

AUDITION PUBLIQUE DE L'OPECST DU 27 JANVIER 2005
« Le stockage réversible ou irréversible dans des formations géologiques profondes »
(axe 2 de la loi de 1991 relative à la gestion des déchets radioactifs)

INTERVENTION DE JACQUES REPUSSARD
Directeur général de l'IRSN

Si le gouvernement, à l'issue du processus engagé par la loi de 1991, retient le principe de l'édification d'un stockage de déchets en couche géologique, l'IRSN, au titre des missions qui lui ont été confiées par le décret de février 2002, aura, le moment venu, à présenter un avis sur le dossier de sûreté qui sera proposé par le futur exploitant.

Depuis 1991, l'IRSN (alors IPSN) s'est attaché à apprécier la disponibilité et la pertinence des éléments de réponse qui devrait être apportés aux principales questions que suscite un tel projet, en se plaçant dès l'origine dans la perspective du processus d'évaluation de la sûreté d'un projet de stockage géologique. Ce processus repose notamment sur le principe de la défense en profondeur.

L'IRSN, qui est aussi un organisme de recherche, a étayé sa démarche à l'aide de programmes autonomes de recherche ciblés, menés en propre (avec, par exemple, la station expérimentale de Tournemire) ou en collaboration avec d'autres organismes, en France ou à l'étranger. Sur les quinze dernières années, l'IRSN aura ainsi consacré plus de 80 M€ à cet effort de recherche, dont une présentation succincte est donnée dans le dossier d'information remis à l'office parlementaire.

Les questions sur lesquelles les recherches déjà réalisées, en cours ou prévues, devront apporter un éclairage suffisant pour apprécier la sûreté globale d'un futur projet d'installation, s'organisent autour de cinq thèmes principaux :

1. la qualification de la couche géologique envisagée pour accueillir l'installation, au regard de l'inventaire prévisible des radionucléides qui seront stockés (fracturation, comportement hydrogéologique) ;
2. l'impact à long terme des interactions entre les colis, leurs enveloppes, les ouvrages et le milieu géologique, tous ces éléments constituant des barrières successives de confinement des radioéléments, dont la performance sera affectée par ces interactions ;
3. la capacité à réaliser des scellements durablement efficaces des voies d'accès (et de ventilation) de l'installation ;
4. la sûreté de l'installation pendant toute sa phase d'exploitation (y compris les aspects de radioprotection pour le personnel d'exploitation) et l'impact à long terme, sur la performance du stockage, des conditions de réalisation et d'exploitation (notamment les contraintes liées à l'éventuel choix de réversibilité) ;

5. la capacité à modéliser le comportement dans le temps du système de stockage pour évaluer, en tenant compte des principales incertitudes, la robustesse des concepts proposés au regard de scénarios pénalisants, notamment en termes de marges de sûreté.

Les appréciations préliminaires (et provisoires) qui sont celles de l'IRSN, sur la base des données scientifiques dont il dispose, peuvent être brièvement résumées de la manière suivante (des informations complémentaires figurent dans le dossier synthétique remis à l'office parlementaire) :

- **sur un plan général**, les bases de connaissances qui ont été réunies devraient permettre de porter une première appréciation du point de vue de la sûreté, sur les points forts et les points faibles de la couche argileuse et des concepts étudiés en vue de la réalisation éventuelle d'une installation de stockage.

A ce stade, l'IRSN n'a pas identifié d'éléments rédhibitoires, du point de vue de la sûreté, à la définition d'un stockage de déchets radioactifs de haute activité à vie longue dans la formation argileuse étudiée sur le site de Bure.

Cette appréciation préliminaire nécessite bien sûr d'être confortée par l'évaluation du dossier qui soit être remis par l'ANDRA en 2005.

- **de manière plus spécifique**, au regard des problématiques ci-dessus, les éléments d'appréciation suivants peuvent être apportés :

1. en ce qui concerne **la qualification de la couche argileuse de Bure**, il existe des indices favorables quant à son homogénéité et à l'existence, dans cette couche, de blocs sains de grandes dimensions. Les techniques de reconnaissance locale de la formation géologique paraissent prometteuses, mais il restera à valider, sur l'ensemble de la zone concernée par un futur stockage, les résultats obtenus sur le site du laboratoire de Bure proprement dit.

En ce qui concerne l'hydrogéologie, les données actuellement disponibles ne permettent pas de proposer un schéma unique d'écoulement hydraulique dans la région étudiée. Il faudra donc établir, à l'aide de modèles qui seront nécessairement relativement complexes, un ensemble d'hypothèses raisonnablement pénalisantes du point de vue de l'évaluation de l'impact possible d'un stockage. Toutefois, l'IRSN estime que les concepts de stockage envisagés par l'ANDRA sont globalement pertinents au regard de cette problématique.

2. en ce qui concerne **les interactions physiques et chimiques** :

- les questions sur l'impact thermique devraient pouvoir être clarifiées en 2005 ;
- de même, un jeu d'hypothèses pénalisantes devrait pouvoir être élaboré pour tenir compte de l'impact de la zone endommagée au voisinage de l'ouvrage ;

- en ce qui concerne **les aspects chimiques**, les hypothèses de travail restent à valider par des expérimentations de longue durée, notamment au sujet de la corrosion des conteneurs et de la possible constitution d'une phase gazeuse importante ;
- 3. en ce qui concerne **les scellements**, leur niveau de performance est important pour la sûreté de l'installation. Les essais réalisés par l'IRSN montrent que les zones d'interface entre le bouchon et la roche peuvent être significativement plus perméables que le bouchon lui-même. Il conviendra donc d'être attentif aux conditions dans lesquelles les techniques expérimentales testées sur différents sites peuvent être transposées, à l'échelle d'une installation opérationnelle, en tenant compte des caractéristiques des argiles de Bure.
- 4. en ce qui concerne **la sûreté d'exploitation d'une installation**, il faut souligner que cet aspect n'a été que peu débattu jusqu'ici. Les risques qu'il s'agira de maîtriser ont beaucoup de points communs avec ceux d'autres installations nucléaires, avec en sus la contrainte spécifique liée au caractère souterrain du stockage. En outre, il conviendra d'être attentif à la qualité de réalisation, à l'échelle industrielle, de l'ensemble des ouvrages et composants. **La capacité à passer de l'échelle du laboratoire au stade industriel de l'installation, sera un facteur important de la performance globale en termes de sûreté.**
- 5. en ce qui concerne **la prise en compte des incertitudes** les plus importantes dans la perspective d'apprécier l'évolution possible du stockage dans le temps et de son impact, il conviendra notamment d'intégrer les informations disponibles en familles de scénarios pouvant donner lieu à une modélisation d'ensemble. Une expérience importante a été accumulée dans ce domaine au plan national et international, et en particulier à l'IRSN. Toutefois, les modélisations doivent s'enrichir de très nombreuses données expérimentales représentatives du site et des concept d'ouvrages retenus, données qui restent largement à acquérir.

En conclusion, si de nombreux progrès des connaissances scientifiques ont été réalisés au cours des dernières années, il faut noter que de nombreuses connaissances et données importantes pour la sûreté manquent encore aujourd'hui. Ces connaissances et données paraissent cependant raisonnablement accessibles.

En 2006, il ne sera donc pas envisageable, selon l'IRSN, de disposer d'éléments suffisants pour fonder une démonstration de sûreté au sens du processus réglementaire de création d'une installation de stockage géologique de déchets radioactifs.

L'IRSN est prêt à poursuivre ses travaux de recherche sur ces sujets, notamment sur le site du laboratoire de Bure, et à coopérer avec tous les acteurs concernés.

Enfin, en tant qu'expert public du risque nucléaire et radiologique, l'IRSN est aussi prêt à contribuer au nécessaire éclairage scientifique du débat de société sur la question de la gestion des déchets radioactifs.



INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

AUDITION PUBLIQUE DE L'OPECST DU 27 JANVIER 2005
« Le stockage réversible ou irréversible dans des formations géologiques profondes »
(axe 2 de la loi de 1991 relative à la gestion des déchets radioactifs)

INFORMATIONS COMPLEMENTAIRES

SOMMAIRE

1. LES RECHERCHES DE L'IRSN SUR LES STOCKAGES GEOLOGIQUES.....	2
1.1 Rappel du rôle de l'IRSN	2
1.2 Présentation synthétique des recherches réalisées par l'IRSN	3
1.3 Principales publications.....	7
2. POINT DE VUE DE L'IRSN SUR LA SURETE D'UN EVENTUEL STOCKAGE GEOLOGIQUE DANS LA FORMATION ARGILEUSE ETUDIEE AU MOYEN DU LABORATOIRE SOUTERRAIN DE BURE.....	8
2.1 Introduction	8
2.2 Qualification de la formation géologique.....	10
2.3 Perturbations mécaniques et thermiques	12
2.4 Combinaison de facteurs chimiques régissant le relâchement et le transport des radionucléides.....	14
2.5 Faisabilité des scellements	15
2.6 Sûreté de l'exploitation et de l'état réversible d'un stockage	16
2.7 Identification et hiérarchisation des incertitudes.....	17
3. POINT DE VUE DE L'IRSN SUR LE POTENTIEL DES FORMATIONS GRANITIQUES	17
4. REMARQUES SUR LE CONCEPT DE REVERSIBILITE.....	18
ANNEXE	20

1. LES RECHERCHES DE L'IRSN SUR LES STOCKAGES GEOLOGIQUES

1.1 Rappel du rôle de l'IRSN

L'IRSN, conformément à ses missions, effectue des études et des travaux de recherches, notamment pour ce qui concerne le stockage géologique des déchets de haute activité et à vie longue, afin d'acquérir des connaissances permettant de recenser et de comprendre les phénomènes à l'origine des risques.

Ces recherches sont nécessaires au développement de la capacité d'expertise nécessaire au rôle technique qu'il doit jouer au sein du système de gestion des déchets en France. En outre, elle lui permet de contribuer au processus d'information et de transparence vis-à-vis de la demande sociétale.

Les travaux de recherches conduits par l'IRSN ne relèvent donc pas de la coordination d'ensemble des recherches menées par les acteurs de la loi de 1991 que sont l'ANDRA et le CEA, en vue de promouvoir la réalisation d'une technique, mais ils contribuent à apprécier la faisabilité des options de stockage étudiées.

Les travaux de recherche sont centrés sur la compréhension des risques de transfert de substances radioactives à travers les barrières composant le stockage, notamment le milieu géologique hôte, en s'appuyant aussi bien sur des expérimentations *in situ* (dans le tunnel de Tournemire), en laboratoire, que sur la modélisation. L'IRSN a signé en 2000 une convention avec l'ANDRA l'autorisant à mener son propre programme expérimental dans le Laboratoire de Recherche Souterrain de Meuse/Haute-Marne, la coordination de la logistique de ces activités avec celles de l'ANDRA étant assurée par un comité technique mixte. Les programmes de recherche de l'IRSN font l'objet de collaborations bilatérales en France et en Europe, ainsi que de contrats européens. L'IRSN contribue également aux travaux de l'AEN/OCDE sur ce sujet.

L'IRSN participe à des exercices méthodologiques et d'évaluation des risques depuis maintenant plus de 20 ans (PAGIS, PACOMA, EVEREST, SPA et BENIPA) qui ont permis de développer des compétences dans le domaine de l'analyse d'impact d'un stockage et de l'identification de paramètres et de phénomènes importants pour la sûreté.

L'IRSN participe à de nombreux groupes de travail dédiés à l'élaboration d'une « doctrine » sur la sûreté des stockages dans deux directions complémentaires :

- *La formalisation de textes techniques susceptibles de guider l'élaboration d'une réglementation pour un éventuel stockage géologique.*
- *La prise en compte du débat public sur les questions de gestion des déchets.*

L'IRSN procède, à la demande de la DGSNR, à une analyse technique des dossiers de sûreté présentés par les exploitants et à l'élaboration de projets de textes, règles ou plans guides destinés à réglementer les activités des installations nucléaires de base (INB) en matière de déchets radioactifs. A cet égard, l'IRSN a contribué à mettre en lumière les principales questions à résoudre en matière de faisabilité et de sûreté des stockages géologiques. Pour réaliser ce travail d'analyse, l'IRSN s'appuie sur des compétences spécifiques aux stockages en formation géologiques ainsi que décrites précédemment, mais fait également appel à l'expérience qu'il possède en matière d'évaluation des risques pour les installations nucléaires « classiques » (criticité, incendie, confinement, risque sismique ...)

1.2 Présentation synthétique des recherches réalisées par l'IRSN

Pour ce qui concerne le stockage de déchets de haute activité et à vie longue en formations géologiques le maintien et le développement de sa capacité d'expertise nécessitent que l'IRSN, comme pour ses autres domaines d'expertise, conduise des travaux de recherche ; ceux ci concernent notamment les domaines des sciences de la terre. Le but est d'apporter des éléments de réponses aux questions scientifiques et techniques qui se posent dans le cadre de l'expertise des dossiers confiée à l'Institut, voire d'identifier des questions nouvelles pertinentes qui supposent une dynamique de recherche propre.

Les travaux de l'IRSN sont centrés sur la compréhension des performances des barrières composant le stockage, notamment le milieu géologique hôte, à l'égard des risques de transfert de substances radioactives.

Au cours des dernières années, les travaux de recherches de l'IRSN ont été principalement focalisés sur l'étude des milieux argileux en tant que milieu d'accueil possible d'un stockage géologique. Ils ont, par des expérimentations *in situ* (en particulier dans la station expérimentale de Tournemire) ainsi qu'en laboratoire, par des observations sur le terrain (site de l'Est) et par la modélisation, concerné en particulier :

- la caractérisation géologique du site de l'Est et la détermination du rôle des fractures dans la circulation des eaux en milieux argileux (à Tournemire),
- l'identification des schémas d'écoulement possibles à l'échelle du site de l'Est, nécessitant la réalisation de modélisations hydrogéologiques et la compréhension des circulations d'eau passées et actuelles à plus grande échelle, celle du Bassin Parisien,
- les perturbations d'origine thermique, hydrique et mécanique induites par la réalisation des ouvrages de stockage de déchets, en particulier lors du creusement des galeries,
- l'importance des modifications minéralogiques et chimiques des argiles en champ proche, provoquées par les interactions à moyen et long terme avec les composants des ouvrages de stockage.

1.2.1. Caractérisation structurale et rôle des fractures

Depuis 1995, l'IRSN a mené, dans la région de Bure, des études sur les principaux accidents aux échelles régionale et locale qui l'ont conduit à soulever différentes questions concernant le modèle structural proposé par l'ANDRA : ré-interprétation des données de géophysique sismique 2D, analyse morpho structurale à partir des modèles numériques de terrain (MNT), analyse microtectonique des fractures, analyse des déformations des macles de la calcite.

Pour ce qui concerne la reconnaissance structurale des milieux argileux, l'identification des fractures secondaires à faible rejet vertical à l'aide des méthodes géophysiques classiques (sismique 2D) est difficile. L'existence de telles structures dans la formation argileuse de Tournemire, identifiées à partir des ouvrages souterrains, a permis de tester la validité d'une méthode de sismique 3D haute-résolution pour reconnaître ce type de structure depuis la surface. Une campagne a été réalisée sur ce site, avec une grande densité de capteurs et une large plage de fréquences des sources sismiques. Elle a montré que, dans l'état actuel des techniques de traitement, les failles de faible rejet vertical pouvaient être détectées dans les couches calcaires profondes sous-jacentes à la station expérimentale ; en revanche, de telles structures ne peuvent pas être clairement détectées dans les formations argileuses proprement dites.

Les études du rôle hydraulique des fractures dans les argilites ont été conduites à partir de la station expérimentale de Tournemire. Ces études ont montré qu'au cours des temps géologiques, ces fractures ont constitué des drains préférentiels de circulation entre la couche argileuse et son encaissant aquifère. A cet égard, des cavités ou des zones d'ouverture avec cristallisation de calcite sont le signe d'une circulation ancienne de fluides, des venues d'eau (en galerie ou interceptées à l'aide de forage) indiquent une circulation récente dans ces fractures. Ces études ont permis, en outre, des adaptations technologiques afin de minimiser la perturbation de la roche et d'améliorer la qualité de l'échantillonnage : forages réalisés sur plusieurs centaines de mètres à l'air, au gaz inerte voire en conditions stériles, techniques de prélèvement in situ de fluides et de roche, de conditionnement et d'analyse.

1.2.2. Circulations d'eau dans le Bassin Parisien et modélisation hydrogéologique du site de l'Est

Les études menées à l'IRSN sont centrées sur la compréhension des différents modes et voies de transfert possibles dans les formations sédimentaires de l'Est du Bassin de Paris. Ainsi, l'IRSN participe aux programmes du CNRS sur la reconstruction de l'histoire sédimentaire, hydrodynamique, thermique et climatique du Bassin de Paris. Ces recherches visent également à comprendre des phénomènes de surpression observés dans le Callovo-oxfordien.

L'IRSN constitue depuis 1998 une base de données géologiques, hydrogéologiques et hydrogéochimique sur le Bassin de Paris (BPDATA). Cette base est alimentée par les données disponibles dans le domaine public (forages pétroliers ou de gaz, puits de géothermie et d'alimentation en eau potable, sources, forages de reconnaissance de l'ANDRA, thèses et synthèses diverses), mais aussi à partir d'analyses d'échantillons d'eaux (compositions chimique et isotopique) réalisées par l'IRSN.

Cette base de données est utilisée pour la compréhension et la reconstitution des écoulements du Bassin de Paris ainsi que pour les modélisations des écoulements d'eau dans le site de l'Est.

Ces modélisations sont développées depuis plusieurs années en collaboration avec l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris (ENSMSP- Centre d'informatique Géologique de Fontainebleau) au moyen du code hydrogéologique NEWSAM. Ce modèle numérique a pour but de reconstituer les différents schémas possibles d'écoulement des eaux souterraines dans l'Est du Bassin de Paris pour interpréter au mieux tant les mesures de charge hydraulique que celles des éléments transportés par l'eau. Un premier ajustement des paramètres hydrogéologiques du modèle à l'échelle du bassin a été réalisé à partir des salinités connues pour les aquifères profonds et en supposant l'existence d'un régime d'écoulement permanent. L'enrichissement permanent de la banque de données BP data et les interprétations en cours et à venir conduisent à faire évoluer ce modèle. Par ailleurs, un modèle centré sur le site de Bure permet d'évaluer les perturbations hydrauliques occasionnées par le creusement des puits du laboratoire.

1.2.3. Incidences de la réalisation des ouvrages de stockage

Les perturbations d'origines mécanique, hydrique et thermique induites par la réalisation d'ouvrages de stockage seront étroitement couplées et s'influenceront mutuellement. La complexité de ces couplages a conduit l'IRSN à aborder ces questions sous plusieurs angles.

- Les perturbations induites par le creusement des ouvrages (« EDZ ») sont étudiées depuis plusieurs années sur le site expérimental de Tournemire, autour du tunnel et des galeries creusées en 1996 et 2003. Les observations, en particulier par carottages, montrent une extension maximale de l'« EDZ » d'environ 2 m autour du tunnel principal. L'une des galeries a été instrumentée préalablement à son creusement à partir de forages munis de capteurs de pression, de capteurs de déplacement et d'accéléromètres. Un travail d'interprétation de ces expérimentations se poursuit actuellement.
- Les perturbations induites par la ventilation naturelle ou forcée des ouvrages pendant la phase d'exploitation sont abordées dans le cadre du projet international du Mont-Terri. Les bilans hydriques permettent d'apprécier la cinétique de désaturation de la roche.
- Les perturbations induites par le dégagement thermique des déchets exothermiques sont abordées, depuis 1995, dans le cadre du programme international (DECOVALEX) dédié aux effets des couplages THM (Thermique, Hydraulique et Mécanique). La méthode d'étude et les outils numériques développés dans ce cadre, pourront être appliqués au milieu argileux.

Par ailleurs, l'IRSN étudie le comportement des roches argileuses sous gradient thermique au moyen d'expériences de chauffage en laboratoire ainsi que par l'analyse d'intrusions basaltiques dans les argilites de Laumière (Aveyron).

L'IRSN a également abordé les questions de faisabilité des scellements d'ouvrages en conduisant un programme d'études, en collaboration avec l'Université Joseph Fourier de Grenoble, destiné à estimer le rôle hydraulique possible des interfaces entre un ouvrage de scellement et la roche hôte, au moyen d'expériences sur échantillons simulant ce contact.

Les résultats de ces recherches sont utilisés par l'IRSN dans des modélisations spécifiques destinées à simuler le comportement thermo-hydro-mécanique des ouvrages d'un stockage. Ces modélisations contribuent à apprécier l'incidence sur la sûreté d'une installation de stockage des diverses perturbations auxquelles elle pourrait être soumise.

1.2.4. Evolution chimique du milieu et de ses propriétés

Les caractéristiques des barrières artificielles devront être appréciées en tenant compte de leur contribution à la limitation des flux de substances radioactives et toxiques relâchées.

A cet égard, l'IRSN développe des expérimentations et des modélisations concernant les interactions chimiques entre la formation hôte et certains matériaux (fer, béton) qu'il est envisagé d'introduire en grandes quantités dans le stockage. Il s'agit d'évaluer dans quelle mesure les propriétés favorables de confinement de la roche hôte (capacité de rétention, limites de solubilité des radionucléides), notamment en champ proche, sont modifiées par ces interactions. Ces évaluations nécessitent de préciser les schémas réactionnels relatifs aux interactions fer-argile et béton-argile (thermodynamique et cinétique), et de simuler ces interactions au moyen de codes couplés performants. L'IRSN réalise ce type de simulations au moyen du code couplé chimie-transport HYTEC et contribue au développement de cet outil de calcul, assuré par l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris.

1.2.5. Modélisation globale de l'évolution et de l'impact d'un stockage

L'IRSN a participé dans le cadre des programmes de recherche européens, avec notamment son homologue allemand GRS, à de nombreux exercices de modélisation ayant pour objectif d'apprécier le rôle des barrières disposées autour des déchets et des combustibles irradiés quant aux capacités de confinement globales d'un stockage, et d'estimer l'impact dosimétrique d'un tel stockage, c'est-à-dire les doses de rayonnement pouvant être reçues par la population vivant dans le voisinage d'un stockage souterrain hypothétique. L'IRSN a ainsi coordonné l'exercice EVEREST, puis l'exercice SPA, concernant le stockage de déchets et de combustibles usés dans différentes formations géologiques profondes (sel, argile, granite) ; ces exercices ont regroupé des organismes de recherche de plusieurs pays (Espagne, Belgique, Allemagne, Pays-Bas, Finlande). Les évaluations ont été menées à partir de données provenant, soit de laboratoires souterrains existants, soit d'études menées sur des sites envisageables en Finlande, en Allemagne et en Belgique, soit d'études relatives à des sites représentatifs des formations géologiques étudiées, sans lien avec un site réel ou envisagé (cas de la France et de l'Espagne)

Plus récemment, l'IRSN a participé au projet BENIPA, consacré à l'étude et à la modélisation détaillée des comportements hydraulique, mécanique, thermique et géochimique d'une barrière ouvragée argileuse. Ce projet répond au besoin de mieux apprécier la façon dont une modélisation intégrée, malgré les simplifications qu'elle impose, peut rendre compte de manière crédible des mécanismes d'évolution des composants du stockage. Ce projet apporte également un éclairage sur la pertinence des fonctions de sûreté conférées aux barrières ouvragées quant au confinement des radionucléides, pour différentes échelles de temps et différentes évolutions du stockage.

1.2.6. Conclusion

Ces travaux de recherche, qui s'appuient sur des observations faites dans divers sites (Mont-Terri, Mol) et tout particulièrement à Tournemire, permettent des développements méthodologiques indispensables à l'étude des milieux semi-perméables et facilitent, par une implication effective dans l'expérimentation, l'évaluation de la validité des données et des performances des méthodes de caractérisation.

Ils permettent aussi de mieux comprendre certains aspects phénoménologiques génériques. Mais du fait des spécificités des différents sites argileux, certains résultats ne peuvent pas être directement transposés aux argilites du Callovo-Oxfordien du site de Bure (rôle hydraulique des fractures, perturbations d'origines mécanique, hydrique et thermique induites par la réalisation d'ouvrages, interactions chimiques entre la formation hôte et certains matériaux apportés...). Ils doivent donc être confirmés sur les argilites de Bure par des recherches menées in situ et en laboratoire.

Ceci confirme l'importance d'un accès direct de l'IRSN au laboratoire souterrain de Bure pour y mener des expérimentations appropriées, sur des sujets bien identifiés, indépendantes de celles de l'ANDRA.

Dans ces conditions, l'IRSN pourra continuer de disposer d'un ensemble de compétences, d'outils expérimentaux et de modèles couvrant l'ensemble des aspects importants pour l'évaluation de la sûreté d'un éventuel stockage.

1.3 Principales publications

Dans la liste présentée en annexe, on trouvera un ensemble de publications faites par l'IRSN dans des réunions internationales et d'articles diffusés dans des revues spécialisées. Ces présentations et articles traitent de l'approche de sûreté générale des stockages en formation géologique profonde, des aspects géologiques et hydrogéologiques associés, de la géomécanique, de la géochimie ainsi que des exercices d'évaluation globale de l'impact d'un stockage.

2. POINT DE VUE DE L'IRSN SUR LA SURETE D'UN EVENTUEL STOCKAGE GEOLOGIQUE DANS LA FORMATION ARGILEUSE ETUDIEE AU MOYEN DU LABORATOIRE SOUTERRAIN DE BURE

2.1 Introduction

L'évaluation des dossiers de l'ANDRA relatifs à la faisabilité d'un stockage de déchets de haute activité et à vie longue dans la formation argileuse étudiée sur le site de Bure a permis de dresser un premier état des connaissances sur le sujet et de dégager un certain nombre de questions, concernant la sûreté d'un éventuel stockage, qu'il apparaît important de prendre en compte pour répondre aux objectifs fixés par la loi du 30 décembre 1991 sur les déchets radioactifs.

Du point de vue de l'IRSN, l'enjeu est d'apprécier en 2006 la faisabilité d'un éventuel stockage dans la formation précitée et donc d'apprécier s'il existe au moins un concept de stockage, établi selon le principe de défense en profondeur, qui soit à la fois peu sensible aux incertitudes et soutenu par des éléments techniques convaincants fondés sur les connaissances disponibles.

Il s'agira en particulier d'examiner :

- si les mécanismes qui régiront l'évolution du stockage sont compris et, en conséquence, s'ils ont fait ou pourront faire l'objet de programmes de recherches et de mesures débouchant sur une modélisation crédible,
- si les technologies sont disponibles pour construire des ouvrages de stockage performants permettant notamment de pallier les éventuels points faibles préjudiciables à la sûreté.

La démarche de sûreté implique que les défauts existants ou envisageables de la barrière géologique et des éléments ouvragés du stockage (colis, conteneurs, barrières ouvragées, scellements) soient identifiés. Ces défauts peuvent être présents initialement, résulter de difficultés de réalisation industrielle ou apparaître au cours du temps. Quelle que soit la probabilité d'apparition de ces défauts, ils doivent être pris en compte dans l'évaluation de sûreté et les concepts retenus devront être peu sensibles aux événements pouvant conduire à des transferts d'activité non maîtrisés.

Cette démarche nécessite d'une part, l'acquisition de connaissances nombreuses, issues notamment d'investigations sur site et de la réalisation d'essais, d'autre part la poursuite de programmes de recherche visant à identifier les phénomènes importants et à en comprendre les mécanismes afin d'être à même, dans la mesure du possible, de les extrapoler avec une confiance suffisante. La démarche de conception ne peut donc être qu'itérative, en vue d'organiser et d'évaluer au mieux les connaissances progressivement acquises, afin de disposer in fine de connaissances suffisantes pour permettre, le cas échéant, l'implantation d'un stockage dans un site donné. L'étude de faisabilité que l'ANDRA présentera en 2005 est une de ces itérations. L'ensemble des questions importantes pour la sûreté ne sera sans doute pas complètement traité à ce stade.

Il est cependant d'ores et déjà possible d'identifier un certain nombre de questions qui méritent une attention particulière. Il s'agit :

- de questions relatives aux facteurs principaux qui pourront déterminer l'architecture du stockage et la conception des ouvrages, en particulier :
 - la formation hôte est-elle affectée par une fracturation susceptible de mettre en cause les concepts développés jusqu'à présent ?
 - si une telle fracturation existe, quel est son rôle hydraulique actuel et quel sera son rôle futur, en relation avec les schémas d'écoulement dans les formations géologiques du site ?
 - l'endommagement immédiat et différé de la roche dû au creusement même des ouvrages, est-il susceptible de créer des courts-circuits notables de la barrière géologique ?
 - le dégagement de chaleur des colis a-t-il une incidence forte sur la conception du stockage, notamment sur son emprise ?
 - quelles sont les contraintes d'exploitation et de réversibilité pour la conception des ouvrages ?
 - les scellements/remblais sont-ils capables de pallier suffisamment les points faibles possibles du stockage, notamment d'empêcher une circulation de fluides au travers des fractures existantes ou susceptibles de se créer ainsi que dans la roche endommagée ?
 - quelles combinaisons de facteurs chimiques (rôles complémentaires des colis, des conteneurs et des barrières ouvragées) permettent de limiter au mieux les transferts d'activité, notamment en cas de défauts de la barrière géologique en dehors du stockage ?

- de questions relatives à l'identification et à la hiérarchisation des incertitudes en vue de déterminer à ce stade les points forts et les points faibles de la sûreté d'un stockage, notamment :
 - quelles sont les principales incertitudes sur les caractéristiques et les mécanismes d'évolution du stockage qui ne pourront raisonnablement pas être levées en 2006 ?
 - quelles sont les principales incertitudes sur la faisabilité technique des ouvrages ?
 - quels choix de scénarios volontairement pénalisants peuvent permettre d'apprécier l'incidence de ces incertitudes sur la sûreté du stockage ?
 - comment intégrer ces informations dans une modélisation d'ensemble permettant de hiérarchiser les points importants qui restent à traiter ?
 - comment les concepts développés peuvent-ils permettre de minimiser l'importance de ces incertitudes ?

Depuis le début du projet, l'IRSN s'est attaché à apprécier la disponibilité et la pertinence des éléments de réponses à ces questions, en se plaçant dans la perspective d'un futur processus d'évaluation de la sûreté d'un projet de stockage géologique, processus reposant notamment sur les principes de la défense en profondeur.

L'IRSN a étayé cette démarche à l'aide de programmes de recherche ciblés, menés en propre ou en collaboration avec des organismes compétents dans les différents domaines scientifiques et techniques concernés.

Les développements ci-après dressent un état des lieux succinct des appréciations préliminaires (et provisoires) qui sont celles de l'institut, sur la base des données scientifiques actuellement disponibles. Au cours des 15 dernières années, des progrès significatifs ont été réalisés sur de nombreux sujets. Cependant des zones d'ombre demeurent, et des travaux de recherches sont encore nécessaires, en vue de réduire les incertitudes sur les risques, en particulier dans le contexte spécifique des couches géologiques du site de Bure.

2.2 Qualification de la formation géologique

➤ Identification de la fracturation secondaire et méthodes de transposition

Les évaluations des données géologiques de surface et l'interprétation des résultats de la campagne géophysique (sismique 3D couvrant l'emprise du laboratoire souterrain) menée par l'ANDRA sur le site de Bure montraient des indices pouvant s'interpréter comme la présence d'une fracturation espacée d'un pas d'environ 500 m recoupant le dogger (couche calcaire sous-jacente à la couche argileuse) avec un rejet d'ordre métrique, mais sans indice évident de recoupement des formations sus-jacentes.

Compte tenu des informations dont il disposait à l'époque, l'IRSN a émis en 2001 des réserves sur le caractère parfaitement homogène des formations géologiques du site de Bure. Ces réserves sont en particulier nées de l'analyse de données géologiques acquises par l'IRSN sur le terrain, d'interprétations de la morphologie détaillée du site de Bure et d'observations faites dans la station expérimentale de Tournemire, localisée dans une formation argileuse présentant des analogies avec celle de Bure. Dans cette station exploitée par l'IRSN, ont en effet été observées des fractures secondaires affectant la couche argileuse qui se sont avérées indétectables par les méthodes géophysiques les plus avancées telles que l'interrogation sismique 3D haute résolution effectuée par l'IRSN en 2002.

Des doutes subsistaient donc, malgré les investigations réalisées sur le site de Bure, sur la présence ou non d'une fracturation secondaire affectant la couche argileuse. L'IRSN a insisté pour que des moyens supplémentaires soient mis en œuvre pour lever ces doutes.

Il y a lieu de bien préciser que ces doutes ne concernaient que la possibilité de discontinuités de faible ampleur, similaires à celles observées à Tournemire, les résultats obtenus au moyen des techniques mises en œuvre à l'époque par l'ANDRA permettant déjà d'écarter la présence d'une fracturation importante dans la zone du laboratoire.

De telles discontinuités ne seraient sans doute pas rédhibitoires pour l'implantation d'un stockage à condition qu'elles soient suffisamment espacées, plus de quelques centaines de mètres, et qu'elles soient prises en compte dans la conception du stockage, notamment son architecture.

Depuis cette date, l'ANDRA a réalisé des investigations complémentaires à Bure. Sur la base de la présentation des résultats de ces investigations à la Commission Nationale d'Evaluation, il semble que seule une fracturation très tenue, s'exprimant sous forme de diaclases, ait été observée dans la couche sous-jacente à la formation hôte et à l'aplomb de certains des indices de fracturation identifiés par l'interrogation sismique 3D. Cette fracturation mineure n'affecterait pas la couche d'argile.

Ces résultats, s'ils sont confirmés, constituent des indices favorables quant à l'homogénéité de la couche argileuse et à l'existence probable, dans cette couche, de blocs sains, de taille cohérente avec les modules de stockage de grande dimension envisagés par l'ANDRA.

Il est néanmoins à noter que les techniques de reconnaissance employées ne peuvent, au sens strict du terme, qualifier la formation étudiée qu'à l'aplomb de la zone reconnue. Ainsi, les observations géologiques faites dans le laboratoire souterrain ne pourront pas être transposées à une zone plus étendue, représentative des dimensions d'une installation de stockage, sans reconnaître cette zone par des techniques adaptées. Au vu des travaux réalisés par l'ANDRA, l'emploi de techniques complémentaires, telles que l'interrogation sismique 3D, soigneusement « calée » au préalable, et les forages déviés, semble prometteur pour reconnaître une zone potentiellement favorable à l'implantation d'une installation de stockage.

➤ Modèles de circulation des eaux souterraines

La particularité de la modélisation hydrogéologique du site de Bure est qu'elle nécessite le traitement cohérent des écoulements à plusieurs échelles d'espace (échelle de la centaine de kilomètres pour le bassin, échelle de la dizaine de kilomètres pour le secteur, échelle kilométrique pour le site).

Le caractère quasiment homogène de la formation hôte et de ses encaissants, avait conduit l'ANDRA à retenir un schéma d'écoulement gouverné uniquement par le pendage régulier des couches vers le nord ouest du bassin. Si de grandes tendances peuvent effectivement être dégagées par une telle approche, l'IRSN a considéré qu'elle ne permettait pas d'accéder à une compréhension suffisante des écoulements souterrains pour identifier de manière crédible les exutoires possibles actuels (ou futurs) d'une éventuelle installation de stockage et les vitesses de transfert des fluides dans les formations géologiques concernées. Cette approche ne tenait pas compte du rôle hydraulique de la fracturation existante et reconnue à l'échelle du bassin et du secteur, sur ces transferts.

L'IRSN a montré que d'autres modèles hydrogéologiques cohérents avec les données structurales, hydrodynamiques et hydrogéochimiques disponibles étaient possibles. Les modélisations que l'IRSN a effectuées, en collaboration avec l'Ecole Nationale Supérieure

des Mines de Paris, montrent en effet que plusieurs schémas d'écoulement, faisant jouer ou non un rôle hydraulique à la fracturation connue (exutoires et vitesses différents), sont envisageables et ne peuvent pas être discriminés par les dispositifs actuels de mesure ; ils pourraient l'être au moyen de points de mesure supplémentaires. Enfin, une modélisation des écoulements en régime transitoire, à petite comme à grande échelle, a été effectuée par l'IRSN. Elle permet d'une part d'évaluer la perturbation hydraulique occasionnée par le creusement des puits, information importante pour les écoulements à l'aplomb du laboratoire, d'autre part d'estimer quelle pourrait être l'incidence des perturbations occasionnées par le creusement d'ouvrages sur les écoulements dans un éventuel stockage, sachant que le temps de remise à l'équilibre hydraulique de la formation hôte pourrait être long.

Une bonne connaissance des écoulements est nécessaire à la fois pour définir une architecture et des concepts qui minimisent les possibilités de transfert d'activité dans les eaux souterraines, et pour limiter les incertitudes sur les estimations d'impact. Il est à noter que la stratégie d'architecture modulaire proposée par l'ANDRA pour minimiser le rôle hydraulique d'éventuelles fractures ainsi que le positionnement des puits en amont hydraulique des zones de stockage pour réduire les possibilités d'écoulement vers les formations sus-jacentes à la formation hôte sont des options de conception pertinentes. Pour ce qui concerne les évaluations d'impact, il conviendrait que celles qui seront présentées en 2005 soient fondées sur des hypothèses permettant raisonnablement d'encadrer les schémas d'écoulement pouvant conduire aux impacts les plus importants.

2.3 Perturbations mécaniques et thermiques

Perturbations mécaniques de la formation hôte et maîtrise de l'endommagement.

Les laboratoires méthodologiques (Tournemire, Mont Terri) montrent que le creusement d'ouvrages dans des argilites perturbent le milieu en créant autour des excavations un anneau de plus forte perméabilité (zone fracturée et zone plus transmissive dit « EDZ »). En outre, la perméabilité de la formation hôte à proximité des ouvrages pourrait évoluer dans le temps sous l'effet de phénomènes probablement couplés, d'origine mécanique, hydrique et thermique. Ces perturbations pourraient créer des voies de transfert privilégiées vers la biosphère pour la radioactivité qui serait relâchée par les colis de déchets.

Un programme d'étude important du comportement mécanique de la formation hôte est mené par l'ANDRA en vue de proposer une modélisation des endommagements mécaniques résultant de l'implantation d'ouvrages de stockage. Les modèles seront calés sur des observations in situ. Les concepts d'ouvrage de stockage envisagés aujourd'hui tiennent bien compte du risque d'endommagement et sont fondés sur des dispositions visant à minimiser son ampleur et ses effets (limitation des dimensions des ouvrages, localisation et conception adaptées des bouchons et des scellements, orientation des ouvrages par rapport aux contraintes des milieux naturels, limitation de la température à moins de 100 °C au contact des milieux argileux). Par ailleurs, il existe des solutions techniques de creusement, telles que l'utilisation de machines à attaque ponctuelle et de micro-tunneliers, permettant de limiter l'endommagement de la roche hôte.

De son côté, pour remplir son rôle d'expert, l'IRSN a élaboré des modélisations d'ouvrages de stockage pouvant tenir compte de l'endommagement immédiat résultant du creusement des ouvrages et de leur comportement différé. Les modélisations s'appuient notamment sur des données et des lois de comportement établies à partir des recherches effectuées dans la station expérimentale de Tournemire. Les modèles développés permettent de rendre compte des ordres de grandeur des endommagements observables dans les laboratoires méthodologiques. D'autres calculs thermomécaniques initiés par l'IRSN montrent que des chargements importants des soutènements des galeries résulteraient de la dilatation thermique d'un massif accueillant des ouvrages de stockage de déchets fortement exothermiques.

Des résultats très récents obtenus lors du creusement des puits du laboratoire de Bure semblent indiquer que l'endommagement immédiat de la roche est limité et de l'ordre de grandeur suggéré par les modélisations (quelques dizaines de centimètres), mais cet ordre de grandeur devra être confirmé par des observations plus nombreuses. Par ailleurs, les modélisations et les expériences montrent que de larges incertitudes demeurent concernant les perturbations mécaniques induites par une éventuelle installation de stockage, en particulier pour ce qui concerne l'extension et la perméabilité des zones désaturées des argilites, les effets des couplages thermo-hydro-mécaniques et le comportement différé de la roche hôte et des ouvrages. Cependant, les progrès faits dans ce domaine peuvent permettre de formuler des hypothèses pénalisantes palliant, au moins provisoirement, les défauts de connaissances en attente de recherches et observations complémentaires.

Impact thermique du stockage

Les contraintes thermiques à respecter dans la conception d'un stockage peuvent avoir une forte influence sur l'emprise des ouvrages, du fait de l'espacement des colis fortement exothermiques. L'ANDRA devra apporter des éléments concernant les facteurs qui conduiront à fixer des limites thermiques. Il peut s'agir :

- de limiter les températures dans les ouvrages pour éviter une perte d'efficacité des barrières ouvragées, un endommagement supplémentaire de la roche ou une vitesse trop élevée de corrosion des conteneurs,
- de limiter les contraintes mécaniques exercées sur les soutènements des ouvrages en raison de la dilatation thermique du massif,
- de limiter la chaleur dégagée afin de l'évacuer au moyen de dispositifs de ventilation bien maîtrisés durant la phase d'exploitation (en exploitation normale comme en situation accidentelle).

L'IRSN a soulevé ces questions. L'ANDRA prévoit aujourd'hui de limiter la température à la surface des colis à moins de 100 °C, ce qui permet de limiter les possibilités de créer des transformations importantes des barrières ouvragées et de la roche hôte et d'éviter la création de phénomènes physiques trop complexes à modéliser. De plus, la mise en œuvre de sur-conteneurs pour protéger certains colis d'une dégradation trop importante s'ils sont mis en contact avec l'eau alors que leur température est élevée, est une option pertinente. Par ailleurs,

les durées d'entreposage préalable au stockage, nécessaires pour n'introduire en stockage que des déchets dont la puissance thermique aura suffisamment décréu, ont également été estimées.

Les questions de sûreté posées par le dégagement de chaleur des colis de déchets, devraient donc pouvoir être clarifiées à l'échéance 2005.

2.4 Combinaison des facteurs chimiques régissant le relâchement et le transport des radionucléides

Le rôle chimique joué par les composants du stockage est important pour la sûreté, car il détermine pour une grande part la capacité de ces composants à retarder et à limiter les relâchements et le transport des radionucléides. L'étude des interactions chimiques dans un stockage doit permettre en particulier d'évaluer les transformations possibles de la roche argileuse ou des barrières ouvragées, la résistance à la corrosion des composants métalliques, la génération de gaz au sein des ouvrages et les mécanismes de dégradation des colis de déchets.

L'appréciation du rôle des facteurs chimiques nécessite en premier lieu de connaître la composition chimique des eaux de la formation argileuse. Il s'agit d'une donnée de base essentielle pour l'estimation des relâchements et du transport des radionucléides dans le stockage car elle détermine la solubilité et la rétention des radionucléides dans le milieu et contribue à définir les fluides qui réagiront avec les composants du stockage. Cette composition n'est cependant pas directement accessible à la mesure et nécessite de croiser données expérimentales et modélisations interprétatives. Les techniques de prélèvement et de mesures à utiliser pour obtenir des données exploitables sont connues. Elles ont été expérimentées par l'IRSN sur les argilites de Tournemire et du site de Bure en vue d'apprécier la fiabilité des compositions chimiques qui pouvaient être déduites des investigations effectuées par l'ANDRA.

Les interactions chimiques entre composants du stockage figurent parmi les processus les plus complexes à évaluer mais des progrès très significatifs ont été faits dans la modélisation de ces processus, grâce notamment à l'augmentation des capacités de calcul des outils informatiques actuels.

L'IRSN a réalisé ce type de modélisation, en collaboration avec l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, notamment pour évaluer les interactions entre le ciment, qu'il est prévu d'introduire en grandes quantités dans un éventuel stockage, et les argiles. En plus des données disponibles, la modélisation s'appuie sur des expériences effectuées par l'IRSN, spécialement destinées à identifier les principales réactions possibles entre ces deux milieux. Les résultats obtenus confortent les connaissances réunies sur le sujet et montrent que de fortes transformations des argiles se produiraient au contact des ciments, mais que l'extension de la perturbation resterait très limitée, de quelques décimètres à quelques mètres autour des ouvrages de stockage. Il en est de même pour les interactions entre l'argile et les composants métalliques. A ce stade, la question principale est donc d'évaluer les effets locaux de la perturbation, notamment sur les performances de certains colis, des barrières ouvragées et des ouvrages de scellement, et d'en tirer les enseignements pour la sûreté d'un éventuel stockage.

La tenue à la corrosion des conteneurs métalliques des colis est également une question de sûreté dont l'appréciation dépend fortement de la connaissance des conditions d'environnement physique et chimique que les colis rencontreront au cours du temps. Des estimations des vitesses de corrosion des conteneurs ont été effectuées par l'ANDRA. L'IRSN estime que les ordres de grandeur doivent être confirmés par des essais vraisemblablement longs et aussi proches que possible des conditions chimiques rencontrées dans le stockage.

Par ailleurs, les aciers qui sont aujourd'hui pressentis pour les surconteneurs peuvent produire de l'hydrogène lors des réactions de corrosion. Selon des estimations effectuées par l'IRSN, au vu des données actuellement disponibles, la création d'une phase gazeuse mettant en pression les ouvrages d'un stockage est possible à long terme. Mais l'incidence sur la sûreté du stockage de ce phénomène et sur les dispositions de conception qu'il conviendrait de mettre en œuvre, n'est pas encore clairement établie.

Par ailleurs, il est à noter qu'un travail important de recensement des données relatives aux colis de déchets et pouvant avoir une incidence sur la conception d'un stockage a été effectué par l'ANDRA. Outre l'établissement d'un inventaire, ce travail a permis de construire des modèles de relâchement d'activité pour les différentes catégories de colis, y compris les combustibles usés. A ce stade, des éléments suffisants sont disponibles pour réaliser une première estimation des performances possibles des colis dans différentes conditions et définir des hypothèses pénalisantes permettant de tenir compte des incertitudes qui affectent les caractéristiques et les modes de dégradation des colis.

2.5 Faisabilité des scellements

Les scellements sont importants pour la sûreté d'un stockage. Ils sont destinés à obturer les alvéoles de stockage et à fractionner les modules de stockage en compartiments "étanches". Ils sont destinés aussi au bouchage des liaisons jour-fond (puits, éventuelles fractures). Les concepts présentés jusqu'à présent par l'ANDRA supposent que des scellements de haute performance recoupant la zone fracturée de l'« EDZ » soient faisables. Cette affirmation s'appuie sur des essais de scellement réalisés dans des milieux granitiques et sur des essais de bouchage de forages par un noyau de bentonite dans le site argileux de Mol.

Dès 2002, l'IRSN a émis de fortes réserves sur la validité de l'extrapolation de ces essais au site de Bure. Celui-ci présente en effet un comportement mécanique différent de ceux du granite et de l'argile de Mol, ce qui peut avoir une incidence sur la performance de confinement d'un scellement. C'est pourquoi l'IRSN a mené des expériences consistant à mesurer la perméabilité de l'interface entre un bouchon de ciment ou de bentonite et un échantillon d'argilite pour diverses pressions de confinement. Les résultats montrent que l'interface reste bien plus perméable que le bouchon lui-même et jouerait donc un rôle non négligeable dans les flux d'eau transmis par le scellement.

Selon l'IRSN, un scellement efficace doit, d'une part minimiser le rôle hydraulique des zones fracturées autour des ouvrages lors de leur creusement, d'autre part assurer un contact quasiment parfait avec la paroi de l'ouvrage. Par ailleurs, qu'il s'agisse d'ouvrages de

scellement ou de barrières ouvragées de bentonite, il reste à démontrer que l'on peut correctement mettre en place ces ouvrages à l'horizontale (difficultés de compactage dans le cas de bentonites pulvérulentes, difficulté d'ancrage des ouvrages) et que les blocs de bentonite peuvent se "souder" après hydratation.

Ainsi l'IRSN estime que des essais in-situ seront nécessaires à une échelle raisonnablement proche des dimensions des ouvrages d'un éventuel stockage. Il est à noter à cet égard qu'une expérience est en cours dans les argilites du Mont Terri, destinée à évaluer les possibilités d'explicitement efficacement la zone endommagée en vue de réduire sa perméabilité globale. L'ANDRA qui est à l'origine de cette expérience, prévoit de réaliser des expérimentations plus complètes sur le sujet dans le laboratoire de Bure. Ces expériences devraient apporter des éléments de réponse importants, mais il est évident que les performances de confinement que pourraient atteindre des ouvrages de scellement ne pourront être définies, avec un degré suffisant de confiance, qu'après la réalisation d'essais probants vraisemblablement de plusieurs années.

Comme pour d'autres sujets, des hypothèses volontairement pénalisantes devront donc être prises pour tenir compte, dans l'étude de faisabilité d'un stockage, des incertitudes sur les performances des scellements.

2.6 Sûreté de l'exploitation et de l'état réversible d'un stockage

Ces aspects n'ont pour l'instant été que relativement peu débattus.

La question principale est que les dispositions techniques prises pour construire, exploiter et conserver un stockage dans un état "réversible" peuvent avoir une incidence a priori non négligeable sur l'élaboration des concepts de stockage eux-mêmes. A titre d'exemples, les puits et les galeries nécessaires pour ventiler le stockage ou acheminer les matériaux nécessaires à sa construction sont autant de points sensibles du stockage (chemins préférentiels possibles pour des transferts d'activité). Par ailleurs, la réversibilité peut imposer des surdimensionnements des soutènements non souhaitables pour le long terme (augmentation de la quantité de ciments et de métaux, donc des perturbations chimiques).

Les données disponibles à l'IRSN sur la phase d'exploitation sont à ce stade très préliminaires, en particulier pour ce qui concerne les dispositions permettant de maîtriser les risques de chute de colis, d'incendie, d'explosion, de contamination par dispersion de gaz radioactifs et de criticité. Un certain nombre de situations accidentelles devront être traitées, telles que la perte de ventilation, l'incendie ou la contamination d'un secteur du stockage. Par ailleurs, la manutention des colis stockés dans des tunnels horizontaux peut s'avérer problématique compte tenu des risques de blocage dus aux déformations des ouvrages et doit également tenir compte de l'altération possible des matériaux et de la roche hôte.

Enfin, une des questions clés concernant ces phases de la vie d'un stockage est de pouvoir vérifier la qualité de la réalisation des ouvrages et surveiller les paramètres influant sur leur évolution. Cela peut s'avérer difficile pour ce qui est du comportement des alvéoles remplis. Sur ce point, l'IRSN estime que la proposition d'« alvéoles témoins » est a priori intéressante.

2.7 Identification et hiérarchisation des incertitudes

Une synthèse des acquis et des incertitudes relatifs aux questions de sûreté d'un éventuel stockage (cf. fiche 3) est importante pour préciser les points forts et démontrables de la sûreté d'un stockage et montrer comment les concepts permettent de compenser les points faibles du site, pour identifier les points sur lesquels pèsent les incertitudes essentielles, et pour déterminer les nécessités de recherches complémentaires. Cela suppose également d'intégrer l'ensemble des informations disponibles en familles de scénarios d'évolution du stockage cohérentes et de réaliser une modélisation globale permettant d'estimer l'impact du stockage et sa robustesse. Une "première vérification de sûreté" a déjà été produite par l'ANDRA. Elle a constitué un bilan des connaissances et de l'état d'avancement des recherches et études.

Dans le domaine de la modélisation globale de l'évolution d'un stockage, l'IRSN a une expérience importante puisqu'il a participé, depuis plus de 20 ans, aux principaux projets de recherches de la communauté européenne sur le sujet (projets EVEREST, SPA, BENIPA notamment). Ces exercices de modélisation, effectués pour des sites génériques, ont permis de mettre au point des méthodes et des outils de calcul pour apprécier les transferts possibles de radioactivité dans les milieux géologiques et les rôles que peuvent jouer les différents composants du stockage sur ces transferts. De manière générale, ces exercices montrent qu'un stockage bien conçu, sur la base de barrières de confinement multiples, permet, même en cas de défaillance sévère d'un ou plusieurs composants, d'atténuer sensiblement les flux de substances radioactives traversant le milieu géologique.

Pour la formation argileuse de Bure, l'IRSN évaluera les résultats des modélisations effectuées par l'ANDRA, sur la base de l'expérience qu'il a acquise ainsi que de simulations spécifiques.

3. POINT DE VUE DE L'IRSN SUR LE POTENTIEL DES FORMATIONS GRANITIQUES

Sur la base des données disponibles en France et à l'étranger, l'IRSN estime que les formations granitiques en profondeur ne présentent pas, de façon générique, de caractéristiques géologiques rédhitoires à l'implantation d'un éventuel stockage.

Le concept international « de référence », étudié notamment par les Suédois et les Finlandais, n'est pas incompatible avec les massifs granitiques français les plus stables, à condition que son implantation soit éloignée des grandes failles. La typologie des granites français montre par ailleurs que leurs caractéristiques mécaniques et thermiques seraient plutôt favorables.

Toutefois, la connaissance de la fracturation et de l'hydrogéologie des granites en profondeur reste déterminante pour la conception d'un éventuel ouvrage de stockage, notamment l'identification de blocs pluri-hectométriques à kilométriques, de faible perméabilité. Sur ce point, les résultats d'investigations disponibles ne sont pas assez nombreux pour permettre, sur la seule base d'études génériques, de statuer aujourd'hui sur l'existence ou non de sites présentant des propriétés de confinement a priori suffisantes pour envisager l'implantation d'un stockage. Seules des reconnaissances in-situ détaillées pourraient permettre d'accéder à la connaissance nécessaire pour traiter de cette question. Il convient toutefois de noter que la reconnaissance préliminaire d'un site du massif de Charroux dans la Vienne n'a pas montré de caractéristiques excluant l'existence de blocs sains et de taille suffisante dans ce site. La configuration géologique de ce site peut se retrouver sur d'autres sites.

Par ailleurs, le creusement des ouvrages de stockage pourrait induire des perturbations hydrauliques et hydrogéochimiques modifiant les écoulements dans l'environnement de l'installation. La limitation de ces perturbations serait un enjeu important de sûreté.

D'autres incertitudes devraient être appréciées, mais qui concernent tous les milieux, qu'ils soient granitiques ou argileux, concernant par exemple les performances des bouchons et des scellements, la durée de vie des conteneurs, l'évolution à long terme des matériaux à base de ciment, le dimensionnement thermique, la génération de gaz ou la manutention horizontale automatisée.

4. REMARQUES SUR LE CONCEPT DE REVERSIBILITE

La fonction première que doit remplir un stockage est de protéger l'homme et l'environnement d'une manière sûre en isolant les déchets. Pour une durée très longue, il est nécessaire d'assurer le maintien de cette fonction soit en restaurant de façon permanente la qualité du stockage, soit en s'assurant que sa qualité perdurera même en cas d'oubli.

L'entretien est une solution sûre, éprouvée et durable ? de maintien à niveau de la sûreté d'une installation dès lors que des ressources appropriées sont apportées continuellement : surveillance, actions en cas de nécessité allant jusqu'au retrait des colis pour les placer dans un autre ouvrage. C'est le mode de fonctionnement classique d'un entreposage. Dans le cas où la fermeture puis la possibilité d'oubli du stockage sont prévues dès la conception de l'ouvrage, il est supposé que l'entretenir n'est plus utile à partir de la fermeture.

La notion de « réversibilité » d'un stockage est une précaution supplémentaire qui correspond à la possibilité de laisser des choix ouverts : retrait des colis du dépôt pour en faire un autre usage, fermeture volontaire, prolongement de la réversibilité. La notion de réversibilité amène ainsi à concevoir un type d'ouvrage que l'on pourrait qualifier « d'entreposage géologique convertible en stockage » par étapes successives au fur et à mesure du processus d'apprentissage. Elle ne correspond pas en soi à une exigence de sûreté.

Même si cette acception de la réversibilité permet déjà d'orienter la conception de l'installation, il n'en reste pas moins que l'étude de faisabilité d'un projet industriel nécessite sans doute de se fixer des bases temporelles plus précises. Une hypothèse de travail pourrait être d'étudier la faisabilité d'un cycle de réversibilité, qui consisterait à assurer une reprise aisée des colis après la phase d'exploitation de l'installation correspondant à la mise en place des colis de déchets dans la formation géologique profonde retenue, puis, s'il est décidé de les reprendre, pendant tout le temps nécessaire à leur retrait et à la mise en œuvre de leur entreposage dans une autre installation. La durée d'un tel cycle serait vraisemblablement de l'ordre d'un siècle.

La recherche de réversibilité d'un stockage induit donc des effets à retenir dans l'évaluation de sûreté. A court terme, quand faudra-t-il renforcer les soutènements ? Comment maintenir dans le temps la possibilité de reprise des colis et le maintien des espacements nécessaires à la manutention ? Que prévoir pour faire face aux comportements anormaux comme d'éventuelles venues d'eaux souterraines ? A long terme, quel sera le comportement des zones endommagées par l'excavation dont l'argilite aura été longtemps exposée à l'atmosphère, provoquant décompression et dessiccation ? Ses propriétés de rétention chimique seront-elles maintenues ? Comment garantir la tenue mécanique des colis ? Quelle estimation de leur durée de vie ? Comment intégrer la possibilité de manutention de conteneurs défectueux ?

Il est à noter que ces questions se posent dans une moindre mesure pour la phase d'exploitation d'un éventuel stockage non réversible.

Enfin, du point de vue de la sûreté, l'oubli d'un stockage en phase de réversibilité (avant la fermeture de l'ouvrage) est à examiner.

Les divers modes de fonctionnement d'un stockage géologique réversible ne peuvent s'enchaîner, ni dans n'importe quel ordre, ni sans limite dans le temps. C'est pourquoi il y a nécessité de qualifier les moyens de vérifier le bon comportement des ouvrages, d'élaborer un processus décisionnel pour conserver la maîtrise des choix au cours du temps et de fixer des points de rendez-vous, en particulier pour décider laquelle des solutions, retrait, poursuite de l'entreposage, fermeture du stockage, est retenue pour l'avenir.

ANNEXE

Approche de sûreté

1. **A Framework for Elaborating a Geological Disposal safety Case : Main issues to be Addressed** – F. Besnus, D. Gay (IPSN – Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, BP 6, 92265 Fontenay-Aux-Roses, France) – *International Atomic Energy Agency IAEA-TECDOC-1282 – Issues relating to safety standards on the geological disposal of radioactive waste , Vienne, 18-22 June 2001.*
2. **Gas Generation in High Level Waste Geological Disposal : Elements for Integration in a Safety Strategy** – F. Besnus (IPSN – Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire,) – *Workshop “Gas generation and Migration in Radioactive Waste Disposal : Safety Relevant Issues” Workshop Proceedings AEN (2001).*
3. **Modeling Approach for Safety Assessment of French High Activity Waste Disposal** – C. Serres and F. Besnus (IRSN, Waste Safety Department BP 17, 92262 Fontenay-Aux-Roses, France) – *International Symposium NUCEF2005, Tokai-mura, Ibaraki-ken, Japan, 9-10 February 2005 (à paraître).*

Géologie, hydrogéologie et transport en milieu poreux

1. **Modeling sorbing and non-sorbing solute migration in a real fracture geometry using lattice-gas cellular automaton** - Valérie Pot (INRA - Unité Environnement et Grandes Cultures, UMR INRA - INA P-GThiverval-Grignon), Alain Genty (IRSN – Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, BP 6, 92265 Fontenay-Aux-Roses, France), *XV international conference on Computational Methods in Water Resources, June 13-17, 2004, Chapel Hill, North Carolina, USA.*
2. **Numerical modelling of hydraulic decompression due to the excavation of tunnel and drifts at the Tournemire underground laboratory** – Claude Mügler (Commissariat à l'Energie Atomique, Saclay, 91191 Gif sur Yvette Cedex, France), Alain Genty et Justo Cabrera (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, BP 6, 92265 Fontenay-aux-Roses Cedex, France) - *Geotechnical and Geological Engineering 22: 525-543, 2004.*
3. **Ventilation experimental at Mont-Terri : Comparison of experimental and modelled data of the saturation state of the opalinus clay for the dry-air ventilation phase** - J.M. Matray IRSN – Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, BP 6, 92265 Fontenay-Aux-Roses, France), A. Giraud (LAEGO, Nancy) – *Eurosafte 2004, Berlin*
4. **Modeling the possible role of faults in saturated zone radioactive transport** – A. Claisse, F. Besnus, Y. Lozac’h, C. Certes, (IRSN – Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, BP 6, 92265 Fontenay-Aux-Roses, France), P. Viennot (CIG – Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau, France) – *International High-level Radioactive Waste Management Conference, Las Vegas 2003.*

5. **An Independent Groundwater Flow Model for Yucca Mountain** – A. Claisse (IRSN – Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, BP 6, 92265 Fontenay-Aux-Roses, France), James R. Winterle (Center for Nuclear Waste regulatory Analyses, San Antonio, TX), Hans D. Arlt (U.S. Nuclear Regulatory Commission, Rockville, MD) – *International High-level Radioactive Waste Management Conference, Las Vegas 2003*.
6. **Numerical Homogenization of Flow Through Fractured Porous Media** - B. Amaziane, M. El Ossmani (Université de Pau, Laboratoire de Mahtématiques), and C. Serres (IRSN – Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, BP 6, 92265 Fontenay-Aux-Roses, France), *CP10 Upscaling Flow and Transport in Porous Media. SIAM Conference GS03, Austin, Texas, March 17-20, 2003*.
7. **Numerical Modelling for Radioactive Underground Repository Optimization** - C. Serres (IRSN – Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, BP 6, 92265 Fontenay-Aux-Roses, France), B. Amaziane (Université de Pau, Laboratoire de Mahtématiques), A. Bourgeat (Université Lyon1 - UCB; Equipe MCS), *ICIAM 2003 5th International Congress on Industrial and Applied Mathematics, Sydney, Australia, July 7-11, 2003*.
8. **Simulation Numérique d'Écoulement et de Transport de Contaminants en Milieux Poreux Hétérogènes** – B. Amaziane, M. El Ossmani (Université de Pau, Laboratoire de Mahtématiques) et C. Serres (IRSN – Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, BP 6, 92265 Fontenay-Aux-Roses, France), *6èmes Journées Milieux Poreux, 12-13 Novembre 2003, IMFT, Toulouse*.
9. **The Ventilation Experiment at Mont Terri : Preliminary results and interpretation of the low humidity-air phase**. J.M. Matray (IRSN – Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, BP 6, 92265 Fontenay-Aux-Roses, France). F. Coste (ARCADIS, Sèvres) (2003) *Eurosafe 2003, Paris*, Seminar 3 Waste Management, pp 45-54.
10. **Different hydraulic properties of single fractures in argillaceous medium: the case of the IRSN Tournemire site (France)** - S. Savoye, J. Cabrera, J.M. Matray (IRSN – Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, BP 6, 92265 Fontenay-Aux-Roses, France) - *International conference on groundwater in fractured rocks, Prague, 15-19/09/2003*
11. **National Hydrological Research Programme (CNRS/PNRH 99/35-01/44): Fluid Transfer Modelling of the Paris Basin** - S. Violette, J. Gonçalves, A. Jost (UMR-Sisyphé, LGA, Université Paris VI), D. Bruel (UMR-Sisyphé, ENSMP/CIG), J.-C. Gros (IRSN - Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, BP 17, 92262 Fontenay-aux-Roses Cedex) & The PNRH Programme partners (LMD-Université Paris VI, UPR.4661-Géosciences-Université Rennes 1, UMR.6531-LGMO-Université d'Orléans, UMR.7566-G2R-Université de Nancy, UMR.5125-Université Lyon 1, INERIS-Verneuil-en-Halatte, LSCE-CEA Saclay, ANDRA, GDF, INSU), *EUROSAFE 2003, Paris 2003*.

12. **Instrument for measuring pore pressure and permeability in low permeability clay** – L. Bertrand, R. Lavignerie, (ANTEA, Orléans), J. Cabrera, J.M Matray et S. Savoye (IRSN - Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, BP 17, 92262 Fontenay-aux-Roses Cedex Fontenay-aux-roses) - *International Meeting Reims 2002 "Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement"*, Reims, 09 - 12 décembre 2002
13. **Intraplate paleostresses reconstructed with calcite twinning and faulting: improved method and application to the eastern Paris Basin (Lorraine, France)** - M. Rocher - *Tectonophysics* 387 (2004) 1–21
14. **Vitesse des ondes ultrasonores, soniques et sismiques dans les argilites du tunnel de Tournemire. Effet de l'anisotropie et de la fracturation naturelle** - B. Zinszner, P. Meynier (Institut Français du Pétrole, 1 et 4 av. de Bois-Préau, 92852 Rueil-Malmaison Cedex, France) J. Cabrera, P. Volant ((Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, BP 17, 92262 Fontenay-aux-Roses Cedex, France)- *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP, Vol. 57 (2002) N°4, pp. 341-353*
15. **Continuum modeling of contaminant transport in fractured porous media** – P. Royer, JL. Auriault (Laboratoire Sols, Solides, Structures (3S), UJF, INPG, CNRS, BP 53, 38041 Grenoble Cedex), J. Lewandowska (Laboratoire d'études des Transferts en hydrologie et Environnement (LTHE), UJF, INPG, CNRS, IRD, BP 53, 38041 Grenoble Cedex, France), C. Serres (IPSN – Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, BP 6, 92265 Fontenay-Aux-Roses, France), *Transport in Porous Media 49 : 333-359, Kluwer Academic Publishers, 2002.*
16. **Modeling Fractures as Interfaces for Flow and Transport in Porous Media** – C. Alboin (Thales, Centre René Mouchotte, 78852 Elancourt, Cedex, France), J. Jaffré, J. E. Roberts (INRIA-Roquencourt, BP 105, 78153 Le Chesnay Cedex, France), C. Serres (IPSN – Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, BP 6, 92265 Fontenay-Aux-Roses, France), *Contemporary Mathematics Volume 295, 2002.*
17. **Evaluation of the 3D Seismic High-resolution method at argillaceous Tournemire IRSN site** – Justo Cabrera ((Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, BP 6, 92265 Fontenay-aux-Roses Cedex, France) - *EUROSAFE Waste Management, Berlin, 2002.*
18. **Synthèse des programmes de recherche 1995-1999 – Projet Tournemire** – Justo Cabrera, Catherine Beaucaire, Gérard Bruno, Laurent DeWindt, Alain Genty, Nirina Ramambasoa, Amel Rejeb, Sébastien Savoye et Philippe Volant (Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, BP 6, 92265 Fontenay-aux-Roses Cedex, France) - *IPSN/DPRE/SERGD 01-19, 2001.*

19. **Characterisation of discontinuities in an argillaceous medium (Tournemire site) : Key questions related to safety assessment of radioactive waste disposal** - Justo Cabrera (Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, BP 6, 92265 Fontenay-aux-Roses Cedex, France) – *EUROSAFE 2001, Paris, 2001.*
20. **Mesure des très faibles perméabilités dans les argilites: expériences acquises dans les sites expérimentaux de Tournemire et du Mont-Terri** - J.Y. Boisson Géologue - (*Revue officielle de l'Union Française des Géologues*), n° 129, Août 2001, UFG Paris (France), pp. 54-61
21. **In situ and laboratory investigations of fluid flow through an argillaceous formation at different scales of space and time, Tournemire tunnel, southern France** - J.Y. Boisson, L. Bertrand, J.F. Heitz, Y. Moreau-le-Golvan - *Hydrogeology Journal, Vol. 9 (2001), n°1, special issue on confining units, Springer Verlag pp. 108-123*
22. **Hydro-thermo-mechanical evolution of the Paris Basin and fluid/mass coupled transfers modelling** - J.-C. Gros (IPSN - Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, BP 6, 92265 Fontenay-aux-Roses Cedex), S. Violette (UMR-Sisyphé-Université Paris VI), D. Bruel (UMR-Sisyphé-ENSMP/CIG), *poster, EUROSAFE 2001, Paris 2001.*
23. **The argillaceous indurated media as a potential geological barrier for deep radioactive waste disposal : Studies at the experimental IPSN Tournemire Site** - Justo Cabrera, Laurent DeWindt, Gérard Bruno, Amel Rejeb, Alain Genty et Philippe Volant (Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, BP 6, 92265 Fontenay-aux-Roses Cedex, France) - *SafeWaste 2000, France, 2000.*
24. **Structural and geophysical investigations of the EDZ (Excavation Disturbed Zone) in indurated argillaceous media : The tunnel and the galleries of the IPSN Tournemire site (France)** – Justo Cabrera and Philippe Volant ((Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, BP 6, 92265 Fontenay-aux-Roses Cedex, France), C. Baker and W. Pettit (Applied Seismologie Consultants Ltd – 10, Belmont, Shrewsbury, United Kingdom) and R.P. Young (Applied Seismology and Rock Physics Laboratory – Keele University, Keele, Staffs., ST5 5BG, United Kingdom) – *Vail Rocks '99, Colorado, USA, 1999.*
25. **Homogenization of Contaminant Transport in fractured Porous Media** - C. Serres (IPSN – Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, BP 6, 92265 Fontenay-aux-Roses, France), P. Royer, J.L. Auriault (Laboratoire Sols, Solides, Structures (3S), UJF, INPG, CNRS, BP 53, 38041 Grenoble Cedex) – *In Proceedings of the International Symposium on Dynamics of Fluids in Fractured Rocks, B. Faybishenko Ed. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 10-12 February 1999.*
26. **Hydrogeological modelling in support of Geological Disposal Safety Assessment** – A. Claisse (IPSN – Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, BP 6, 92265 Fontenay-aux-Roses, France), *EUROSAFE 1999, Paris.*

27. **Domain decomposition for some transmission problems in flow in porous media** - J. Jaffré, J. E. Roberts, X. Wang, C. Alboin (INRIA-Roquencourt, BP 105, 78153 Le Chesnay Cedex, France), C. Serres (IPSN – Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, BP 6, 92265 Fontenay-aux-Roses, France), *In Multiphase Flow and Transport in Porous Media*, Z. Chen, R.F. Ewing and Z.C. Shi eds, Springer 1999.
28. **Numerical Modeling of the Flow and Transport of Radionuclides in Heterogeneous Porous Media** – B. Amaziane, M. El Ossmani (Université de Pau, Laboratoire de Mahtématiques) et C. Serres (IRSN – Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, BP 17, 92262 Fontenay-aux-Roses, France), *Computational Geosciences*. (A paraître).

Modélisation intégrée d'un stockage – Exercices d'évaluation d'impact

1. **Lessons learnt from IRSN modelling performed for the 5th EC PCRD BENIPA exercise** - D. Pellegrini, F. Besnus, C. Certes, F. Deleruyelle, C. Serres (IRSN – Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, BP 17, 92262 Fontenay-aux-Roses, France), *EUROSAFE 2003, Paris 2003*.
2. **Evaluating effect of design options on flow and transport** - C. Serres, A. Claisse, F. Besnus (IPSN – Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, BP 6, 92265 Fontenay-Aux-Roses, France) – *International High-Level Radioactive Waste management Conference 2001*.
3. **Radiological impact of a spent fuel disposal in deep geological granite formation – Results from the European SPA Project** – P. Baudoin, D. Gay, C. Certes, C. Serres (IPSN – Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, BP 6, 92265 Fontenay-aux-Roses, France), *Safewaste 2000, Les déchets nucléaires : de la recherché à la maîtrise industrielle* » Montpellier 2 au 4 octobre 2000.
4. **Influence of biosphere modeling on integrated performance assessment results : Lessons Learnt From the SPA Project** – D. Gay, F. Besnus, P. Baudoin (IPSN – Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, BP 6, 92265 Fontenay-aux-Roses, France) – *IRPA 10, 10th International Congress of the International Radiation Protection Association “Harmonization of Radiation, Human Life and the Ecosystem”, Hiroshima, Japan, May 14-19, 2000*.
5. **Some comments from the integrated performance assessment point of view on the behaviour of a deep geological disposal system. Cases of I-129 and heavy nuclides releases** – F. Besnus, D. Gay, P. Baudoin, C. Certes, C. Serres (IPSN – Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, BP 6, 92265 Fontenay-aux-Roses, France) – *WM symposia “HLW, LLW, Mixed Wastes and Environmental Restoration – Working Towards a Cleaner Environment” Tucson, Arizona, February 27 – March 2, 2000*.

6. **Performance assessment of a geological repository for spent fuel : Highlights of the SPA Project** – P. Baudoin, D. Gay, C. Certes, C. Serres (IPSN – Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, BP 6, 92265 Fontenay-aux-Roses, France) – *In Eurodewaste 1999, Fifth European Commission conference on radioactive Waste Management and Disposal and Decommissioning, Brussels 15-18 november 1999.*
7. **The EU Everest Project: Evaluation of elements responsible for the dose equivalent associated with the final disposal in deep geological formations of radioactive waste** – P. Baudoin, C. Certes, P. Escalier des Orres (IPSN – Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, BP 6, 92265 Fontenay-aux-Roses, France), *International Conference on Deep geological Disposal of Radioactive Waste, Conference Proceedings, Canadian Nuclear Society, 1996*

Géomécanique

1. **Contacts argilite/béton : résultats hydromécanique préliminaires**, O. Buzzi, J. Hans, M. Boulon (Laboratoire 3S – Université Joseph Fourier, 38041 Grenoble, France) – F. Deleruyelle, F. Besnus (IRSN - Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, BP17, 92262 Fontenay-aux-Roses, France) – *16^{ème} Congrès Français de Mécanique (CFM2003), 1-5 septembre 2003, Nice.*
2. **Hydromechanical behaviour of a bentonite/rock interface : preliminary experimental results**, O. Buzzi, J. Hans, M. Boulon (Laboratoire 3S – Université Joseph Fourier, 38041 Grenoble, France) – F. Deleruyelle, F. Besnus (IRSN - Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, BP17, 92262 Fontenay-aux-Roses, France) - *ALERT Workshop and European Graduate School, Aussois, France, October 6-8 2003.*
3. **Implications of coupled thermo-hydro-mechanical processes on the safety of a hypothetical nuclear fuel waste repository** - T. S. Nguyen, M. Chijimatsu, J. De Jonge, L. Jing, M. Kohlmeier, A. Millard (CEA/DEN), A. Rejeb (IRSN), J. Rutqvist (LBL/USA), M. Souley (INERIS), Y. Sugita - *Proc; GeoProc 2003, pp. 215- 221 - Part 1, International Conference on coupled THMC processes in geosystems, 13-15 octobre, Stockholm, Suède.*
4. **The influence of in situ stresses on the coupled HM response of saturated rock against tunnelling excavation** - J. Rutqvist (Lawrence Berkeley National Laboratory), A. Rejeb, M. Tijani (Ecole des Mines de Paris/CGES), T. C. Tsang (LBL/USA) - *Proc; GeoProc 2003, pp. 114- 119, Part 1, International Conference on coupled THMC processes in geosystems, 13-15 octobre, Stockholm, Suède*
5. **Time dependant behaviour of Tournemire argilites (France)** - A. Rejeb (IRSN) - *ISRM 2003, Gauteng (Afrique du sud), 8-12/09/2003 Congrès International de Mécanique des Roches, 8-12 septembre 2003, Afrique du Sud*

6. **Evaluation of the importance of thermo-hydro-mechanical couplings on the performance assessment of a deep underground storage design** – A. Millard (CEA/DEN/DMT), A. Rejeb (IRSN) - *ISRM 2003, Congrès International de Mécanique des Roches, 8-12 septembre 2003, Afrique du Sud.*
7. **Numerical modeling of underground structures taking into account the visco-plastic behaviour and damaging of rock** – F. Pellet, A. Hajdu & M. Boulon (Laboratory 3S – Université Joseph Fourier, 38041 Grenoble, France) – F. Deleruyelle, F. Besnus (IRSN – Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, BP17, 92262 Fontenay-aux-Roses, France) – *Proceedings of NUMOG VIII – A.A. Balkema, Rotterdam, Pande & Pietruszczak (eds), 8th International Symposium Rome, Italy, April 10-12 2002.*
8. **Effect of a fractured zone on drift behaviour in the argillaceous Tournemire site (France)** - G. Armand (IRSN), A. Rejeb (IRSN) (2002) *Proc. ROCKMEC'2002, pp. 275-282, octobre 2002, Konya, Turquie*
9. **The Effect of topography on in situ stresses in argillaceous rock at Tournemire, France** - A. Rejeb (IRSN) - *Proc. ROCKMEC'2002, pp. 65 – 70, octobre 2002, Konya, Turquie*
10. **Experimental evaluation of the termo-hydro-mechanical behaviour of the fractures in Tournemire Site (France)** – A. Rejeb (IRSN), B. Pincet (ARCADIS), Ph. Robino (ARCADIS - *International Meeting Reims 2002 "Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement", Reims, 09 - 12 décembre 2002*
11. **Hydromechanical effects of shaft sinking at the Sellafield site** - A. Rejeb (IRSN), D. Bruel (Ecole des Mines de Paris)- *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Decovalex II, Special Issue, Vol. 38, n°1, January 2001, pp. 17-29*
12. **Constitutive modeling of Tournemire shale hydromechanical behaviour** - N Ramambasoa (IRSN), D. Nguyen- Minh (LMS/ Ecole Polytechnique), A. Rejeb (IRSN) - *International Workshop on Geomechanics - THM behaviour of deep argillaceous rocks - Theory and experiment, Paris, 11-12/10/2000*
13. **Laboratory investigation of the mechanical properties of Tournemire shale – Effects of excavation and desaturation** - A. Rejeb (IRSN), G.Vouille (Ecole des Mines/CGES), F. Vales - *International Workshop on Geomechanics – THM behaviour of Deep Argillaceous Rocks – Theory and Experiment, Octobre 2000, Paris, France*
14. **Etude expérimentale du comportement thermo-hydro-mécanique des fractures dans le site de Tournemire (France)** - A. Rejeb - *Colloque international de géotechnique, Beyrouth Liban*
15. **A viscoplastic model including anisotropic damage for the time dependent mechanical behaviour of rock** – F. Pellet, A. Hajdu (Laboratory 3S – Université Joseph Fourier, 38041 Grenoble, France) – F. Deleruyelle, F. Besnus (IRSN – Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, BP17, 92262 Fontenay-aux-Roses, France) –

International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanic (Editor Wiley) (à paraître)

16. **Numerical modeling of the excavated damaged zone around underground openings** – F. Pellet, F. Z. Zerfa & A. Hajdu (Laboratoire 3S – Université Joseph Fourier, 38041 Grenoble, France) – F. Deleruyelle, F. Besnus (IRSN - Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, BP17, 92262 Fontenay-aux-Roses, France) – 3rd *Asian Rock Mechanics Symposium, Kyoto, Japan, 30/11/2004- 02/12/2004 (à paraître)*

Géochimie

1. **Reactive transport modeling of a spent fuel repository in a stiff clay formation considering excavation damaged zones**, L. De Windt*, D. Pellegrini** and J. van der Lee* (*Ecole des Mines de Paris, CIG, Fontainebleau, **Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, Fontenay-aux-Roses, France), In *Radiochimica Acta 92, 841-848 (2004)*.
2. **Coupled modeling of cement/claystone interactions and radionuclide migration**, L. De Windt*, D. Pellegrini**, J. van der Lee*, (*Ecole des Mines de Paris, CIG, Fontainebleau, **Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, DES, Fontenay-aux-Roses), In *Journal of Contaminant Hydrology 68 (2004) 165-182*.
3. **In situ diffusion of HTO, 22Na+, Cs+, and I- in opalinus clay at the Mont Terri underground rock laboratory**. L.R van Loon¹, P. Wersin², J.M. Soler³, J. Eikenberg², Th. Gimmi⁴, P. Hernan³, S. Dewonck⁵, S. Savoye⁶. (¹PSI, ²NAGRA, ³ENRESA, ⁴Univ Bern, ⁵ANDRA, ⁶IRSN) *Radiochimica Acta vol 92 9-11 (2004) page 757-764*.
4. **Determination of isotopic composition of interstitial water in indurated shales by means of an improved radial method** - S. Savoye¹, C. Wittebroodt¹, J-L. Michelot² (¹ IRSN ; ² UMR IDES Paris-Sud)- *International Workshop on the application of isotopes techniques in hydrological and environmental studies, Paris, 06-08/09/2004*
5. **Using different technical approaches for pore water isotopic characterisation of an argillaceous rock** V.Altinier^{1,2}, M.Massault², S.Savoye¹, C.Beaucaire¹, J-L. Michelot², N.Waber³. (¹ IRSN, SARG ; ² UMR IDES Paris-Sud ; ³ Water rock interaction group Univ Bern). *International Workshop on the application of isotopes techniques in Hydrological and environmental studies, Paris, 06-08/09/2004*
6. **Diffusion as the main process for mass transport in very low content argillites : 1 Chloride as a natural tracer for mass transport. Diffusion coefficient and concentration measurements in interstitial water** - Patriarche, D.^{1,2}, J.-L. Michelot¹, E. Ledoux², and S. Savoye³ (¹UMR IDES Paris-Sud ;² ENSMP ³ IRSN). - *Water Resources Research, vol. 40, 1-19, 2004*

7. **Influence of thermal stress on kerogen from the underground Mol laboratory (Boom clay formation, Oligocene, Belgium). II Simulation Experiments** - I. Deniau, C. Beaucaire, H. Pitsch (IRSN, Fontenay-aux-roses) - *21st International meeting on organic geochemistry, Cracovie, Pologne, 8-12/09/2004*
8. **The ion-exchange properties of the Tournemire argillite I. Study of the H, Na, Cs, Ca and Mg behaviour** – P. Jacquier (CEA, Saclay), C. Beaucaire (IRSN, Fontenay-aux-roses) - *Applied Clay Science 26 (2004) pp 163-170*
9. **Study of Iodide sorption to the argillite of Tournemire in alkaline media** – K. Devivier, I. Devol-Brown, S. Savoye (IRSN, Fontenay-aux-Roses) - *Applied Clay Science 26, pp 171-179*
10. **Characterization of argillites heated by a basaltic intrusion at Laumière (Aveyron, France), evolution of the mineral combination with depth and intrusion proximity** - E. Kohler (IRSN, Fontenay-aux-Roses), C. Pozo, J. Raynal, M. Jullien, (CEA Cadarache), C. Beaucaire, H. Pitsch, J. Cabrera (IRSN, Fontenay-aux-roses)- *Geophysical research abstracts, vol. 5, 14660 (2003)*
11. **Assessment of geochemical containment properties in the near-field of a deep underground repository**, D. Pellegrini (Institute de Radioprotection et de Sûreté Nculaire, Fontenay-aux-Roses), L. De Windt (Paris School of Mines, CIG, Fontainebleau), published in *Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 757, 19-25, Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVI, Editors R.J. Finch & D.B. Bullen, Symposium held December 2-5, 2002, Boston, Massachussets, USA.*
12. **Assessment of near-field containment properties disturbed by an alkaline plume**, D. Pellegrini (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, Fontenay-aux-Roses), L. De Windt (Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau), *Eurosafe 2002, November 4-5, Berlin, Germany, 2002.*
13. **Fully coupled modeling of radionuclide migration in a clayey rock disturbed by alkaline plume**, L. De Windt*, D. Pellegrini**, J. van der Lee*, (*Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau, **Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, Fontenay-aux-Roses), *TrePro '02 Modeling of Coupled Transport Reaction Processes, March 20-21, Karlsruhe, Germany, FZKA 6721, 5-8, 2002.*
14. **Study of iodide sorption on the argillite of Tournemire**. K. Devivier, S. Savoye, I. Devol. Brown IRSN – Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, Fontenay-aux-Roses, France). *Goldschmidt Conference 2002, Davos (Suisse) août 2002; Abstract dans Geochimica et Cosmochimica Acta, p 1203*

15. **The Tournemire Argillite: ion - exchange properties and sorption of Cs and Se (IV)** - P. Jacquier, J. Ly, (CEA, Saclay), C. Beaucaire (IRSN, Fontenay-aux-Roses) - *International Meeting Reims 2002 "Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement"*, Reims, 09 - 12 décembre 2002
16. **Chemical structure, morphological features and thermal behaviour of the insoluble organic matter from boom clay formation (Belgium): Model site for deep geological disposal of nuclear waste** - I. Deniau (IRSN, Fontenay-aux-Roses), Sylvie Derenne (ENSCP, Paris), C. Beaucaire, H. Pitsch, (IRSN, Fontenay-aux-Roses), Claude Largeau (ENSCP, Paris) - *International Meeting Reims 2002 "Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement"*, Reims, 09 - 12 décembre 2002
17. **Iodide sorption on the argillite of Tournemire in alkaline media** - K. Devivier, I. Devol-Brown, S. Savoye (IRSN, Fontenay-aux-Roses) - *International Meeting Reims 2002 "Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement"*, Reims, 09 - 12 décembre 2002
18. **Separation of the organic and clayey fractions of a mudrock** - I. Devol-Brown, H. Pitsch (IRSN, Fontenay-aux-Roses), J. Ly(CEA, Saclay), C. Beaucaire (IRSN, Fontenay-aux-roses) - *International Meeting Reims 2002 "Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement"*, Reims, 09 - 12 décembre 2002
19. **Determination of isotopic composition of interstitial water in indurated shales : the in situ radial diffusion method** - S. Savoye¹, J.L Michelot², M. Piedevache³ (¹ IRSN, SARG ; ² UMR IDES Paris-Sud ; ³ SOLEXPERTS AG, Suisse). - *International Meeting Reims 2002 "Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement"*, Reims, 09 - 12 décembre 2002
20. **Effect of carbonate ions on pyrite (FeS₂) dissolution (Congrès de l'Ecole des Mines)** - M. Descostes (CEA, Saclay), C. Beaucaire I. Deniau (IRSN, Fontenay-aux-Roses), F. Mercier(CNRS, Univ Evry), S . Savoye(IRSN, Fontenay-aux-Roses), J. Sow and P. Zuddas (Univ. Paris VII)- *Bulletin de la Société Géologique de France (2002) Vol 173; PART 3 pp. 265-270*
21. **Caractérisation géochimique du kérogène associé à l'argile oligocène de Boom (Mol, Belgique) et evolution sous divers stress thermiques** - I. Deniau (IRSN, Fontenay-aux-Roses) - *Thèse : Paris 6, 19 décembre 2002*
22. **Reactive transport modeling of interaction processes between claystone and cement**, L. De Windt*, D. Pellegrini**, J. van der Lee*, (*Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau, **Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, Fontenay-aux-Roses), *Eurosafe 2001, November 5-6, Paris, France, Vol. 3, 55-60, 2001.*
23. **Reactive transport modeling of pH controlling processes in cement/clay systems**, L. De Windt*, J. van der Lee*, D. Pellegrini** (*Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau, **Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, DES, Fontenay-aux-

- Roses), *In Water-Rock Interaction Proc., July 10-15, Villasimius, Italy, Cidu (ed.), Balkema Publishers, Vol. 2, 1315-1318, 2001.*
24. **Are artificial tracers conservative in argillaceous media? The Tournemire claystone case**, S. Savoye, L. De Windt, C. Beaucaire, G. Bruno, N. Guitard (Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, Fontenay-aux-Roses), *In Water-Rock Interaction Proc., July 10-15, Villasimius, Italy, Cidu (ed.), Balkema Publishers, Vol. 2, 1383-1386, 2001.*
 25. **Modeling of geochemical interaction processes between claystone and cement**, L. De Windt*, D. Pellegrini**, J. van der Lee*, F. Besnus** (*Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau, **Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, Fontenay-aux-Roses) - *Proceedings of the 9th International High-Level Radioactive Waste management Conference (IHLRWM), Las Vegas, Nevada, April 29 – May 3, 2001.*
 26. **Morphological and chemical features of a kerogen from the Boom clay formation: structure, source organisms and formation pathways** - I. Deniau (IRSN, Fontenay-aux-Roses), Sylvie Derenne (ENSCP, Paris), C. Beaucaire, H. Pitsch, (IRSN, Fontenay-aux-Roses), Claude Largeau (ENSCP, Paris) - - *Organic Geochemistry 32, (2001), pp. 1343-1356*
 27. **Experimental investigations on iron corrosion products formed in bicarbonate/carbonate-containing solutions at 90°C.** - S. Savoye¹, L. Legrand², G. Sagon², S. Lecomte², A. Chaussé, R. Messina², P. Toulhoat² (¹ IRSN; ² Univ Evry)- *Corrosion Science 43, (11), (2001), pp. 2049-2064*
 28. **Extraction of water and solutes from argillaceous rocks for geochemical characterization: methods, processes and current understanding** - E. Sacchi¹, J.L. Michelot¹, H. Pitsch², P. Lalieux³, J.F. Aranyossy⁴ (¹UMR IDES; ²IRSN, ³OCDE, ⁴ANDRA)- *Hydrogeology Journal, Vol. 9 (2001), n°1, pp. 17-33*
 29. **Simulation of thermal stress influence on the Boom Clay kerogen (Oligocene, Belgium) in relation with long term storage of high activity nuclear waste - I Study if generated soluble compounds** - I. Deniau (IRSN, Fontenay-aux-Roses) - *Applied Geochemistry*
 30. **Mineralogical , chemical and isotopic perturbation induced in shale by fluid circulation in a fault at the Tournemire experimental site (Aveyron, France) -** J. Cabrera (IRSN, Fontenay-aux-Roses) - *Journal of Geochemical exploration*
 31. **Diffusion as the main process for mass transport in very low water content argillites: 2. Chloride as a natural tracer for mass transport-diffusion coefficient and concentration measurements in interstitial water** – Patriarche^{1,2}, D., E. Ledoux², J.-L. Michelot¹, R. Simon-Coinçon², and S. Savoye³ (¹UMR IDES Paris-Sud ;² ENSMP ³ IRSN)- *Water resources Research, 40, 20-39*

32. **Occurrence and nature of thermolabile compounds in the boom clay kerogen (Oligocene, underground Mol Laboratory, Belgium** – I. Deniau (IRSN, Fontenay-aux-Roses), - *Organic Geochemistry*, Vol.35, Issue 2, Pages 91-107
33. **Pyrite dissolution in acidic media** M. Descostes (CEA, Saclay), C.Beaucaire (IRSN, Fontenay-aux-Roses) - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 68, Issue 22, Pages 4559-4566
34. **Corrosion behaviour of carbon steel in the Tournemire clay.** F. Foct¹, J. Cabrera², W. Dridi¹; S. Savoye². (¹ EDF, ² IRSN) *Science and Technology series (sous presse)*
35. **Sensitivity of Cement/Clay Interaction Modeling to Mineralogical and Transport Hypotheses**, D. Pellegrini¹ (¹IRSN, BP 17, 92262 Fontenay-Aux-Roses, France), L. De Windt² (²Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau), *International Workshop on Mechanisms and modelling of waste/cement interactions, May 8-12, 2005, Meiringen/Switzerland (à paraître).*