présenter ses résultats et de justifier son choix pour les installations de stockage et les déchets concernés. »

Aux États-Unis, un groupe d'experts de la National Academy of Sciences a affirmé, en 1995, qu'il n'y avait pas de raison de limiter la durée des calculs dans le temps concernant le dépôt de Yucca Mountain [7] « à un horizon d'environ un million d'années » « après la transformation de l'environnement géologique », empêchant ainsi « l'acquisition d'informations utiles » et l'acquisition de la base scientifique des calculs de sûreté qui permettraient la poursuite de ces calculs. « L'Environmental Protection Agency des États-Unis » (US EPA), après examen de cette recommandation, a décidé de la mettre en application en deux phases. Premièrement, elle recommande une évaluation rigoureuse des performances pour une période de 10 000 ans, conformément à une limite prescrite. Au-delà de cette période, la sûreté doit être évaluée jusqu'au

moment où l'on parvient à la dose maximale tout en restant dans le cadre de la période de stabilité géologique (estimée à un million d'années à Yucca Mountain). Toutefois, les résultats de cette évaluation à plus long terme n'ont pas à être conformes aux prescriptions fixées pour la période de 10 000 ans. L'EPA a précisé en ce qui concerne ses derniers calculs que [8] :

« les incertitudes associées à ce type de prédictions étaient préoccupantes et que l'on était en droit de s'interroger sur la réelle validité de celles-ci à très long terme ; néanmoins les résultats disponibles des évaluations de performance indiquent que la dose maximale pourrait intervenir au-delà de la limite de 10 000 ans... Ces résultats peuvent, donc, donner une description plus complète du comportement des dépôts. »

Les prescriptions de l'EPA ont été intégrées à la réglementation de la Commission de régulation nucléaire (US NRC) [9]. Ces prescriptions sur la validité des calculs à long terme n'est pas partagé par tous mais l'on s'accorde en général à dire que la rigueur des estimations effectuées pour illustrer la sûreté à tout moment dans le futur dépend de l'ampleur des données scientifiques venant à l'appui de l'évaluation.

Cela montre que, même lorsque la réglementation prescrit l'adoption d'une limite temporelle pour les calculs de dose et de risque, ou d'une durée pendant laquelle les résultats de ces calculs doivent être comparés à des valeurs limites ou conseillées (par exemple [8-10]), il n'y a, habituellement, plus de troncature temporelle, ou du moins elle est extrêmement éloignée dans le temps, s'agissant de la période requérant une évaluation de la sûreté moins rigoureuse, que l'on assimile à une activité plus générale consistant à élaborer une série d'arguments pour la sûreté, comme ceux qui sont examinés dans la dernière section de ce document.

3. QUELLES SONT LES LIMITES DE LA PREDICTABILITE DU DEPOT ET DE SON ENVIRONNEMENT ?

Les stockages sont habituellement aménagés dans des milieux géologiques stables dont les caractéristiques fondamentales assurant la sûreté, comme la stabilité mécanique, le faible débit d'eau souterraine et les conditions géochimiques favorables, risquent peu d'évoluer de manière importante avec le temps. Les milieux généralement choisis :

- ne sont pas susceptibles d'être soumis à des mouvements tectoniques de grande ampleur, à des phénomènes volcaniques ou à des phénomènes géologiques pouvant induire des modifications rapides ou soudaines des conditions géologiques ou géochimiques ;
- sont, d'une manière générale, découplés des événements et des processus intervenant près de la surface, y compris du changement climatique ; et
- ne contiennent aucune ressource naturelle qui pourrait éventuellement donner lieu à des forages exploratoires, réduisant donc au minimum la possibilité d'une intrusion humaine dans le futur, à une époque l'on aura perdu la mémoire de l'emplacement de ce dépôt.

Le stockage comprend des matériaux ouvragés qui sont en général bien compris et qui sont choisis pour leur résistance à la dégradation physique et chimique dans les conditions d'environnement géologique. En outre, il ne doit pas y avoir entre eux ou avec le milieu géologique d'interactions complexes ou mal comprises pouvant donner lieu à des problèmes de sûreté. En tout état de cause, les incidences de ces interactions sur la sûreté sont souvent atténuées par les propriétés intrinsèques du stockage et de son environnement, comme le montre la section 4.1.

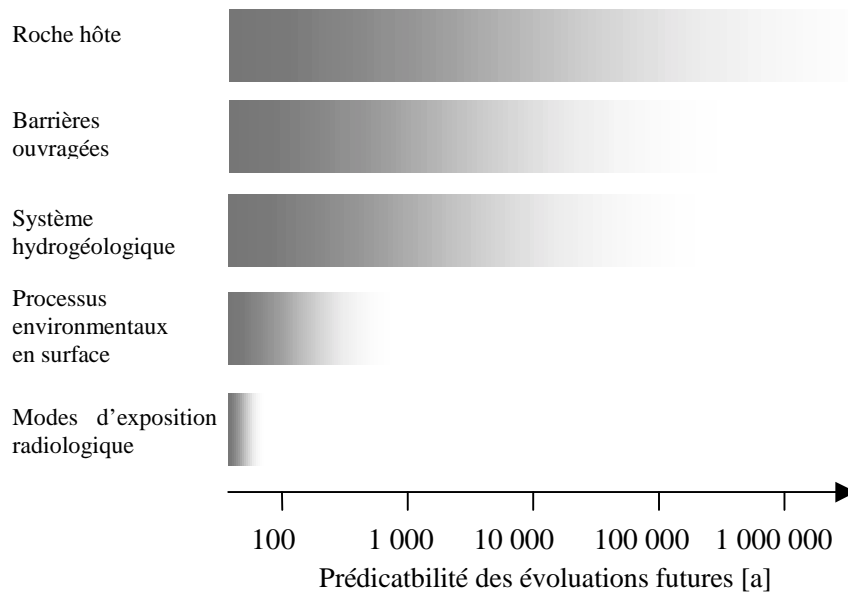
Néanmoins, sur des échelles de temps suffisamment longues, même les matériaux ouvragés et milieux géologiques les plus stables sont soumis à des perturbations et subissent des modifications. Ainsi, il faut envisager la possibilité d'apparition de nouveaux phénomènes et de déformations dans la

roche hôte sur des périodes de l'ordre, par exemple, de 10^5 ou 10^6 années même lorsque un site a été choisi avec le plus grand soin pour sa stabilité. Ces perturbations et changements s'accompagnent d'incertitudes qui généralement augmentent avec le temps et doivent être prises en compte dans les évaluations de sûreté. Ainsi, à des moments très différents selon les parties du système concernées, les incertitudes peuvent être tellement grandes que les prédictions relatives à l'évolution du stockage et de son milieu environnant perdent de leur sens (voir encadré 1).

Comme présenté dans la section suivante, certains arguments en faveur de la sûreté seront probablement suffisants pour obtenir l'autorisation du dépôt à condition que celui-ci soit bien conçu et qu'un site géologiquement stable ait été choisi. On peut présenter ainsi des dossiers solides sur les conséquences radiologiques d'un tel dépôt pendant la période post-fermeture au cours de laquelle la stabilité du milieu géologique est garantie alors qu'une évaluation moins rigoureuse des conséquences radiologiques pourrait suffire pour les périodes ultérieures compte tenu de la décroissance radioactive et, par voie de conséquence, de la moindre radiotoxicité des déchets. Néanmoins, il importe de reconnaître les limites de la prédictabilité du système aussi bien dans le cadre de la réglementation que dans les dossiers de sûreté si l'on veut rester crédible aux yeux du public et des autres parties prenantes¹.

1. On entend ici par « partie prenante » une institution, un groupe ou un individu jouant un rôle dans le processus (voir compte-rendu du Forum sur la confiance des parties prenantes (FSC), Paris, 2000).

Encadré 1. **Limites de prédictabilité des divers aspects du système de stockage en formation géologique**
(tiré de figure 1, page 15 de [3])



Cette figure illustre les limites de la prédictabilité de divers composants d'un système de stockage géologique, (les échelles de temps dépendant dans la pratique du site et de la conception). Elle montre que, pour un site bien choisi, l'évolution des caractéristiques générales des barrières ouvragées et de la roche hôte est raisonnablement prévisible sur une longue période (disons 10^5 ou 10^6 années, par exemple, dans le cas de la roche hôte). Il existe des incertitudes en ce qui concerne les systèmes de barrières ouvragées et la roche hôte sur des périodes plus courtes, mais elles peuvent du moins être délimitées avec un certain degré de confiance. Les caractéristiques de la circulation de l'eau souterraine (système hydrogéologique), en particulier près de la surface, dépendent du changement climatique et, de ce fait, sont moins prévisibles. Les processus environnementaux à la surface et les modes d'exposition radiologiques ne sont en général pas considérés comme faisant partie du système de stockage géologique mais doivent être pris en compte pour évaluer la dose et le risque. Ceux-ci sont encore moins prévisibles étant donné qu'ils dépendent de l'évolution de l'environnement, des activités humaines et des habitudes individuelles qui sont incertaines même à une échelle de quelques années.

4. QUELS TYPES D'ARGUMENTS PEUVENT PRENDRE EN COMPTE LES MODIFICATIONS ET LES INCERTITUDES ASSOCIEES A DE LONGUES ECHELLES DE TEMPS ?

4.1 Considérations générales

Les évaluations de sûreté prennent en compte un éventail de plus en plus complet d'arguments, dont ceux fondés sur les indicateurs de sûreté et de performance qui peuvent être utilisés en plus de la dose et du risque. Par ailleurs la réglementation fournit de plus en plus d'orientations sur leur utilisation [11].

Un certain nombre d'argumentaires se rapporte à la qualité intrinsèque du site et de la conception. La sûreté d'un dépôt, quel qu'il soit, dépend avant tout des caractéristiques favorables des matériaux ouvragés et du milieu géologique, y compris de leur prédictabilité sur des périodes prolongées, étant entendu que ces caractéristiques favorables doivent être mises en évidence dans les dossiers de sûreté. Dans le cas du milieu géologique, les preuves de stabilité et les autres caractéristiques favorables proviennent souvent d'observations et de mesures in situ, par exemple des mesures relatives à l'âge et à la circulation des eaux souterraines (profil isotopique naturel dans certaines roches argileuses, voir encadré 2), ainsi que des informations paléohydrogéologiques en général. Ces informations permettent de comprendre l'histoire de l'environnement géologique, dont on pourra se servir pour prévoir l'évolution géologique dans le temps. D'autres arguments sont fondés, par exemple, sur des considérations thermodynamiques et cinétiques. On peut également argumenter sur le principe de la faisabilité d'un stockage en formation géologique en se référant à des analogues naturels, en particulier à des gisements d'uranium naturels (voir tableau 1).

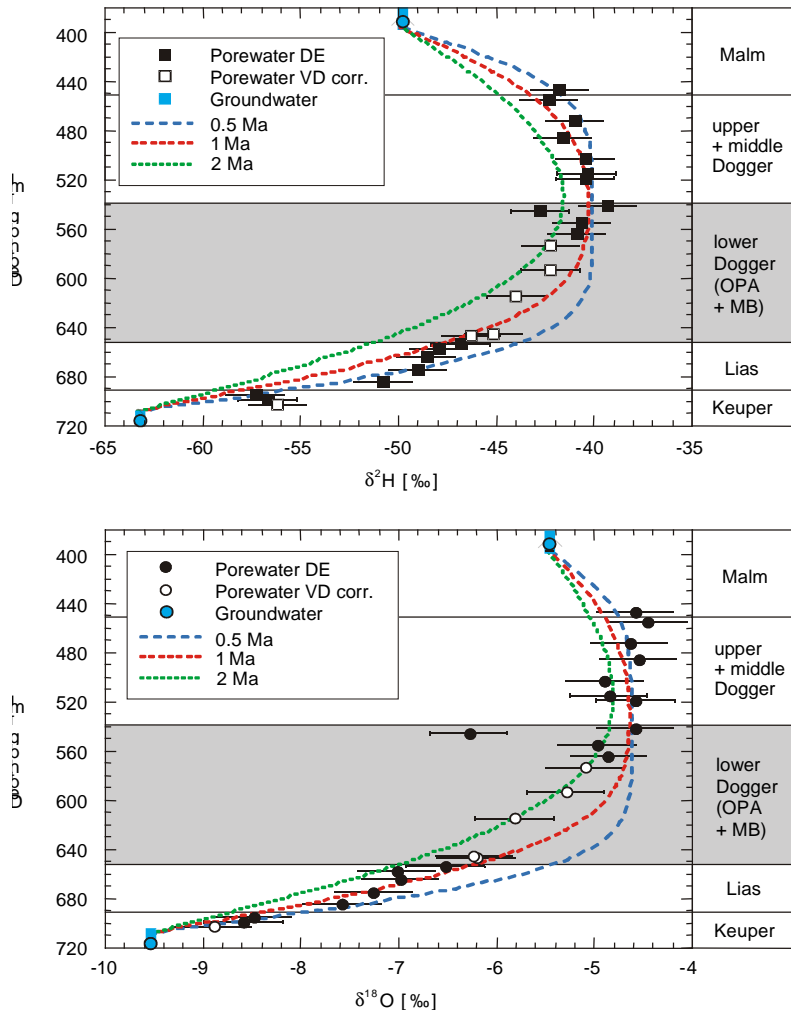
La qualité intrinsèque du site et de la conception tient aussi, pour la plupart des dépôts, aux propriétés des barrières ou aux processus multiples qui contribuent à la sûreté. C'est ce que l'on appelle le concept multi-barrières ou multi-fonctions. Comme il ressort de l'encadré 3, à mesure que les conditions dans le stockage et dans son environnement évoluent dans le temps, certains composants peuvent cesser de remplir certaines fonctions, et de nouvelles

fonctions et processus associés prennent alors le relais. Ainsi, des conteneurs de déchets peuvent à terme se fissurer, à la suite de quoi la sûreté du dépôt dépendra, par exemple, des processus d'immobilisation et de ralentissement géochimique et de la lenteur de la circulation des eaux souterraines à l'intérieur et autour du dépôt. Le confinement total des déchets dans les conteneurs, l'immobilisation géochimique et la faible circulation des eaux souterraines sont des exemples de « fonctions de sûreté ». L'idée fondamentale derrière ce concept de multi-barrières ou de multi-fonctions est que si un composant ou processus est moins efficace que prévu ou cesse d'être efficace plus tôt que prévu, d'autres barrières ou processus prendront dans une certaine mesure la relève. Cela signifie que beaucoup d'incertitudes liées à l'évolution du dépôt et de son environnement n'ont que des répercussions limitées sur la sûreté globale du système.

Tableau 1. **Exemples d'éléments pour argumenter la stabilité et d'autres caractéristiques favorables du stockage et de son environnement**

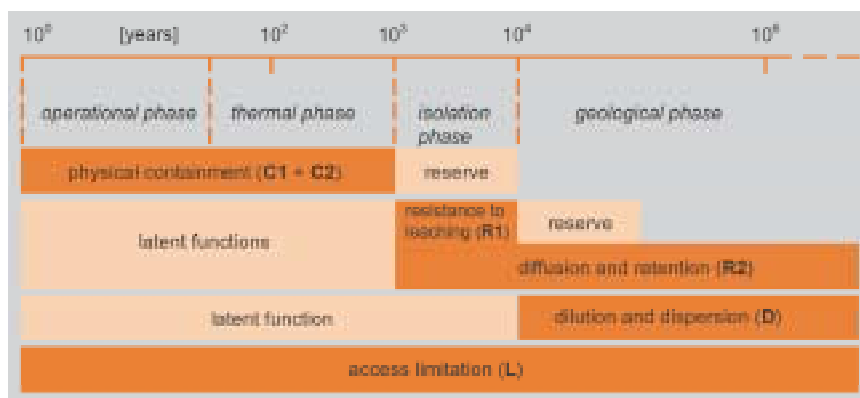
Types d'argument	Exemples d'application
Existence de dépôts d'uranium naturel et d'autres analogues naturels d'un système de dépôt ou d'un ou plusieurs de ses composants	Faisabilité de principe du stockage en formation géologique ; stabilité à long terme de la formation hôte et de la bentonite utilisée comme matériau tampon dans de nombreuses conceptions de dépôts
Argument d'ordre thermodynamique	Stabilité du cuivre, qui est utilisé pour le conteneur dans certaines conceptions, dans des eaux souterraines profondes (par exemple [12])
Argument d'ordre cinétique	Vitesse de corrosion du fer qui est également utilisé pour fabriquer les conteneurs dans certaines conceptions.
Argument relatif au bilan massique	Altération chimique limitée (illitisation) de la bentonite ; corrosion lente du cuivre
Profils des isotopes naturels dans certaines roches argileuses, âge des eaux souterraines et informations paléohydro-géologiques en général	Circulation lente des eaux souterraines [13] et stabilité à long terme de la géosphère (par exemple [14])
Expériences en laboratoire	Études en laboratoire de la dissolution du verre par exemple
Études de modélisation détaillées	Circulation lente des eaux souterraines et du transport de radionucléides ; faible probabilité et conséquences limitées des séismes

Encadré 2. **Courbes de la concentration isotopique dans les argiles d'Opalinus (OPA) et les strates de roche adjacente, comparant les données mesurées en présence de conditions diverses (points de données) et les résultats préliminaires de modélisations fondées sur l'hypothèse d'une simple diffusion [14]**



Il ressort de la comparaison que la diffusion joue un rôle prédominant dans la maîtrise de la composition de l'eau porale dans l'argile d'Opalinus et, par analogie, dans le ralentissement de la migration des radionucléides relâchés.

Encadré 3. **Les quatre phases de l'évolution normale du système de stockage proposé par l'ONDRAF pour les déchets de haute activité et fonctions de sûreté à long terme correspondantes [15]**



Les fonctions de sûreté à long terme du système de stockage sont : le «confinement physique» (C1 – « étanchéité » et C2 - « limitation des infiltrations d'eau ») ; le « ralentissement et la dispersion des matières relâchées » (R1 – « résistance à la lixiviation » et R2 – « diffusion et rétention ») et la « limitation de l'accès » (L).

La fonction de sûreté à long terme de l'environnement du système de stockage est « la dispersion et la dilution » (D).

Une fonction est dite « latente » dès lors qu'elle n'est assurée partiellement ou intégralement que si certaines autres fonctions ne jouent pas leur rôle comme prévu.

On appelle fonctions de réserve les fonctions susceptibles de produire partiellement ou intégralement l'effet prévu sans qu'il soit possible actuellement de compter dessus avec certitude.

L'utilisation de conteneurs à longue durée de vie, qui est envisagée pour la plupart des dépôts de déchets de haute activité, constitue un autre exemple de conception permettant de limiter l'impact des incertitudes sur la sûreté. Les performances de ces conteneurs atténuent en effet les effets des incertitudes associées aux processus thermique, hydraulique, mécanique et chimique qui peuvent intervenir durant la phase transitoire qui suit la fermeture du dépôt. Si les conteneurs restent intacts pendant toute la durée de la phase transitoire, ces

incertitudes n'auront que peu d'importance pour la sûreté à condition que le comportement du système après cette phase soit parfaitement prévisible.

Les preuves de la qualité intrinsèque du site et de la conception ne suffisent pas néanmoins à présenter un dossier de sûreté qui soit assez solide pour obtenir une autorisation. Toutes les réglementations nationales actuelles exigent un argumentaire de sûreté, fondé sur l'évaluation d'indicateurs, comme la dose et le risque, qui peuvent être comparés à des critères réglementaires. Pour vérifier le respect de ces critères, on établit des scénarios d'évolution du dépôt et de son environnement dont on quantifie les conséquences radiologiques. Pour justifier le choix de scénarios, de modèles et de données, soit des sources très diverses existent – terrain, laboratoire et études théoriques, entre autres – soit d'autres arguments peuvent souvent être présentés pour justifier le choix de scénarios particuliers, des hypothèses de modélisation et des valeurs des paramètres.

Il reste néanmoins des incertitudes qui ont des répercussions négatives sur l'évaluation des conséquences. Les sections suivantes présentent les démarches pouvant être adoptées pour y remédier. La section 4.2 synthétise un bilan des démarches que l'on peut adopter et est suivie d'une analyse plus détaillée de l'utilisation d'approches dites simplifiées dans la section 4.3. La section 4.4 présente la formulation et l'évaluation de scénarios décrivant l'évolution géologique. Les incertitudes peuvent également être évitées dans une certaine mesure en utilisant des indicateurs de sûreté et de performance complémentaires aux données sur les doses et le risque comme établis dans la section 4.5.

Enfin, l'importance accordée à différents argumentaires ou différents indicateurs de sûreté et de performance peut aussi varier avec le temps. À mesure que le dépôt et son environnement évoluent, les incertitudes et leur impact sur la sûreté changent, et les dangers présentés par les déchets diminuent. Cette évolution de la démarche d'évaluation de sûreté avec le temps est examinée dans la section 4.6.

4.2 Traitement des incertitudes

De nombreuses incertitudes peuvent être quantifiées, ou du moins bornées, et il existe des méthodes pour les prendre en compte lorsque l'on évalue le respect des critères de dose ou de risque.

Il s'agit de :

- l'utilisation de valeurs pessimistes de paramètres et d'hypothèses prudentes pour s'assurer que le modèle d'évaluation des conséquences radiologiques sera conservatif² ; et
- l'utilisation de techniques probabilistes, et/ou d'une série de calculs déterministes effectués séparément pour étudier tout l'éventail des possibilités d'évolution du système.

Certaines incertitudes susceptibles d'avoir un effet sur les niveaux de sûreté sont néanmoins difficiles à quantifier ou borner et se prêtent moins aux méthodes mentionnées ci-dessus, en particulier lorsque l'éventail des possibilités est très large ou imprévisible. L'évolution de l'environnement à la surface ainsi que la nature et la chronologie des activités humaines futures, par exemple, relèvent très nettement de la spéculation même à relativement courte échéance, bien que des bornes puissent être définies, dans une certaine mesure du moins, en fonction des ressources humaines et des besoins alimentaires. Sur des durées beaucoup plus longues, l'élaboration de scénarios d'évolution de l'environnement géologique, dont la stabilité est un aspect essentiel pour le dossier de sûreté, relève de plus en plus de la spéculation. On est ainsi confronté à des difficultés particulières en raison du rôle fondamental joué par l'environnement géologique dans le concept multi-barrières ou multi-fonctions. Ce point est examiné plus en détail dans la section 4.4.

Par ailleurs, il est possible d'utiliser des techniques simplifiées pour traiter les incertitudes liées à l'évolution de l'environnement en surface et à la nature et à la chronologie des activités humaines futures. Il a également suggéré que des démarches de ce type puissent être également envisagées s'agissant de l'évolution à long terme de l'environnement géologique. Il est également possible de bâtir des arguments complémentaires en faveur de la sûreté qui ne requièrent pas une évaluation explicite de certaines incertitudes, ceci en utilisant des indicateurs de sûreté et de performance complémentaires à la dose et au risque.

2. Cette démarche peut être acceptable, souhaitable ou même nécessaire lorsque l'on démontre le respect de critères réglementaires, alors qu'un traitement plus réaliste est indispensable à des fins d'optimisation ou pour tester des modèles et des bases de données.

4.3 Approche stylisée

Les caractéristiques de la société, les habitudes humaines, la technologie et l'environnement à la surface sont susceptibles de subir de nombreuses modifications qui sont, dans une large mesure, impossibles à prévoir à des horizons de quelques centaines d'années voire moins ; la probabilité de transformations importantes croissant au fur et à mesure de périodes plus longues. C'est pour cette raison que généralement on ne compte plus sur un contrôle institutionnel au-delà d'une période de quelques centaines d'années au plus. La stabilité plus grande de l'environnement géologique que de l'environnement en surface est ainsi un argument décisif en faveur du stockage géologique comme solution de gestion des déchets de haute activité à vie longue.

Néanmoins, il faut faire des hypothèses sur les caractéristiques de l'environnement en surface, sur la nature des activités et de la société humaine future pour pouvoir évaluer la dose et le risque, puis les comparer à des objectifs réglementaires et de dimensionnement. De l'avis de l'ensemble de la communauté internationale une approche simplifiée est adaptée à la définition de ces hypothèses. Celle-ci a été amplement examinée dans les instances internationales, par exemple au sein du Groupe ad hoc de l'AEN [16] et dans le cadre du projet BIOMASS³ de l'AIEA [17-21]. Elle consiste à définir un éventail d'illustrations crédibles « différentes » ou « situations simplifiées », par exemple pour décrire les différentes conditions climatiques possibles, les pratiques agricoles et les voies d'exposition susceptibles d'exister dans le futur, puis à analyser la dose ou le risque associé à des groupes critiques hypothétiques. Ceci permet d'éviter toute spéculation sur des thèmes, tels les habitudes humaines futures, pour lesquelles les incertitudes sont grandes et incompressibles.

En Finlande et aux États-Unis, les autorités de sûreté définissent les voies d'exposition, les activités humaines et les diverses sources de perturbations à prendre en compte par les exploitants. Dans la plupart des autres pays, on estime que le choix des situations simplifiées et des groupes critiques sont de la responsabilité des exploitants qui ensuite en débattent avec les autorités de sûreté. En règle générale, on suppose que l'homme aura dans l'avenir le même métabolisme et les mêmes besoins alimentaires qu'aujourd'hui, et toutes spéculations sur les progrès scientifiques et technologiques sont exclues. Les

3. BIOMASS de l'AIEA : BIOSphere Modelling and ASSessment (BIOMASS) c'est-à-dire évaluation et modélisation de la biosphère, Programme de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA).

doses et les risques calculés pour de tels groupes critiques dans des situations simplifiées ne doivent pas être vus comme des mesures des dommages et risques sanitaires auxquels seront confrontés des hommes réels dans l'avenir mais plutôt comme des illustrations simplifiées de dommages potentiels, c'est-à-dire des exemples de dommages que pourrait subir un homme individuel hypothétique. Ce point doit être souligné lors de la présentation des résultats des évaluations de sûreté.

4.4 Scénarios de l'évolution à long terme de l'environnement géologique

Dans un avenir suffisamment lointain, il est possible d'envisager un large éventail de scénarios de l'évolution géologique, dont certains pourraient avoir des incidences considérables sur le dépôt. Il faut envisager, par exemple, la possibilité que le dépôt puisse à terme être exposé à la surface à la suite d'une surrection ou de l'érosion. Certains règlements, dont ceux qui exigent le calcul des doses et du risque au moins jusqu'au moment où ces indicateurs de sûreté parviendront à des valeurs maximales, peuvent aboutir à la poursuite des calculs jusqu'à des périodes où l'évolution de l'environnement géologique ne peut plus être prévue de manière fiable, même pour un site stable bien choisi. Si dans la pratique, ces calculs reposent sur l'hypothèse d'un environnement géologique stable, cas le plus fréquent, il convient d'attacher moins d'importance à des arguments fondés sur des résultats portant sur des périodes pour lesquelles l'hypothèse de la stabilité devient contestable. Comme précisé plus bas, même si les arguments se rapportant à la radiotoxicité des déchets dans cet avenir lointain peuvent jouer un rôle, il n'est peut-être pas raisonnable d'ignorer totalement ce danger et donc tenter de trouver des arguments complémentaires en faveur de la sûreté.

Les participants de l'atelier sur les échelles de temps ont suggéré d'étudier la possibilité d'utiliser une démarche simplifiée similaire à celle adoptée pour traiter les incertitudes liées à l'évolution de l'environnement en surface et à la nature des activités humaines futures. On pourrait, ainsi, éviter de spéculer sur l'évolution géologique à une époque où le danger représenté par les déchets aura nettement diminué par rapport à ce qu'il était au moment de la mise en place des déchets dans le dépôt. À l'heure actuelle, la plupart des règlements ne donnent des orientations ni sur l'éventail des possibilités ou des scénarios d'évolution géologique qui devrait être étudié à ces horizons très lointains, ni sur l'importance qu'il convient d'accorder aux résultats des calculs de dose et de risque par rapport à d'autres arguments peut-être plus qualitatifs en faveur de la sûreté. Des orientations de ce type seraient certainement utiles, et l'on se dirige sur cette voie à l'heure actuelle (voir section 4.6).

4.5 Indicateurs de sûreté et de performance complémentaires

Le fait d'utiliser la dose et le risque comme indicateurs de sûreté n'interdit pas pour autant de recourir à d'autres indicateurs de sûreté et de performance. Il convient de distinguer deux grandes catégories d'indicateurs. La première est constituée par les observations et les mesures in situ qui peuvent démontrer les caractéristiques favorables du dépôt et de son voisinage, comme l'âge des eaux souterraines et les observations de l'immobilité de l'uranium et du thorium naturels dans certaines formations géologiques, que l'on examine dans la section 4.1. L'autre catégorie comporte des indicateurs qui sont calculés au moyen de modèles d'évaluation de la sûreté, notamment les doses et le risque, mais aussi des indicateurs complémentaires comme les concentrations, les flux et les inventaires d'activité ou de radiotoxicité. L'analyse qui suit porte sur cette seconde catégorie d'indicateurs.

La présentation de la dose et du risque en fonction du temps ne suffit pas à bien faire passer le message que les stockages en formation géologique profonde assurent un niveau de sûreté approprié. En effet, ces indicateurs ont tendance à attirer l'attention sur les faibles relâchements qui risquent un jour de se produire plutôt que sur le fait que la radioactivité reste pour l'essentiel isolée et confinée dans le dépôt et son environnement immédiat où elle décroît. Il peut donc être utile de compléter les courbes de dose et de risque en fonction du temps par d'autres courbes ou tableaux présentant des indicateurs qui illustrent plus directement les performances des différentes barrières prises isolément ou combinées. Le projet européen SPIN [22, 23] conclut que plusieurs indicateurs complémentaires peuvent être utilisés pour illustrer le fonctionnement des différents compartiments du système multi-barrières. Ces indicateurs peuvent être, par exemple, les inventaires en fonction du temps à l'intérieur de chacun des compartiments du système et les flux sortant de ces compartiments. Ces indicateurs montrent où se trouve la majorité de la radioactivité et la manière dont elle se déplace et décroît dans le système à tout moment.

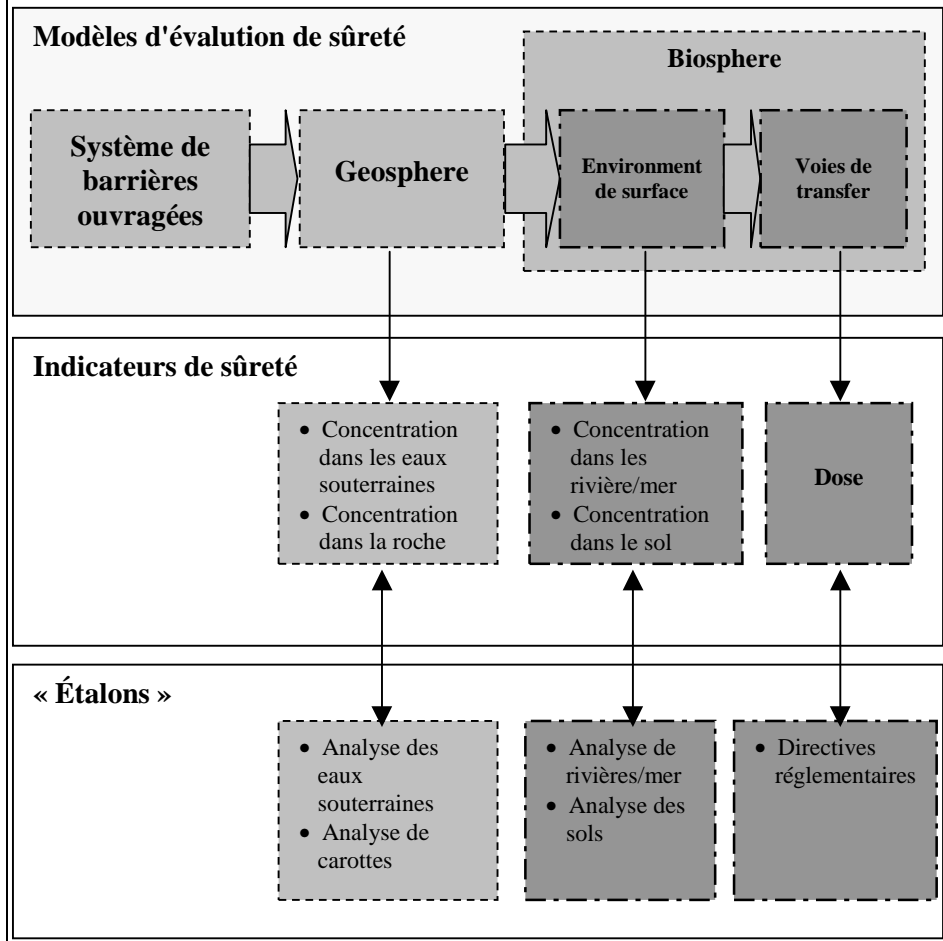
En outre, comme présenté ci-dessous, des indicateurs complémentaires peuvent permettre d'éviter le problème de la prédictibilité limitée de l'environnement en surface et, à un horizon beaucoup plus lointain, de la prédictibilité limitée de l'environnement géologique. De surcroît, ils fournissent d'autres arguments utiles pour la sûreté si l'on parvient à obtenir des valeurs de référence reconnus comme éléments de comparaison. Le choix des indicateurs peut dépendre non seulement de l'échelle de temps considérée mais aussi du contexte de l'évaluation réalisée – par exemple, les cadres géographique et géologique spécifiques et le contexte réglementaire. L'emploi d'indicateurs complémentaires dans l'évaluation de sûreté japonaise H12 est illustré dans l'encadré 4.

Pour définir des valeurs de référence on peut partir de dangers acceptables (en ce qui concerne la dose et le risque) ou de perturbations négligeables de la nature, par exemple perturbations des flux ou des concentrations de radionucléides naturels, qui se produisent dans des systèmes naturels. Néanmoins, quelques problèmes subsistent en ce qui concerne :

- les échelles temporelles et spatiales qu'il convient d'utiliser pour l'observation des systèmes naturels – on peut, ainsi, obtenir des valeurs de référence différentes en établissant les moyennes pour des échelles locales ou plus régionales;
- le fait que les conditions naturelles ne sont pas nécessairement « sans danger »; et
- la manière dont il convient de régler le problème des radionucléides non naturels.

Plusieurs documents établis au niveau national et international contiennent des orientations sur les avantages, inconvénients et limites des indicateurs complémentaires à la dose et au risque [22-26]. Le projet européen SPIN a inventorié et évalué une série d'indicateurs complémentaires. L'encadré 5 résume les conclusions de ce projet concernant les avantages et les inconvénients de l'utilisation comme indicateur du débit de dose efficace ; en outre, on a pu constater que deux indicateurs complémentaires présentaient un grand intérêt, en particulier sur des durées plus longues.

Encadré 4. **Modèles d'évaluation indicateurs de sûreté complémentaires et valeurs de référence ou « étalons » correspondants utilisés dans l'évaluation de sûreté H12 [26]**



Deux indicateurs complémentaires sont examinés ici plus en détail bien que d'autres aient également été étudiés lors de l'atelier sur les échelles des temps. Il s'agit de (i) la radiotoxicité des déchets, qui fournit un indicateur de sûreté pouvant être évalué sans prendre pour hypothèse préalable un environnement géologique stable et (ii) les taux de relâchement de radionucléides dans l'environnement en surface qui peut, dans certains cas, fournir un indicateur de sûreté qui peut être évalué sans avoir à recourir à des hypothèses détaillées sur l'état futur de l'environnement.

Encadré 5. **Conclusions du projet SPIN concernant les avantages et les inconvénients de l'utilisation du débit de dose efficace comme indicateur et de deux indicateurs complémentaires [23]**

Débit de dose efficace

Avantages :

L'indicateur de base utilisé pour déterminer la sûreté des installations nucléaires dans le monde.

Basé sur le meilleur système de pondération pour la biosphère actuelle qui soit pertinent pour la sûreté.

Des valeurs de référence sont définies dans les réglementations nationales.

Inconvénients :

Les incertitudes liées aux voies de transfert dans la biosphère et à la dilution dans les aquifères sont comprises.

Conclusion :

Cet indicateur est utile pour toutes les périodes de temps mais doit être préféré à des temps rapprochés étant donné que les incertitudes liées aux voies de transfert dans la biosphère croissent avec le temps.

Concentration de la radiotoxicité dans l'eau de la biosphère

Avantages :

Les coefficients de dose par ingestion de la CIPR sont des facteurs de pondération pertinents pour la sûreté.

Les incertitudes relatives aux voies de transfert dans la biosphère sont exclues.

Des valeurs de référence pertinentes pour la sûreté peuvent être définies.

Inconvénients :

Les incertitudes relatives à la dilution dans les aquifères sont incluses.

Conclusion :

Cet indicateur est utile pour toutes les périodes de temps mais doit être préféré pour des périodes de temps rapprochés et intermédiaires parce que les incertitudes liées à la dilution dans les aquifères croissent avec le temps.

Cet indicateur est moins pertinent pour des périodes de temps très éloignées dans le temps.

Flux de radiotoxicité émanant de la géosphère

Avantages :

Les coefficients de dose par ingestion de la CIPR constituent un système de pondération pertinent pour la sûreté.

Les incertitudes relatives aux voies de transfert dans la biosphère et à la dilution dans les aquifères sont exclues.

Des valeurs de référence pertinentes pour la sûreté peuvent être définies.

Inconvénient :

Il est impossible d'obtenir des valeurs de référence par des mesures seulement : il faut pour les obtenir utiliser des modèles en introduisant donc un nouveau type d'incertitudes

Conclusion :

Cet indicateur est utile pour tous les périodes de temps mais doit être préféré pour celles qui sont les plus éloignées en raison de l'exclusion des incertitudes liées aux voies de transfert dans la biosphère et à la dilution dans les aquifères, qui croissent avec le temps. La définition d'une valeur de référence pour cet indicateur est compliquée par le fait que les flux ne peuvent être mesurés directement mais sont déduits des mesures de concentrations et des hypothèses sur l'environnement hydrogéologique concerné.

Radiotoxicité des déchets

Il n'existe pas de définition universellement admise de la radiotoxicité, mais celle-ci peut être grossièrement définie comme la dose hypothétique résultant de l'ingestion de matières radioactives. La radiotoxicité des déchets fournit un indicateur qui peut avoir deux fonctions dans un dossier de sûreté.

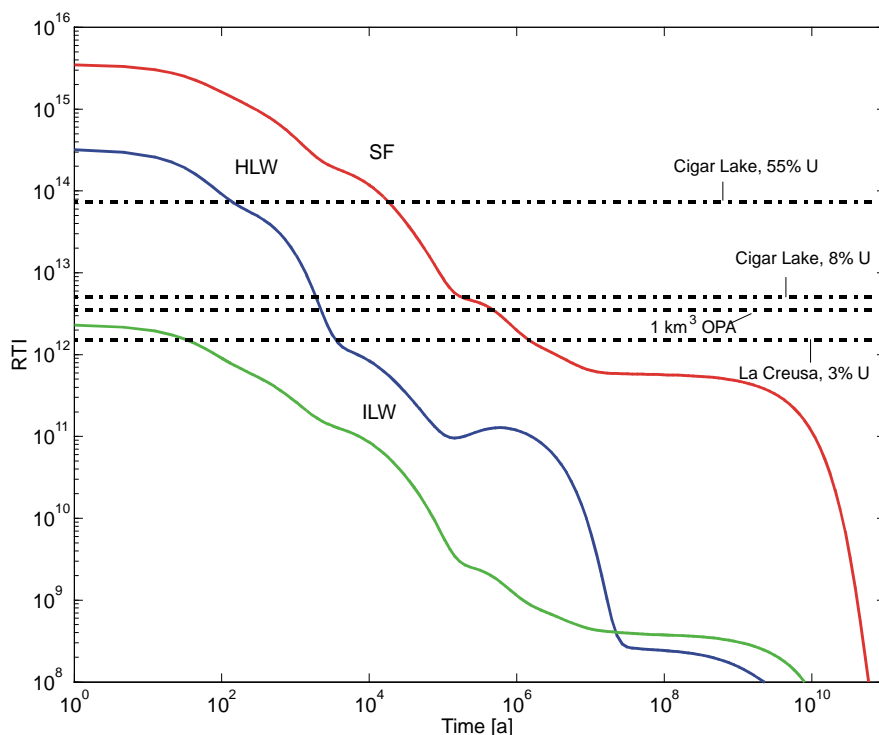
- À des horizons où la stabilité géologique est garantie, la radiotoxicité peut illustrer la logique qui sous-tend la stratégie d'isolement et de confinement des déchets pendant toute la période où la décroissance radioactive réduit le danger associé. En dépit des limites de prédictabilité mentionnées plus haut, les méthodes utilisées en sciences géologiques sont généralement capables de montrer, pour un site bien choisi, que les déchets resteront isolés dans le dépôt pendant un laps de temps suffisant pour permettre la décroissance substantielle de la radiotoxicité.
- À des horizons plus lointains, lorsqu'il n'est plus possible de prendre pour hypothèse la stabilité géologique du site et que l'on attache

moins d'importance aux résultats des calculs de dose et de risque, la radiotoxicité donne une indication sur le danger résiduel constitué par les déchets et fournit un indicateur de sûreté qui peut compléter la dose et le risque s'il est possible d'obtenir des valeurs de référence reconnues.

Ce deuxième rôle concorde avec la tendance générale à donner moins de poids ou d'importance aux calculs de dose et de risque pour privilégier d'autres arguments, parfois plus qualitatifs, et l'utilisation d'indicateurs de performance et de sûreté complémentaires dans le cadre de l'évaluation du respect des critères à des horizons beaucoup plus lointains. Ces tendances s'observent de plus en plus dans les réglementations (voir Encadré 8).

Des systèmes naturels, comme le minerai d'uranium peuvent fournir des valeurs de référence ou critères auxquels on peut comparer cet indicateur. Par exemple, au terme d'une période de 100 000 ans environ, la radiotoxicité d'une tonne de combustible usé suédois est équivalente à la radiotoxicité de l'uranium naturel qui a servi à la fabriquer. Dans l'évaluation suisse d'un stockage dans l'argile d'Opalinus, Nagra a comparé la radiotoxicité des déchets à celle des radionucléides naturels contenus dans 1 km³ d'argile d'Opalinus ainsi qu'à celle d'un volume de minerai d'uranium naturel et a utilisé ces informations pour montrer que la période à considérer est d'un million d'années (Encadré 6).

Encadré 6. **Indice de radiotoxicité (RTI) du combustible usé (SF), des déchets de haute activité vitrifiés (HLW) et des déchets de moyenne activité à vie longue (ILW) en fonction du temps, avec quelques niveaux de référence [14]**



L'indice de radiotoxicité est défini comme la dose hypothétique résultant de l'ingestion de substances radioactives, rendue adimensionnelle en la divisant par une dose de référence – en l'occurrence 0.1 mSv obtenue à partir de la dose limite annuelle fixée dans les orientations réglementaires suisses. Les niveaux de référence correspondant au galeries de combustible usé/déchets de haut activité hypothétiquement remplies de minerai d'uranium naturel de qualités diverses. On précise également l'indice de radiotoxicité de 1km³ d'argile d'Opalinus (OPA). Au-delà d'un million d'années, la radiotoxicité des déchets même les plus toxiques (combustible usé) chute en dessous de ces niveaux de référence.

Soulignons, toutefois, les limites des arguments de sûreté fondés sur la radiotoxicité des déchets enfouis. Comme le montre les exemples cités ci-dessus, différentes comparaisons peuvent aboutir à des temps d'intersection différents, limitant donc l'applicabilité de ce type d'arguments. De plus, les courbes d'activité ou de toxicité ont peu de sens, seules, sur le plan du risque et de la sûreté étant donné, par exemple, que la mobilité des radionucléides n'est pas prise en compte. Même lorsqu'une courbe indique que le dépôt est devenu comparable à un système naturel, cela n'équivaut pas forcément à un retour à des conditions correspondant à une banalisation du site. Néanmoins, en dépit de ces réserves, la radiotoxicité et la comparaison à des systèmes naturels, comme le minerai d'uranium, peuvent compléter utilement la dose et le risque dans la présentation d'un dossier.

Taux de relâchement de substances radioactives

Comme indiqué dans la section 3, la formation géologique est souvent efficacement protégée des changements de l'environnement en surface bien que, dans quelques cas, les transformations en surface ou en sub-surface peuvent avoir une certaine influence sur le débit et la circulation des eaux souterraines, par exemple. Cette protection signifie que les taux de relâchement de radionucléides dans l'environnement en surface fournissent des indicateurs qui peuvent être évalués sans référence aux conditions souvent peu prévisibles qui caractérisent la surface ou la sub-surface, puisqu'ils sont essentiellement déterminés par l'évolution du dépôt et de son environnement immédiat.

Le relâchement de substances radioactives dans l'environnement en surface a servi d'indicateurs de sûreté ou de performance dans plusieurs évaluations de sûreté récentes. En Finlande, les autorités de sûreté estiment que la nature de l'environnement en surface est tellement incertaine au-delà de 10 000 ans environ (période appelée « l'ère des changements climatiques extrêmes » par les autorités de sûreté finlandaises, voir Encadré 7) qu'il est prudent de fonder les critères de protection radiologique sur des contraintes de relâchement de radionucléides individuels dans l'environnement en surface plutôt que sur des contraintes de dose ou de risque. Néanmoins, en règle générale, les autorités de sûreté définissent des critères de radioprotection basés sur la dose ou le risque, le rôle des autres indicateurs étant de compléter et non de les supplanter.

Ces arguments fondés sur des indicateurs complémentaires sont parfois plus facilement compréhensibles pour des non spécialistes que ceux qui reposent principalement sur les calculs de dose ou de risque. Ils requièrent, toutefois, des explications minutieuses. En effet, ni les indicateurs eux-mêmes

(y compris la dose et le risque) ni les valeurs auxquelles on les compare ne sont explicites. Par ailleurs la confusion peut venir du fait de passer dans l'analyse d'un indicateur à un autre selon le moment considéré dans le cadre de la présentation du dossier de sûreté. Il convient, donc, d'élaborer et de communiquer une stratégie rationnelle pour le choix et l'utilisation des différents indicateurs.

Le recours à des indicateurs complémentaires ainsi qu'à des valeurs de référence pour les comparaisons est une question qui mérite certainement des orientations réglementaires supplémentaires. Au cours des premières étapes d'un projet, la réglementation devrait donner des orientations générales sur les informations complémentaires à fournir par les exploitants plutôt que de prescrire l'utilisation d'indicateurs complémentaires spécifiques. Ce n'est que lorsque la réglementation cesse d'être générique, pour se rapporter à un dossier, site ou concept particulier (comme c'est le cas en Finlande) et que des études détaillées ont démontré l'intérêt et l'applicabilité de valeurs de référence, qu'elles pourront prescrire utilement des indicateurs complémentaires spécifiques.

4.6 L'apport des arguments selon les échelles et périodes de temps considérés

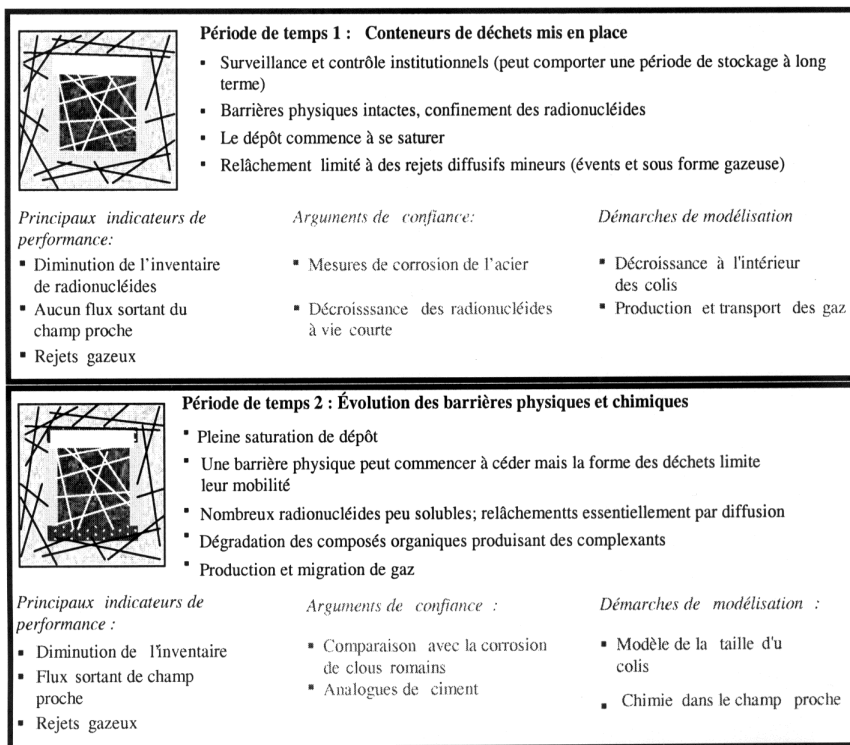
Quel que soit le moment de l'évolution du dépôt et de son environnement, l'accent est mis, dans un dossier de sûreté, sur les fonctions de sûreté censées être les plus efficaces et sur les arguments jugés les plus convaincants. Ainsi, on peut attendre des conteneurs qu'ils assurent au départ un confinement total des déchets, et donc les arguments associés insisteront sur les données prouvant l'intégrité de ces conteneurs pendant une certaine période de temps. À une date ultérieure, on ne peut plus compter sur un confinement total, et les arguments fondés, par exemple, sur la stabilité des matrices de déchets, l'immobilisation géochimique, la lenteur de la circulation des eaux souterraines et la stabilité de l'environnement géologique seront utilisés pour démontrer que les rejets dans l'environnement humain resteront faibles. Bien qu'ils ne soient pas forcément mis en évidence dans les dossiers de sûreté, ces derniers arguments sont une garantie de plus de la sûreté du stockage à une période où les conteneurs sont censés rester intacts – c'est à dire même si leur longévité est inférieure à ce que est prévu, d'autres mécanismes garantiront des niveaux suffisants de sûreté. C'est un exemple du concept de multi-barrières ou multi-fonctions (par exemple [14], [15]).

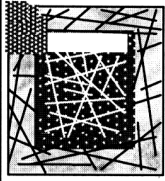
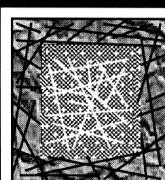
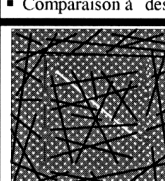
Dans certaines évaluations de sûreté, on définit des périodes discrètes où «périodes de temps» [3] pour lesquels on dispose de différentes argumentations

(Encadré 7). Ces périodes de temps peuvent être très utiles pour les débats internes entre experts mais aussi entre exploitants et autorité de sûreté et entre exploitants, autorités de sûreté et public. Certaines réglementations laissent entendre ou même définissent explicitement les arguments à utiliser selon les périodes de temps. Il serait certainement utile que les réglementations fournissent d'autres orientations et explications sur les divers aspects de la pondération des arguments, notamment sur la manière dont il convient de définir exactement cette pondération.

Encadré 7. Présentation d'une évaluation de sûreté sur la base de cinq périodes de temps

Cette figure illustre ce que l'on envisage actuellement concernant l'évaluation et la présentation de chacun des cinq cadres temporels proposés dans la mise à jour programmée de l'évaluation générique des performances après fermeture réalisée par la Nirex.



	<p>Période de temps 3 : Barrière chimique</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Les conditions réductrices dans le champ proche sont pleinement établis ▪ La corrosion provoque la défaillance d'un nombre important de colis ▪ Relâchement de radionucléides par advection-diffusion, en particulier de ceux qui sont mal sorbés ▪ Production et migration de gaz
<p><i>Principaux indicateurs de performance :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Flux sortant de champ proche ▪ Rejets gazeux 	<p><i>Arguments de confiance :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Analogues ciment ▪ Site de Maqarin <p><i>Démarches de modélisation :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Modèle de champ proche à l'échelle du dépôt ▪ Circulation des eaux souterraines à l'état stationnaire à l'échelle de la région
	<p>Période de temps 4 : barrière géologique stable</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ La plupart des colis de déchets ont cédé, n'offrant plus qu'une faible résistance à la migration des radionucléides de sorte que le champ proche est traité comme étant homogène ▪ Migration des radionucléides qui sortent du champ proche et traversent le champ lointain
<p><i>Principaux indicateurs de performance :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Les flux sortent du champ proche et du champ lointain ▪ Risque radiologique ▪ Effets sur l'environnement ▪ Comparaison à des flux naturels 	<p><i>Argument de confiance :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Site de Maqarin - migration limité ▪ Oklo - ralentissement ▪ Paléohydrogéologie - stabilité de la géosphère <p><i>Démarches de modélisation:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Modèle « soupe » du champ proche homogène ▪ Modèle de transport des eaux souterraines
	<p>Période de temps 5 : système réagissant à des transformations externes</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Champ proche homogène ▪ Migration des radionucléides du champ proche et à travers le champ lointain ▪ Nécessité de prendre en compte le changement climatique et les transformations hydrogéologiques ▪ Relâchement dans l'environnement en présence de diverses conditions climatiques
<p><i>Principaux indicateurs de performance</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Dose ou risque radiologique ▪ Comparaison au fond naturel de rayonnement 	<p><i>Arguments de confiance :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Comparaison au fond naturel de rayonnement <p><i>Démarches de modélisations :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Modèle « soupe » du champ proche homogène ▪ Géosphère de référence ▪ Biosphères de références représentant diverses conditions climatiques

Il n'existe pas actuellement de consensus sur la manière exacte dont il convient de définir les périodes de temps et sur l'importance ou le poids qu'il convient d'attribuer aux différents arguments associés. En effet, les questions mises en jeu sont en général propres au programme, au concept et au site concernés bien que plusieurs pays utilisent des raisonnements similaires pour délimiter les périodes de temps (voir Encadré 8), qu'ils basent en général sur les

connaissances scientifiques de l'évolution du stockage et de son environnement. En outre, on prend de plus en plus conscience de la nécessité d'adapter la présentation du dossier aux préoccupations des intéressés, ce qui peut influencer sur le poids accordé aux arguments, comme il ressort de l'analyse consacrée aux préoccupations du public dans la section suivante.

Encadré 8. **Périodes de temps considérées dans la réglementation**

La réglementation au Royaume Uni (voir [6]) suppose une période de temps adaptée à des calculs détaillés de risque et de dose ainsi qu' à une période de temps plus lointaine adaptée à des calculs exploratoires plus simples et à des informations qualitatives associées lorsque la validité des modèles de relâchement et de transport des radionucléides devient contestable.

La Suède fixe une limite de risque sans aucune limite de temps. Toutefois, elle n'exige des analyses quantitatives des répercussions sur la santé et l'environnement que pour les premières 10 000 années alors que, dans la période suivante, elle définit moins précisément les impératifs à respecter, l'objectif étant alors d'évaluer la capacité de protection du dépôt en présence de divers scénarios possibles.

Les autorités de sûreté finlandaises [10] sont plus précises dans leurs prescriptions, puisqu'elles définissent explicitement les périodes de temps de la post-fermeture pour les évaluations de sûreté relatives au combustible usé :

- un « avenir prévisible en ce qui concerne l'environnement » (plusieurs milliers d'années) durant lequel les estimations de dose doivent être prudentes ;
- l'« ère de changement climatique extrême » (au-delà de 10 000 ans) durant laquelle on s'attend à des périodes de glaciation et de permafrost, les critères de radioprotection étant alors fondés sur les contraintes de relâchement de radionucléides de la géosphère à la biosphère; et
- le « futur le plus lointain » (au-delà de 200 000 ans), lorsque l'activité du combustible usé devient moins importante que celle de l'uranium naturel qui a servi à le fabriquer, pour lequel on n'exige plus d'évaluations de sûreté quantitatives rigoureuses et l'évaluation de sûreté peut être fondée sur des considérations plus qualitatives.

Dans l'une des communications présentées [27], une série d'objectifs de confinement en fonction du temps a été proposée avec deux périodes cibles afin de tenter de concilier les considérations éthiques et techniques et les préoccupations du public.

- On part de l'idée que la période initiale de 500 ans correspond à la période qui préoccupe le plus le public. On propose, de ce fait, pour cette première période, un objectif de confinement total du moins pour le combustible usé et les déchets retraités de haute activité étant donné leur extrême dangerosité. Cette période peut chevaucher une période de surveillance pendant laquelle le dépôt reste ouvert et non saturé ; dans de nombreux programmes nationaux on propose une période prolongée de stockage souterrain surveillée et réversible. Cette période peut également coïncider, du moins dans une certaine mesure, avec une phase pendant laquelle se produisent des phénomènes transitoires relativement complexes, comprenant une resaturation du dépôt et de son environnement. Si l'on parvient à assurer un confinement complet pendant la période transitoire, cela réduira la nécessité de modéliser ces phénomènes en détail, même si l'on doit examiner les répercussions de ces phénomènes transitoires sur des caractéristiques à long terme du système de stockage.
- Jusqu'à 100 000 ans, le point final correspondant en gros au point d'intersection des courbes d'activité – on prescrit une contrainte de dose déduite du fond naturel de rayonnement.
- Au-delà de 100 000 ans environ, on propose de considérer que la redistribution éventuelle de l'activité résiduelle par les processus naturels ne peut être distinguée des variations régionales naturelles des niveaux de rayonnement.

5. COMMENT LE PUBLIC PEUT-IL INFLUENCER LE CHOIX DES ARGUMENTAIRES À DIFFÉRENTS MOMENTS ?

Un dossier de sûreté ne doit pas se limiter à traiter les préoccupations des spécialistes mais doit aussi souvent répondre aux préoccupations du public dans son ensemble. En effet, pour décider de l'opportunité de créer des stockages géologiques, du moment où il convient de le faire et de la manière de procéder, il faudra vraisemblablement un examen public approfondi et une participation de tous les intéressés.

Les dossiers de sûreté doivent être présentés au public de manière compréhensible et les documents qui lui sont destinés doivent se concentrer sur des arguments qui peuvent être appréhendés sans recours à des analyses techniques détaillées. Cela peut avoir une incidence sur les périodes de temps sur lesquelles on mettra tout particulièrement l'accent et sur les fonctions de sûreté et les argumentations qui seront mises en avant dans les documents destinés au public. Ainsi, on insistera dans les documents destinés à des non spécialistes sur les arguments basés sur des observations directes (par exemple, la stabilité des gisements d'uranium naturel) et sur des indicateurs qui permettent de comparer les performances d'un système de stockage aux phénomènes naturels et aux conditions naturelles actuelles (par exemple, les flux de radioactivité naturelle).

Les échelles de temps importantes prises en compte dans les évaluations de sûreté ne sont peut-être pas familières au public, et les bilans dressés pour ces périodes peuvent être accueillis avec scepticisme. Certains ordres de grandeur sont supérieurs aux échelles de temps caractéristiques de l'expérience humaine directe et peuvent donner l'impression que l'on présume des connaissances scientifiques, compte tenu en particulier des cas où l'on n'a pas réussi à prévoir (parfois avec des conséquences catastrophiques) le comportement de structures ouvragées sur des périodes de temps beaucoup plus courtes, du moins en l'absence d'une maintenance adéquate. En outre, il semble y avoir un fossé entre les durées ayant de l'importance pour la plupart des gens et celles envisagées dans les études de sûreté des stockages en formation géologique profonde. Pour le non spécialiste, le long terme se borne généralement à plusieurs décennies, à savoir quelques générations.

C'est la période de quelques centaines d'années qui suit immédiatement la mise en place des déchets qui est probablement jugée la plus préoccupante par de nombreux membres du public (voir par exemple l'expérience des enquêtes publiques et d'autres débats avec les intéressés dans le cadre des procédures d'autorisation de Konrad, Allemagne [27], ainsi que le projet RISCOM-2 de la Communauté européenne⁴) de sorte que l'on pourrait insister plus particulièrement sur ces années lorsque l'on présente le dossier de sûreté au public. En règle générale, aucun relâchement n'est attendu durant la première période, un point qui devrait être mieux mis en relief dans de nombreux dossiers de sûreté. La surveillance durant les années où le dépôt est opérationnel et pendant la période immédiatement consécutive à sa fermeture pourrait contribuer à gagner la confiance du public.

En général, les arguments portant sur de très longues durées risquent de moins intéresser le public. Toutefois, le public est une entité hétérogène de sorte qu'il ne faut pas négliger l'intérêt qu'il est susceptible d'y porter. En fait, à plusieurs occasions, des membres du public ont manifesté un grand intérêt pour les événements et les situations qui ne risquent de se produire que dans un avenir lointain. En Suède et en Finlande, par exemple, les effets de la glaciation sur les dépôts ont suscité un vif intérêt dans le public.

4. Le projet RISCOM-2 : projet de la Commission européenne sur la transparence de l'évaluation du risque.

6. PRINCIPAUX ENSEIGNEMENTS

a) Les échelles de temps à couvrir par le dossier de sûreté

Les durées très longues prises en compte dans les évaluations de sûreté s'expliquent par les longues périodes de vie de certains isotopes présents dans les déchets et l'extrême efficacité du confinement de la radioactivité attendue des installations de stockage en formations géologiques profondes : les études de sûreté des dépôts ont tendance à se focaliser sur les temps reculés où des relâchements sont susceptibles de se produire. Aucun argument éthique ne justifie la décision de fixer une limite à la période prise en compte dans les évaluations de sûreté en dépit des difficultés techniques que cela soulève pour ceux qui réalisent ces évaluations. En effet, l'éthique veut que le niveau de protection dont bénéficient les hommes et l'environnement aujourd'hui soit aussi garanti aux hommes et à l'environnement dans le futur, ce qui implique qu'il est nécessaire d'évaluer les effets sur la sûreté d'un dépôt aussi longtemps que les déchets continuent à présenter un danger. Étant donné que les incertitudes croissent généralement avec le temps, ou simplement pour des raisons pratiques, il faut définir une troncature temporelle pour les calculs de dose et de risque. Cette troncature n'est généralement pas appliquée à la période à prendre en considération de manière moins rigoureuse dans l'évaluation de sûreté, qui est assimilée à une activité plus générale consistant à élaborer une série d'arguments de sûreté.

b) Limites de prédictibilité du dépôt et de son environnement

Afin de rester crédible auprès de la communauté scientifique ainsi que des autres intéressés, il importe de reconnaître les limites de prédictibilité du dépôt et de son environnement aussi bien dans la réglementation que dans les dossiers de sûreté. Des bilans bien étayés des conséquences radiologiques peuvent être réalisés pour des périodes prolongées à condition qu'un dépôt soit bien conçu et que le site choisi soit adapté et géologiquement stable. Lorsque la stabilité de l'environnement géologique ne peut plus être garantie, il faudra

procéder à une évaluation plus qualitative des conséquences radiologiques parce qu'à cet horizon-là la radiotoxicité des déchets devrait être nettement moindre.

c) Arguments de sûreté pour différents périodes de temps

Il est bon de disposer d'argumentations multiples pour présenter un dossier de sûreté convaincant. Certaines argumentations sont de nature plus qualitative que d'autres, et il se peut que, dans des périodes de temps différents, l'accent soit mis sur différents types d'arguments et différents indicateurs de performance. On prend de plus en plus en compte dans les évaluations de sûreté l'éventail complet des arguments disponibles en faveur de la sûreté ainsi que les indicateurs de sûreté et de performance pouvant servir à compléter les doses et le risque; les réglementations donnent d'ailleurs de plus en plus d'orientations sur leur utilisation. Lorsque l'on examine différentes périodes de temps, il importe de se rappeler que les dangers émanant des déchets diminuent avec le temps.

d) Démarches simplifiées

Étant donné que la société humaine, les technologies et l'environnement en surface seront certainement amenés à évoluer et qu'il est, dans une large mesure, impossible de prévoir ces changements aux horizons considérés dans les évaluations de sûreté, on s'accorde au niveau international pour penser que les doses radiologiques et les risques calculés pour des groupes d'hommes hypothétiques vivant dans le futur mais dont les habitudes et les techniques resteraient similaires à celles d'aujourd'hui sont des indicateurs valables de la sûreté des dépôts. Il ne faut pas voir dans les doses et les risques calculés pour des groupes critiques dans des situations simplifiées des mesures des dommages et risques sanitaires auxquels seront confrontés des hommes réels du futur mais plutôt des indicateurs simplifiés des dommages potentiels, à savoir des illustrations des dommages que pourrait subir un homme individuel hypothétique. Il convient d'insister sur ce point lorsque l'on présente les résultats des évaluations de sûreté. L'adoption d'une démarche simplifiée de ce genre permet d'éviter toute spéculation sur les habitudes alimentaires de l'homme du futur car sur ce point les incertitudes sont grandes et incompressibles.

e) Indicateurs de sûreté et de performance complémentaires

Des indicateurs de sûreté et de performance autres que la dose et le risque peuvent donner des renseignements sur la sûreté. Ce sont des arguments complémentaires utiles si l'on s'accorde sur des valeurs ou des critères de référence qui serviront d'éléments de comparaison. Une réflexion sur les dangers acceptables ou les perturbations négligeables de la nature peuvent servir de point de départ à la définition de valeurs de référence. Néanmoins (1) les échelles temporelle et spatiale sur lesquelles les observations des systèmes naturels doivent porter, (2) le fait que les conditions naturelles ne soient pas forcément sans danger, et (3) la manière de procéder avec des radionucléides qui ne sont pas présents dans la nature soulèvent des problèmes. Les arguments s'appuyant sur des indicateurs complémentaires exigent des explications minutieuses, et il convient d'élaborer et de communiquer une stratégie rationnelle en ce qui concerne le choix et l'utilisation des indicateurs. L'utilisation d'indicateurs complémentaires, leur pondération dans différentes périodes de temps ainsi que des valeurs de référence pour procéder aux comparaisons sont autant de points qui devraient faire l'objet d'orientations réglementaires supplémentaires.

f) Répondre aux préoccupations du public

Quelles que soient les échelles de temps considérées, les documents destinés au public doivent surtout faire appel à des arguments qui peuvent être compris, sans référence à des analyses techniques détaillées. La présentation de dossiers de sûreté couvrant une période de quelques centaines d'années après la mise en place mérite une attention particulière, et il conviendra d'insister dans ces documents sur le fait que, dans la plupart des concepts de dépôts, aucune libération de radioactivité ne doit survenir pendant ce laps de temps. La surveillance exercée pendant la phase opérationnelle du dépôt et pendant la période immédiatement consécutive à sa fermeture pourrait contribuer à gagner la confiance du public.

RÉFÉRENCES

- [1] Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste, ICRP Publication No. 81, Pergamon Press, Oxford and New York, 2000.
- [2] Confidence in the Long-term Safety of Deep Geological Repositories. Its Development and Communication, diffusé à l'AEN, Paris, 1999.
- [3] The Handling of Timescales in Assessing Post-closure Safety of Deep Geological Repositories. Workshop Proceedings, Paris, France, 16-18 avril 2002, diffusé à l'AEN, Paris, 2002.
- [4] Principes de gestion des déchets radioactifs, Collection Sécurité n° 111-F, AIEA, Vienne, 1995.
- [5] Protection objectives for the disposal of radioactive waste, HSK-R-21/e. Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate (HSK) and Federal Commission for the Safety of Nuclear Installations (KSA), Villigen-HSK, Suisse, 1993.
- [6] Some Questions on the Use of Long Timescales for Radioactive Waste Disposal Safety Assessments, R.A. Yearsley and T.J. Sumerling.
- [7] Technical Bases for Yucca Mountain Standards, National Research Council, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 1995.
- [8] US Code of Federal Regulations Chapter 40, Part 197-Public Health and Environmental Radiation protection Standards for Yucca Mountain, Nevada, pp. 57-58, US Environmental Protection Agency, Washington, D.C. 2001.

- [9] US Code of Federal Regulations Chapter 10, Part 63 – Disposal of High-level Radioactive Wastes in a Geologic Repository at Yucca Mountain, Nevada, Paragraphs 63.311 (10,000 years) and 63.341 (up to a million years). U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., 2001.
- [10] Consideration of Timescales in the Finnish Safety Regulations for Spent Fuel Disposal, E. Ruokola.
- [11] Établir et faire partager la confiance dans la sûreté des dépôts en grande profondeur : approches et arguments, AEN, Paris, 2002.
- [12] Treatment of Barrier Evolution: The SKB Perspective, A. Hedin.
- [13] The Konrad Safety Case: Licensee Point of View, H. Besenecker, in Building Confidence Using Multiple Lines of Evidence, Atelier de l'AMIGO/OCDE/AEN, Yverdon-les-Bains, Suisse, 3-5 juin 2003.
- [14] Handling of Timescales in Safety Assessments: the Swiss Perspective, J. Schneider, P. Zuidema and P. Smith.
- [15] Fulfilment of the Long-term Safety Functions by the Different Barriers during the Main Time Frames after Repository Closure, P. De Preter and P. Lalioux, cité dans [3].
- [16] Working group on biosphere analysis in repository assessments: The case for benchmark biosphere and de-coupling of biosphere and EBS/geosphere analyses, document PAAG AEN NEA/PAAG/DOC (98) 6, 1998.
- [17] Long-term releases from solid waste disposal facilities: the Reference Biosphere concept. BIOMASS Theme 1 Working Document BIOMASS/T1/WD01, diffusé par l'AIEA, Vienne, 1999.
- [18] Alternative assessment contexts: implications for the development of reference biosphere's and biosphere modelling. BIOMASS Theme 1 Working Document BIOMASS/T1/WD02, diffusé par l'AIEA, Vienne, 1999.

- [19] Radioactive Substances Act 1993 – Disposal Facilities on Land for Low and Intermediate Level Radioactive Wastes: Guidance on Requirements for Authorisation: Environment Agency, Scottish Environment Protection Agency, and Department of the Environment for Northern Ireland, Bristol, Janvier 1997.
- [20] Guidance on the definition of critical and other hypothetical exposed groups for solid radioactive waste disposal, Working Document BIOMASS/T1/WD03, diffusé par l’AIEA, Vienne, 1999.
- [21] Biosphere System Identification and Justification. Working Document BIOMASS/T1/WD06, diffusé par l’AIEA, Vienne, 1999.
- [22] The SPIN Project: Safety and Performance Indicators in Different Timeframes, R. Storck and D.-A. Becker.
- [23] Testing of Safety and Performance Indicators (SPIN), D.-A. Becker, D. Buhmann, R. Storck, R.J. Alonso, J.-L. Cormenzana, M. Hugi, F. van Gemert, P. O’Sullivan, A.Laciok, J. Marivoet, X. Sillen, H. Nordman, T. Vieno, M. Niemeyer, EUR-19965, 2003.
- [24] IAEA Activities Related to Safety Indicators, Time Frames and Reference Scenarios, B. Batandjieva, K. Hoiki & P. Metcalf.
- [25] Handling of Timescales and Related Safety Indicators, L. Griffault and E. Fillion.
- [26] Handling of Timescales: Application of Safety Indicators, H. Umeki and P. A. Smith.
- [27] Long Timescales, Low Risks: Rational Containment Objectives that Account for Ethics, Resources, Feasibility and Public Expectations – some thoughts to provoke discussion, N. A. Chapman.
- [28] Handling of Timescales in Safety Assessments of Geological Disposal: an IRSN-GRS Standpoint on the Possible Role of Regulatory Guidance, D. Gay and K-J. Röhlig.

ACRONYMES

AEN	Agence pour l'énergie nucléaire
AIEA	Agence internationale de l'énergie atomique, Vienne, Autriche
ANDRA	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, France
DGSNR	Direction générale de la sûreté nucléaire et de la radioprotection
DHA	Déchets de haute activité
DMA	Déchets de moyenne activité
FSC	Forum sur la confiance des parties prenantes
GRS	Gesellschaft fuer Anlagen und Reaktorsicherheit
HSK	Division principale de la sécurité des installations nucléaires
IGSC	Groupe d'intégration pour le dossier de sûreté
IRSN	Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire
NAGRA	Association nationale pour le stockage des déchets nucléaires, Suisse
NIREX	United Kingdom Nirex Limited
NUMO	Nuclear Waste Management Organization of Japan
ONDRAF/NIRAS	Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies, Belgique
SAM Ltd	Safety Assessment Management Limited
US-DOE-YM	Department of Energy, Yucca Mountain, États-Unis
US-EPA	U.S. Environmental Protection Agency

ÉGALEMENT DISPONIBLE

Publications de l'AEN d'intérêt général

AEN infos

ISSN 1605-9581

Abonnement annuel : € 43 US\$ 48 £ 28 ¥ 5 500

Energie nucléaire aujourd'hui (L') (2003)

ISBN 92-64-20328-0

Prix : € 21 US\$ 24 £ 14 ¥ 2 700

Gestion des déchets radioactifs

Public Confidence in the Management of Radioactive Waste: The Canadian Context (2003)

Workshop Proceedings, Ottawa, Canada, 14-18 October 2002

ISBN 92-64-10396-1

Prix : € 45 US\$ 52 £ 30 ¥ 5 700

Engineered Barrier System (EBS) in the Context of the Entire Safety Case (2003)

Workshop Proceedings, Oxford, U.K., 25-27 September 2002

ISBN 92-64-10354-6

Prix : € 45 US\$ 52 £ 30 ¥ 5 700

Stepwise Decision Making in Finland for the Disposal of Spent Nuclear Fuel (2002)

ISBN 92-64-19941-1

Prix : € 45 US\$ 45 £ 28 ¥ 5 250

Établir et faire partager la confiance dans la sûreté des dépôts en grande profondeur (2002)

Approches et arguments

ISBN 92-64-09782-1 (Bilingue)

Prix : € 45 US\$ 40 £ 28 ¥ 5 150

Radionuclide Retention in Geologic Media (2002)

Workshop Proceedings, Oskarshamn, Sweden, 7-9 May 2001

ISBN 92-64-19695-1

Prix : € 55 US\$ 49 £ 34 ¥ 5 550

Programme français de R-D sur le stockage géologique de déchets radioactifs (2003)

Revue internationale par des pairs du Dossier 2001 Argile

ISBN 92-64-02137-X

Gratuit : version papier ou web.

Informer, consulter et impliquer le public dans la gestion des déchets radioactifs (2003)

Panorama international des approches et expériences

ISBN 92-64-02128-0 (Bilingue)

Gratuit : version papier ou web.

Engineered Barrier Systems and the Safety of Deep Geological Repositories (2003)

State-of-the-art Report

ISBN 92-64-18498-8

Gratuit : version papier ou web.

SAFIR 2: Belgian R&D Programme on the Deep Disposal of High-level and Long-lived Radioactive Waste (2003) – An International Peer Review

ISBN 92-64-18499-6

Gratuit : version papier ou web.

Déclassement et démantèlement des installations nucléaires (2002)

ISBN 92-64-28488-5

Gratuit : version papier ou web.

An International Peer Review of the Yucca Mountain Project TSPA-SR (2002)

ISBN 92-64-18477-5

Disponible sur le web.

Bon de commande au dos.

