

**Rôle des informations géoscientifiques
dans le dossier de sûreté
pour la gestion des déchets radioactifs**

Principales conclusions du projet AMIGO

© OCDE 2010
NEA n° 6396

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

ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

L'OCDE est un forum unique en son genre où les gouvernements de 33 démocraties œuvrent ensemble pour relever les défis économiques, sociaux et environnementaux que pose la mondialisation. L'OCDE est aussi à l'avant-garde des efforts entrepris pour comprendre les évolutions du monde actuel et les préoccupations qu'elles font naître. Elle aide les gouvernements à faire face à des situations nouvelles en examinant des thèmes tels que le gouvernement d'entreprise, l'économie de l'information et les défis posés par le vieillissement de la population. L'Organisation offre aux gouvernements un cadre leur permettant de comparer leurs expériences en matière de politiques, de chercher des réponses à des problèmes communs, d'identifier les bonnes pratiques et de travailler à la coordination des politiques nationales et internationales.

Les pays membres de l'OCDE sont : l'Allemagne, l'Australie, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Chili, la Corée, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la Finlande, la France, la Grèce, la Hongrie, l'Irlande, l'Islande, l'Israël, l'Italie, le Japon, le Luxembourg, le Mexique, la Norvège, la Nouvelle-Zélande, les Pays-Bas, la Pologne, le Portugal, la République slovaque, la République tchèque, le Royaume-Uni, la Slovaquie, la Suède, la Suisse et la Turquie. La Commission européenne participe aux travaux de l'OCDE.

Les Éditions OCDE assurent une large diffusion aux travaux de l'Organisation. Ces derniers comprennent les résultats de l'activité de collecte de statistiques, les travaux de recherche menés sur des questions économiques, sociales et environnementales, ainsi que les conventions, les principes directeurs et les modèles développés par les pays membres.

Cet ouvrage est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE. Les opinions et les interprétations exprimées ne reflètent pas nécessairement les vues de l'OCDE ou des gouvernements de ses pays membres.

L'AGENCE 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, la Corée, 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 slovaque, la République tchèque, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Turquie. La Commission européenne 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.

Publié en anglais sous le titre :

Geoscientific Information in the Radioactive Waste Management Safety Case Main Messages from the AMIGO Project

Les corrigenda des publications de l'OCDE sont disponibles sur : www.oecd.org/editions/corrigenda.

© OCDE 2010

Vous êtes autorisés à copier, télécharger ou imprimer du contenu OCDE pour votre utilisation personnelle. Vous pouvez inclure des extraits des publications, des bases de données et produits multimédia de l'OCDE dans vos documents, présentations, blogs, sites Internet et matériel d'enseignement, sous réserve de faire mention de la source OCDE et du copyright. Les demandes pour usage public ou commercial ou de traduction devront être adressées à rights@oecd.org. Les demandes d'autorisation de photocopier une partie de ce contenu à des fins publiques ou commerciales peuvent être obtenues auprès du Copyright Clearance Center (CCC) info@copyright.com ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC) contact@efcopies.com.

Photos de couverture : Comet/Nagra.

Avant-propos

Les déchets radioactifs sont produits à toutes les étapes du cycle du combustible nucléaire et dans les applications des substances radioactives, qu'elles soient industrielles, médicales, militaires ou concernent la recherche. Les déchets les plus dangereux, à vie longue, tels que le combustible nucléaire usé et les déchets de haute activité issus du retraitement du combustible doivent être confinés et isolés pendant des milliers d'années. Le stockage de ces déchets dans des ouvrages aménagés à de grandes profondeurs, ce que l'on appelle des centres de stockage ou des dépôts géologiques, dans des formations adaptées, est étudié à travers le monde comme la solution de référence.

Le « dossier de sûreté » sert à évaluer, en la documentant, la sûreté d'un dépôt. Il présente les données et les méthodes justifiant que l'on ait confiance dans la qualité du concept de stockage, la sûreté de l'installation, la solidité des mécanismes scientifiques et institutionnels ainsi que les résultats des analyses et des calculs. Le Groupe d'intégration pour le dossier de sûreté (*Integration Group for the Safety Case – IGSC*) de l'AEN établit et documente les fondements scientifiques et techniques des dossiers de sûreté afin de s'en servir comme plate-forme de dialogue entre spécialistes et outil de décision.

Dans le cas du stockage géologique, les études de la géosphère représentent une composante majeure du dossier de sûreté. Ces informations géoscientifiques ont ceci de particulier qu'elles peuvent fournir des preuves et des raisonnements qui portent sur les échelles géologiques (c'est-à-dire des millénaires, voire plus). Elles peuvent recouvrir également plusieurs sous-disciplines : géophysique, hydrogéologie, géochimie et paléohydrogéologie, par exemple. Autre caractéristique importante de ces informations pour ce qui concerne spécifiquement le stockage des déchets radioactifs, leur précision et leur niveau de compréhension évoluent à mesure que l'aménagement du dépôt avance. Aux toutes premières étapes de la planification d'un dépôt, ces informations risquent d'être limitées et provisoires, les données étant souvent rares et générales puisque l'on n'a pas encore sélectionné un site. À ce stade, le dossier de sûreté est donc également lacunaire. La collecte de données supplémentaires aux étapes ultérieures, notamment pendant le choix du site et l'aménagement du dépôt, et les améliorations successives de la portée et de la précision des informations permettent d'accéder à une compréhension plus fine de la géosphère et de son évolution et ainsi d'enrichir le dossier de sûreté. En fonction des données disponibles, et notamment des données géoscientifiques, le dossier de sûreté pourra venir appuyer la décision de procéder au choix du site, à la construction du dépôt et à son exploitation et, finalement, à sa fermeture.

Afin de dresser un panorama de l'application de ces informations géoscientifiques dans les dossiers de sûreté, l'IGSC a parrainé le projet sur les Procédures et méthodes d'intégration des informations géologiques dans le dossier de sûreté (*Approaches and Methods for Integrating Geological Information in the Safety Case* – AMIGO). Ce projet a étudié la façon dont sont recueillis et intégrés tous les types d'informations géologiques lors du choix du site et de la conception de l'ouvrage de stockage, de l'évaluation des performances et dans le dossier de sûreté global établi pour le stockage en profondeur des déchets radioactifs. Ce projet est né d'une série de projets d'échange internationaux consacrés à la modélisation du transport des radionucléides. Il s'est appuyé sur les résultats obtenus qu'il a intégrés afin de dresser un panorama élargi de l'utilisation des informations géologiques non seulement pour la modélisation, mais aussi pour l'élaboration du dossier de sûreté global. Le projet AMIGO a démontré que les données et la compréhension géoscientifiques servent de multiples objectifs dans le dossier de sûreté et, de cette manière, contribuent largement aux décisions qui sont prises au cours du processus par étapes d'aménagement de dépôts en formations géologiques. Des progrès importants ont été réalisés dans la façon d'intégrer et d'appliquer ces informations.

Remerciements

Le Groupe d'intégration pour le dossier de sûreté (IGSC) souhaite exprimer sa reconnaissance aux membres passés et présents du Groupe de pilotage d'AMIGO qui ont contribué à formuler et à orienter le projet sur toute sa durée puis à définir et à peaufiner ce rapport. Il s'agit de :

Klaus-Jürgen Röhlig.....Président du Groupe de pilotage de l'IGSC,
anciennement GRS-Cologne, aujourd'hui
Université de technologie de Clausthal,
Allemagne

Johan AnderssonStreamflow AB, Suède

Rick BeauheimSandia National Laboratories, États-Unis

Gérard Bruno.....Anciennement IRSN, France, aujourd'hui AIEA

Ann DierckxAnciennement ONDRAF/NIRAS, Belgique

Betsy ForinashOCDE/AEN

Erik FrankIFSN, Suisse

Andreas GautschiNagra, Suisse

Mark Jensen.....SGDN, Canada

Patrick Lebon.....Andra, France

Christophe Serres.....IRSN, France

Sylvie Voinis.....Anciennement OCDE/AEN, aujourd'hui
Andra, France

Des remerciements particuliers sont adressés aux membres du Comité technique du programme du troisième atelier AMIGO¹, en premier lieu parce qu'il n'a pas été fait mention de leur contribution dans les actes de l'atelier, mais surtout parce qu'ils sont parvenus à organiser les débats et la session de clôture de cet atelier de façon à faire émerger les principaux messages et enseignements du projet d'ensemble.

Enfin, l'IGSC tient à rendre hommage aux animateurs et à tous ceux qui ont participé aux ateliers AMIGO et contribué au questionnaire. À l'évidence, sans leurs contributions inestimables au fil des années, le projet et, à plus forte raison, le présent ouvrage n'auraient pas vu le jour.

Ce rapport a été établi, dans le cadre d'un contrat, par Tim McEwen de la société McEwen Consulting, Royaume-Uni.

1. Sylvie Voinis (Andra) présidait ce Comité technique de programme qui comptait par ailleurs Jean-Claude Duplessy (Centre national de la recherche scientifique, France), Betsy Forinash (OCDE/AEN), Erik Frank (IFSN), Lise Griffault et Patrick Lebon (tous deux de l'Andra), Christophe Serres (IRSN), Jan-Olof Selroos (SKB) et Paul Smith (SAM Ltd.).

Table des matières

Avant-propos	3
Remerciements	5
Synthèse des résultats	9
Contexte et finalités du projet AMIGO	9
Rôle des informations géoscientifiques dans le dossier de sûreté.....	10
Tendances et progrès récents.....	11
Importance de l'intégration	12
Valeur des échanges d'information.....	13
Contexte et présentation des problématiques	15
Contexte et finalité du projet AMIGO	15
Rôle et fonctions des informations géoscientifiques dans les concepts de la sûreté employés dans le domaine du stockage géologique	16
Rôle des informations géologiques dans l'aménagement du dépôt et les dossiers de sûreté	18
Arguments et preuves de cette sûreté	22
Collecte d'informations géoscientifiques et possibilité de les transposer	25
Intégration et gestion des informations géoscientifiques utilisées dans un dossier de sûreté	32
Relations entre les informations géoscientifiques et la conception technique du stockage	37
Conclusions	39
Références	41
Annexes	
A. Contexte du lancement et objectifs du projet AMIGO	45
B. Résultats des ateliers et du questionnaire AMIGO.....	51

Synthèse des résultats

Contexte et finalités du projet AMIGO

Avant que ne démarre le projet AMIGO, on redoutait, comme en témoigne le document à l'origine du projet (AEN, 2002) ainsi que la description faite à l'annexe A du présent ouvrage, que les informations géoscientifiques ne soient insuffisamment exploitées lors de l'élaboration des dossiers de sûreté. Et de fait, on avait l'impression que les concepts de sûreté avaient eu tendance à sous-estimer la contribution fondamentale à la sûreté que peut faire la géosphère – ou, du moins, que les dossiers de sûreté n'en avaient pas tenu compte. Par conséquent, on risquait d'avoir sous-représenté ou considéré comme acquis, lors de la présentation d'un dossier de sûreté, l'importante contribution du milieu géologique au confinement des déchets et le fait qu'il offre des conditions adaptées et stables aux barrières ouvragées.

À cette époque, en outre, plusieurs problèmes étaient jugés compliquer la représentation de la géosphère dans les dossiers de sûreté (voir annexe A). L'un d'entre eux tenait au fait que de nombreux programmes de stockage avaient fait porter les études et la modélisation géologiques presque exclusivement sur les aspects hydrogéologiques directement liées au transport des radionucléides, sans s'intéresser (si ce n'est dans une moindre mesure) aux autres aspects du système géologique. Par ailleurs, il était difficile de coordonner efficacement la caractérisation du site et les études géoscientifiques, d'une part, et les besoins de la modélisation et de l'évaluation des performances, de l'autre. Établir un lien direct entre ces activités était compliqué du fait notamment que les paramètres et propriétés du site employés dans les évaluations de sûreté sont souvent impossibles à mesurer directement et doivent, en outre, être extrapolés à d'autres dimensions ou à des échelles spatiales très différentes. Qui plus est, la communication entre le personnel affecté à la caractérisation du site et à l'évaluation de sûreté et, plus généralement, l'intégration des données et travaux propres aux différentes disciplines (et aux sous-disciplines géologiques) constituaient de véritables défis. Le projet AMIGO devait donc traiter directement du rôle de la géosphère mais aussi des problèmes pratiques que pose sa représentation dans les dossiers de sûreté.

Le projet AMIGO a consisté à organiser trois ateliers et à établir un questionnaire très complet que l'on trouvera décrit de manière plus détaillée dans les annexes A et B. Le résultat des ateliers et les réponses au questionnaire démontrent que, pour ce qui est de la définition de la place des informations géoscientifiques dans les dossiers de sûreté, des progrès considérables ont été accomplis depuis 2002. Des concepts comme les fonctions de sûreté et la

synthèse des connaissances géologiques² ont permis de mettre en place des mécanismes permettant de hiérarchiser et de synthétiser les informations pertinentes puis d'en mesurer l'importance pour la sûreté d'ensemble d'un système de stockage. L'interprétation et l'application aux dossiers de sûreté des informations géoscientifiques posent des problèmes pratiques dont la résolution a nécessité l'élaboration de divers outils et approches (nous mentionnerons une fois de plus les concepts de fonction de sûreté et de synthèse des données géologiques). La section qui suit sera consacrée aux conclusions de ce projet ainsi qu'à une analyse du rôle et de l'application pratique des informations géoscientifiques dans les dossiers de sûreté.

Rôle des informations géoscientifiques dans le dossier de sûreté

L'importance des informations géoscientifiques pour le choix du site est une évidence connue de longue date (voir, par exemple, les travaux du groupe SEDE de l'AEN – Groupe de coordination sur l'évaluation des sites et la conception des expériences pour l'évacuation des déchets radioactifs – antérieurs à 2000). Plus récemment, on a pris peu à peu conscience de la place importante des informations géoscientifiques dans les évaluations de la sûreté, et donc dans le dossier de sûreté, et corrélativement de la nécessité d'intégrer correctement ces informations (comme en témoigne, de fait, la constitution de l'IGSC, fruit de la fusion entre le SEDE et le PAAG [Groupe consultatif sur l'évaluation des performances des systèmes d'évacuation des déchets radioactifs], auparavant deux groupes de l'AEN se consacrant respectivement à la caractérisation des sites et aux évaluations des performances).

Dans un dossier de sûreté, les informations géoscientifiques ont de multiples fonctions importantes. D'abord et avant tout, elles constituent la base sur laquelle seront calculées les valeurs (y compris leurs intervalles de variation et incertitudes) des principaux paramètres de l'évaluation des performances. Toutefois, la caractérisation des sites, par sa portée, et la compréhension géoscientifique, par son importance, dépassent de très loin les strictes données nécessaires à l'évaluation des performances. De plus, les informations géoscientifiques :

- Fournissent une compréhension de la géosphère aux échelles temporelles et spatiales intéressantes du point de vue de la sûreté du stockage, autrement dit, répondre aux deux questions : Comment la géosphère peut-elle avoir évolué pour atteindre l'état actuel ? Quelle pourrait être son évolution potentielle future ? Le fait de démontrer que l'on possède cette connaissance, avec l'investissement que ces recherches supposent, est en soi un moyen non négligeable d'inspirer confiance dans le dossier de sûreté.
- Permettent de fixer les limites et priorités des évaluations des performances et de la sûreté parce qu'elles identifient et confirment les processus et événements pertinents, facilitent la formulation des modèles conceptuels, et justifient des décisions d'opérer des simplifications acceptables de la modélisation, etc.

2. On définira plus précisément les expressions *synthèse des connaissances géologiques et modèle descriptif du site* à la section consacrée à l'intégration et à la gestion des informations géoscientifiques employées dans un dossier de sûreté.

- Apportent un complément d'informations qualitatives (par exemple, l'âge des eaux souterraines) qui viendront appuyer des jugements concernant l'importance des processus qui déterminent la stabilité du site, l'isolement des déchets, les propriétés de confinement de la géosphère, les rejets de radionucléides et leur mobilité en subsurface ainsi que d'autres aspects des fonctions de sûreté.

Tendances et progrès récents

La collecte, l'interprétation et la communication d'informations géoscientifiques sont autant d'aspects importants de leur application dans les dossiers de sûreté. Dans ce domaine, les décennies qui viennent de passer ont été marquées par d'importants progrès technologiques et par la mise au point d'outils méthodologiques, comme nous le verrons ci-après. Bien entendu, tous les aspects ne sont pas résolus. Il reste des problèmes pratiques mais aussi des polémiques concernant, par exemple, l'emploi des analogues naturels et la communication de ces informations géoscientifiques à des publics moins avertis (c'est-à-dire le grand public). Voici quelques exemples des progrès accomplis récemment :

- La recherche de preuves multiples n'est plus aujourd'hui une aspiration réservée aux responsables au plus haut niveau. Elle est entrée dans la pratique et acceptée comme une méthode rationnelle pour appliquer les informations géoscientifiques. Le dossier de sûreté français établi récemment et qui présente des preuves d'un transport dominé par la diffusion dans les formations argileuses en est un exemple (Smith *et al.*, in Andra, 2005a).
- L'emploi de données indirectes illustre la tendance à recourir à des preuves diversifiées que l'on observe aujourd'hui. Ces données sont, en fait, des preuves spécifiques, souvent très spécialisées, qui peuvent démontrer de manière convaincante que le site est stable et adapté au stockage des déchets radioactifs. Ces preuves peuvent être obtenues sur le site de stockage pressenti ou dans un environnement géologique du même type (on trouvera plusieurs exemples de l'emploi de ce type de preuves dans l'ouvrage de l'AEN, 2009a). Ces données indirectes servent, et c'est là l'une de leurs utilisations importantes, à évaluer la pertinence de certains processus et phénomènes parce qu'elles renseignent sur les conditions dans lesquelles ils se produisent ainsi que sur leurs effets potentiels. Elles peuvent donc être considérées comme des analogues de processus potentiellement importants, en particulier ceux qui ne peuvent être directement observés sur un site de stockage potentiel en raison des échéances considérées ou d'autres facteurs. Pour illustrer l'emploi de ces données, nous prendrons l'exemple de l'argile à Opalinus en Suisse. D'après une riche base de données hydrogéologiques – dont une partie a été établie pour des environnements géologiques fortement tectonisés – il apparaît que le transport par advection à travers des failles et fractures est insignifiant dans l'argile à Opalinus à des profondeurs supérieures à 200 mètres. Une conclusion que viennent également confirmer d'autres données hydrochimiques et isotopiques sur l'eau interstitielle dans l'argile. L'absence d'anomalies hydrochimiques et de nombreux filons minéraux conduisent à conclure à

l'absence d'importants paléo-écoulements à travers ces failles et fractures. Ces observations sont donc à rapprocher la capacité d'auto-cicatrisation prononcée de l'argile pour déduire que les failles anciennes que l'on réactiverait ou les fractures nouvelles ne laisseront à aucun moment circuler d'importants écoulements de fluides en raison de ces mécanismes d'auto-cicatrisation (Gautschi in AEN, 2001 et Nagra, 2002a et 2002b).

- Les informations paléogéoscientifiques (que l'on peut souvent relier aux données indirectes évoquées ci-dessus) ont pris de l'importance, de même que l'objectif d'exploiter ces preuves pour se projeter dans l'avenir, confirmer les performances de la géosphère et des modèles mis au point.
- On est parvenu à une meilleure intelligence et à une approche plus systématique de la transposition des données, techniques et conclusions, en particulier des paramètres individuels, des techniques d'investigation et des méthodes d'évaluation des données, de la compréhension des mécanismes ainsi que des modèles conceptuels. Cette transposition a été particulièrement marquée lors des recherches sur les formations argileuses (par exemple, Mazurek *et al.*, in AEN, 2007 et Mazurek *et al.*, 2008), mais aussi sur des environnements géologiques cristallins et différents types de roches (e.g., SKB, 2006a,b).
- Dans la dernière phase du projet AMIGO, on a pris conscience de plus en plus de la nécessité de tenir compte de la faisabilité technique et de veiller à la compatibilité avec les composantes ouvragées lors de l'examen des questions géoscientifiques.

Importance de l'intégration

Une mise en œuvre efficace de toutes ces tendances récentes passe par l'intégration des informations géoscientifiques non pas seulement dans l'élaboration d'un dossier de sûreté mais également dans l'ensemble du processus d'aménagement d'un dépôt. On retiendra à cet égard les aspects suivants :

- Les liens et allers-retours entre la caractérisation du site, la conception technique et l'évaluation de la sûreté se multiplient. Ce phénomène traduit l'accent mis dans les dossiers de sûreté sur l'architecture du stockage et sa faisabilité technique. Cette évolution a des implications sur les types de données que devront fournir les études géoscientifiques et sur la manière dont ces données seront intégrées et exploitées.
- On a vu apparaître dans les dossiers de sûreté récents de nouveaux outils et méthodes permettant d'établir des priorités entre les études géoscientifiques et de faciliter l'intégration des informations géoscientifiques. Les plus importants dans ce contexte sont les fonctions de sûreté (même si, bien sûr, elles ne sont pas tirées des travaux géoscientifiques et si leur application ne se limite pas aux aspects géoscientifiques du dossier de sûreté) ainsi que l'élaboration d'une synthèse des

connaissances géologiques, ou d'un modèle descriptif du site³. Une fonction de sûreté peut être considérée comme le moyen par lequel un composant d'un stockage contribue à la sûreté (bien que les définitions exactes varient sur les programmes ; AEN, 2009c). Prenons, par exemple, une fonction de sûreté principale telle que « retarder et atténuer la migration des radionucléides », qui est liée à la sous-fonction « retarder la migration des éléments radioactifs par diffusion/rétention dans la formation hôte » qui, à son tour, repose entre autres sur « l'absence d'hétérogénéités significatives au regard de la diffusion » (Andra). On peut définir et évaluer les fonctions de sûreté liées à la géosphère en termes de prévisibilité géologique et mécanique de la formation hôte, prévisibilité des écoulements souterrains, propriétés de rétention de tous les radionucléides éventuellement rejetés, prévisibilité de la composition des eaux souterraines et absence de ressources dans la roche hôte (et son voisinage immédiat). Les tableaux 1 et 2 donnent des exemples de fonctions de sûreté. Le concept de synthèse des connaissances géologiques a été également abondamment débattu. C'est peut-être le concept le plus utile qui ait vu le jour : il permet d'utiliser au mieux les informations géoscientifiques dans un dossier de sûreté parce qu'il favorise et, de fait, exige une intégration véritable de ces informations.

Vu l'importance de cette intégration, certains programmes nationaux dont ceux de l'Andra, de la Nagra, de Posiva et de SKB, ont même changé de structure organisationnelle et adopté de nouveaux outils de gestion pour améliorer la communication et faciliter la compréhension mutuelle entre les différentes disciplines et équipes. Ces approches vont dans le sens d'une plus grande cohérence entre notamment les besoins de l'analyse de sûreté et les priorités des études géoscientifiques.

Valeur des échanges d'information

Le projet AMIGO avait pour objectif notamment de favoriser les échanges d'informations entre programmes géoscientifiques internationaux de gestion des déchets radioactifs et avec les établissements universitaires, les autorités de contrôle et les organismes de gestion des déchets. Les conclusions qui suivent en ont été tirées, dont certaines, en particulier celles qui concernent les interactions

3. La synthèse des connaissances géologiques est un rapport ou ensemble de rapports et fichiers contenant une explication géoscientifique de la compréhension globale que l'on a des caractéristiques, attributs et évolutions (passées et futures) du site qui peuvent démontrer (c'est-à-dire inspirer confiance dans) les performances et la sûreté à long terme du stockage. On y trouve des modèles (descriptifs, mathématiques, conceptuels et de sites). Elle tient compte des incertitudes ainsi que des autres interprétations géoscientifiques des données disponibles comme nous l'exposerons plus en détail à la section consacrée à l'intégration et à la gestion des données géoscientifiques employées dans un dossier de sûreté. Le modèle descriptif du site bien que proche de la synthèse ne doit pas se confondre avec lui. Les différences entre ces deux expressions sont également analysées à la même section du document.

entre les gestionnaires de déchets et les autorités de contrôle avaient déjà été soulignées dans les principaux messages du projet GEOTRAP (AEN, 2002) :

- Publier les bases de données géoscientifiques dans la littérature spécialisée de façon à en encourager l'exploitation lors de nouvelles recherches pourrait présenter des avantages pour les programmes géoscientifiques.
- Un groupe de pilotage externe, une expertise périodique du programme, voire les deux, sont des moyens de garantir la pertinence des travaux géoscientifiques menés par un programme.
- Faciliter le processus d'examen et s'assurer de la fiabilité des résultats de l'évaluation de sûreté passent par des interactions efficaces entre les autorités de contrôle et les gestionnaires de déchets. L'autorité doit définir un ensemble clair et compréhensible de règles, donner des consignes et des orientations sur les sujets essentiels. Il revient aux gestionnaires de déchets de communiquer ouvertement les résultats de ses recherches et de documenter intégralement l'analyse de sûreté et ses fondements scientifiques. Ce travail de documentation comportera des éléments d'une démarche d'assurance qualité décrivant, par exemple, les processus et résultats tirés de la collecte, de l'interprétation et de l'application de données géoscientifiques lors de l'analyse de sûreté et dans le dossier de sûreté.
- Il y a lieu d'organiser tant des interactions officielles (avec le public) et des relations bilatérales entre les autorités de contrôle et les gestionnaires de déchets. On imposera également un mécanisme de résolution des problèmes.

Ces conclusions seront détaillées dans les sections qui suivent.

Contexte et présentation des problématiques

Contexte et finalité du projet AMIGO

Historique du projet AMIGO

Les projets géoscientifiques internationaux consacrés au stockage des déchets radioactifs dans les années 80 étaient centrés sur la mise au point et la validation de modèles d'écoulement et de transport des radionucléides. S'appuyant sur les enseignements tirés de ces projets, les prédécesseurs de l'IGSC, à savoir le SEDE (Groupe de coordination sur l'évaluation des sites et la conception des expériences pour l'évacuation des déchets radioactifs) et le PAAG (Groupe consultatif sur l'évaluation des performances des systèmes d'évacuation des déchets radioactifs) ont lancé le projet GEOTRAP qui portait sur la migration des radionucléides dans les milieux géologiques hétérogènes (1996-2001). Ce projet élargit le champ d'étude de la migration des radionucléides. Sans se limiter au développement et à la validation de modèles, il a permis d'évaluer également les démarches pratiques suivies pour régler des problèmes de modélisation et combler les lacunes dans les connaissances, et s'est intéressé à la possibilité d'entreprendre des coopérations internationales.

Le projet de l'AEN/OCDE connu sous le nom de AMIGO (procédures et méthodes d'intégration des informations géologiques dans le dossier de sûreté), est né du projet GEOTRAP (AEN, 2002) et a élargi encore le champ d'investigation pour ce qui est des disciplines géoscientifiques concernées et de leur domaine d'application. C'est ainsi que le projet AMIGO s'est efforcé de parvenir à une conception commune de la façon dont les aspects géologiques peuvent influencer sur la modélisation du transport des radionucléides et ainsi comment les géosciences peuvent alimenter les calculs d'évaluation de la sûreté et les dossiers de sûreté, en général (AEN, 2004 ; 2007).

Portée et objectifs du projet AMIGO

Dans le projet AMIGO, l'accent était mis sur la collecte et l'intégration de tous les types d'informations géologiques et sur leur rôle dans le dossier de sûreté global. Les objectifs d'AMIGO ont été définis comme suit (AEN, 2002) :

- Dresser un bilan de l'état des connaissances et identifier les moyens d'améliorer la contribution des données sur la géosphère à la constitution du dossier de sûreté d'un stockage.
- Contribuer à l'élaboration de méthodes de représentation de la géosphère dans le dossier de sûreté du stockage.

- Définir la terminologie à employer dans les communications et interactions entre équipes travaillant sur la caractérisation du site et spécialistes de l'évaluation de la sûreté lors de l'établissement du dossier de sûreté d'un stockage.
- Clarifier le rôle et l'application des informations et preuves géoscientifiques employées dans un dossier de sûreté.
- Élucider les relations et les besoins d'informations pour la caractérisation du site et la modélisation effectuée dans les évaluations de sûreté.
- Favoriser les échanges d'informations entre programmes géoscientifiques internationaux de gestion des déchets radioactifs ainsi qu'entre universitaires, autorités de contrôle et gestionnaires de déchets.

Structure du projet AMIGO

Le projet AMIGO était organisé autour d'une série d'ateliers qui ont commencé en 2003 :

- Le premier atelier AMIGO a eu lieu en 2003 à Yverdon-les-Bains, en Suisse. Il était intitulé *Geological Disposal: Building Confidence Using Multiple Lines of Evidence*.
- Le deuxième atelier AMIGO, *Linkage of Geoscientific Arguments et Evidence in Supporting the Safety Case*, s'est tenu à Toronto, au Canada, en 2005.
- Le troisième et dernier atelier AMIGO a été organisé à Nancy, en France, en 2008 sur le thème : *Approaches et Challenges for the Use of Geological Information in the Safety Case*.

L'AEN a publié des rapports regroupant les communications techniques et une synthèse des débats et des conclusions de chaque atelier (AEN, 2004b, 2007, 2009b). La présentation, par l'organisation d'accueil, de son dossier de sûreté et, plus spécialement, de la façon dont elle avait exploité les informations sur la géosphère constituait un des temps forts de ces ateliers, une occasion de fournir des détails aux autres participants et d'obtenir un retour d'informations sur leur propre travail. En dehors de l'organisation de ces ateliers, le projet AMIGO a consisté à élaborer un questionnaire destiné à établir une compilation d'exemples pratiques de l'expérience des différents pays concernant les sujets et problèmes essentiels. Un rapport fait la synthèse des réponses obtenues au questionnaire sous le titre *The Evolving Role of Geoscience in the Safety Case: Responses to the AMIGO Questionnaire* (AEN, 2008).

Le lecteur trouvera à l'annexe A un complément d'informations sur le projet AMIGO. Les résultats des trois ateliers AMIGO et les réponses au questionnaire sont présentées à l'annexe B.

Rôle et fonctions des informations géoscientifiques dans les concepts de la sûreté employés dans le domaine du stockage géologique

En termes qualitatifs, la géosphère (et par voie de conséquence, les informations géoscientifiques) jouent un rôle identique dans tous les concepts de stockages de

déchets à vie longue. En effet, la géosphère contribue à la sûreté à long terme de la manière suivante :

- Elle isole les déchets de l'environnement humain et limite la probabilité d'une intrusion humaine intempestive ou accidentelle.
- Elle procure en profondeur un environnement chimique et physique stable et propice, et protège de cette manière les déchets et les barrières ouvragées de divers phénomènes externes (évolution du climat et érosion à long terme). C'est ainsi qu'elle contribue au confinement à long terme des déchets.
- Elle empêche, retarde et/ou atténue le relâchement et la migration de radionucléides (même si la contribution particulière de la géosphère dans les divers concepts de stockage peut varier en fonction du rôle qu'elle y joue) et ainsi contribue au concept multibarrières.

C'est ce que l'on appelle souvent les fonctions de sûreté (comme nous l'avons vu ci-dessus).

Les formations susceptibles d'accueillir des stockages géologiques (ainsi que l'environnement géologique dans lequel elles se trouvent) sont choisies notamment pour leur stabilité à long terme, leur capacité d'accueillir l'ouvrage de stockage des déchets, leur capacité d'empêcher ou d'atténuer la libération potentielle de radioactivité et leurs fonctions de tampon par rapport aux perturbations à la fois externes et internes. Les dangers naturels sont également pris en compte dans le choix du site d'un éventuel stockage. Toutefois, on admet que les roches hôtes intéressantes pour le stockage des déchets radioactifs, c'est-à-dire à des profondeurs supérieures à quelques centaines de mètres, ont peu de chance de se trouver en équilibre physique ou chimique. Le concept de stabilité de la géosphère, au sens où il s'agit de préserver un environnement physique et chimique stable à de grandes profondeurs, n'implique pas, par conséquent, que se maintiennent sur de très longues périodes de temps, des conditions stationnaires. Cette stabilité suppose, en revanche, que l'importance et la fréquence des changements qui interviennent dans le système géologique ne risquent pas de compromettre la sûreté à court et à long terme du système de stockage⁴.

Tous les programmes de stockage des déchets à vie longue attribuent à la géosphère un grand poids pour la réalisation des deux premières fonctions de sûreté énumérées ci-dessus. La troisième fonction jouit également d'une priorité élevée dans tous ces programmes. Toutefois, l'importance de la contribution de la géosphère à cette fonction – par rapport à celle des colis de déchets et d'autres composantes ouvragées du stockage – peut varier en fonction de considérations géologiques et réglementaires et des caractéristiques du programme. Quelles que soient les particularités du concept de dépôt, la géosphère est d'ordinaire considérée comme une composante essentielle du système multi-barrières à de longues échéances, du moins dans la mesure où elle assure la redondance des principales caractéristiques qui assurent le confinement et empêchent le rejet de radionucléides des colis de déchets. La géosphère joue un rôle qui est, par conséquent, très proche dans tous les concepts de stockage géologique, même si

4. Ce sujet a été longuement étudié dans deux rapports établis dans le cadre du projet de l'AEN sur la stabilité de la géosphère, voir AEN (2004a, 2009a).

les fonctions relatives de la géologie et des composantes ouvragées du système peuvent être différentes (voire évoluer avec les étapes, dans un même programme). Et, de fait, les caractéristiques de la géosphère et la confiance que l'on peut avoir dans sa fonction de barrière sont des données importantes qui influent sur la façon dont sont conçues les barrières ouvragées pour garantir la sûreté à long terme du stockage.

Rôle des informations géologiques dans l'aménagement du dépôt et les dossiers de sûreté

La compréhension de l'état actuel et de l'évolution future de la géosphère est un préalable fondamental pour prouver que l'on peut se fier aux performances attendues d'un stockage géologique. De fait, la force d'un dossier de sûreté d'un stockage est étroitement liée à l'intelligence que l'on a de la géosphère. En outre, l'accueil réservé à l'installation dépend en partie de la capacité de communiquer à toutes les parties prenantes la confiance que l'on a dans cette compréhension. L'importance de cet aspect ressort tout au long de cet ouvrage.

Le dossier de sûreté est normalement présenté à des moments particuliers du processus par étapes d'aménagement d'un stockage. Le dossier de sûreté mûrit avec les avancées du programme. Il est peu à peu affiné de manière itérative, par des allers et retours entre les principales composantes du programme, à savoir la caractérisation du site, la conception technique et l'évaluation des performances. Tant la portée des informations que la façon dont elles sont employées évoluent avec le dossier de sûreté. Les informations géologiques sont employées de diverses manières par les programmes de gestion des déchets. En voici quelques exemples :

- pour la sélection du site, elles servent à vérifier que les critères généraux d'exclusion sont remplis et à démontrer, ou non, qu'une roche hôte adaptée est de taille suffisante pour accueillir un stockage et permettre une certaine souplesse dans le choix du lieu d'implantation de cet ouvrage ;
- lors de la conception technique, elles servent à adapter la conception et l'architecture du stockage de telle manière que les barrières ouvragées puissent fonctionner de manière satisfaisante dans l'environnement géologique retenu et qu'elles soient protégées par cet environnement ;
- lors des évaluations de sûreté, les données géologiques fournissent les valeurs des paramètres à entrer dans les modèles, viennent confirmer ou infirmer les hypothèses effectuées dans les modèles et peuvent permettre de choisir entre des modèles conceptuels ;
- elles constituent un faisceau de preuves diverses et complémentaires qui viennent appuyer indirectement ou de façon qualitative l'argumentation en faveur de la sûreté, de la stabilité ou d'autres caractéristiques essentielles traitées dans le dossier de sûreté (concernant, par exemple, la stabilité géologique à long terme) ou viennent renforcer la confiance qu'on leur accorde.

L'usage précis que l'on fera des informations géologiques dépend de l'étape de planification ou de mise en œuvre atteinte par un programme. À une étape

précoce de l'aménagement d'un dépôt, un dossier de sûreté utilisera des données géoscientifiques limitées et assez générales, s'appuyant souvent sur des sources publiées. Même aux tous premiers stades de la planification, il est possible de définir des exigences que doivent remplir la géosphère et la caractérisation géologique (critères employés pour identifier des sites pressentis) en fonction de la sûreté à long terme et de la faisabilité technique. Pour ce qui est de la sûreté à long terme, il peut être utile à ce stade précoce de montrer que le site satisfait aux exigences générales ou aux critères d'exclusion. Ultérieurement, à mesure que le dossier de sûreté s'étoffe, il est censé contenir nettement plus d'informations géoscientifiques (plus détaillées de surcroît), en particulier des données propres au site recueillies dans le cadre du programme de caractérisation, et notamment des résultats d'expérimentations et d'études effectués en surface et, parfois aussi, en profondeur.

Le tableau 1 récapitule les caractéristiques intéressantes de la géosphère que l'on pourrait citer dans un dossier de sûreté. Il s'inspire de l'exemple de l'argile à Opalinus en Suisse, présenté lors du 1^{er} atelier AMIGO (Gautschi et al., in AEN, 2004b). Ces caractéristiques, définies pour l'argile à Opalinus, sont néanmoins applicables en général à tout environnement géologique.

Une fois que l'on a sélectionné un site, voire plusieurs sites possibles, les travaux géoscientifiques servent davantage à acquérir confiance dans la description ou le modèle conceptuel du site et se concentrent sur la caractérisation détaillée des propriétés du site. En général, il s'agit d'atteindre un point où :

- On établit un « modèle du site » stable. En d'autres termes, ce modèle ne doit pas changer fondamentalement lorsqu'on y introduit des informations nouvelles ou plus détaillées. De la sorte, la confiance que l'on acquiert dans l'utilisation du modèle et les résultats qu'il produit augmentent progressivement au fur et à mesure de l'aménagement du dépôt. Pour que cette confiance dans le « modèle du site » s'instaure, ce dernier doit concorder avec un large éventail de mesures d'origines diverses.
- On possède les informations exigées pour procéder à une évaluation de sûreté détaillée (par exemple, à l'appui d'une demande d'autorisation) avec quantification des incertitudes.
- Les incertitudes qui subsistent ne remettent pas en cause la confiance que l'on a acquise dans la sûreté du stockage.

Dans la mesure du possible, il faut alors établir une synthèse de toutes les informations disponibles dans une description cohérente ou modèle conceptuel du site (également appelé synthèse des connaissances géologiques). Cette synthèse recouvre les données pertinentes obtenues avec un large éventail de techniques de caractérisation, compte tenu d'informations spécifiques au site, mais aussi plus générales, obtenues par exemple dans des laboratoires souterrains « généralistes » ou sur des analogues naturels. Ce modèle peut également contenir des données comme des profils de traceurs naturels, qui sont quantitatives mais ne fournissent pourtant que des informations ou contraintes indirectes sur les caractéristiques et l'évolution du site. Le modèle du site doit décrire son évolution géologique, ses caractéristiques actuelles à l'état non perturbé, les perturbations que pourraient provoquer la construction du stockage

et l'évolution post-fermeture du stockage. À mesure qu'évolue l'intelligence que l'on a d'un site, la priorité tend à se déplacer de l'acquisition d'une compréhension générale vers une meilleure caractérisation des phénomènes jugés susceptibles d'avoir le plus d'effet sur le fonctionnement du stockage. Avec le temps, on identifie les scénarios les plus préoccupants, et la collecte des données se concentre sur les informations dont on a besoin pour les évaluer. Ces descriptions ou modèles conceptuels sont donc employés pour explorer des options de conception et pour les évaluations de sûreté mais aussi pour planifier d'éventuelles études ultérieures du site.

Tableau 1. Caractéristiques intéressantes de la géosphère que l'on pourrait citer dans un dossier de sûreté inspirées de l'exemple de l'argile à Opalinus en Suisse, présenté lors du 1^{er} atelier AMIGO (Gautschi *et al.*, in AEN, 2004b)⁵

<p><i>Stabilité géologique à long terme</i>, ce qui suppose, par exemple des processus de soulèvement et d'érosion lents et une insensibilité de l'environnement géochimique et hydrogéologique aux variations géologiques et climatiques.</p> <p><i>Des propriétés structurales, chimiques et physiques intéressantes</i>, notamment l'épaisseur de la formation hôte, des déplacements lents des eaux souterraines, un environnement géochimique favorable du point de vue de la rétention des radionucléides et de la protection du systèmes de barrières ouvragées, des propriétés mécaniques de la roche démontrant la faisabilité de la construction (« bien que ne relevant pas à strictement parler du dossier de sûreté, la faisabilité technique de l'ouvrage est un aspect pertinent dans la mesure où le système décrit dans le dossier de sûreté doit pouvoir être réalisé »).</p> <p><i>Une étendue suffisante latéralement</i> qui offre une certaine souplesse dans le choix de l'emplacement exact et dans l'architecture du stockage.</p> <p><i>Absence ou faible probabilité de phénomènes et perturbations néfastes ou encore insensibilité de la géosphère à ce type de phénomène ou perturbation</i>, dont des phénomènes et événements climatiques et géologiques, les perturbations provoquées par le stockage lui-même (gaz, altérations chimiques) et une intrusion humaine future.</p> <p><i>Explorabilité</i>, en d'autres termes la possibilité de caractériser la roche à toutes les étapes du projet et cela suffisamment pour pouvoir décider de passer (ou non) à l'étape suivante (par exemple, la caractérisation du site à partir de la surface peut fournir suffisamment d'éléments pour que l'on puisse décider de passer à une caractérisation effectuée depuis des galeries souterraines).</p> <p><i>Prévisibilité</i>, ce qui signifie que l'éventail des scénarios possibles d'évolution géologique est suffisamment limité sur toute la durée pendant laquelle l'environnement géologique joue un rôle, dans le dossier de sûreté (ce qui peut représenter, par exemple, un million d'années).</p>

La construction d'un dossier de sûreté convaincant repose également sur la confiance que l'on parvient à établir grâce à un faisceau de preuves. Comme nous l'avons fait remarquer ci-dessus, la synthèse des connaissances géoscientifiques contribue à l'évaluation de la sûreté parce qu'elle constitue le fondement sur lequel reposent les paramètres du modèle ou les hypothèses de modélisation employés dans les calculs de performance du système de stockage. Ce sujet sera approfondi ultérieurement. La confiance naît lorsque l'on parvient à démontrer

5. Le texte cité dans ce tableau à la rubrique *Propriétés structurales, chimiques et physiques intéressantes* (« bien que ne relevant pas à strictement parler du dossier de sûreté, la faisabilité technique de l'ouvrage est un aspect pertinent dans la mesure où le système décrit dans le dossier de sûreté doit pouvoir être réalisé ») est directement extrait d'un rapport de la Nagra (2002b). D'après les évolutions récentes décrites dans le présent ouvrage, il semblerait que le lien entre la conception et la faisabilité techniques et l'élaboration du dossier de sûreté soit bien plus étroit.

que le modèle conceptuel du site concorde avec une large panoplie de mesures et observations provenant de diverses sources, y compris des expériences effectuées sur le terrain ou en laboratoire et l'observation de systèmes d'analogues naturels. Les données géologiques peuvent servir à confirmer le réalisme ou le conservatisme des valeurs des paramètres et des hypothèses employées dans les modèles. De même, les multiples preuves et arguments peuvent appuyer les principales hypothèses relatives aux caractéristiques du site et leur évolution à long terme dans le modèle du site.

Enfin, les informations géoscientifiques peuvent venir appuyer les arguments qualitatifs susceptibles de renforcer la crédibilité de la sûreté à long terme. Pour ce qui est de la géosphère, il peut s'agir de preuves de la validité du stockage géologique en tant que solution pour gérer les déchets – fondées, par exemple, sur des analogues naturels et sur les propriétés du système de stockage retenu, à savoir la prédominance du transport par diffusion dans la roche hôte. On notera avec intérêt que l'intégration des informations tirées d'analogues naturels aux dossiers de sûreté est restée limitée. D'aucuns estiment que ces analogues ne sont pas assez exploités pour faire connaître les dossiers de sûreté à des publics plus vastes (y compris de non spécialistes). Cela étant, les arguments qui sont fondés sur les analogues naturels ne sont pas toujours simples et faciles à comprendre pour ces publics. De plus, à côté de ces analogues qui vont dans le sens des hypothèses faites dans les évaluations et le dossier de sûreté, on trouvera également des analogues qui les contredisent et qu'il convient d'expliquer si l'on ne veut pas les laisser démolir les arguments employés dans les dossiers de sûreté⁶.

Cette analyse des caractéristiques intéressantes de la géosphère nous conduit à évoquer un autre projet de l'AEN intitulé « *Stability et buffering capacity of the geosphere for long-term isolation of radioactive waste* », couramment appelé « projet sur la stabilité de la géosphère » qui avait été initialement proposé par le Club Argile de l'AEN et a été lancé en 2002⁷. Deux ateliers ont été organisés, le premier consacré aux roches argileuses (AEN, 2004a) et le deuxième aux roches cristallines (AEN, 2009a). Les conclusions du projet sur la stabilité de la géosphère mettent en évidence l'importance que revêt ce concept de stabilité dans tous les environnements de stockage possibles et ainsi que pour la constitution d'un dossier de sûreté convaincant. Elles abordent également les effets de la stabilité sur l'emplacement et l'architecture du dépôt. La prise de conscience de cette importance et de la compréhension de ce qu'est la stabilité pour les dossiers de sûreté est en soi un bon exemple de l'évolution du rôle des géosciences dans la gestion des déchets radioactifs.

6. Nous évoquerons ci-après à la section intitulée « collecte d'informations géoscientifiques et possibilités de les transposer » le problème de la transposition des données géologiques, y compris des données sur les analogues, d'un site à un autre et d'un environnement géologique à un autre environnement géologique.
7. Pour les besoins du projet sur la stabilité de la géosphère, on avait défini la stabilité d'une roche cristalline comme étant la présence de conditions mécaniques, thermo-hydrogéologiques et chimiques favorables à la sûreté d'un stockage de déchets nucléaires. Dans ce sens, le terme « stabilité » ne désigne pas un état permanent. La géosphère évolue constamment, bien que, le plus souvent très lentement, une évolution qui est parfaitement acceptable du point de vue du stockage géologique. L'important est de comprendre cette évolution.

Arguments et preuves de cette sûreté

Quel que soit le type particulier de milieu géologique et de stockage de dépôt, il existe des arguments et des preuves en faveur de la sûreté du stockage que l'on peut classer selon qu'ils démontrent l'isolement des déchets ou leur rétention dans le champ proche du dépôt et la géosphère environnante. L'applicabilité de ces arguments est susceptible de varier en fonction des échéances considérées. Si l'on envisage de les utiliser, il convient bien sûr de tenir compte des preuves allant dans le même sens que l'on a recueillies sur place et, inversement, des types de données de terrain qui pourraient contrarier ces arguments. Avant de présenter ces arguments dans un dossier de sûreté, il importe de décider quels sont les messages qui sont le plus susceptibles d'en asseoir la crédibilité scientifique.

À l'issue des débats qui ont eu lieu dans le cadre du deuxième atelier AMIGO (AEN, 2007), on est parvenu à la conclusion que le meilleur moyen de décrire la situation de ces arguments géoscientifiques consistait à établir cinq catégories d'importance primordiales pour les fonctions de sûreté liées à la géosphère et qui se rapportent à l'utilisation des informations géoscientifiques dans un dossier de sûreté, comme le montrent les tableaux 1 et 2, à savoir:

- la facilité de compréhension et de modélisation des écoulements d'eaux souterraines ;
- la rétention des radionucléides qui seraient relâchés ;
- la prévisibilité de la composition des eaux souterraines ;
- la prévisibilité géologique et mécanique de la formation hôte ;
- l'absence de ressources dans cette roche hôte (et dans son voisinage immédiat).

Pour chacune de ces catégories, les participants ont dégagé le raisonnement et les arguments à développer, la façon de les appliquer dans chacune des roches hôtes ou des milieux géologiques intéressants et la possibilité de les appliquer aux différentes échéances. Ont été également identifiées des données recueillies sur le terrain et d'autres preuves qui tendraient à neutraliser ces arguments. Les participants ont également recherché les messages qui contribueraient le mieux à la crédibilité scientifique d'un dossier de sûreté.

Le deuxième atelier AMIGO est parvenu aux conclusions suivantes concernant l'emploi des arguments géoscientifiques en faveur de la sûreté mais aussi comme indicateurs de cette sûreté :

- Le plus important argument géoscientifique est une bonne intelligence de l'histoire géologique du site et de son environnement. Cette compréhension doit concorder avec les connaissances que l'on a sur des milieux géologiques semblables et faire l'objet d'un vaste consensus parmi les experts.
- Les preuves en faveur de la sûreté reposent, pour la plupart, sur un enchaînement d'arguments qui, ensemble, sont plus convaincants et puissants que tout argument unique.
- Les études géoscientifiques doivent tendre à établir un niveau de prévisibilité jugé « raisonnable ». Tant qu'il est possible de fixer des

limites raisonnées à l'évolution future du site, le dossier de sûreté peut être présenté et défendu, ce qui implique qu'il n'est plus nécessaire de procéder à une description détaillée de cette évolution, une opération qui pourrait de toute façon se révéler impossible.

- Ce même type d'argument s'applique généralement à toutes les roches hôtes et milieux géologiques même s'il peut varier par sa puissance, sa facilité d'emploi et l'échelle de temps sur laquelle il est valide. Ces arguments conviennent en général mieux à des systèmes simples du point de vue géologique – ce qui est directement lié à l'exigence d'explorabilité et à d'autres propriétés intéressantes de la géosphère (voir tableau 1).

Il a été également conclu que les échanges d'expérience entre programmes sont une forme capitale d'examen par des pairs et ne peuvent qu'améliorer les arguments géoscientifiques employés.

Le dernier alinéa traitant de la simplicité géologique est important à plusieurs égards déterminants pour l'élaboration d'un dossier de sûreté convaincant :

- Il sera considérablement plus facile d'apporter la preuve que l'on peut se fier aux propriétés et au fonctionnement futurs de la géosphère si l'environnement géologique (et, corrélativement, les environnements hydrogéologiques et hydrogéochimiques) est relativement simple.
- À cela, deux raisons principales : tout d'abord, on aura moins de mal à obtenir les informations indispensables pour prouver que la confiance existe (voir le concept d'explorabilité de la Nagra, expliqué dans le tableau 1) ; et deuxièmement, il y aura moins de modèles conceptuels de rechange pour la géosphère et moins d'incertitudes sur ses propriétés et caractéristiques. La synthèse des connaissances géologiques sera donc plus simple à préparer et devrait être, par là-même, plus convaincante.
- La réduction des incertitudes sur les propriétés et le fonctionnement de la géosphère qui en résultera faciliteront l'élaboration d'un dossier de sûreté convaincant. Ce sera d'autant plus vrai des concepts de stockage où la géosphère contribue davantage que les barrières ouvragées à la sûreté à long terme.

Le tableau 2 montre comment sont appliquées, pour démontrer les diverses fonctions de sûreté de la géosphère, les informations géoscientifiques de différents types⁸. Bien que disponibles, certaines informations ne sont pas largement employées ou, au contraire, sont jugées inadaptées aux dossiers de sûreté, ce que nous avons également indiqué. Ce tableau est, bien sûr, quelque peu simplifié mais, lorsque possible, nous avons donné à titre d'illustrations des exemples tirés de programmes nationaux. Les termes *quantitativement* et *qualitativement* servent dans ce tableau à qualifier la façon dont les données sont utilisées dans le dossier de sûreté. Celles qui sont employées quantitativement renseignent directement sur un processus ou événement et peuvent être

8. Nous verrons ultérieurement la façon dont ces informations géoscientifiques sont structurées avant leur emploi dans un dossier de sûreté.

Tableau 2. Types particuliers d'informations géoscientifiques employées dans les dossiers de sûreté

Le tableau décrit la façon dont certains types d'informations géoscientifiques servent dans les dossiers de sûreté à démontrer les diverses fonctions de sûreté de la géosphère, à savoir isoler les déchets, faire obstacle à la migration des radionucléides et à prouver la stabilité et la prévisibilité à long terme de la géosphère. L'emploi des adverbess *quantitativement* et *qualitativement* est expliqué dans le texte.

Type d'informations	Isolation des déchets	Barrières
Signatures isotopiques	Informations non utilisées ordinairement ou considérées comme inadaptées	Quantitativement
Composition des eaux souterraines	Quantitativement et qualitativement	Quantitativement et qualitativement
Flux naturels	Qualitativement	Quantitativement (en théorie, mais pas souvent dans la pratique) et qualitativement
Température	Informations non utilisées ordinairement ou considérées comme inadaptées.	Qualitativement et quantitativement
Remplissage des fractures	Quantitativement et qualitativement	Quantitativement et qualitativement
Géologie structurale	Quantitativement et qualitativement	Quantitativement et qualitativement
Géomorphologie	Quantitativement (lorsque le soulèvement est important) et qualitativement	Quantitativement et qualitativement

exploitées sans transformation dans un modèle, par exemple. Les données que l'on exploite qualitativement viennent appuyer ou compléter des informations concernant des processus et événements, mais ne peuvent être entrées directement dans un modèle.

Tableau 2. Types particuliers d'informations géoscientifiques employées dans les dossiers de sûreté

Le tableau décrit la façon dont certains types d'informations géoscientifiques servent dans les dossiers de sûreté à démontrer les diverses fonctions de sûreté de la géosphère, à savoir isoler les déchets, faire obstacle à la migration des radionucléides et à prouver la stabilité et la prévisibilité à long terme de la géosphère. L'emploi des adverbess *quantitativement* et *qualitativement* est expliqué dans le texte.

Stabilité et prévisibilité à long terme	Commentaires et exemples
Qualitativement et quantitativement (en fonction de leur pertinence pour contraindre les modèles)	Employées effectivement et efficacement. Intérêt particulier dans le cas des milieux argileux, par exemple pour la préservation des profils de diffusion. Utiles pour la reconstitution détaillée de conditions antérieures, par exemple l'analyse des minéraux de remplissage de fractures.
Quantitativement et qualitativement	La composition des eaux souterraines est une donnée primordiale pour évaluer l'évolution et la stabilité des barrières ouvragées ainsi que pour calculer les paramètres employés dans les modèles de migration. La préservation de type d'eaux souterraines stratifiées, même sur des sites recouverts dans le passé d'épaisses couches de glace, par exemple Olkiluoto, en Finlande, donne à penser que les systèmes hydrogéologiques et hydrogéochimiques sont bien protégés.
Qualitativement	Informations sous utilisées, théoriquement intéressantes mais peuvent être quelque peu obscures. Des analogues naturels, tels que des gisements d'uranium, peuvent servir à représenter le comportement à long terme des stockages de déchets radioactifs ou les processus qui influent sur leur contenu radioactif.
Qualitativement et quantitativement	On a besoin des distributions de température pour les employer comme conditions initiales dans les évaluations de l'évolution thermique du site. Les profils de température peuvent également servir, par exemple à justifier les valeurs calculées de la conductibilité thermique (voir e.g. SKB in SKB, 2008).
Quantitativement et qualitativement	Peut fournir des informations utiles pour la reconstruction paléohydrogéologique (voir, par exemple, Sellafeld) et révéler l'absence de mouvement de fluides (par exemple, argile de Boom, argile du Callovo-Oxfordien).
Quantitativement et qualitativement	Est, en général, effectivement et efficacement employée. C'est un impératif absolu dans tous les milieux géologiques – même si son importance paraît plus grande pour les roches cristallines où les zones de déformation sont omniprésentes et sont déterminantes pour les systèmes hydrogéologiques, l'architecture du dépôt, etc.
Quantitativement et qualitativement	En usage, mais encore en cours de développement. Revêt une importance plus grande dans les dossiers de sûreté de zones à la topographie marquée ou de forte surrection (par exemple, au Japon et en Suisse). Compte également dans les sites côtiers, en particulier lorsqu'on étudie la biosphère future.

Collecte d'informations géoscientifiques et possibilité de les transposer

L'un des principaux objectifs d'un programme de caractérisation d'un site consiste à recueillir des données à intégrer au dossier de sûreté. De ce fait, il est

Tableau 2. Types particuliers d'informations géoscientifiques employées dans les dossiers de sûreté (suite)

Type d'informations	Isolation des déchets	Barrières
Expériences <i>in situ</i>	Informations non utilisées ordinairement ou considérées comme inadaptées.	Quantitativement et qualitativement
Analogues naturels	Qualitativement	Quantitativement et qualitativement
Modèles conceptuels et numériques alternatifs	Quantitativement	Quantitativement

évident que l'évaluation des performances doit avoir un impact considérable sur la portée et le contenu de ce programme. Dans la pratique, toutefois, il est parfois difficile d'établir cette relation directe.

Les paramètres et propriétés du site employés dans l'évaluation de sûreté ne sont presque jamais directement mesurables, à l'exception parfois de certaines propriétés géométriques d'un site, par exemple, les limites de la formation géologique. Dans certains cas, l'inclusion de ces éléments géométriques ne sera possible que dans des environnements sédimentaires ayant une structure géologique simple, autorisant une mesure directe, parfois même très précise.

Alternativement, ces paramètres et propriétés du site peuvent être tirés d'une longue série d'observations, de l'interprétation des données et de la construction de modèles et de l'intégration de modèles séparés. D'ailleurs, les mesures ne peuvent couvrir qu'une petite fraction du volume de la géosphère à modéliser. De plus, la majorité des propriétés du site varient dans l'espace, mais aussi probablement dans le temps. Leur extrapolation à trois dimensions exige de recourir à des hypothèses supplémentaires, avec la modélisation associée, avant de pouvoir passer au type de modélisation nécessaire dans une évaluation des performances. De plus, comme nous l'avons vu précédemment, la fourniture de données géoscientifiques pour l'évaluation des performances représente une partie seulement des exigences imposées à la réalisation d'un programme de caractérisation du site. Dans leur majorité, les données recueillies risquent de ne pas être employées, ni directement, ni indirectement, dans une évaluation des performances. Elles seront bel et bien utilisées, en revanche, pour acquérir une compréhension approfondie du site et de la zone où il se trouve, dans le cadre du dossier de sûreté. La conception technique du dépôt exige également beaucoup de données. De fait, sur la durée du projet AMIGO, on a pu observer que l'obtention de données propres à la conception technique du stockage prenait de l'importance en même temps que l'on prenait conscience de l'intérêt d'intégrer les exigences techniques du stockage des déchets aux aspects géoscientifiques.

Tableau 2. **Types particuliers d'informations géoscientifiques employées dans les dossiers de sûreté (suite)**

Stabilité et prévisibilité à long terme	Commentaires et exemples
Semi-quantitativement et qualitativement	Ont été effectivement et efficacement employées pour tous les environnements géologiques. Peuvent servir de manière quantitative ou semi-quantitative lorsqu'il s'agit d'étudier la stabilité et la prévisibilité à long terme, notamment des mesures de convergence effectuées dans un laboratoire souterrain sur de nombreuses années.
Quantitativement	En général sous-utilisés bien qu'il soit souvent fait mention de leur utilité potentielle. Le recours à des informations provenant d'analogues naturels dans un dossier de sûreté se limite souvent à un processus particulier ou à une partie du système auxquels on peut prouver qu'elles sont transposables (par exemple, interaction d'eau hyperalcaline avec la matrice rocheuse – Maqarin, Jordanie).
Quantitativement	Sont effectivement et efficacement employés sachant que l'on recourt de moins en moins à des modèles conceptuels alternatifs à mesure que le programme avance car la collecte de grandes quantités de données impose de se limiter à un modèle privilégié, le modèle géologique unique d'Olkiluoto, par exemple.

également beaucoup de données. De fait, sur la durée du projet AMIGO, on a pu observer que l'obtention de données propres à la conception technique du stockage prenait de l'importance en même temps que l'on prenait conscience de l'intérêt d'intégrer les exigences techniques du stockage des déchets aux aspects géoscientifiques.

L'application des géosciences à la gestion des déchets radioactifs a considérablement progressé au cours des dix dernières années. Ces progrès s'expliquent, pour beaucoup, par une meilleure appréciation et une compréhension plus profonde de la complexité des systèmes géologiques, à laquelle il faut ajouter l'évaluation de l'importance, ou non, de cette complexité dans des environnements géologiques. De plus, on a pris conscience qu'il était nécessaire de contraindre les interprétations du comportement et du fonctionnement de la géosphère. La complexité de la géosphère, en effet, aura été déterminée par son évolution, peut-être sur de nombreuses ères géologiques – une évolution qui se poursuit aujourd'hui et se poursuivra demain. De ce fait, il existera toujours, dans la caractérisation physique et chimique de la géosphère, une certaine incertitude qui influera sur la compréhension que l'on a de son comportement et de son fonctionnement sur les échelles spatiales et temporelles indispensables pour démontrer la sûreté d'un stockage géologique ainsi que sur la confiance qu'on leur accorde. Cette incertitude réside en partie dans notre incapacité d'effectuer des mesures directes et intégrales de la géosphère qui puissent représenter davantage qu'un intervalle étroit de la vie d'un système qui évolue lentement. Malgré ces limites, il est possible de parvenir à une compréhension géoscientifique raisonnée du comportement actuel et historique de la géosphère et de son évolution future. Cette compréhension ne sera jamais ni complète ni précise, mais on pourra la borner suffisamment pour réduire toutes les ambiguïtés éventuelles et définir les niveaux d'incertitude.

La majorité des techniques de reconnaissance des sites existent depuis longtemps déjà, mais certaines d'entre elles ont effectué des progrès considé-

rables depuis les dix dernières années en particulier en géophysique, et plus précisément sismique. Ces progrès permettent de définir des structures à des profondeurs de plusieurs centaines de mètres, voire davantage, avec une résolution qui peut se limiter à quelques mètres dans des conditions favorables (par exemple, Davies *et al.*, 2004). Ces techniques, qui concernaient surtout des environnements sédimentaires (voir leur utilisation pour les études de l'argile à Opalinus, Nagra (2002a) et AEN (2004b)) ont été, ces dernières années étendues, aux roches cristallines (par exemple, études de SKB (notamment Cosma *et al.*, 2003) ou de Posiva à Olkiluoto (Cosma *et al.*, 2008)). On a également davantage exploité l'expérience de l'industrie des hydrocarbures et des universitaires pour la caractérisation des sites dans les programmes de stockage des déchets radioactifs. L'impact a été probablement plus important pour l'étude d'environnements sédimentaires, car les transferts d'expériences sur des sujets tels que l'évolution des bassins et la diagénèse ont été plus importants que dans les roches cristallines.

Les transferts de données ont également été importants dans le domaine de la gestion et de l'organisation d'importants jeux de données pluridisciplinaires de caractérisation du site, avec les programmes de simulation associés, dont nous avons évoqué ci-dessus l'emploi dans les roches sédimentaires. Pour ce qui concerne les milieux cristallins, en particulier les terrains volcaniques ou tectoniques plus complexes, les apports de l'université et d'autres secteurs de la recherche, travaillant notamment sur le risque sismique, ont été plus développés que pour les environnements sédimentaires comme le montre la publication AEN (2009a) à propos de la stabilité et de la capacité des systèmes géologiques de jouer le rôle de tampon.

Les exigences qu'imposent les spécifications des dossiers de sûreté se sont traduites par un effort considérable pour améliorer la mesure de certains paramètres dont la chimie des eaux interstitielles, la conductivité hydraulique de fractures isolées et la conductibilité thermique in situ, effort qui a largement dépassé ce qui est exigé normalement dans des programmes de reconnaissance de sites dans d'autres domaines, et notamment l'évaluation de minéraux⁹. Des techniques adaptées existent déjà pour mesurer la majeure partie de ces paramètres, mais l'on a encore besoin d'acquérir de la pratique avant de

9. De nombreux rapports établis dans le cadre de programmes actuels et passés de caractérisation des sites de stockages de déchets radioactifs décrivent la façon dont sont employées les multiples techniques nécessaires pour étudier de façon approfondie l'environnement géologique. Pour les roches cristallines, ce sont probablement SKB et Posiva qui ont publié le plus grand nombre de rapports, tandis que, pour les milieux sédimentaires, l'Andra et la Nagra en ont publié un bon nombre. Les rapports des études effectuées à Yucca Mountain sont probablement les plus pertinents concernant les environnements tectoniquement actifs que l'on trouve notamment au Japon. Des travaux effectués sur des évaporites, notamment dans le cadre de WIPP, sont représentatifs de l'influence sur ces programmes de caractérisation de techniques de reconnaissance mises au point dans l'industrie des hydrocarbures, voir par exemple, Beauheim *et al.*, dans AEN (2007), et illustrent les possibilités d'investigations souterraines par la cartographie, les forages et des mesures de réflexion électro-magnétique (Bornemann *et al.*, 2008). Il y a également des parallèles intéressants à faire entre le stockage des déchets radioactifs et celui du CO₂, ce que démontrent Whittaker dans AEN (2007), mais aussi, plus près de nous, Bachu et McEwen (à paraître en 2009).

pouvoir les utiliser avec le maximum d'efficacité. C'est particulièrement vrai lorsque le programme d'aménagement de dépôts a atteint le stade de la construction souterraine, ce qui est le cas d'ONKALO sur le site d'Olkiluoto, en Finlande ou de la mine d'étude de Gorleben en Allemagne. Il existe, par exemple, des contraintes pratiques qui restreignent les possibilités de recueillir des données géologiques pendant la construction et que l'on doit bien comprendre si l'on veut exploiter au mieux cette phase pour obtenir des informations sur des volumes de masse rocheuse considérablement plus importants que si l'on se contente de pratiquer des forages depuis la surface (voir, par exemple, Posiva, 2009).

Les conclusions de l'atelier AMIGO-2 ont mis en évidence l'importance de trois éléments d'un programme de caractérisation d'un site :

- Un groupe de pilotage externe, une expertise périodique du programme, voire les deux, sont des moyens de s'assurer de la pertinence des travaux géoscientifiques entrepris dans le cadre du programme. Les autorités de contrôle peuvent aussi participer au processus de décision pour définir les études et travaux expérimentaux à effectuer ultérieurement.
- La confiance acquise dans les données géoscientifiques sur un site hôte potentiel renforce la capacité des autorités de contrôle de prendre des décisions crédibles et défendables en matière d'autorisation. Il est donc primordial de maintenir des relations entre autorités de contrôle et gestionnaires de déchets. Les exemples de cette collaboration bénéfique sont nombreux dans plusieurs programmes de gestion.
- Il peut être intéressant de publier les jeux de données géoscientifiques dans la littérature spécialisée afin de favoriser leur utilisation pour de nouvelles recherches. La publication de ces données est en effet de nature à encourager des collaborations entre le programme de stockage, les industriels ou les universitaires. L'emploi de ces données dans des secteurs autres que le stockage des déchets radioactifs a des répercussions évidentes sur la gestion de ces jeux de données et leur publication.

On a vu émerger, au cours des dix dernières années notamment, la nécessité de concevoir un programme de caractérisation du site qui soit convenablement intégré aux parties géologique, hydrogéologique, hydrogéo-chimique et géotechnique du programme. Cette intégration devient cruciale si l'on considère la modélisation nécessaire et l'emploi ultérieur de ces données de modélisation dans le dossier de sûreté, un sujet que nous abordons plus en détail ci-après.

Possibilité de transposer les données recueillies sur d'autres sites, dans des laboratoires en surface et des laboratoires de recherche souterrains

Transposer des données et autres informations entre sites peut se révéler un moyen important d'utiliser au mieux les informations disponibles sur des types spécifiques de roche ou de milieu géologique. Néanmoins, cela a des implications importantes, qui ont trait à la possibilité de transposer à des sites de stockage pressentis dans des environnements géologiques proches des données recueillies par d'autres programmes de stockage, dans des laboratoires, qu'ils soient ou non souterrains, spécifiques au site ou se consacrent à des recherches générales.

Cette transposition est pourtant assez courante. On en trouve de multiples exemples dans tous les types d'environnements géologiques intéressants du point de vue du stockage des déchets radioactifs. Mazurek *et al.* (in AEN, 2007) et Mazurek *et al.* (2008) analysent ce sujet en se référant notamment aux roches argileuses et aux programmes de l'Andra et de la Nagra.

Comme Mazurek *et al.* le montrent (AEN, 2007), la transposition d'informations peut intervenir à divers niveaux : paramètres individuels, techniques d'investigation et méthodes d'évaluation, compréhension du processus, modèles conceptuels et conclusions importantes (faisabilité technique, tout ce qui concerne la sûreté).

Dans les systèmes argileux, la structure microscopique gouverne bon nombre de propriétés macroscopiques, y compris les propriétés géochimiques ou de transport, et elle est essentiellement déterminée par les propriétés des plaquettes des minéraux argileux. Ce type de microstructure est commun à tous les systèmes argileux et de lui dépend la possibilité de transposer des données entre sites et formations différents. Il existe toutefois des disparités entre formations argileuses qui sont principalement dues à des facteurs tels que la variation du degré de compression (et, partant, de la porosité) ainsi que du degré de cimentation diagénétique si bien qu'il faut bien connaître ces caractéristiques des milieux argileux pour transposer de manière satisfaisante les données.

Dans les roches cristallines, on note des différences d'autre nature qui seraient davantage liées à des facteurs tels que l'histoire tectonique et les niveaux métamorphiques maximum des sites plutôt qu'au type de roche spécifique. Par exemple, le laboratoire souterrain de recherche d'Äspö, en Suède, est considéré comme un laboratoire applicable à n'importe quel site de stockage potentiel aménagé dans le bouclier précambrien fennoscandien ; les données provenant d'Äspö peuvent donc être jugées tout aussi applicables à un milieu cristallin au Japon dans des roches beaucoup plus jeunes.

Pour les évaporites, et en particulier les roches salines, les informations sont probablement davantage transposables globalement d'un site à l'autre étant donné qu'il existe moins de différences importantes entre formations. Ces évaporites ont néanmoins des caractéristiques qui revêtent une importance considérable pour le confinement assuré par la roche hôte (fonction de sûreté primordiale), *i.e.* le nombre et la taille d'inclusion d'eaux saumâtres ou la géométrie des corps anhydrides, qui ne peuvent être étudiés que sur le site particulier envisagé.

Les raisons de transposer d'un site à l'autre des caractéristiques, événements, données et connaissances sont variables. Les programmes nationaux de stockage peuvent avoir atteint des stades variés de leur évolution et ils peuvent également suivre des stratégies différentes pour établir leur dossier de sûreté. Il existe plusieurs raisons de transposer des informations entre formations et sites :

- Les informations provenant d'autres sites peuvent être exploitées pour combler des lacunes d'un programme national particulier et disposer de données indispensables pour un dossier de sûreté préliminaire. Par exemple, on pourra justifier l'extrapolation des mesures faites en laboratoire à des conditions *in situ* si les deux types de données se retrouvent dans d'autres programmes. Le catalogue de caractéristiques établi par le Club Argile de l'AEN (Boisson, 2005) ou le catalogue de

caractéristiques, événements et processus des systèmes argileux (FEPCAT, Mazurek et al., 2003) en sont des exemples.

- On a recours à des informations sur d'autres sites pour démontrer que la formation ou le site étudié n'ont rien d'inhabituel et, au contraire, qu'ils possèdent des caractéristiques qui correspondent à d'autres formations ou milieux géologiques équivalents. La convergence de programmes indépendants vers des jeux de données et conclusions cohérentes inspire confiance dans le programme national. À titre d'exemple, on retiendra les formes de démonstration des propriétés auto-cicatrisantes des formations salifères ou des argiles ou le maintien de conditions réductrices à grande profondeur, même au cours des périodes glaciaires, dans des roches cristallines.
- L'identification de différences flagrantes peut servir à orienter des recherches ultérieures. On mettra au point des techniques d'investigation spéciales qu'on évaluera dans les laboratoires souterrains de recherche pour les employer ensuite ailleurs à la caractérisation d'un site. Ce pourrait être le cas d'un équipement géotechnique et de techniques d'essai que l'on mettrait au point.
- Il est possible de transposer, de sites ou laboratoires souterrains de recherche analogues, des modèles conceptuels portant sur différents niveaux (caractéristiques et processus individuels, leur couplage et leur importance pour la sûreté). On citera, par exemple, l'identification de mécanismes de transport pertinents dans la géosphère et le rôle des fractures naturelles ou induites sur les écoulements et les mécanismes de transport.
- La transposition d'informations sur les aspects techniques du stockage des déchets peut être d'égale, voire de plus grande importance, que les transferts rendus possibles par l'enrichissement des connaissances sur les processus naturels. À titre d'exemple, on pourra transposer entre sites des informations relatives aux techniques de construction, à la modélisation géotechnique et à l'architecture et la conception du dépôt.

Cette transposition se fait à différents niveaux suivant le stade d'avancement du dossier de sûreté et l'importance des analogies qui peuvent être trouvées entre sites et formations concernés. Aux premiers stades de l'élaboration d'un dossier de sûreté, ces informations peuvent être transposées d'autres sites afin de combler des lacunes dans la caractérisation du site et d'obtenir un jeu de données indispensable pour établir un premier dossier de sûreté. À ce stade, les conditions de cette transposition ne sont pas forcément bien définies. Dans des dossiers de sûreté plus avancés, la transposition d'informations se justifie moins par la nécessité de combler des lacunes que par la volonté de mieux comprendre les processus et de gagner en confiance, par exemple, en établissant des relations empiriques dans lesquelles interviennent des informations sur divers sites et milieux.

Intégration et gestion des informations géoscientifiques utilisées dans un dossier de sûreté

Comme nous l'avons vu ci-dessus, l'intérêt de réunir, d'interpréter et de modéliser des données géoscientifiques de manière structurée et intégrée s'est fait particulièrement sentir au cours des vingt dernières années. C'est probablement la Nagra qui a, la première, adopté cette approche structurée pour l'élaboration de son dossier de sûreté de l'argile à Opalinus (Nagra, 2002b). D'autres organismes de gestion des déchets lui ont emboîté le pas, notamment l'Andra, NUMO, la SGDN (NWMO), SKB et Posiva. Comme l'intégration de ces données géoscientifiques s'est révélée très importante, l'efficacité et la réussite de cette intégration sont devenues impératives, un aspect qui a été souligné dans les quatre rapports consacrés à AMIGO (AEN, 2004b, 2007, 2008, 2009b).

Synthèse des connaissances géologiques et modèle descriptif du site

Le dossier de sûreté d'un stockage géologique doit fournir des arguments rationnels et complémentaires démontrant et suscitant la confiance dans les estimations concernant le fonctionnement à long terme de cette installation. La sûreté à long terme inhérente au concept de stockage géologique repose en partie sur la stabilité à long terme de la géosphère environnante et sur les barrières multiples conçues pour immobiliser les déchets et ralentir la migration des contaminants. L'une des phases importantes du dossier de sûreté est l'obtention d'un modèle intégré de la géosphère que l'on appelle synthèse des connaissances géologiques, un terme employé d'abord par la Nagra, mais qui s'est répandu depuis (*e.g.*, chez NUMO et la SGDN, et qui devrait recouvrir non seulement le site lui-même mais également l'environnement géologique avoisinant.

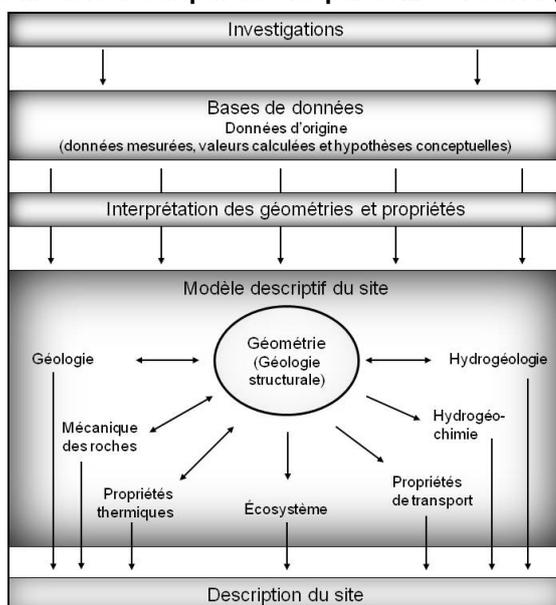
Cette synthèse des connaissances géologiques représente l'intégration de données pluridisciplinaires propres au site dans une compréhension ou conception cohérentes internes de l'environnement géologique et de son évolution. Le terme *géosphère* intègre en l'occurrence tous les aspects de la géologie, de l'hydrogéologie, de l'hydrochimie, etc., du milieu géologique. Cette synthèse peut donc être définie comme un rapport ou ensemble de rapports et dossiers contenant une explication géoscientifique de la connaissance globale que l'on a des caractéristiques, des attributs et de l'évolution du site (passés et futurs) et qui permettent de démontrer (au sens d'acquérir confiance dans) le fonctionnement et la sûreté à long terme du stockage. Cette synthèse inclut des modèles (descriptifs, mathématiques, conceptuels et du site par exemple) et tient compte des incertitudes et des autres interprétations géoscientifiques possibles des données disponibles.

Enfin, cette synthèse constitue le socle scientifique sur lequel se fonder pour communiquer la confiance et la compréhension que l'on a du fonctionnement et de la stabilité à long terme de la géosphère. Dans ce sens, elle fournit une compréhension holistique du site. C'est également un support technique pour rationaliser les études effectuées dans le cadre de l'évaluation de sûreté et pour élaborer des arguments géologiques complémentaires à l'appui du dossier de sûreté du stockage. Bien que le gestionnaire de déchets établisse normalement cette synthèse qui représente un travail considérable, l'autorité de contrôle peut décider de procéder à une interprétation géologique, hydrogéologique et

géochimique indépendante de la base de données géologiques du gestionnaire de déchets, et devrait logiquement présenter ses observations sur la justification scientifique et la valeur de cette synthèse (Bluth, in AEN, 2004b).

Une autre terminologie est également employée pour parler de l'intégration des données géologiques d'un site. Posiva et SKB – voir par exemple KB (2008) – ont choisi notamment le modèle descriptif du site, qui, bien que proche de la synthèse des connaissances géologiques n'est pas parfaitement synonyme (figure 1). Le modèle descriptif du site diffère principalement par le fait qu'il est délibérément séparé de l'évaluation de sûreté. Les rapports décrivant les données employées dans la modélisation effectuée pour le dossier de sûreté et l'évolution future du site sont établis par ailleurs. D'autres organismes de gestion des déchets ont adopté une approche encore différente pour présenter ces informations. C'est le cas notamment du Dossier Argile de l'Andra (Andra, 2005b)¹⁰.

Figure 1. Illustration de la façon dont est effectuée la description intégrée du site appelée **Modèle descriptif du site** par SKB et Posiva (tiré de SKB).



La synthèse des connaissances géologiques marque par conséquent un progrès par rapport au modèle descriptif du site dans la mesure où elle illustre l'évolution passée du site, son état présent et son évolution future probable en

10. L'Andra établit deux documents présentant le type d'informations qui seraient normalement contenues dans une synthèse des connaissances géologiques ou dans un modèle descriptif du site. Il s'agit (i) du référentiel du site, une synthèse des données brutes acquises et interprétées assortie d'une analyse des incertitudes de toutes sortes (intervalles de porosité et de perméabilité, incertitudes liées aux valeurs de la pression, etc.) et (ii) d'un modèle conceptuel qui correspond à une courte présentation des modèles conceptuels et phénoménologiques (s'appuyant sur des valeurs mesurées, les résultats des modélisations, des argumentations) qui constituent la base de la description de l'évolution du stockage.

faisant spécifiquement référence au dossier de sûreté. Cela consistera, par exemple, i) à illustrer les arguments multiples qui viennent appuyer la compréhension que l'on a de l'évolution du site ; ii) à imposer des contraintes à l'intégrité et aux performances des barrières dans le champ lointain en utilisant pour ce faire des analogues du site, par exemple (notamment des charges hydrauliques anormales ; la profondeur maximale de la recharge en temps glaciaire, etc.), et iii) à présenter un document qui démontre la rigueur de l'évaluation et l'influence des incertitudes sur les prévisions. Bien que les gestionnaires de déchets adoptent diverses approches pour présenter les données géologiques, l'importance d'une description ou d'un modèle intégré de la géosphère n'en est pas moins universellement reconnue.

Comme on a pu le constater lors de l'atelier AMIGO-3 (AEN, 2009b), la tendance est aujourd'hui à établir une séparation nette entre l'élaboration de la synthèse des connaissances géologiques (ou d'un modèle descriptif du site) qui soit aussi réaliste que possible et l'évaluation de sûreté caractérisée par le fait que, puisqu'on cherche à prouver la conformité à la réglementation, il est fréquent qu'on adopte une démarche délibérément pénalisante, en général pour rendre compte de phénomènes mal compris ou d'incertitudes difficiles à quantifier ou pour pallier l'absence de modèles ou de bases de données suffisamment réalistes. Par exemple, les rapports établis par l'Andra pour le Dossier 2005 Argile (voir, par exemple, Lebon in AEN, 2009b) contiennent deux documents – l'un d'eux présente les informations géoscientifiques, l'autre justifie les hypothèses de modélisation effectuées pour l'évaluation de sûreté. On notera à cet égard qu'il n'est pas toujours facile de définir ce qui est pénalisant dans une évaluation de sûreté. Certains modèles et certaines bases de données peuvent être employés dans plusieurs applications pour cette évaluation, et un modèle qui sera pénalisant dans une application ne le sera pas nécessairement dans une autre. La difficulté de définir ce qui est « pénalisant » risque d'être encore plus grande lorsque l'on procède à une synthèse des connaissances géologiques et c'est l'une des principales raisons pour lesquelles SKB, par exemple, dissocie le modèle descriptif du site des prévisions concernant l'évolution future du site, qui sont elles, présentées dans l'évaluation de sûreté.

L'élaboration de la synthèse des connaissances géologiques crée le cadre structuré dans lequel pourra s'instaurer la confiance dans la compréhension de la géosphère. Le modèle est élaboré par un processus itératif qui combine, afin de tester et, le cas échéant, de modifier le modèle, des données géologiques, hydrogéologiques, géochimiques, paléohydrogéologiques, géophysiques et géomécaniques recueillies lors d'études successives de plus en plus détaillées. Cette synthèse sert plusieurs objectifs dont : i) la mise au point d'hypothèses facilitant la coordination et la planification des activités de caractérisation du site afin de mieux comprendre la géosphère et son évolution ; ii) une méthode systématique d'identification et de formulation des autres arguments géologiques prouvant la stabilité à long terme de la géosphère et iii) l'élaboration d'une base scientifique transparente et logique pour documenter et appuyer la modélisation des écoulements et du transport entre autres. Les méthodes employées pour organiser et structurer les preuves géoscientifiques afin de les exploiter au mieux dans le dossier de sûreté seront évoquées ci-après.

Communications interdisciplinaires et intégration des données

Pour mener à bien ce type de travail, il est nécessaire de mettre en place un système qui assure une communication efficace des informations et conceptions entre les différentes disciplines et qui garantisse une intégration suffisante des données de diverses natures. Il est de plus en plus fréquent de recourir à une *équipe de sûreté pluridisciplinaire* (appelée également *équipe du dossier de sûreté*) pour garantir l'intégration nécessaire entre l'évaluation de sûreté, la (conception) technique, la caractérisation du site ainsi que les études et recherches, tout en conservant une vision globale ainsi qu'une culture de sûreté satisfaisante, comme le décrit plus en détail le rapport sur l'initiative de l'AEN INTESC (AEN, 2009c).

Divers problèmes ont par le passé interdit d'utiliser efficacement dans les dossiers de sûreté les données tirées de la caractérisation des sites. Ainsi, comme on l'a souvent vu, la volonté de s'en tenir à des résultats solides, tels que des doses estimées, dans les évaluations de sûreté, a conduit à négliger d'intégrer complètement certaines données de caractérisation des sites à des preuves associées parce qu'elles ne facilitent pas directement ce type de calcul alors qu'elles auraient pu renforcer d'autres arguments importants dans le dossier de sûreté. En outre, il est arrivé que les problèmes de gestion et aspects pratiques dominent les programmes de caractérisation des sites et interdisent de répondre parfaitement aux besoins de l'évaluation de sûreté. Heureusement, ces problèmes ont été pour la plupart résolus en intégrant mieux la caractérisation du site et l'évaluation de sûreté à la majorité des programmes de stockage et en utilisant, pour faire le lien entre les deux activités, une synthèse des connaissances géologiques ou un modèle descriptif du site.

Il existe différentes manières de parvenir à cette intégration nécessaire et diverses conceptions de la façon de l'organiser. Plusieurs structures de management assez proches peuvent donc se révéler tout aussi valables, comme le montre le rapport sur l'initiative INTESC (AEN, 2009c). La riche expérience que nous acquise, pendant de longues années, grâce aux travaux de nombreux gestionnaires de déchets et organismes de contrôle, a prouvé que la constitution d'un groupe pluridisciplinaire intégré est une méthode appropriée et efficace pour établir une synthèse des informations géologiques et asseoir sa confiance dans une description ou un modèle conceptuel du site. Un groupe à l'image de l'équipe de modélisation d'Olkiluoto chez Posiva (OMTF), avec les autres groupes parallèles et analogues au sein de Posiva, ont les moyens de vérifier si toutes les données pertinentes sont exploitées, si l'on a bien pris en compte toutes les sources pertinentes d'incertitudes, si toutes les alternatives proposées ont un sens, et si l'on a bien exploré toutes les autres solutions possibles. Ces groupes doivent être composés de représentants des équipes chargées de dossier de sûreté si l'on veut favoriser les échanges fructueux entre l'équipe de modélisation et de caractérisation du site et celle chargée de l'évaluation des performances. On a désormais des exemples spécifiques de recours à cette approche pour élaborer la synthèse des connaissances géologiques ou le modèle descriptif du site chez la Nagra, l'Andra, NUMO, SKB, Posiva, etc. D'ailleurs, il est devenu clair, au cours des dix dernières années, que sans cette équipe multidisciplinaire ou sans l'une des structures de management du même type décrites dans le rapport INTESC (AEN, 2009c), il ne sera pas possible de réaliser l'intégration nécessaire et de faire reposer le dossier de sûreté sur les informations géoscientifiques exigées.

Transparence et traçabilité

La sélection et l'application dans une évaluation de sûreté des informations tirées de la caractérisation du site exigent d'être bien documentées, justifiées croisées avec d'autres références pour assurer la traçabilité des analyses présentées dans le dossier de sûreté. Les informations géoscientifiques fournissent non seulement les valeurs des paramètres à intégrer aux modèles d'évaluation de la sûreté mais également des preuves complémentaires de la valeur des hypothèses de modélisation telles que l'homogénéité et l'invariance temporelle de certains processus et caractéristiques géologiques. À cet égard, l'importance des catalogues de FEP a été soulignée lors du troisième atelier AMIGO. Le catalogue FEPCAT, élaboré pour les milieux argileux par le Club Argile de l'AEN (Mazurek *et al.*, 2003), en est un bon exemple et a d'ailleurs été évoqué précédemment dans cet ouvrage.

Cet impératif de traçabilité doit être pris en charge dès l'aube du projet pour éviter que la tâche ne devienne trop fastidieuse. La meilleure organisation consiste à soumettre les bases de données à une démarche d'assurance qualité, avec des procédures de qualification des « données externes », par exemple des données obtenues sur des puits d'hydrocarbures, et dont la qualité ne peut pas être facilement vérifiée. L'importance cruciale de ces procédures tient à la très longue durée de l'aménagement d'un stockage. En effet, un système d'archivage approprié est un moyen de préserver la mémoire de toutes les informations pertinentes dans l'entreprise, d'assurer la traçabilité des connaissances à mesure que le programme passe par des étapes successives et de faire en sorte que le personnel qui sera appelé ultérieurement à participer au projet accède à une excellente compréhension des travaux antérieurs. Cette démarche devrait, en outre, limiter les obligations de refaire certains travaux.

Autres aspects de la gestion des informations géoscientifiques dans des dossiers de sûreté

Certaines communications, de Nadeau *et al.* (AEN, 2004b) notamment, mais aussi des interventions lors du premier atelier AMIGO ont fait valoir que les programmes de gestion des déchets radioactifs pourraient utilement s'inspirer de l'expérience de l'industrie des hydrocarbures entre autres ainsi que des travaux universitaires pour ce qui est de la gestion et de l'organisation d'importants jeux de données géologiques de sources pluridisciplinaires ainsi que de l'élaboration de modèles conceptuels intéressant l'environnement géologique étudié. Dans un milieu sédimentaire, les modèles conceptuels des processus, tels que les évolutions diagénétiques et l'évolution des bassins peuvent présenter un intérêt. Dans des roches cristallines, ce sera, par exemple, l'évolution structurale des zones de déformation. C'est ainsi qu'un modèle de bassin a été utilisé pour reproduire les processus géologiques, physiques et chimiques qui se sont produits au cours des 248 millions d'années qu'a duré l'évolution du bassin parisien pour expliquer les propriétés hydrauliques actuelles de la région (Violette *et al.*, in AEN, 2004b). Ce modèle est contraint par divers types d'informations quantitatives et qualitatives issues de différentes disciplines scientifiques recouvrant la géologie, la palynologie (analyse des pollens afin de reconstituer des climats antérieurs), l'hydrogéochimie, la mécanique des roches, l'hydrogéologie et la climatologie.

Relations entre les informations géoscientifiques et la conception technique du stockage

À un certain stade de l'évolution d'un programme d'aménagement d'un dépôt, le concept de sûreté et la conception du dépôt doivent être adaptés aux conditions spécifiques du site qui sont caractérisées de manière de plus en plus détaillée au fil du programme. La conception du stockage et son architecture ne peuvent, par conséquent, être définies qu'à une étape relativement tardive et, de surcroît, sont susceptibles d'être modifiées par les informations supplémentaires que l'on peut obtenir sur la roche hôte. Le dossier de sûreté est élaboré parallèlement aux résultats du programme de caractérisation du site. Il peut aussi être mis à jour même après le début de l'exploitation du stockage si le programme de surveillance fournit de nouvelles informations géoscientifiques, par exemple sur l'impact de la construction et de l'exploitation de l'ouvrage.

À chaque étape, on étudie les répercussions des incertitudes que comportent les données géoscientifiques en effectuant des analyses qualitatives et quantitatives de sûreté. Ces répercussions sont ensuite prises en compte dans la conception de façon à augmenter la robustesse de l'ouvrage vis-à-vis des événements, processus et incertitudes les plus importants. Les communications présentées lors du troisième atelier AMIGO ainsi que la réflexion en groupes de travail ont fourni des exemples de la façon dont la disponibilité des données géoscientifiques est prise en compte dans le concept de sûreté, la conception du dépôt et le dossier de sûreté, et cela dans des programmes ayant atteint différents stades de développement (AEN, 2009b).

Pour adapter la conception du dépôt à la multiplication des informations propres au site, on pourra se fonder sur des préférences, consignes ou critères indiquant, par exemple, les conditions à remplir pour qu'un volume particulier de roche puisse recevoir des colis de déchets. Au moment de la conception, le rôle des données géoscientifiques et des préférences, consignes ou critères associés, varieront en fonction de l'étape de la planification et de la mise en œuvre du stockage. Ces données peuvent être employées dès les premières étapes pour définir, par exemple, un projet d'architecture de l'ouvrage en fonction d'informations tirées d'études effectuées depuis la surface. À des stades ultérieurs, elles serviront lors de décisions de construire une galerie, de creuser une alvéole de stockage ou encore d'utiliser l'alvéole pour y stocker des déchets par exemple.

Les spécialistes de Posiva, notamment, ont entrepris de définir des critères d'acceptation de la roche qui permettront de fixer l'emplacement, la longueur et l'orientation des galeries de stockage ainsi que l'emplacement des alvéoles dans le plancher des galeries (Posiva, 2008). SKB effectue des travaux analogues. Ils découlent d'un programme antérieur de classification des roches hôtes qu'ont décrit Andersson *et al.* (AEN, 2009b) et qui a été testé pendant la construction de l'installation ONKALO à Olkiluoto. Andersson *et al.* (*op. cit.*) évoquent également la mise au point chez SKB de critères de rejet des alvéoles de stockage fondés sur leur possibilité de glissement sur de longues fractures traversant les alvéoles de stockage à la suite d'un séisme.

Ces programmes ont été lancés afin de définir les objectifs de performance de la roche hôte et de mettre au point des critères d'acceptation de certains volumes de roche pour y stocker des déchets, dont des critères d'acceptation des alvéoles

de stockage (pour les concepts de stockage évoqués ci-dessus). Des programmes du même type ont été élaborés pour déterminer l'emplacement de modules de stockage de différents types de déchets dans le concept de l'Andra (voir Andra, 2005b par exemple). Les critères à développer et appliquer sont conçus de façon à intégrer toutes les exigences imposées par la sûreté à long terme et la conception. L'application de ces critères permet d'obtenir des estimations des conséquences attendues au voisinage de ces alvéoles ou modules de stockage ainsi que les probabilités d'écart par rapport à ces estimations, résultant par exemple d'événements perturbateurs tels que des séismes. Les stockages qui reposent sur des conceptions de l'ouvrage ou des concepts de stockage différents de ceux employés par SKB et Posiva, pour les roches cristallines, et par l'Andra, pour ce qui concerne l'argile, peuvent viser des performances différentes de la roche hôte, prendre en compte d'autres types de contraintes géologiques mais aussi de caractéristiques, événements et processus. Malgré cela, l'élaboration de ces critères sera très probablement fort ressemblante.

Tous les organismes de gestion des déchets suivent donc des chemins analogues pour ce qui concerne l'architecture et la conception du dépôt, avec des spécificités qui découlent des conditions géologiques propres au site et débouchent par conséquent sur des conceptions susceptibles de manifester une variabilité considérable. Il existe ainsi une relation étroite entre la collecte et l'intégration de données géoscientifiques, la conception des stockages et leurs caractéristiques techniques et l'élaboration des dossiers de sûreté.

Conclusions

Comme nous l'avons vu précédemment et nous le verrons à l'annexe A, on redoutait, avant le lancement du projet AMIGO, que les informations géoscientifiques ne soient pas suffisamment employées pour élaborer les dossiers de sûreté et que les concepts de sûreté aient sous-estimé la contribution fondamentale de la géosphère à la sûreté. Il y avait aussi d'autres problèmes qui étaient jugés compliquer la représentation de la géosphère dans les dossiers de sûreté.

L'importance des informations géoscientifiques pour la sélection du site est évidente et connue depuis longtemps. Toutefois, ce n'est que peu à peu que l'on a pris conscience de la place significative que ces informations peuvent prendre dans des évaluations de sûreté, comme l'ont démontré plusieurs projets de l'AEN et l'a confirmé le projet AMIGO. Dans un dossier de sûreté, elles jouent plusieurs rôles importants, au premier rang desquels le fait de constituer la base de connaissances qui servira à établir les valeurs des paramètres clés de l'évaluation des performances. Toutefois, la caractérisation du site et la compréhension géoscientifique sont des domaines qui débordent largement les limites des données strictement nécessaires à l'évaluation des performances, ainsi que nous l'avons démontré dans cet ouvrage.

Le projet AMIGO a révélé les progrès accomplis dans la manière de recueillir les données géoscientifiques et de les exploiter pour préparer un dossier de sûreté. Notamment, on a pris davantage conscience de la nécessité de tenir compte de la faisabilité technique et, dans l'analyse de questions géoscientifiques, de veiller à assurer la compatibilité avec les aspects techniques. Mais, avant tout, il faudra retenir que l'efficacité de l'application des informations géoscientifiques repose sur leur intégration à l'élaboration d'un dossier de sûreté mais aussi au processus global d'aménagement du dépôt. C'est peut-être le domaine où l'on a le plus progressé vers une exploitation efficace de ces données, un thème sur lequel la réflexion a été nourrie et dont l'importance a été soulignée sur toute la durée du projet AMIGO. Et de fait, la volonté d'intégrer fortement les données géoscientifiques à l'élaboration du dossier de sûreté continue de motiver certains projets entrepris dans le cadre du programme de travail de l'IGSC. On accorde beaucoup d'importance à la compréhension et aux informations géoscientifiques, mais l'accent sera mis, dans les années qui viennent, sur les problèmes techniques qui intéressent tant la géosphère que les composantes ouvragées d'un stockage, par exemple.

Le projet AMIGO avait pour objectif notamment de favoriser des échanges d'informations entre programmes géoscientifiques internationaux de gestion des déchets radioactifs ainsi qu'entre les instances universitaires, autorités de

contrôle et organismes de gestion des déchets. À cet égard, ce fut un succès, notamment si l'on considère les relations entre les gestionnaires de déchets et les autorités de contrôle, un sujet qui figurait au nombre des principaux messages du projet GEOTRAP (AEN, 2002).

Avec la fin de trois projets majeurs portant sur des aspects essentiels que l'on peut considérer comme des piliers du dossier de sûreté, à savoir projet consacré au système de barrières ouvragées, celui sur la stabilité de la géosphère et le projet AMIGO, qui ont tous atteint leurs objectifs, l'IGSC oriente sa réflexion sur des aspects et thèmes pluridisciplinaires liés aux questions d'intégration dans l'aménagement du stockage et le dossier de sûreté. Cette démarche s'appuie sur l'expérience et les conclusions tirées de ces projets et se concentre sur le défi que constituent la conception et la construction d'un dépôt dans un environnement géologique stable et la démonstration de sa sûreté à l'aide de preuves tirées des géosciences et d'autres disciplines scientifiques et techniques.

Références

Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) (2005a), Actes du colloque intitulé *L'argile dans les barrières de confinement naturelles et ouvragées pour le stockage des déchets radioactifs*, Andra, Tours, France, mars 2005.

Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) (2005b), Dossier 2005 *Argile*, tome « Architecture et gestion du stockage géologique », Châtenay-Malabry, France.

Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) (2001), Groupe de travail sur la mesure et la compréhension physiques des écoulements souterrains dans les milieux argileux de l'IGSC (Club Argile). Proceedings of Topical Session on Self-healing. Nancy, France, mai 2001. AEN/RWM/CLAYCLUB(2001)5, OCDE, Paris, France.

Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) (2002), *AMIGO Foundation Document. Mode of Operation Of Work of AMIGO*, OECD/NEA International Project on Approaches and Methods for Integrating Geologic Information in the Safety Case, AEN/RWM/IGSC(2002)9, OCDE, Paris, France.

Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) (2004a), *Stability et Buffering Capacity of the Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste – Application to Argillaceous Media*, "Clay Club" Actes d'un atelier, Braunschweig, Allemagne, 9-11 décembre 2003, OCDE, Paris, France.

Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) (2004b), *Geological Disposal: Building Confidence Using Multiple Lines of Evidence*, Actes du premier atelier AMIGO, Yverdon-les-Bains, Suisse, juin 2003, OCDE, Paris, France.

Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) (2007), *Linkage of Geoscientific Arguments et Evidence in Supporting the Safety Case*, Actes du deuxième atelier AMIGO, Toronto, Canada, septembre 2005, OCDE, Paris, France.

Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) (2008), *The Evolving Roles of Geosciences in the Safety Case: Responses to the AMIGO Questionnaire. A Report of the AEN Working Group on Approaches et Methods for Integrating Geological Information in the Safety Case (AMIGO)*. AEN/RWM/IGSC(2008)2, OCDE, Paris, France.

Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) (2009a), *Stability et Buffering Capacity of the Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste – Application to Crystalline Rock*, Actes d'un atelier, Manchester, Royaume-Uni, 13-15 novembre 2007, OCDE, Paris, France.

Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) (2009b), *Approaches et Challenges for the Use of Geological Information in the Safety Case for Deep Disposal of Radioactive Waste*, Actes du troisième atelier AMIGO, Nancy, France, 15-17 avril 2008, OCDE, Paris, France.

Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) (2009c), Expériences internationales des dossiers de sûreté pour les dépôts en formation géologique (INTESC) : Résultats du projet INTESC, OCDE, Paris, France.

Bachu, S et McEwen, T (sous presse, parution prévue en 2009), Geological factors of significance in the long-term emplacement et isolation of CO₂ et radioactive waste. In: Toth, F (ed.), *Geological disposal of CO₂ et radioactive waste: A Comparative Assessment*. Springer, Dordrecht, Pays-Bas.

Boisson, J.Y. (ed.) (2005), Catalogue of characteristics of argillaceous rocks studied with respect to radioactive waste disposal issues, Groupe de travail de l'IGSC de l'OCDE/AEN sur la caractérisation, la compréhension et le fonctionnement des roches argileuses en tant que formations destinées au stockage (Club Argile), OCDE/AEN, Paris, France.

Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M. (2008), Standortbeschreibung Gorleben Teil 3. Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars [Description du site de Gorleben, Partie 3 : résultats de la prospection géologique de la structure salifère.] 2008. Geologisches Jahrbuch Reihe C, Band C 73.

Cosma C, Balu L, Enescu N. (2003), Estimation of 3-D positions et orientations of reflectors identified in the reflection seismic survey at the Forsmark area. SKB R-03-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Cosma, C, Cozma, M, Enescu, N et Juhlin, C. (2008), 3-D Seismic Investigations at Olkiluoto 2007: Factual Report, Posiva Working Report 2008-43.

Davies, R, Cartwright, J, Stewart, S, Lappin, M et Underhill, J (eds.) 2004. 3-D seismic technology, Application to the exploration of sedimentary basins. Geological Society Memoir No. 29. Geological Society, Londres.

Mazurek, M, Pearson, F J, Volckaert, G & Bock, H. (2003), FEPCAT Project: Features, Events and Processes Evaluation Catalogue for Argillaceous Media. Rapport OCDE/AEN, Paris, France.

Mazurek, M, Gautschi, A, Marschall, P, Vigneron, G, Lebon, P et Delay, J. (2008), Transferability of geoscientific information from various sources (study sites, underground rock laboratories, natural analogues) to support safety cases for radioactive waste repositories in argillaceous formations. Physics et Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 33, Supplement 1, S95-S105 "Clays in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement".

Posiva Oy (2008), Safety Case Plan 2008, POSIVA 2008-05, Posiva Oy, Olkiluoto, Finlande. Disponible sur : www.posiva.fi/files/490/POSIVA_2008-05_28.8web.pdf

Posiva (2009), Olkiluoto Site Description 2008 – Part 1, POSIVA 2009-01. Posiva, Olkiluoto, Finlande. Disponible sur : www.posiva.fi/en/databank/posiva_reports

Smith P., Beauheim, R., Gautschi, A., Röhlig, Voinis, S., Lalieux, P. et Lebon, P. (2005), Integrating geological information into safety cases for deep disposal facilities in clay formations: experience from the OCDE/AEN with examples from Belgium, France et Switzerland. In: Andra (2005), Actes du colloque international intitulé « L'argile dans les barrières de confinement naturelles et ouvragées pour le stockage des déchets radioactifs », Andra, Tours, France, mars 2005.

Société coopérative nationale suisse pour l'entreposage de déchets radioactifs (Nagra) (2002a), *Projekt Opalinuston: Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse – Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle*, Nagra Technischer Bericht NTB 02-03, Nagra, Wettingen, Suisse.

Société coopérative nationale suisse pour l'entreposage de déchets radioactifs (Nagra) (2002b), *Project Opalinus Clay. Safety Report – Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste et long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis)*, Rapport technique de Nagra, NTB 02-05. AEN 2001.

Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB) (2006a), *Site descriptive modelling Forsmark stage 2.1 – Feedback for completion of the site investigation including input from safety assessment and repository engineering*, R-06-38, mai 2006, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Suède. Une version pdf de ce document est disponible sur le site www.skb.se

Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB) (2006b), *Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark et Laxemar: a first evaluation – Main*, SKB TR-06-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB) (2008), *Site description of Forsmark at the completion of the site investigation phase – SDM-Site Forsmark*, TR-08-05, décembre 2008, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Suède. Une version pdf de ce document est disponible sur le site www.skb.se

Toth, F.L. (ed.) (sous presse) *Geological Disposal of CO₂ et Radioactive Waste: A Comparative Assessment*. Springer, Dordrecht, Pays-Bas.

Annexe A

Contexte du lancement et objectifs du projet AMIGO

Contexte et historique du projet AMIGO

Les projets internationaux sur ce thème ont vu le jour dans les années 80 lorsque les pays ont commencé à apprécier les mérites des échanges d'expériences et des comparaisons des démarches suivies pour modéliser les transports de radionucléides. Sous l'égide de l'AEN, les projets entrepris dans ces domaines portent les noms de INTRACOIN (1981-1984), d'HYDROCOIN (1984-1987) et d'INTRAVAL (1987-1993).

Ces projets étaient consacrés à la mise au point et la validation de modèles d'écoulement et de transport des radionucléides. Ils sont parvenus à la conclusion qu'il n'était pas possible de valider les modèles appliqués aux systèmes naturels sur les échelles de temps applicables au stockage, du moins au sens strict du terme. Autre enseignement important, il fallait intégrer de manière satisfaisante l'éventail des informations relatives au transport de radionucléides, ce qui exigeait à son tour d'organiser des communications efficaces entre ceux qui participent à la modélisation et ceux qui recueillent les données ou exploitent les résultats de la modélisation. On s'est également aperçu qu'il ne suffisait pas de se limiter à un calcul de la migration des radionucléides pour élaborer un dossier de sûreté qui recouvre la totalité des arguments techniques intégrés sur lesquels repose la démonstration de la sûreté à long terme du système de stockage des déchets.

À partir de ces enseignements, les groupes qui ont précédé l'IGSC, à savoir le SEDE (Groupe de coordination sur l'évaluation des sites et la conception des expériences pour l'évacuation des déchets radioactifs) et le PAAG (Groupe consultatif sur l'évaluation des performances des systèmes d'évacuation) ont lancé le projet GEOTRAP sur la migration des radionucléides dans les milieux géologiques hétérogènes (1996-2001). Ce projet ne s'est pas cantonné à l'étude proprement dite de la migration des radionucléides. Au-delà de l'élaboration de modèles et de leur validation, il a permis d'évaluer des approches pratiques possibles pour résoudre les problèmes de modélisation et de combler les lacunes de nos connaissances, mais aussi d'étudier la possibilité de lancer des collaborations internationales.

Cinq des conclusions essentielles du projet GEOTRAP ont été jugées constituer des orientations pour des travaux futurs, applicables, par delà la migration des radionucléides, à presque tous les aspects d'un programme de

stockage de déchets radioactifs (AEN, 2002). Ces conclusions peuvent être résumées comme suit :

- À tous les stades de l'élaboration d'un dossier de sûreté, des communications étroites doivent exister entre les responsables de la caractérisation du site et les responsables de l'évaluation des performances. Les spécialistes de la caractérisation doivent comprendre comment les données et les modèles conceptuels sont employés pour calculer l'évolution de la géosphère et du système de stockage, y compris les limites des modèles d'évaluation des performances ainsi que les données spécifiques qui sont nécessaires. À leur tour, les responsables de l'évaluation des performances doivent comprendre les méthodes qui sont utilisées pour développer les modèles conceptuels de la géosphère et apprécier dans quelle mesure les données sont applicables, y compris les possibilités ou non de recueillir certaines données et le contexte dans lequel les données peuvent être considérées comme valables.
- La caractérisation du site est une étape cruciale pour parvenir à une compréhension approfondie du contexte géologique et du système de stockage dans son ensemble. Cette compréhension va au-delà de ce dont on a besoin pour établir des modèles d'évaluation des performances qui sont, par nécessité, simplifiés. De fait, la caractérisation du site sert à documenter et à justifier des décisions relatives à l'abstraction et à la simplification des modèles. Elle sert aussi à recenser les processus en jeu et à quantifier les paramètres importants dans l'évaluation de la sûreté. Par voie de conséquence, la caractérisation du site ne peut se limiter à répondre aux besoins des évaluations des performances.
- Il importe d'améliorer l'intégration, tant qualitative que quantitative, des différents types de données pour asseoir notre confiance dans la compréhension globale que l'on a du système. Quantitativement, cela signifie qu'il est possible d'employer des données obtenues en laboratoire ou sur le terrain pour limiter le nombre de paramètres libres employés dans les modélisations d'autres expériences. En outre, les données tirées d'expériences ou d'observations effectuées à diverses échelles peuvent être extrapolées ou combinées dans des modèles d'évaluation des performances d'échelle supérieure. L'intégration qualitative est importante lorsqu'il s'agit de démontrer qu'il existe une cohérence entre plusieurs arguments, par exemple, lorsque les interprétations d'informations provenant de diverses sources convergent vers un même modèle conceptuel.
- L'exploitation des savoirs de spécialistes d'autres disciplines scientifiques et techniques peut être très bénéfique. Il s'agira aussi bien de connaissances théoriques, de techniques expérimentales, d'expériences ou de preuves obtenues sur le terrain concernant des processus particuliers ou de techniques pour intégrer des données de diverses sources. Par ailleurs, cette ouverture vers autres disciplines techniques offrira parfois l'occasion d'organiser des expertises plus vastes.

- Les communications entre gestionnaires de déchets et autorités de contrôle à toutes les étapes de l'aménagement de stockage sont primordiales. Pour l'autorité de contrôle, c'est un moyen d'obtenir des informations et de communiquer ses observations sur les orientations techniques prises par le gestionnaire de déchets, mais aussi de comprendre les limites des données et des modèles. De même, le gestionnaire de déchets peut ainsi accéder à une meilleure compréhension des attentes de l'autorité de contrôle et adapter son programme en fonction de ces attentes.

C'est dans ces enseignements qu'il faut rechercher l'origine du projet de l'IGSC AMIGO sur les procédures et méthodes d'intégration des informations géologiques dans le dossier de sûreté.

Portée et objectifs du projet AMIGO

Le projet AMIGO a mis l'accent sur la collecte et l'intégration de tous les types d'informations géologiques et sur leur rôle dans un dossier de sûreté global. Il a ainsi adopté dès son origine une perspective élargie tant des informations étudiées que de leurs applications aux stockages géologiques. On s'est intéressé, par exemple, à l'utilisation des géosciences pour le choix d'un site et la conception d'un stockage, l'évaluation des performances mais aussi pour obtenir une confirmation de la sûreté de l'ouvrage.

Les objectifs d'AMIGO ont été définis comme suit (AEN, 2002) :

- Dresser un bilan de l'état des connaissances et identifier les moyens d'améliorer la contribution des données sur la géosphère à la constitution du dossier de sûreté d'un stockage.
- Contribuer à l'élaboration de méthodes de représentation de la géosphère dans le dossier de sûreté d'un stockage.
- Définir la terminologie à employer dans les communications et interactions entre équipes travaillant sur la caractérisation du site et spécialistes de l'évaluation de la sûreté lors de l'établissement du dossier de sûreté d'un stockage.
- Clarifier le rôle et l'application des informations et preuves géoscientifiques employées dans un dossier de sûreté.
- Élucider les relations et besoins d'informations pour la caractérisation du site et la modélisation dans les évaluations de sûreté.
- Favoriser les échanges d'informations entre programmes géoscientifiques internationaux de gestion des déchets radioactifs ainsi qu'entre universitaires, autorités de contrôle et gestionnaires de déchets.

Le projet AMIGO s'articulait autour d'une série d'ateliers qui ont commencé en 2003. Compte tenu des objectifs énoncés ci-dessus, on a identifié plusieurs problèmes majeurs à traiter lors de ces ateliers (AEN, 2002) :

- Le rôle de la géosphère et sa représentation dans le concept de sûreté et le dossier de sûreté.

- Les possibilités de la caractérisation des sites par rapport aux besoins du dossier de sûreté et de l'évaluation des performances.
- Les procédures possibles pour intégrer et prendre en compte toutes les formes d'informations disponibles.

Nous décrivons plus en détail ci-après l'intérêt que présente chacun de ces sujets. L'accent était mis sur l'expérience et les démarches pratiques employées pour les traiter. Il convient de noter par ailleurs que le projet avait pour objectif la participation de praticiens tant de la caractérisation du site que de l'évaluation de sûreté ayant l'expérience de différents milieux géologiques.

Le rôle de la géosphère et sa représentation dans le concept et le dossier de sûreté

Au moment du lancement du projet AMIGO, l'IGSC redoutait que les concepts de sûreté des stockages géologiques sous-estiment la contribution fondamentale de la géosphère à la sûreté. Traditionnellement, la principale fonction de sûreté attribuée à la géosphère était la rétention. Il était estimé cependant que l'environnement géologique en profondeur contribuait de manière tout aussi importante à isoler les déchets. Or, on avait le sentiment que cette fonction de la géosphère, à savoir créer des conditions adaptées et stables pour les barrières ouvragées, avait peut-être été sous-représentée ou considérée comme acquise lors de la présentation des dossiers de sûreté.

Le rôle de la géosphère dans le dossier de sûreté est à l'évidence subordonné à la capacité de le représenter de manière bien documentée sur les échelles temporelles et spatiales pertinentes. Plusieurs problèmes ont compliqué la représentation de la géosphère dans les dossiers de sûreté, et notamment la question de savoir comment réunir et présenter les savoirs acquis sur le site et comment évaluer l'influence de la construction de l'ouvrage et de l'évolution des barrières ouvragées sur la géosphère.

Autre problème associé, dans de nombreux programmes de stockage, les études de sites et la modélisation des performances étaient axées sur la partie du système hydrogéologique jugée capable de transporter des radionucléides jusqu'à la biosphère, et l'on avait tendance à caractériser de manière moins approfondie les autres parties du système. À l'époque, on était néanmoins conscient que la définition du niveau de caractérisation exigé pour ces parties du système censées être moins importantes n'était pas une tâche négligeable et ne relevait pas toujours de l'intuition.

Capacités de caractérisation des sites en fonction des besoins du dossier de sûreté et de la modélisation des performances

L'un des principaux objectifs d'un programme d'étude de site consiste à obtenir des informations utilisables pour la modélisation de l'évolution du système de stockage. Il est ainsi évident que l'évaluation des performances doit avoir un impact considérable sur la portée et le contenu de ce programme. Dans la pratique toutefois, l'IGSC s'est aperçu qu'il était difficile d'établir ce lien direct.

Les paramètres et propriétés du site que l'on emploie dans les évaluations de sûreté ne sont presque jamais directement mesurables à l'exception de

certaines situations spécifiques mentionnées dans cet ouvrage. Ils sont en général déduits par un processus qui commence par l'observation et la mesure, passe par l'interprétation de données et s'achève par la construction éventuelle d'un modèle qui lui-même devra probablement être intégré avec d'autres modèles du même type. L'extrapolation en trois dimensions exige de nouvelles hypothèses, avec la modélisation associées, avant de pouvoir entreprendre la modélisation spécifique à l'évaluation de performances.

Un autre problème mis au jour dans ce cadre concerne les difficultés éventuelles de communication entre les équipes de caractérisation des sites et les équipes d'évaluation de sûreté qui doivent parvenir à des relations de travail efficaces si elles veulent pouvoir apprécier les conditions à remplir pour pouvoir élaborer un dossier de sûreté bien documenté et convaincant.

Procédures pour intégrer et tenir compte de tous les types d'informations disponibles

La caractérisation des sites repose sur un large éventail de disciplines, d'activités et de techniques de mesure dont les résultats sont destinés à une diversité d'utilisateurs. On a donc besoin d'un système de gestion des données qui soit à la fois souple et sûr afin de documenter et de stocker des données et des interprétations, mais qui permette également aux utilisateurs d'avoir accès aux aspects de ces jeux de données qui les concernent. Lors de la formulation du projet AMIGO, on était conscient que ces bases de données de caractérisation et ces systèmes de visualisation géologique devaient être complétés par d'autres outils capables d'intégrer des informations complémentaires ou de représenter la confiance, par exemple. À cet égard, les outils et procédures employés pour asseoir sa confiance dans le modèle géologique – traçabilité, tests d'hypothèses et cohérence entre disciplines – présentent un intérêt particulier, de même que l'emploi de preuves multiples, *e.g.* d'informations paléohydrogéologiques.

Structure du projet AMIGO

Comme nous l'avons indiqué ci-dessus, le projet AMIGO a été structuré en une série d'ateliers dont le premier a eu lieu en 2003 :

- Premier atelier AMIGO « *Geological Disposal: Building Confidence Using Multiple Lines of Evidence* », organisé en 2003 à Yverdon-les-Bains, Suisse.
- Deuxième atelier AMIGO « *Linkage of Geoscientific Arguments et Evidence in Supporting the Safety Case* » à Toronto au Canada, en 2005.
- Troisième et dernier atelier AMIGO « *Approaches et Challenges for the Use of Geological Information in the Safety Case* », organisé à Nancy, France en 2008.

L'AEN a publié, dans la série de ses rapports, les communications techniques ainsi qu'une synthèse des débats et des conclusions de chaque atelier (AEN, 2004b, 2007, 2009b). Outre les ateliers, un questionnaire a été établi pour recenser des exemples pratiques d'expériences nationales concernant les principaux sujets et problèmes abordés dans le cadre du projet AMIGO. L'idée était de compiler des descriptions d'expériences nationales de l'application des

arguments et preuves géoscientifiques dans les dossiers de sûreté. Un rapport récapitulant les réponses au questionnaire a ainsi été publié sous le titre « *The Evolving Role of Geoscience in the Safety Case: Responses to the AMIGO Questionnaire* » (AEN, 2008). L'annexe B décrit les résultats de ces trois ateliers et du questionnaire.

Annexe B

Résultats des ateliers et du questionnaire AMIGO

Nous présenterons ci-après une courte synthèse des trois ateliers AMIGO et du questionnaire AMIGO ainsi que les principales conclusions qui en ont été tirées. Le corps du présent document repose sur bon nombre de ces conclusions.

Premier atelier AMIGO : « *Geological Disposal: Building Confidence Using Multiple Lines of Evidence* »

Ce premier atelier a eu lieu en Suisse en 2003. Parmi les sujets examinés, on retiendra le rôle de la géosphère dans les concepts de stockage, la synthèse des informations géologiques dans les modèles conceptuels ainsi que les types d'arguments destinés au dossier de sûreté qu'on peut tirer des informations géologiques ou qui peuvent reposer sur ces informations. La Nagra (Société coopérative nationale pour l'entreposage de déchets radioactifs, Suisse) qui était l'une des organisations hôtes, a présenté dans le détail les informations géoscientifiques qu'elle avait employées dans le dossier de sûreté qu'elle venait d'achever pour l'argile à Opalinus. Outre des informations sur les programmes nationaux de gestion des déchets, cet atelier fut consacré à des présentations des recherches et études géologiques liées à la modélisation des bassins et à l'industrie pétrolière. Trois groupes de travail se sont consacrés (i) au rôle de la géosphère dans le dossier de sûreté, (ii) aux preuves multiples employées pour appuyer le dossier de sûreté et (iii) à des recommandations pratiques pour gérer les interactions entre les diverses équipes travaillant sur le dossier de sûreté.

L'atelier a débouché sur les recommandations suivantes :

- Il conviendrait de consentir des efforts supplémentaires pour expliquer le rôle et l'importance de la géosphère – et ainsi le concept de stockage géologique lui-même – à un public élargi.
- Il serait peut-être utile que les programmes de gestion des déchets radioactifs s'intéressent aux techniques géophysiques et aux méthodes d'interprétation mises au point et initialement employées dans l'industrie des hydrocarbures et par les universitaires. L'expérience de la gestion d'importants jeux de données d'origines pluridisciplinaires et de l'élaboration des modèles conceptuels associés pourrait éventuellement être aussi transposée.
- On pourrait mieux exploiter certains types d'informations géoscientifiques en particulier celles qui proviennent de l'étude des analogues naturels. Bien que ces derniers ne soient pas généralement exploitables

seuls pour obtenir, par exemple, des valeurs des paramètres des modèles d'évaluation de sûreté, ils peuvent néanmoins servir à identifier les processus pertinents et à imposer des contraintes ou fournir des informations complémentaires confirmant le bien-fondé des valeurs sélectionnées des paramètres.

- Il serait peut-être intéressant de publier dans la littérature spécialisée les jeux de données géoscientifiques afin d'en favoriser l'exploitation dans de nouvelles recherches.
- Un groupe de pilotage externe ou une expertise périodique du programme, voire les deux, sont des moyens de garantir la pertinence des travaux géoscientifiques entrepris dans le cadre d'un programme. Les autorités de contrôle peuvent également participer à la définition des études et travaux expérimentaux ultérieurs.

L'évolution récente des programmes de stockage des déchets radioactifs témoigne de la prise en compte des enseignements de programmes tels qu'AMIGO. En effet, depuis le lancement de ce projet, les échanges fructueux avec d'autres industries ont marqué de leur empreinte la conception et l'organisation des études de sites et des dossiers de sûreté les plus récents.

Deuxième atelier AMIGO : « *Linkage of Geoscientific Arguments and Evidence in Supporting the Safety Case* »

Le deuxième atelier AMIGO a été organisé au Canada en 2005. Partant de la réflexion de l'atelier AMIGO-1, les participants ont étudié comment les informations et preuves géoscientifiques sont associées de façon à obtenir une description unifiée et cohérente de la géosphère à l'appui du dossier de sûreté (cette description est souvent appelée *synthèse des connaissances géologiques* ou *modèle descriptif du site*). Ils se sont par ailleurs intéressés à l'extrapolation et à la transposition d'informations géoscientifiques dans le temps et l'espace ainsi qu'à certains aspects pratiques de leur collecte et de leur communication ainsi que des moyens de les relier entre elles.

Les organisations hôtes, à savoir Ontario Power Generation (OPG) et la Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN) ont décrit les recherches entreprises dans le cadre du programme technologique d'aménagement d'un dépôt en formation géologique ainsi que la réglementation en cours d'élaboration. Quatre groupes de travail ont examiné les sujets suivants : (i) indicateurs géoscientifiques de sûreté, (ii) communication des arguments géoscientifiques en faveur de la sûreté ; (iii) réalités des études de sites et (iv) compilation et intégration des connaissances et arguments géoscientifiques.

L'atelier AMIGO-2, compte tenu des discussions en groupes de travail, a abouti aux conclusions et recommandations suivantes :

- Présenter les résultats d'études géoscientifiques n'est pas un objectif en soi. Il est indispensable d'expliquer comment sont compris les résultats et comment ils se répercutent sur la sûreté. Les preuves et arguments géoscientifiques peuvent être reliés aux principales fonctions de sûreté qu'assure la formation géologique hôte (cet aspect est approfondi à la section consacrée aux arguments et indicateurs de sûreté).

- Des autorités de contrôle qui ont confiance dans les données scientifiques relatives à un site pressenti sont plus à même de prendre des décisions fiables et défendables en matière d'autorisations. De ce point de vue, l'efficacité des interactions entre autorités de contrôle et gestionnaires de déchets est primordiale.
- La transposition de données et d'informations recueillies dans des laboratoires souterrains de recherche, sur des analogues et d'autres sites est un moyen précieux de combler des lacunes dans les données, d'améliorer sa compréhension et de favoriser la mise au point d'outils d'investigation ainsi que d'identifier les besoins des modèles. La transposition de ces données doit respecter une structure prédéfinie et logique.
- Les arguments fondés sur de multiples preuves et sur des études de l'évolution passée d'un site devraient assurément constituer le moyen le plus efficace de réduire ou de contraindre les incertitudes. Des enceintes propices à une réflexion pluridisciplinaire sont les plus susceptibles de produire ce type d'arguments.

Troisième atelier AMIGO : “Approaches et Challenges for the Use of Geological Information in the Safety Case”

Le troisième atelier AMIGO s'est tenu en France au mois d'avril 2008. Il a permis de poursuivre la réflexion des deux premiers ateliers mais également d'étudier les liens et allers et retours, lors de l'élaboration d'un dossier de sûreté, entre la caractérisation du site, le concept de sûreté, les aspects techniques de la conception, de la construction et de l'exploitation d'un stockage ainsi que l'évaluation de sûreté (AEN, 2009b). Cet atelier s'est inspiré aussi des résultats du questionnaire AMIGO (AEN, 2008) (voir section suivante du présent ouvrage). L'Andra et l'IRSN y ont présenté des communications détaillées traitant de la collecte et de l'application des données géoscientifiques.

Des exemples montrant comment les preuves et arguments géoscientifiques sont de plus en plus intégrés aux évaluations et dossiers de sûreté y ont été présentés. Cette évolution a été rendue possible, notamment par le recours à la synthèse des connaissances géologiques pour regrouper des informations très diverses et consolider les acquis ainsi que par des communications plus efficaces entre géoscientifiques et spécialistes de l'évaluation de sûreté. Ont été également présentés des exemples de la façon dont le concept de sûreté et la conception du stockage sont adaptés aux conditions propres au site en s'appuyant, par exemple, sur des critères de sûreté que l'on applique aux propriétés qui font que la roche hôte est adaptée à la construction d'un stockage ou à l'installation de déchets. Il existe, par conséquent, une relation étroite entre le concept de sûreté et la conception de l'ouvrage, d'une part, et la caractérisation du site, de l'autre.

Les conclusions générales de l'atelier AMIGO-3 recouvrent dans une large mesure celles des précédents ateliers AMIGO et du projet antérieur GEOTRAP. On notera tout particulièrement que tous ces colloques ont conclu à la nécessité d'une intégration pluridisciplinaire pour planifier des études de site, établir une synthèse des informations géologiques et employer ces informations dans des dossiers de sûreté. L'atelier AMIGO-3 a fourni des exemples pratiques et

encourageants de progrès de cette intégration dans plusieurs programmes nationaux. Parmi les solutions trouvées, on retiendra la tendance qui s'accroît à mettre en place des « groupes d'intégration » pour identifier et combler les lacunes dans les connaissances et compréhensions ainsi que l'élaboration d'outils et de méthodes pour favoriser cette intégration, notamment l'analyse phénoménologique des situations de stockage conçue par l'Andra et l'approche par fonctions de sûreté appliquée chez SKB qui est l'entreprise suédoise de gestion du combustible nucléaire et des déchets.

Lors de l'atelier AMIGO-3, une question revenait régulièrement au centre de la réflexion : l'emploi des fonctions de sûreté, des « postulats relatifs à la sûreté » ou de concepts du même type pour organiser les informations géo-scientifiques en fonction de leur pertinence pour la sûreté et établir des priorités dans les travaux de R-D et de caractérisation de façon à combler les lacunes des connaissances ou incertitudes dans les dossiers de sûreté. L'expression des fonctions de sûreté peut devenir un outil de communication intéressant entre spécialistes de la sûreté et des géosciences, mais aussi avec les parties prenantes. À l'Andra, par exemple, les concepteurs, les évaluateurs de la sûreté ainsi que des scientifiques ont élaboré en collaboration les fonctions de sûreté et les indicateurs correspondants. De même, les « postulats relatifs à la sûreté » de l'ONDRAF/NIRAS (Organisme national de déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies) sont le fruit du travail commun des responsables de l'évaluation de la sûreté et des géoscientifiques. Il a été noté, toutefois, que le principal objectif de la R-D et de la caractérisation du site est de comprendre le site et son évolution une fois qu'on y a installé un stockage. Il faut néanmoins veiller à ce que les hypothèses concernant la fonction attendue de la géosphère dans le concept et le dossier de sûreté ne faussent pas les études.

Réponses au questionnaire AMIGO

Comme nous l'avons décrit précédemment, un questionnaire a été établi après l'atelier AMIGO-2 (voir AEN, 2007 et 2008). Ce questionnaire devait permettre d'enregistrer des descriptions d'expériences nationales de l'application des arguments et preuves géoscientifiques dans un dossier de sûreté. Ces descriptions devaient recouvrir notamment :

- la façon dont les études scientifiques sont planifiées ;
- la façon dont les informations pluridisciplinaires sont intégrées ;
- les méthodes employées pour limiter les incertitudes ;
- les techniques appliquées pour faire connaître l'interprétation et la compréhension que l'on a des résultats synthétisés.

Ce questionnaire a permis également de recueillir des exemples pratiques de preuves géoscientifiques particulières venant directement confirmer les performances du dépôt, ou inspirant confiance dans ces performances, et cela pour divers concepts de sûreté nationaux et milieux géologiques. Les questions posées étaient censées s'appliquer à tout type d'environnement géologique. Toutefois, le questionnaire faisait ressortir comment les informations géoscientifiques viennent appuyer en général un dossier de sûreté et ne se limitait pas aux données géoscientifiques que l'on pourrait fournir pour les intégrer à des modèles d'évaluation de la sûreté.

Dix-sept organisations représentant à la fois des organismes de gestion des déchets et des autorités de contrôle concernées par 12 programmes nationaux ont répondu. Ces organisations travaillent sur tout un éventail de concepts de stockages aménagés dans différentes roches hôtes et ayant atteint différentes étapes de leur élaboration. Les conclusions ont porté sur deux sujets principaux (AEN, 2008) :

- Raisonnements géoscientifiques
 - Les exemples nationaux ont montré que les informations géoscientifiques peuvent contribuer de manière capitale au dossier de sûreté. Aucun argument unique ne peut prouver de manière irréfutable que la sûreté est garantie. Au contraire, on utilise des preuves et raisonnements divers pour appuyer certains aspects principaux du concept de sûreté ou du dossier de sûreté d'un stockage. Qui plus est, l'expérience a montré que ces preuves constituent une base plus intuitive pour expliquer et démontrer la sûreté à long terme d'un site spécifique à des publics tant scientifiques que non scientifiques.
 - Bien que la plupart des exemples donnés appartiennent à un site ou à un concept de stockage particulier, bon nombre d'entre eux peuvent s'appliquer plus largement.
- Synthèse des connaissances géologiques
 - Les résultats ont démontré la puissance de cette synthèse des connaissances géologiques ou de tout autre modèle descriptif du site : l'intégration d'informations géoscientifiques indépendantes est une démarche efficace et scientifiquement défendable que l'on peut suivre pour asseoir sa confiance dans le fonctionnement de la géosphère. On a ainsi la possibilité d'appuyer des éléments capitaux du dossier de sûreté sur des observations faites par diverses disciplines et qui convergent vers une conclusion importante unique.
 - La synthèse des connaissances géologiques gagne beaucoup en force lorsqu'elle associe toutes les sources d'informations et de données qualitatives et quantitatives et ne néglige ni n'omet rien de ce qui pourrait suggérer des défauts ou lacunes de notre compréhension. L'une des plus grandes difficultés, lors de l'élaboration de cette synthèse, consiste à identifier et à traiter les incertitudes.
 - Les informations concernant la stabilité passée et future de la géosphère, un domaine dans lequel les arguments paléohydrogéologiques risquent de se révéler très importants, sont l'un des produits majeurs de cette démarche¹¹.

Comme les ateliers, les résultats du questionnaire ont mis en évidence l'importance de communications satisfaisantes et d'une coopération efficace entre géoscientifiques et spécialistes des évaluations des performances.

11. Deux rapports établis dans le cadre du projet sur la stabilité de la géosphère approfondissent ce sujet (AEN, 2004a, 2009a). Comme nous l'avons vu dans le présent rapport, il existe donc un lien étroit entre le projet AMIGO et le projet sur la stabilité de la géosphère de l'AEN.

LES ÉDITIONS DE L'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16
IMPRIMÉ EN FRANCE