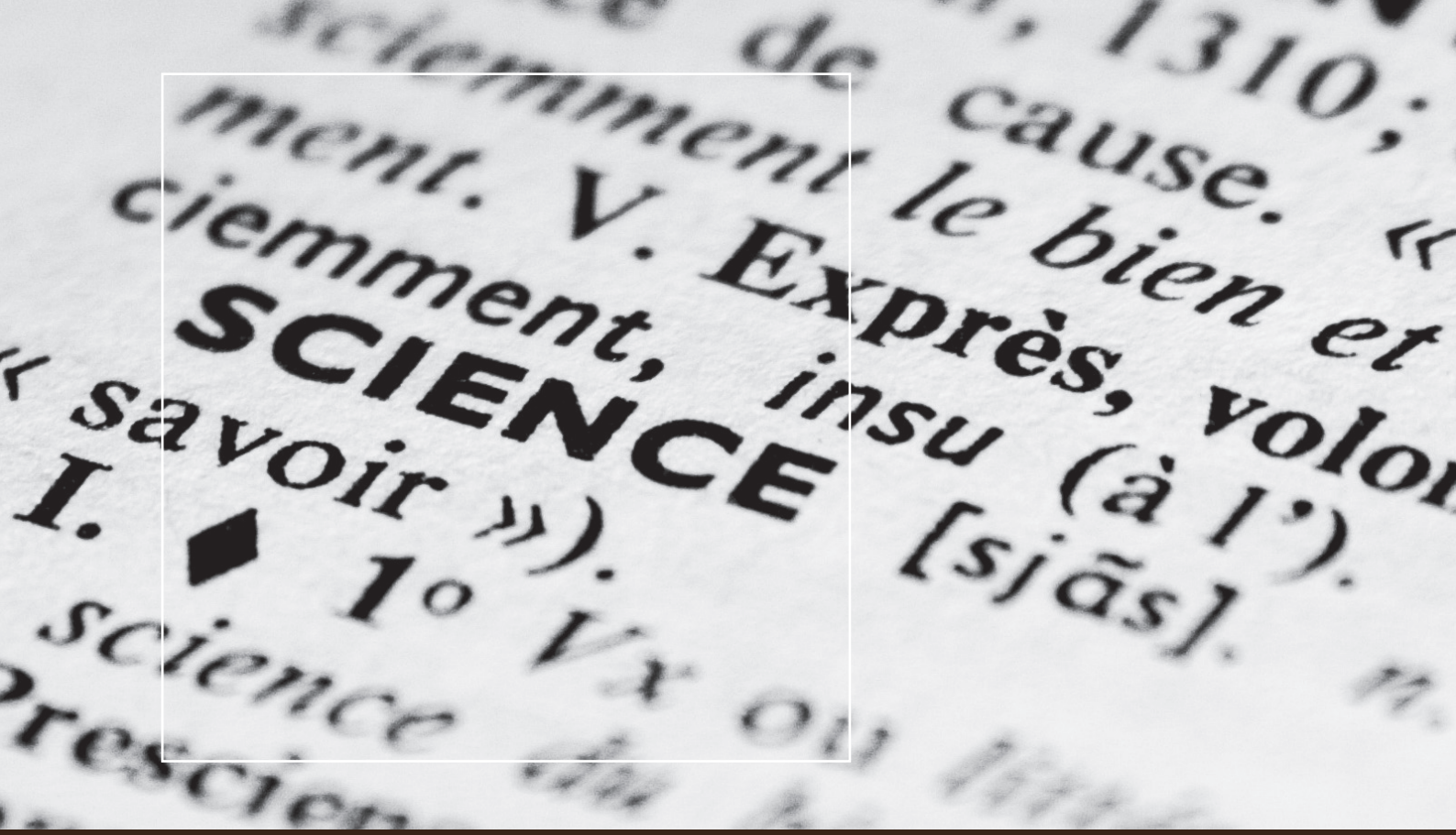
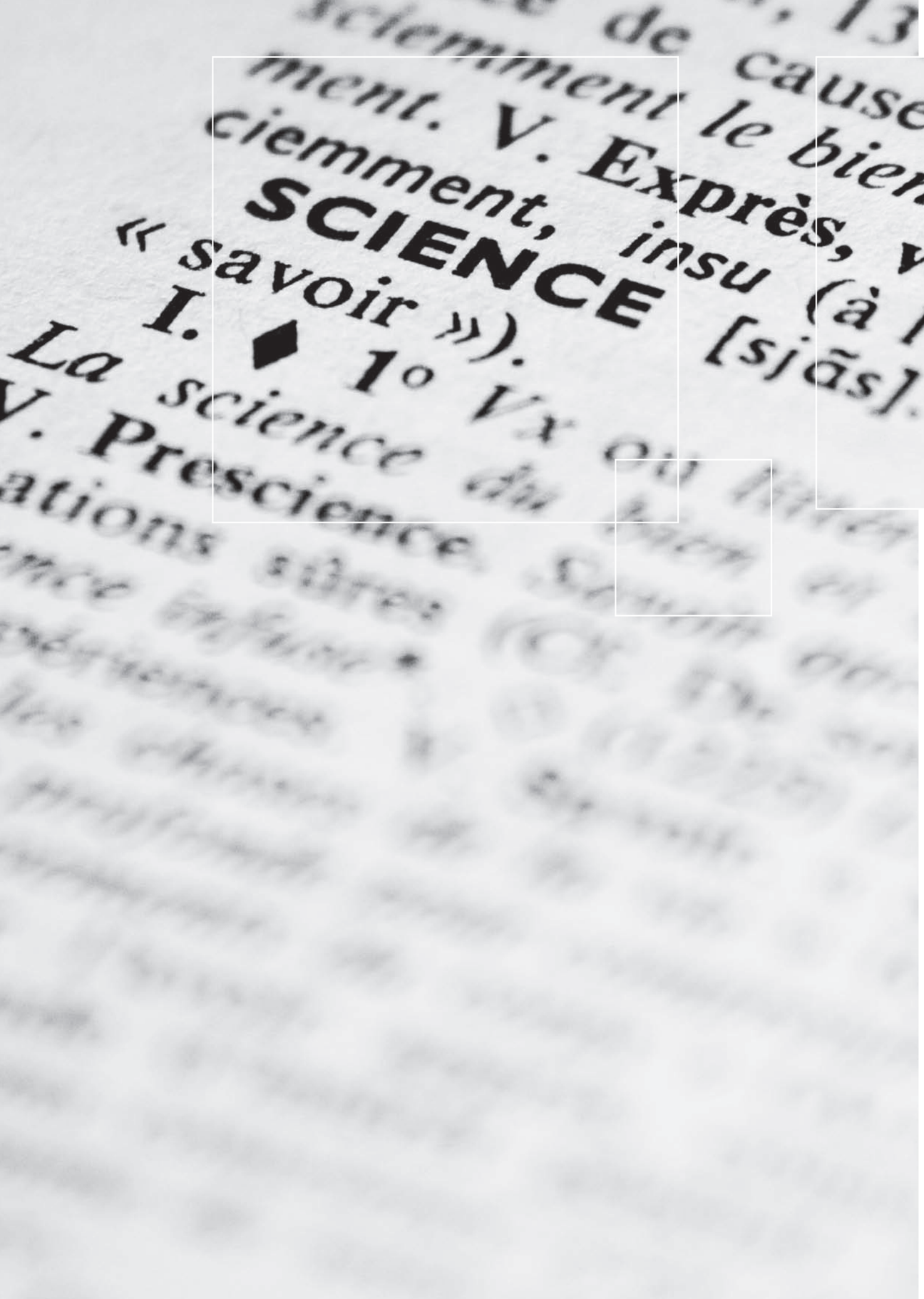


2006 - 2009

4 ans de recherches scientifiques à l'Andra pour les projets de stockage

ANDRA
La maîtrise des déchets radioactifs



Sommaire

Avant propos 4

1. La recherche à l'Andra

Le calendrier des recherches 6
Le Conseil scientifique 7
Les objectifs et l'organisation de la recherche 8

2. La réversibilité du stockage sous le prisme des sciences humaines et sociales

Un régime d'innovation pour l'Agence 12
Une communauté spécialisée autour de la réversibilité 12
Un groupement de laboratoires en sciences humaines et sociales 14

3. Conceptualiser le milieu géologique et la biosphère associée

De l'inventaire géologique régional au programme de reconnaissance pour le projet FA-VL : une démarche scientifique cohérente 16
La dynamique sédimentaire de l'est du bassin de Paris : résultats des études géologiques du projet HA-MAVL 17
Comment peuvent évoluer le milieu géologique et les biosphères à long terme ? 22
Les interactions eau-roche : facteur clé gouvernant la composition de l'eau porale du Callovo-Oxfordien 24

Un outil exceptionnel : le Laboratoire souterrain 28

4. Le stockage et ses interactions avec l'environnement

Les argilites et leur comportement THMC dans un stockage HA-MAVL 31
Le comportement des matériaux cimentaires en stockage et en entreposage 35
Les colis de déchets FA-VL et leurs propriétés 38
Les colis de déchets HA-MAVL et leurs propriétés 39
Les interactions entre le verre, le fer et l'argile 42

5. Les phénomènes de transferts au sein d'un stockage

La maîtrise des constantes thermodynamiques 48
Les transferts de radionucléides et d'autres solutés dans les argilites 49
Les transferts de gaz dans les argilites 54
Les transferts dans la biosphère 57

6. L'observation - surveillance d'un stockage et de son environnement

La stratégie et les techniques d'auscultation à long terme 60
L'Observatoire pérenne de l'environnement (OPE) 62

7. L'évaluation des performances d'un stockage

La maîtrise des processus d'évolution des composants du stockage et de son environnement géologique 67
Les options de conception et performances du stockage 73

8. La diffusion des résultats et la valorisation scientifique

Les publications 76
Les congrès 83
Les thèses 88

Glossaire des termes, acronymes et sigles utilisés 92

Avant propos

La loi de programme du 28 juin 2006 sur la gestion durable des matières et déchets radioactifs a élargi le rôle de l'Agence. Sa mission est désormais de trouver, mettre en œuvre et garantir des solutions de gestion sûres, sur le long terme, pour tous les déchets radioactifs français.

Ainsi, dans le cadre du Plan National de Gestion des Matières et des Déchets Radioactifs (PNGMDR), l'Andra est chargée de réaliser, tous les trois ans, l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs présents en France. Le dernier Inventaire national a été publié en 2009. L'Andra assure une mission de service public pour la prise en charge des objets ou des sites pollués radioactifs dont les responsables sont défaillants. Elle gère des centres de stockage existants pour les déchets de très faible à moyenne activité à vie courte et s'assure du progrès continu de leur exploitation pour la protection de l'homme et l'environnement, l'amélioration des services rendus et l'insertion locale des centres.

Enfin, elle met en place des programmes de Recherche et Développement qui visent à trouver des solutions de gestion pour les déchets radioactifs à vie longue, de haute, moyenne et faible activités. Cette mission importante allie des recherches technologiques pour concevoir l'entreposage temporaire et le stockage réversible et des investigations scientifiques de haut niveau pour garantir que les solutions de stockage assureront la protection de l'homme et de l'environnement à très long terme.

C'est pourquoi, l'Agence doit mener une politique de recherche et d'innovation pour tous les types de déchets radioactifs, et plus particulièrement pour ceux n'ayant pas encore de solution de gestion. L'essentiel des recherches est donc concentré sur le projet de stockage de déchets de haute et moyenne activité à vie longue (HA-MAVL), sans négliger les études préparatoires au projet de stockage de déchets de faible activité à vie longue (FA-VL).

Au terme de quinze années de recherche organisées dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991, le dossier 2005 remis par l'Andra avait montré la faisabilité du stockage géologique profond de déchets HA-MAVL dans l'Est du bassin de Paris, au sein de la formation d'argilites du Callovo-Oxfordien. Cette étude de faisabilité s'était principalement attachée à évaluer les conditions dans lesquelles un stockage pourrait être construit, exploité et géré de manière réversible, dans un objectif de protection des personnes et de l'environnement. Les évaluations de ce dossier, effectuées jusqu'au début de l'année 2006 par la Commission Nationale d'Évaluation, le Groupe Permanent « déchets » mis en place par l'Autorité de Sûreté Nucléaire et le groupe de revue international mis en place sous l'égide de l'AEN/OCDE à la demande des tutelles de l'Andra ont constitué des données d'entrée importantes pour l'établissement du plan de développement du dossier HA-VL-Argile et en particulier du programme scientifique 2006-2010 (réactualisé et reconfiguré à mi-parcours, en 2008). Ce dernier s'appuie naturellement sur les résultats acquis depuis 1994 et tient compte du planning des travaux de construction et d'expérimentation dans le Laboratoire souterrain.

Ainsi, les résultats faisant l'objet du présent bilan concernent une période qui débute au printemps 2006 et s'achève en fin d'année 2009. Ils sont issus de travaux programmés en fonction des contributions attendues d'une part pour le jalon 2009 (choix d'une zone d'intérêt pour une reconnaissance approfondie (ZIRA) et validation des options de conception, sûreté et réversibilité) et d'autre part en préparation au dossier scientifique et technique de 2012 du projet HA-MAVL.

Depuis 2006, les études scientifiques sont structurées au sein de quatre grandes unités :

- le programme scientifique qui intègre depuis 2006 les opérations scientifiques conduites dans le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne et des recherches en amont dans le domaine des sciences humaines et sociales ;
- le programme de simulation qui traduit la volonté de l'Andra de poursuivre et d'amplifier les efforts engagés sur cette thématique dès 2002 ;
- le programme reconnaissance depuis la surface destiné dans un premier temps à contribuer à la définition de la ZIRA ;
- le programme d'observation et surveillance, dédié à la mise au point de capteurs, de systèmes de mesure ou de transmission du signal et à la mise en place d'un Observatoire pérenne de l'environnement.

L'activité scientifique associée à ces programmes a bénéficié de supports relevant de la politique scientifique de l'Agence (doctorats et post-doctorats, partenariats, fonctionnement en groupements de laboratoires). On notera à ce sujet la mise en place entre 2006 et 2009 de nouveaux partenariats avec l'Université Technologique de Troyes (UTT), Nancy-Université, l'Institut National de Recherche en Informatique et Automatique (INRIA) et le British Geological Survey.

Enfin, on a cherché à harmoniser l'investissement au niveau international de l'Andra avec les priorités scientifiques et techniques affichées en vue des futures échéances. C'est dans cette optique que l'Andra participe activement aux programmes du VII[e] PCRD Forge (production et migration des gaz), Recosy (contrôle du redox), Catclay (transfert des cations dans l'argile) et Modern (surveillance du stockage) dont l'Agence assure le pilotage.

Nota bene

Les termes, acronymes et sigles utilisés dans le document sont en dernière page.

Les publications Andra sont citées dans le dernier chapitre, dans les rubriques « Les publications » et « Les thèses ». Les publications d'autres auteurs et les documents collectifs de l'Andra sont à la fin de chaque chapitre.

1 La recherche à l'Andra

Le calendrier des recherches

Les étapes marquant l'activité des projets HA-MAVL, FA-VL et des centres de surface

- **Le projet de stockage de déchets HA-MAVL en milieu géologique profond**

Le projet HA-MAVL s'inscrit dans un processus pluriannuel initié par la loi du 30 décembre 1991 qui doit aboutir la remise d'un dossier de demande d'autorisation de construction (DAC) à la fin de 2014.
La première phase d'études géologiques sur site (cartographie, forages et sismique réflexion), débutée en 1994, s'est traduite par le dépôt, mi-1996, d'une demande d'autorisation d'installation et d'exploitation (DAIE) d'un laboratoire souterrain sur la commune de Bure (sud du département de la Meuse). À la suite de l'avis positif de la CNE et des autorités de sûreté et à l'enquête publique, le Gouvernement a donné l'autorisation de sa construction à la fin de 1998. Le creusement du Laboratoire souterrain a commencé en 2000.

Les travaux réalisés dans le cadre de la loi de 1991 fixant une échéance à l'issue de quinze années de recherches ont conduit l'Andra à déposer un « Dossier 2005 - Argile » en décembre 2005.
Les avancées scientifiques réalisées entre 2006 et 2009 et les études prévues jusqu'en 2014 s'inscrivent dans un calendrier précis d'échéances intermédiaires destiné à organiser la production des éléments (i) contribuant à un dossier scientifique et technique qui sera fourni fin 2012 et (ii) servant de support au dossier DAC de 2014 (schéma ci-dessous).

On retiendra en particulier que les recherches géologiques complémentaires menées en 2007 et 2008 sur la zone de transposition (ZT) définie dans le Dossier 2005 ont servi, en 2009, à proposer une zone d'intérêt pour y mener des recherches approfondies (ZIRA). Sur cette ZIRA d'environ 30 km², la sismique 3D de 2010, et les éventuels forages de calage, serviront à préparer le dossier scientifique et technique de 2012 et la localisation du futur stockage. Ce dossier constituera également un élément pour le débat public de 2013.

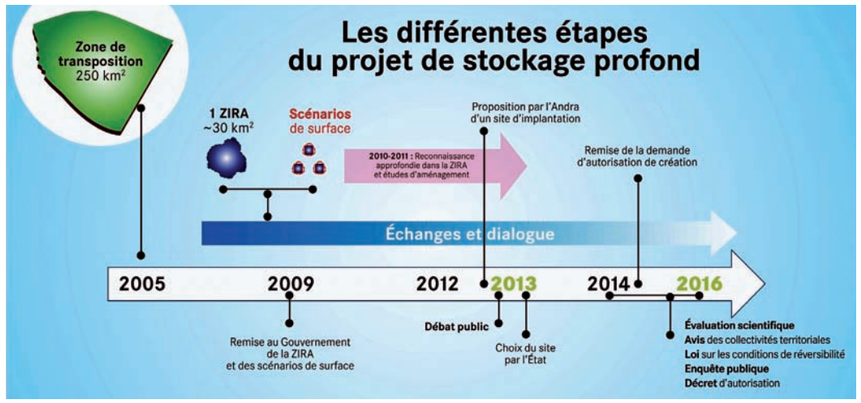
Parallèlement, la réflexion sur les options de conception, de sûreté et de réversibilité du stockage menée depuis 2008 sera une donnée d'entrée pour affiner les concepts de stockage réversible.

L'analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS) engagée dès 1999, et révisée en 2009, sera réactualisée avec les nouveaux résultats à partir de 2011 pour préparer les calculs de performance puis de sûreté dont les résultats alimenteront le DAC de 2014.

Dans le Laboratoire souterrain, les expérimentations se poursuivent pendant toute cette période pour répondre à des problématiques scientifiques et, de plus en plus, à des questionnements technologiques.
Ces données sont intégrées, au fur et à mesure, dans l'élaboration de l'avant projet sommaire (APS), puis l'avant projet détaillé (APD) du stockage qui sera un des éléments constituant le dossier DAC.

- **Le projet FA-VL**

La recherche de solutions de gestion pour les déchets faiblement radioactifs à vie longue (principalement graphite et radifères) est inscrite dans la loi de juin 2006. C'est dans cette optique que l'Andra a mis en œuvre en 2008 - 2009 une réflexion sur la qualité géologique à laquelle devrait répondre un site de stockage pour de tels déchets en s'appuyant sur un inventaire du BRGM. Parallèlement, l'Andra a engagé, dès 2008, des études sur le comportement des déchets FA-VL issus du démantèlement des centrales UNGG au travers d'un programme de R&D commun entre l'Andra, EDF et le CEA. Les études portent sur le comportement à long terme des déchets graphite, des colis et des résines échangeuses d'ions. La synthèse des résultats est attendue pour 2010 et 2011, suivant les thématiques.



CSM

CSTFA

CSFMA

- **Les centres de surface**

Les centres de stockage de surface de déchets faiblement à très faiblement radioactifs à vie courte sont au nombre de trois :
- Le centre de stockage de la Manche (CSM) qui a été exploité de 1969 à 1994 ; il est en phase de surveillance depuis 2003 ;
- Le centre de stockage des déchets de faible et moyenne activité à vie courte (CSFMA) mis en service en 1992, pour une durée prévue de 60 ans dans la commune de Soulaines ;
- Le centre de stockage des déchets de très faible activité (CSTFA) exploité depuis 2003 sur les communes de Morvilliers et de La Chaise.

Pour ces centres en activité industrielle, les études scientifiques relèvent d'expertises visant à répondre à des questions spécifiques et à réactualiser des résultats, en particulier pour tenir compte des évolutions réglementaires (aléa sismique, comportement hydrogéologique,...). Les actions de recherche viennent également en support à l'élaboration des rapports de sûreté des sites et aux analyses régulières ayant pour objectif d'accompagner l'exploitation des sites.

Les faits scientifiques marquants 2006 - 2009

Les événements scientifiques qu'il faut retenir sur la période 2006 - 2009 sont les suivants :
- **nouvelles expérimentations dans le Laboratoire souterrain** mises en place ou préparées dès 2006, dont certaines d'entre elles ont des durées de plusieurs années ;
- **travaux de reconnaissance géologique** en 2007 - 2008 dans la zone de transposition de 250 km² en Meuse/Haute-Marne, avec l'enregistrement de 175 km de sismique 2D et une campagne de 14 forages profonds, répartis sur 6 plates-formes, dont un forage à 2 000 mètres de profondeur pour atteindre le Trias inférieur ;
- **production du « Dossier 2009 »** en fin d'année 2009, avec la proposition d'une zone d'intérêt pour une recherche approfondie, de 30 km² environ, devant aboutir à la localisation possible du stockage ; mise en place progressive de l'Observatoire pérenne de l'environnement depuis 2007 ;
- **mise en place de l'Observatoire pérenne de l'environnement** au cours de l'année 2009 ;
- **partenariats avec les grands organismes scientifiques** renouvelés avec le CNRS, le CEA, le BRGM, l'INERIS ; quatre nouveaux accords conclus avec des établissements de recherche et d'enseignement supérieur (la fédération des universités de Nancy, l'Université de Technologie de Troyes, l'INRIA et le groupe des Écoles des Mines), auxquels s'ajoute l'accord signé avec le British Geological Survey ;
- **renouvellement ou mise en place des groupements de laboratoires.**

Le Conseil scientifique

Le Conseil scientifique de l'Andra a été créé par loi du 30 décembre 1991. Les membres du Conseil sont nommés par arrêté ministériel pour une durée de cinq ans. Pour la période 2006 - 2009, la constitution du Conseil était déterminée par l'arrêté ministériel du 08 février 2005.

Claude Détraz	> Ancien directeur de la recherche au CERN > Docteur en physique.	Président
Jésus Alonso	> Ingénieur à l'université Polytechnique de Madrid > Directeur de projet à l'ENRESA (Espagne)	
Michel Callon	> Directeur de recherche > Professeur de sociologie à l'École des Mines de Paris	
Marc Demarche	> Ingénieur civil en électromécanique > Directeur du site GIE > Euridice (Belgique) et directeur adjoint de l'ONDRAF	
Jean Dercourt **Hervé Chamley**	> Secrétaire perpétuel de l'académie des sciences > Ancien directeur du laboratoire de sédimentologie de l'université Lille 1	Arrêté ministériel du 06/11/2006 en remplacement de Jean Dercourt
Alexandre Ern	> Ingénieur en chef des ponts et chaussées > Professeur à l'ENPC	
Anne Flüry-Hérard	> Docteur en médecine > Conseillère du Haut-commissaire à l'énergie atomique	
Marc Panet	> Ancien P-dg. d'EEG SIMECSOL > Ingénieur civil des Mines	
Laurence Robb	> Professeur à l'université d'Oxford (G.B.) et à l'université du Witwatersrand (Afrique du Sud) > Docteur en géologie	
Kastriot Spahiu	> Coordinateur de recherche chez SKB > Docteur en chimie inorganique (Stockholm)	
Pierre Toulhoat	> Directeur de recherche CNRS et directeur scientifique à l'INERIS > Docteur ès Sciences (géochimie)	
Michel Vauclin	> Directeur de recherche au CNRS > Docteur en sciences physiques	

Le Haut-commissaire à l'énergie atomique était jusqu'en 2010 invité permanent du Conseil scientifique de l'Andra, il est désormais membre de droit.

"Les programmes 2006-2009 impliquent des recherches dans des disciplines scientifiques variées. Pour y répondre, l'Andra engage des études auprès de très nombreux organismes et laboratoires français et étrangers..."

Quelques réflexions sur le bilan scientifique de 2006 - 2009

En février 2010, le Conseil scientifique est arrivé au terme de sa troisième mandature depuis la loi qui l'a fondé le 30 décembre 1991. Dans un dialogue continu et exigeant avec l'Agence, il s'est efforcé de contribuer au succès de la politique rigoureuse et ambitieuse que la France s'est donnée. Les progrès scientifiques ont été remarquables, grâce à l'émergence d'une véritable communauté scientifique sur les sujets majeurs que pose un projet de stockage géologique. Le Conseil a régulièrement émis des avis, tant sur l'activité scientifique de l'Agence elle-même que sur les questions scientifiques en débat.

Ainsi il a apprécié que l'Agence ait su externaliser les tâches répétitives tout en conservant une activité de pilotage, d'analyse, d'intégration et de synthèse qui est essentielle. Le Conseil s'est félicité également des capacités de l'Agence à modifier, ces dernières années, ses structures d'une façon efficace, tout en soulignant que, pour l'avenir, des points nécessitaient une attention particulière : des renforts de compétences dans certaines disciplines comme l'hydrogéologie et la transmission des connaissances des spécialistes seniors.

Le Conseil a encouragé les études sur la réversibilité séculaire du stockage et a insisté sur la rigueur scientifique qui devait être de mise dans celles concernant l'entreposage, en insistant sur le fait qu'en aucun cas l'entreposage ne devait être considéré comme une alternative au stockage géologique.

L'enjeu scientifique majeur identifié par le Conseil scientifique pour les prochaines années est d'asseoir, sur les bases les plus sûres possibles, le changement d'échelle des analyses géologiques (de l'expérience conduite localement, au site tout entier). Le Conseil a également souligné que, face au développement important et salutaire des études, il était toujours plus important, pour l'Agence, de maîtriser en interne la synthèse des résultats des recherches.

Sans aucun doute, l'entrée du projet de stockage dans une phase de réalisation va nécessiter des développements technologiques dont le Conseil scientifique devra se saisir en renforçant son interaction avec la direction des projets.

On peut enfin rappeler deux remarques plus générales qui ont émergé ces dernières années des débats du Conseil scientifique. D'abord, les recherches ne sauraient s'arrêter après la mise en service du stockage, les sciences concernées ne vont pas se mettre en sommeil. Analyser le retour d'expérience et accompagner l'exploitation réversible pendant 100 ans constitueront des tâches difficiles et essentielles. Ensuite, la qualité et le haut niveau du savoir-faire accumulé par l'Agence doivent être valorisés dans le contexte international très compétitif qui résulte du redémarrage de l'industrie électronucléaire.

Claude Détraz,
Président du Conseil scientifique de 2000 à 2010

Le Conseil scientifique a été partiellement renouvelé, en date du 18 février 2010, par arrêté du ministre de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer et de la ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. Christian Fouillac, directeur de la recherche du BRGM, en a été nommé président, les autres nouveaux membres sont : Bernard Boullis, directeur du programme « Aval du cycle » au CEA ; Laurent Michot, directeur de recherche au CNRS et Karen Scrivener, directrice de laboratoire à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Ils remplacent Jésus Alonso, Claude Détraz, Laurence Robb et Kastriot Spahiu.

Les objectifs et l'organisation de la recherche

Au regard des travaux menés jusqu'alors et des enjeux relatifs à la loi du 26 juin 2006, les recherches scientifiques 2006-2010 peuvent être considérées comme une optimisation destinée à affiner les hypothèses, compléter les bases de données existantes par des opérations en vraie grandeur, développer des outils technologiques et de simulation et associer, dans une même approche, les progrès portant sur l'ingénierie et sur la phénoménologie du stockage.

Ces travaux sont articulés autour de plusieurs orientations prioritaires :

- la consolidation des données acquises au cours de la période antérieure et la conduite d'expériences sur la longue durée pour conforter les modélisations ;
- la réalisation d'essais intégrés à visée technologique (plus spécifiquement dans le Laboratoire souterrain) et la mise en œuvre de moyens d'observation et de surveillance du stockage ;
- la quantification plus précise des marges de sûreté passe par une évaluation plus fine du comportement et de l'évolution du stockage et de ses composants (approche moins conservative) ;
- le développement de simulations numériques visant à représenter le plus fidèlement possible le comportement du milieu géologique et du stockage dans l'optique de la préparation des analyses de sûreté ;
- la reconnaissance de la zone de transposition autour du Laboratoire souterrain afin de définir une localisation précise d'implantation pour un éventuel stockage.

Pour contribuer à des choix de représentation qui s'affranchissent du caractère pénalisant des hypothèses retenues pour l'évaluation de sûreté réalisée dans le cadre du dossier 2005 et pour associer, dans une même approche, les progrès portant sur l'ingénierie et sur la phénoménologie du stockage, les travaux scientifiques réalisés ou engagés au cours de la période 2006-2009 ont bénéficié d'un ensemble d'investigations complémentaires du milieu géologique et de recherches à caractère fondamental destinées à étayer les modèles conceptuels retenus et à conforter la robustesse des approches scientifiques développées.

Ils ont visé à une maîtrise accrue des phénomènes élémentaires, à la prise en compte des couplages entre phénomènes et aux interfaces entre composants du stockage et son environnement ainsi qu'à une meilleure appréhension des changements d'échelle et plus spécifiquement des variabilités spatiales et temporelles du milieu géologique.

Quelques points qui apparaissent très dimensionnants ont fait l'objet d'efforts spécifiques comme le comportement à long terme des colis de stockage et de leur contenu - dont la responsabilité de la conduite des recherches incombe depuis 2006 à l'Andra - la représentation de la phénoménologie des premiers milliers d'années et des différents transitoires (thermique, mécanique et hydraulique-gaz en particulier) ou la production d'éléments nécessaires à caractériser la phase de réversibilité et à nourrir le programme de surveillance et d'observation du stockage (capteurs, moyens de transmission des données...).

Les programmes 2006-2009 impliquent des recherches dans des disciplines scientifiques variées. Pour y répondre, l'Andra engage des études auprès de très nombreux organismes et laboratoires français et étrangers sous forme de prestations ciblées sur une question, sous forme de travaux réalisés par les groupements de laboratoires (GL) quand la problématique est complexe, sous forme d'actions partenariales et sous forme de thèses et de post-doctorats. Les études menées dans le cadre des GL résultent de la nécessaire mise en commun de moyens techniques et humains sur des thématiques complexes pour répondre à des questions phénoménologiques interdépendantes.

Les partenariats de l'Andra

L'Andra a mis en place une série de partenariats avec des organismes et des institutions d'enseignement supérieur :

- **le CEA**, avec plusieurs thèmes de développement :
  1) le comportement à long terme des colis en conditions de stockage, 2) la plate-forme de simulation « ALLIANCES », 3) le comportement des colis de déchets de graphite, 4) le comportement des matériaux (argiles, argilites remaniées, ciments et conteneurs), 5) les capteurs innovants et le suivi de l'aléa sismique, et 6) la migration des radionucléides.
- **Le CNRS-PACEN**, au travers de trois groupements nationaux de recherche (GNR) : FORPRO (Formations Profondes), PARIS (Physicochimie des Actinides et des Radionucléides aux Interfaces et en Solution) et MoMas (Modélisations Mathématiques et Simulations numériques) ; Le CEA et EDF sont partenaires du GNR PARIS ainsi que de MoMas, dans lequel sont également associés le BRGM et l'IRSN.
- **Le BRGM** avec, pour les objectifs, 1) la compréhension des processus gouvernant la spéciation et les transferts de solutés dans les formations géologiques argileuses, 2) l'analyse des variabilités spatiales et temporelles des formations géologiques argileuses, et 3) le développement et l'application d'outils de surveillance des milieux naturels.
- **L'INERIS** avec des études en lien avec les ouvrages de stockage : 1) le comportement THM des infrastructures et du milieu géologique, 2) l'analyse et l'évaluation des risques liés à l'exploitation 3) l'observation et la surveillance des installations, 4) la surveillance et l'évaluation des risques chimiques, 5) le développement de plates-formes de modélisation.
- **Nancy-Universités** pour développer les recherches en géosciences, en sciences de l'environnement, en sciences pour l'ingénieur et en sciences humaines et sociales. Ce partenariat inclut une participation de l'Andra à des actions d'enseignement.
- **Les Écoles des Mines** (Carnot-Mines) destiné à développer les connaissances et compétences dans les domaines des géosciences, du comportement des colis et des radionucléides, de l'environnement, de l'ingénierie et des sciences humaines et sociales (SHS) ; ce partenariat, outre les actions de communes de recherche prévoit un important volet enseignement (cours et encadrement de stages et doctorats).
- **L'Université de Technologie de Troyes** [UTT] avec un double objectif d'enseignement et de recherche dans les domaines 1) de l'instrumentation et des capteurs, 2) de l'écologie et du développement durable, 3) du diagnostic, du contrôle et de la fiabilité et de la sûreté de fonctionnement.
- **L'INRIA** [Institut National de Recherche en Informatique et en automatique] pour les problématiques de recherches dans le domaine de la simulation numérique et des outils associés.
- **Le BGS** [British Geological Survey] pour une coopération scientifique et technique dans le domaine des sciences de la Terre, avec échange de compétences, de connaissances et d'informations entre les deux entités.

Par ailleurs, un accord avec l'INRA était en cours de finalisation en décembre 2009 pour l'observation, l'expérimentation *in situ* et la modélisation du fonctionnement des écosystèmes terrestres et aquatiques.

Les thèses et post-doctorats

En complément à ses partenariats de recherche, l'Andra a développé, dès 1998, une politique de thèses et de post-doctorats. Ces recherches destinées à répondre à des thématiques de fond bénéficient ainsi d'un haut niveau de qualité pendant une période pluriannuelle, tout en permettant au doctorant, avec le statut de salarié Andra détaché dans un laboratoire, d'avoir un contact avec la recherche appliquée.

La direction scientifique engage, chaque année, de six à dix thèses dans tous les domaines scientifiques qui sont abordés dans le cadre des projets de stockage. À l'issue de la soutenance, chaque thèse est éditée sous l'égide de l'Andra. Leur liste est reportée en fin du présent rapport. Deux à trois post-doctorants sont également recrutés chaque année pour une durée généralement fixée à 18 mois.

Les groupements de laboratoires

Pour réussir la combinaison des différents facteurs guidant la politique scientifique de l'Andra (confiance, transparence, équité, souplesse, durée, transversalité, excellence, valorisation), il a été recherché un mode de fonctionnement plus participatif avec les différents acteurs de la recherche tant dans la définition des programmes que dans l'analyse des résultats, ce qui implique une contractualisation pluriannuelle. Dans cet esprit, ont été constitués ou renouvelés les groupements de laboratoires autour de sept grandes thématiques multidisciplinaires :

- données thermodynamiques,
- transfert des radionucléides,
- verre-fer-argile,
- transfert des gaz,
- géomécanique,
- évolution des structures cimentaires
- capteurs.

Un huitième groupement, en sciences humaines et sociales, était en cours de création à la fin de 2009. Chaque groupement associe dans un comité de pilotage les compétences nécessaires à l'élaboration de son programme et à la résolution des problématiques qui lui sont liées, dans le respect des objectifs du projet. Leur organisation flexible permet d'agréger, autour du groupe de référence des laboratoires représentés au comité de pilotage, d'autres participants mobilisés sur des aspects plus ponctuels.

Jusqu'en 2009 ces groupements ont essentiellement travaillé à mettre sur pied les moyens d'investigation dédiés aux nouvelles problématiques posées par l'Andra. Outre la recommandation à poursuivre les efforts engagés, l'évaluation réalisée à mi-parcours de ces travaux (juin 2009) souligne l'intérêt d'intensifier les interactions entre les différents groupements de laboratoires sur l'étude d'un même composant du stockage ou d'un même processus (par exemple les groupements Verre/Fer/Argile et Transfert de gaz sur la génération par corrosion et la migration d'hydrogène dans les alvéoles HA, ou les groupements Géomécanique et Transfert de Radionucléides sur les possibilités de transfert dans l'EDZ).

1 La recherche à l'Andra

Les collaborations internationales

• L'Andra et les projets européens du programme « Euratom »

Pendant la période 2006 - 2009, la direction scientifique de l'Andra a été, et continue à être, dans le cadre des 6e et 7e PCR, partie prenante dans plusieurs projets européens relevant du stockage géologique des déchets radioactifs (voir tableau ci-dessous). Plusieurs autres projets seront déposés au cours de l'année 2010.

Projet (type)*	Sujet	Période	Leader	Principale implication Andra
NF-PRO (IP)	Analyse et rôle des différents éléments du « champ proche »	6e PCRD 2004-2007	SCK.CEN (B)	Leader du composant sur l'EDZ,Implication forte dans le composant « Intégration »
FUNMIG (IP)	Compréhension et modélisation des processus de migration des RN dans la géosphère	6e PCRD 2005-2008	FZK-INE (D)	Leader du composant sur la migration des RN dans les roches argileuses
CARD (CA)	Mise en place d'une « plateforme technologique » visant à une meilleure coordination des projets	6e PCRD 2006-2007	NIREX (GB)	Participation au comité exécutif
MICADO (CA)	Étude et modélisation des processus de dissolution des combustibles usés	7e PCRD 2006-2009	SUBA-TECH (F)	Réalisation de calculs de performance et d'incertitudes associées aux données d'entrées
PAMINA (IP)	Application de méthodologies d'analyses des performances (PA) et d'analyses de sûreté (SA)	7e PCRD 2006-2009	GRS (D)	Benchmarks (méthodes et outils) sur le traitement d'incertitudes et l'analyse de sensibilité appliqués aux calculs de performance
ReCoSy (IP)	Étude des phénomènes Redox et de leur influence sur la rétention et le transport des RN	7e PCRD 2008-2012	FZK (D)	Membre de l'External User Advisory Group
CARBO-WASTE (CP)	Traitement et stockage du graphite irradié et des autres déchets carbonés	7e PCRD 2008-2012	FZH (D)	Implication sur 3 thématiques : - approche intégrée de la gestion des déchets, - caractérisation et modélisation, - stockage.
PETRUS II (CA)	Coordination des actions d'enseignement et de formation au niveau européen	7e PCRD 2009-2011	INPL (F)	Contribution à l'élaboration et la mise en œuvre du programme d'enseignement
MODERN (RP)	Développement et mise en œuvre des techniques de contrôle et de surveillance des stockages	7e PCRD 2009-2013	**ANDRA**	Coordinateur de l'ensemble du projet
FORGE (IP)	Évaluation de l'impact des gaz dans les stockages de déchets radioactifs	7e PCRD 2009-2013	NERC (UK)	Coordination de la modélisation, contribution, *via* les expériences *in situ*, au WP technique
IGDTP (CA)	Plateforme technologique (suite de CARD) visant la coordination des moyens et des actions dans le domaine des projets stockages géologiques	7e PCRD 2009-201?	SKB (S)	Membre du comité exécutif et du groupe responsable de la définition de l'agenda stratégique des recherches.
CATCLAY **	Étude des processus de migration des cations dans les roches argileuses	7e PCRD 2010-2014	CEA (F)	Responsable du module sur le développement des modèles et l'intégration des résultats

*Type de projet : IP = Integrated Project, CA = Coordinated Action, RP = Research Project, CP = Collaborative Project
**en cours d'approbation

Tableau 1 : liste des programmes européens auxquels participe l'Andra

• Les autres collaborations internationales institutionnelles et multilatérales

L'Andra participe par ailleurs à de nombreuses actions organisées sous l'égide d'organismes internationaux institutionnels (OCDE, AIEA) et à des groupes de travail regroupant des laboratoires et divers organismes nationaux sur des thèmes de recherche commun (ex. du programme Bioprota **[voir encadré ci-dessous]**).

- Le groupe de travail sur les argiles de l'AEN (**Clay Club**), rassemblant la plupart des acteurs internationaux intéressés par les possibilités de stockage en milieu argileux, est présidé depuis plusieurs années par le directeur scientifique de l'Andra. Ce groupe permet de faire régulièrement le point des programmes et de partager les connaissances acquises dans les différents pays, au travers de réunions annuelles, de workshops spécialisés et de rapports de synthèse.
- La participation au **projet Sorption** de l'AEN-OCDE est renforcée dans la phase 3 du projet (2007 - 2010) par une responsabilité accrue (financement renforcé et direction du Comité de pilotage du projet). Le projet vise à démontrer la validité des différentes techniques de modélisation thermodynamique pour sélectionner les paramètres de sorption utilisables dans les évaluations de la sûreté des dépôts de déchets radioactifs.
- L'Andra contribue également au développement du projet AEN-OCDE **Thermodynamic Data Base** (TDB), visant à fournir sous format de livres, une sélection rigoureuse de grandeurs thermodynamiques associées à des éléments d'intérêt dans le contexte des déchets radioactifs[1]. Cet ensemble de données constitue un socle de connaissances, utilisé par l'Andra pour le développement de sa propre base de données thermodynamiques ThermoChimie.
- Dans le cadre de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), l'Andra participe à l'élaboration de documents techniques sur la gestion des déchets radioactifs. Les équipes de la direction scientifique sont notamment sollicitées, sur la surveillance de l'environnement, le projet de recherche concertée sur les déchets de graphite, les modélisations environnementales (**projet EMRAS II**) et le fonctionnement du « réseau des laboratoires d'excellence ».

BIOPROTA

Le groupe de travail international Bioprota, lancé en 2002 à l'initiative de l'Andra, rassemble les représentants de 17 agences et instituts spécialisés (Andra, EDF [France], Ciemat [Espagne], SCK•CEN [Belgique], BfS [Allemagne], JGC, NUMO [Japon], EPRI [USA], KAERI [Corée], LLW-Repository, NDA [UK], Nagra [Suisse], NRPA [Norvège], NWMO [Canada], Posiva [Finlande], SKB, SSM [Suède]), autour du thème de la caractérisation et de la surveillance de la biosphère.

Cette plateforme permet d'échanger sur les programmes de R&D en cours et de définir les démarches pertinentes et les priorités à donner aux travaux de caractérisation dans les différents pays impliqués.
L'organisation d'ateliers spécialisés permet d'analyser l'état des connaissances sur les processus et les paramètres spécifiques des transferts dans la biosphère des radionucléides prioritaires (ateliers ^{36}Cl en 2007, ^{79}Se en 2008, ^{226}Ra en 2010) et de confirmer la pertinence des nouvelles études. Des inter-comparaisons de modèles et des discussions techniques sont régulièrement réalisées : comportement du ^{79}Se dans l'environnement, transfert sol-plante du ^{36}Cl (2007, 2009).

Bioprota est visible à l'échelle internationale et a fortement influencé la R&D en radio-écologie au cours de ces dernières années (I, Cl, Se, Ni, U) ainsi que d'autres programmes internationaux (BIOMAS, EMRAS).

Figure 1 : préparation de traceurs pour une expérience de diffusion rétention dans le laboratoire du Mont Terri

• Les laboratoires souterrains étrangers

L'Andra a une politique de coopération avec les agences homologues étrangères qui se traduit par des échanges de points de vue et de résultats lors de workshops et de visites réciproques.

Cette collaboration est plus particulièrement développée dans le cadre d'expérimentations menées dans des laboratoires souterrains étrangers. En ce qui concerne les formations argileuses, l'Andra participe aux études menées dans deux laboratoires souterrains, le Mont Terri en Suisse et Mol en Belgique. L'Agence est également partie prenante dans des expérimentations en milieu granitique quand elles relèvent d'essais technologiques ou concernent les barrières ouvragées.

• **Le Mont Terri :** depuis 1996, une extension de la galerie de sécurité du tunnel autoroutier du Mont Terri (St Ursanne, canton du Jura - Suisse) est utilisée dans le cadre d'un projet de recherche international, initié par la Nagra et l'Andra. Pour l'Andra, l'intérêt est de donner accès, en souterrain, à une roche argileuse présentant de fortes analogies avec l'argilite du Callovo-Oxfordien pour concevoir et mettre au point les expérimentations qui sont le cas échéant mises en œuvre dans le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne.
Fin 2007, sur les 32 expériences en cours, l'Andra participe à 14 d'entre elles portant sur la mécanique des roches, la géochimie (figure 1) et les démonstrateurs.

• **Mol :** le SCK•CEN étudie la faisabilité d'un stockage géologique dans l'argile tertiaire de Boom avec le laboratoire souterrain de Mol (Belgique). L'Andra participe à l'expérimentation PRACLAY dont l'objectif principal est d'étudier la diffusion thermique dans l'argile et ses conséquences sur le champ proche et la formation hôte.

• **Les laboratoires en milieu granitique :** en appui du programme mis en œuvre dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, l'Andra participe à des expériences dans les laboratoires souterrains d'Äspö (Suède), du Grimsel (Suisse) et de l'URL (Canada). Ces expérimentations portent sur les démonstrateurs de concepts de stockage et sur la caractérisation du comportement des barrières ouvragées constituées d'argiles gonflantes.

Au plan technologique, les démonstrateurs visent à établir en souterrain et en vraie grandeur la faisabilité de concepts de stockage adaptés aux colis de déchets et à la roche hôte. Le creusement d'alvéoles témoins rend crédible la perspective du stockage et le chiffrage des coûts. Au plan scientifique, ces démonstrateurs servent à observer puis à modéliser l'évolution de composants qui interagissent entre eux : eau du site, roche, colis, barrière ouvragée argileuse. Les principales expérimentations menées ces dernières années sont au nombre sept, une au Grimsel, quatre à Äspö et deux à l'URL canadien.

Les barrières ouvragées ont pour rôle de colmater les vides en exerçant une pression mécanique sur l'encaissant et les constituants du stockage afin de rétablir l'étanchéité de l'ensemble. Les études menées s'intéressent aux argiles, telles que les bentonites, qui sont des argiles naturelles riches en smectites ayant la propriété de gonfler en s'hydratant. Les expérimentations ont pour objectifs de déterminer les cinétiques d'hydratation en fonction du flux d'eau et du gradient thermique local et d'évaluer les pressions exercées quand le volume est bloqué.

1 Le 10e volume a été publié en 2008 sur les solutions solides ; un 11e volume a été publié en 2009 concernant le thorium. La phase IV du projet TDB (2008-2012) s'applique à la sélection de données pour le fer, l'étain et le molybdène, ainsi qu'à la mise à jour des sélections effectuées antérieurement

2 La réversibilité du stockage
sous le prisme des sciences humaines et sociales

Les sciences humaines et sociales (SHS) occupent une place spécifique dans le programme scientifique du projet HA-MAVL de l'Andra, en lien avec les processus de consultation et le débat public. Des actions relevant des SHS concernent également d'autres programmes associés au dialogue avec les parties prenantes, et en particulier le programme d'observation et de surveillance du stockage et de l'environnement. Plus largement, le concours des SHS a été important dans les démarches d'information et de consultation de l'Agence pour les différents projets, il continue à l'être pour son évolution et son suivi. À ce titre, un conseil d'experts en participation citoyenne, le COESDIC, a été mis en place en 2008 sous l'égide du conseil scientifique de l'Andra.

La thématique de la réversibilité, très étroitement associée au projet de création du centre de stockage profond pour les déchets HA-MAVL, a été privilégiée pour ces recherches. Elles reposent sur la réalisation de thèses de doctorat, les collaborations avec les laboratoires d'accueil des doctorants, et l'organisation de rencontres et de publications scientifiques. Des études spécifiques avec un intérêt plus opérationnel ont aussi été réalisées *via* des cahiers des charges précis.

Un régime d'innovation pour l'Agence

Le cadrage de la loi de programme du 28 juin 2006 prévoit la poursuite des études et des recherches en vue de choisir un site et de concevoir un centre de stockage réversible en couche géologique profonde (projet HA-MAVL). Cette demande de réversibilité place l'Andra dans un nouveau régime d'innovation au sein duquel les solutions proposées doivent se construire progressivement au fil de l'engagement des parties. Le dossier de DAC déposé par l'Agence sera précédé d'un débat public, avant son instruction en 2015. Ensuite, et avant que l'autorisation de création soit délivrée, une nouvelle loi devra fixer les conditions précises de réversibilité du centre de stockage.

Pour ce faire, l'Agence doit avancer des compromis sociotechniques, des solutions robustes aussi bien sur le plan technique que social, et donc devenir un acteur majeur dans la configuration des choix possibles. À l'interface entre les domaines de la décision politique et de la conception scientifique et technique, la définition de la réversibilité ne peut se construire que sur la base d'échanges entre les acteurs des deux domaines. C'est à ce travail de construction collective, qui n'en est aujourd'hui qu'à un stade intermédiaire et qui doit servir de support à l'élaboration de la future loi sur les conditions de réversibilité du stockage profond, que se sont attachées les recherches en SHS du programme scientifique de l'Andra, dans la période 2008-2009.

Plus généralement, l'Andra vise à intéresser les chercheurs en SHS à ses travaux et à favoriser ainsi la constitution progressive de communautés scientifiques spécialisées sur des sujets d'intérêt commun.

Une communauté spécialisée autour de la réversibilité

Des sujets de recherche portant sur la réversibilité et orientés vers les SHS ont été proposés dans le programme d'allocations de thèses de doctorat de l'Andra à partir de 2008. L'organisation de rencontres scientifiques et la réalisation de publications communes avec les chercheurs en SHS a également constitué un moyen d'incitation et de mise en œuvre de cette collaboration de recherche entre des chercheurs en SHS et l'Andra.

Une thèse en sciences économiques dédiée à la définition de la réversibilité du stockage

L'approche économique de la réversibilité fait l'objet d'une thèse intitulée « Gestion des déchets radioactifs et calcul économique : une approche par la théorie des options réelles ». Débutée en 2008 au sein des universités de Strasbourg et de Nancy 2, elle est fondée sur la théorie des options réelles. La thèse s'attache à la caractérisation des décisions optimales, en termes de calcul économique, dans un projet qui s'étale sur plusieurs générations et qui est marqué par les inconnues, les irréversibilités et l'accumulation de l'information au fil du temps.

La journée d'études « Réversibilité et Sciences Sociales »

L'Andra a inauguré une série de rencontres scientifiques autour de la réversibilité. Une journée d'études s'est tenue au siège de l'Agence le 2 octobre 2008 et a rassemblé une trentaine de participants. Structurée autour huit présentations orales réalisées par des représentants de l'Andra, des réactions d'un intervenant externe, et de quatre temps intermédiaires de discussion générale, elle a permis de tester les travaux de l'Andra auprès de spécialistes en SHS, d'intéresser les membres de cette communauté au sujet et de développer de nouvelles initiatives. Le recueil des différents textes et des discussions a fait l'objet d'une publication (Andra, 2009-a).

À la suite de cette journée, l'Andra a engagé une clarification de la terminologie et approfondi le raisonnement sur la question de la réversibilité, notamment en relation avec la sûreté et avec les aspects liés au processus décisionnel du stockage. Un effort a été initié également pour que la réversibilité se distingue plus clairement de la stricte « récupérabilité » technique, que les « coûts » de la réversibilité soient mis au regard des bénéfices, et les incertitudes au regard de l'acquisition de connaissances.

Le colloque interdisciplinaire sur la réversibilité

Sur la base de la journée du 2 octobre 2008, l'Andra a organisé un colloque interdisciplinaire en vue d'explorer les nouveaux rapports entre science, technique et société introduits par la notion de réversibilité dans le cadre du stockage géologique profond des déchets radioactifs. Il s'est tenu au Palais des Congrès de Nancy du 17 au 19 juin 2009 **[voir encadré p. 13]**.

L'Andra y a présenté sa démarche qui consiste à décliner les fonctions de la réversibilité dans le processus de stockage, de manière à élaborer la décision de manière progressive (par itérations successives, par récurrence, avec des points d'étape intermédiaires définis sur des périodes stables).

Les actes du colloque, avec toutes les interventions et les articles faisant suite aux communications présentées, existent en cédérom (Andra, 2009-b). Un ouvrage sur l'approche française de la réversibilité est en cours de finalisation.

Ces deux rencontres ont servi, par ailleurs, à préparer un colloque international qui se tiendra à Reims sous l'égide de l'OCDE/AEN sur la même thématique du 14 au 17 décembre 2010.

Les répertoires argumentatifs autour de la notion de réversibilité

Une étude portant sur « les formes d'argumentation autour de la notion de réversibilité » a été réalisée en 2009, par le Groupe de Sociologie Pragmatique et Réflexive (GSPR) de l'École des Hautes Études en Sciences Sociales. Un chapitre du livre en cours de préparation sur l'approche française de la réversibilité rendra compte des résultats de cette étude.

L'étude s'est attachée principalement à l'identification et au suivi des définitions et des argumentaires autour de la réversibilité mobilisés par différents acteurs, de manières différentes et par différents moyens, en France dans la période 1980-2008. Elle rend explicite la relation de la notion de réversibilité avec d'autres notions similaires ou associées, notamment en liaison avec des approches à l'échelle internationale, et plus particulièrement avec la notion de « récupérabilité ».

Les processus sociopolitiques sont aussi mis en avant et il est présenté une cartographie des acteurs et des arguments avec des tables et des représentations graphiques permettant de tracer et de rendre facilement compréhensibles les évolutions suivies par cette notion. Elle caractérise et met en lumière également les positionnements relatifs des acteurs et des arguments. Un répertoire complet de sources et de la documentation existante est aussi disponible grâce à cette étude.

La création d'un espace documentaire pour un accès aux travaux exploratoires de l'Andra sur la réversibilité, à partir de multiples points de vue

La création d'un espace documentaire participatif autour de la question de la réversibilité fait l'objet des travaux et des réflexions menées actuellement par l'équipe Cogniva Europe (CNAM et Université Technologique de Troyes). Avec cet espace, il sera possible d'archiver et d'organiser l'information relative à l'enquête menée par l'Andra sur ce sujet, de l'actualiser et de faciliter l'articulation entre les différents items, d'offrir des opportunités de participation aux parties intéressées et d'y intégrer les résultats. Il servira également à tracer et à rendre visibles les actions des différents intervenants et le processus d'exploration de l'Andra.

L'édition et la publication des résultats, en particulier sous forme de cartographies et synthèses, sont aussi envisagées. Une maquette du dispositif, dénommé « Explore », a été présentée lors du colloque interdisciplinaire de Nancy en juin 2009.

Jusqu'alors, le travail s'est attaché principalement à l'identification et à la conception d'outils informatiques et organisationnels permettant l'élaboration graduelle de cet espace de manière expérimentale. Explore est un dispositif d'expérimentation et de recherche en cours de développement. Une approche «multipoints de vue» a été adoptée pour réaliser un prototype opérationnel.

La construction du point de vue de l'Andra sur la réversibilité se croise avec l'intégration d'autres points de vue sur cette question. Ceci invite à circonscrire la recherche et à évaluer la contribution possible d'Explore à la stabilisation de l'approche Andra. Des outils complémentaires en vue du débat public pourraient être développés en relation avec la construction de scénarios.

Le colloque sur la Réversibilité

Afin d'explorer les nouveaux rapports entre science, technique et société introduits par la notion de réversibilité dans le cadre du stockage géologique des déchets radioactifs, l'Andra a organisé un colloque interdisciplinaire sur ce thème du 17 au 19 juin 2009, au palais des Congrès de Nancy.

Ce colloque a rassemblé une centaine de participants, notamment des chercheurs et des scientifiques issus d'institutions en sciences humaines et sociales comme le CNRS, l'Université de la Sorbonne, Sciences-Po Paris, l'Université Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse), l'Université de Louvain (Belgique) ou l'EHESS, et des intervenants de l'Andra. Des représentants du Comité Local d'Information et de Suivi (CLIS) du Laboratoire de Meuse/Haute-Marne, des homologues de l'Andra et d'autres institutions s'intéressant à la gestion des déchets (AEN, CNE, IRSN, BRGM, CEA, EDF) étaient également présents.

Destiné à croiser les points de vue d'ingénieurs, de chercheurs en sciences de la nature et de l'ingénieur et de chercheurs en sciences sociales, le colloque a traité la question de la réversibilité en relation avec d'autres thématiques (la mémoire, les modèles décisionnels, l'argumentation et le débat public, l'analyse économique) et d'autres expériences industrielles (le stockage de CO_2, les résidus miniers).

Le colloque a mis en exergue comment la notion de réversibilité véhicule et met en œuvre des compromis sociotechniques, caractéristiques d'un nouveau régime d'innovation. Il est ressorti que l'approche de l'Andra consistant à décliner les fonctions de la réversibilité dans le processus de stockage, de manière à élaborer la décision de manière progressive, s'inscrit bien dans ce nouveau régime.

2 La réversibilité du stockage
sous le prisme des sciences humaines et sociales

“L’aboutissement du travail interdisciplinaire mené sur cette thématique durant la période 2007-2010 a renforcé le positionnement de l’Agence à l’échelle internationale, vis-à-vis des réflexions existant en matière de gouvernance.”

Un groupement de laboratoires en sciences humaines et sociales

Les dispositifs mis en place dans le domaine des SHS autorisent d’ores et déjà à envisager l’ouverture de perspectives intéressantes pour les recherches à venir en support au débat public du projet HA-MAVL et à l’élaboration de la future loi sur les conditions de réversibilité. L’aboutissement du travail interdisciplinaire mené sur cette thématique durant la période 2007-2010 a renforcé le positionnement de l’Andra à l’échelle internationale, vis-à-vis des réflexions existant en matière de gouvernance. L’intérêt suscité par ce travail auprès d’homologues et d’organismes, ainsi qu’auprès des chercheurs étrangers, semble aussi l’indiquer.

La création d’un GL, ancré sur les approches qui ont été développées à l’Andra en relation avec les SHS, est en cours. Dédié à la problématique générale de la transmission intergénérationnelle et les longues échelles de temps, il serait destiné à appréhender les enjeux et les modalités d’intervention de l’Agence dans ce domaine et à accompagner ainsi le débat public. Il est structuré autour des 3 axes suivants :

1. Les mécanismes de production et de validation de connaissances sur le très long terme : les places respectives de l’expérimentation et de la simulation ; la gestion des incertitudes vis-à-vis de la création d’irréversibilités ; les dispositifs de création, d’évaluation et de préservation des compétences ; la compréhension des longues échelles de temps ;

2. La gouvernance intergénérationnelle : la transmission de la capacité de décision et l’intégration des demandes sociétales ; les institutions, les politiques mémorielles et la mémoire collective ; les modèles de décision récursive et la maîtrise des processus sur le long terme ;

3. L’évaluation et la prospective : les études du futur et les outils de la prospective ; la construction des scénarios sociotechniques.

Références bibliographiques :

> Andra (2009-a). Réversibilité et sciences sociales Actes de la journée d’études du 2 octobre 2008. Andra éd. juin 2009, ISBN 2.916162.04.6.

> Andra (2009-b). Colloque interdisciplinaire « Réversibilité » du 17 au 19 juin 2009 - Nancy - DVD-Rom Andra.

3 Conceptualiser
le milieu géologique et la biosphère associée

De l'inventaire géologique régional au programme de reconnaissance pour le projet FA-VL : une démarche scientifique cohérente

Pour sélectionner des sites pouvant être sollicités dans le cadre d'un appel d'offre à candidatures en lien avec un possible stockage de déchets de faible activité à vie longue (FA-VL), l'Andra a demandé, dans un premier temps, au Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) d'inventorier les formations géologiques de France métropolitaine répondant à plusieurs critères :

- une localisation dans les grands bassins sédimentaires et leur périphérie pour être à l'écart des zones de forte sismicité, à structuration complexe ou à gradient hydraulique élevé ;
- des formations ayant des capacités de confinement, une très faible perméabilité et une bonne homogénéité : les formations à dominante argileuse répondent à ces critères ;
- une formation hôte d'épaisseur minimale de l'ordre de 50 mètres pour assurer la rétention des radionucléides pendant une longue période de temps ;
- des formations affleurantes ou sous couverture peu importante pour un stockage se situant à une profondeur inférieure à 200 mètres.

Le BRGM a proposé des formations réparties dans les trois bassins sédimentaires français (figure 1) :

- le bassin de Paris avec les marnes irisées du Trias (Keuper), les argiles du Lias et les argiles de la Woëvre (Callovo-Oxfordien), les argiles de l'Albien et les marnes de Brienne (Crétacé inférieur), les Dièves (Crétacé supérieur) et les argiles plastiques du Tertiaire (argiles de Louvil et des Flandres) ;
- le bassin d'Aquitaine avec les marnes versicolores (Trias), la formation de Penne (argiles du Lias) et les argiles à Paléothérium et les molasses du Tertiaire ;
- le bassin du sud-est avec les formations argileuses du Crétacé inférieur.

À la suite de cet inventaire, l'Andra n'a pas retenu le bassin du sud-est en raison d'une morphologie trop contrastée et de la profondeur des horizons possibles.

Dans un deuxième temps, l'Andra a croisé l'emprise des formations proposées avec la carte administrative afin d'identifier les cantons, départements et régions concernés.

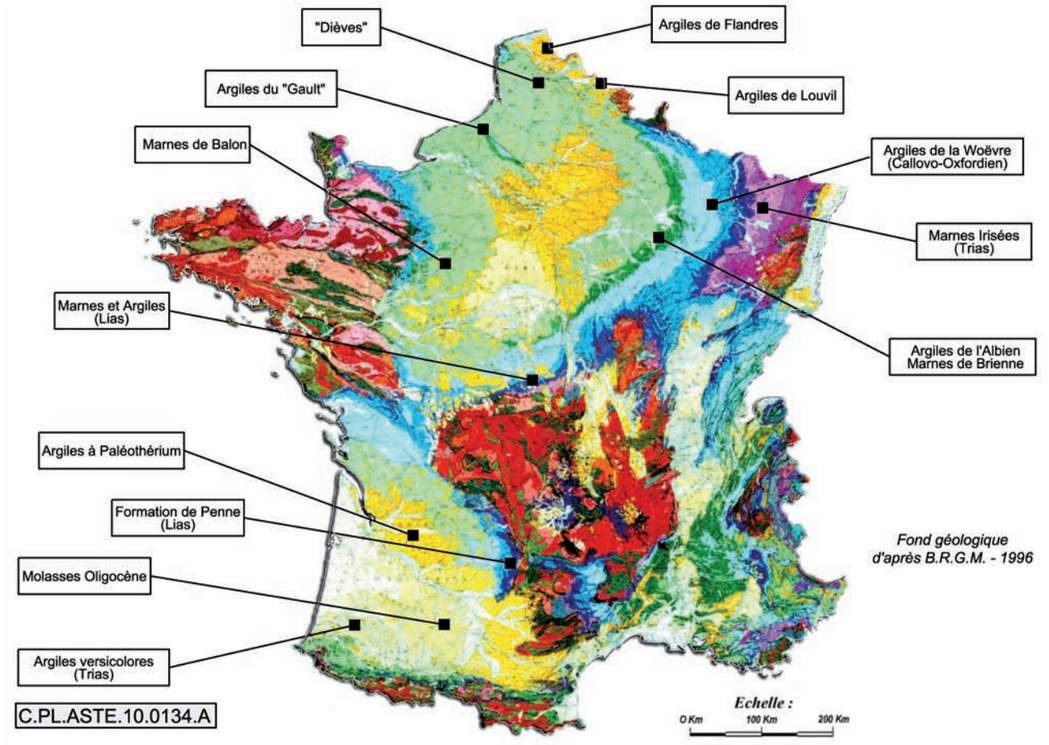
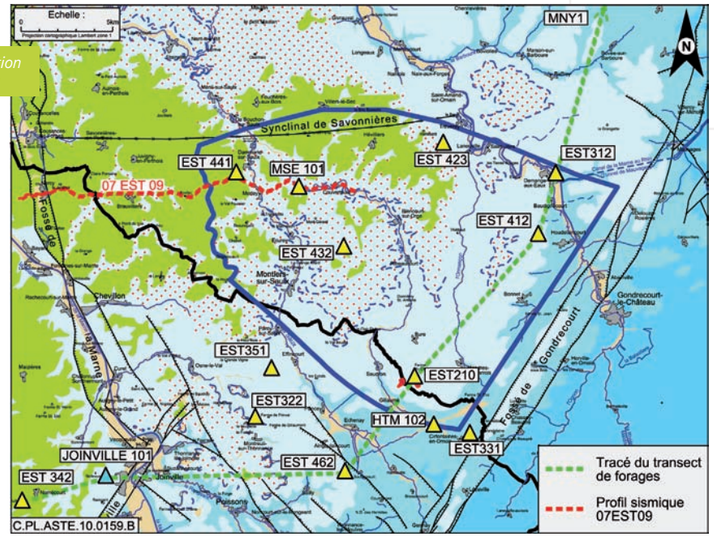


Figure 1 : formations géologiques initiales

Figure 2 : carte de localisation de la zone de transposition



Puis l'Agence a noté l'intérêt géologique des formations dans chacun de ces cantons en croisant plusieurs caractéristiques :

- **l'épaisseur de la formation** - 50 mètres était l'épaisseur minimale requise - **et son homogénéité** à l'échelle d'un stockage ;
- **les failles et fractures** peuvent être à l'origine de circulations de fluides, moteurs du transport des éléments chimiques ; le stockage doit donc être positionné à l'écart des structures tectoniques, ce qui induit des contraintes de localisation mais n'élimine pas nécessairement un secteur ;
- **le comportement mécanique** des formations n'est pas un critère rédhibitoire mais une mauvaise tenue ou une altération importante de la formation lors du creusement est un élément qui peut rendre délicate la réalisation des infrastructures.

Enfin, certains cantons ont été exclus de la liste en raison de ressources minérales ou énergétiques exploitées ou recherchées, telles que l'hydrothermalisme, les hydrocarbures et le sel gemme.
C'est à l'issue de ce travail que l'Andra a lancé un appel d'offre à candidatures auprès des communes pour proposer d'engager, pendant deux ans, des investigations géologiques sur le terrain.

Plusieurs dizaines de municipalités ayant manifesté leur intérêt, l'Andra a classé ces communes en fonction de leur contexte géologique, en reprenant les critères initiaux : par exemple, certaines épaisseurs dépassant nettement les 50 mètres nécessaires ont été considérées comme plus favorables. D'autres caractéristiques supplémentaires ont été introduites dans cette analyse :

- pendage des couches,
- hydrogéologie de surface,
- évolution géomorphologique prévisible à long terme,
- surface disponible sur la commune, l'emprise du stockage en profondeur et en surface variant, selon les concepts, entre plusieurs dizaines à plus d'une centaine d'hectares.

Le programme d'investigation depuis la surface avait pour objectif d'acquérir des données sur les propriétés de la formation hôte potentielle et de préciser le contexte géologique des communes retenues. Il était donc focalisé sur une tranche de terrains située entre la surface et une centaine de mètres sous la formation argileuse, avec des moyens techniques complémentaires :

- une cartographie détaillée et des mesures hydrologiques sur une surface de plusieurs dizaines de kilomètres carrés ;
- des forages carottés pour des analyses minéralogiques, chimiques et géomécaniques sur échantillons, complétés par des diagraphies et un suivi géologique en temps réel ;
- des forages à l'air avec isolation de chaque aquifère à tester, pour faire des prélèvements d'eau non contaminés et en réaliser le suivi piézométrique ;
- des mesures géophysiques, par sismique réflexion pour éclairer jusqu'à 300 mètres de profondeur, et par électrique et électromagnétisme pour des profondeurs de quelque dizaines de mètres ;

Deux étapes étaient programmées, la première destinée à confirmer les caractéristiques déduites de l'inventaire géologique et à localiser la zone la plus favorable, la seconde, dite de « caractérisation », permettant de préciser le volume et les propriétés de rétention de la formation et le contexte hydrogéologique du secteur.

À l'issue de cette phase de recherche, d'une durée de deux ans, les études destinées à préparer le stockage devaient être engagées sur le secteur le plus favorable, avec l'accord des communes considérées.

La dynamique sédimentaire de l'est du bassin de Paris : résultats des études géologiques du projet HA-MAVL

Des études géologiques ont débuté dès 1994 dans l'est du bassin de Paris pour évaluer la faisabilité d'un stockage de déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue (HA-MAVL) dans la formation d'argilite du Callovo-Oxfordien. La compréhension du contexte géologique a été régulièrement améliorée, jusqu'à définir en 2005, une zone de 250 km^2, dite « zone de transposition » (ZT) (figure 2), à la limite des départements de la Meuse et de la Haute-Marne.

Entre 2006 et 2009, le modèle géologique a été affiné grâce aux résultats provenant, d'une part de quatre thèses Andra [(**Estéban**, 2006), (**Huret**, 2006), (**Lefranc**, 2007) et (**Brigaud**, 2009)] et, d'autre part, de la campagne de reconnaissance 2007-2008 dans la zone de transposition **[voir encadré p.18]**. La représentation volumique des unités du Callovo-Oxfordien et de ses encaissants est enrichie de la variabilité pétrophysique haute-fréquence au sein de chacune d'elles, ce qui a permis de :

1. Proposer, au sein de la ZT, une zone d'intérêt pour une reconnaissance approfondie (ZIRA) **[voir encadré p.21]** dans laquelle pourrait être implanté le stockage ;

2. Améliorer la représentation de la formation du Callovo-Oxfordien et de son cadre tectonique pour affiner les calculs de performance et les analyses de sûreté.

Pour préparer la reconnaissance sur la ZIRA, programmée en 2010, la conception des campagnes d'investigation depuis la surface, et plus particulièrement la mise en œuvre de moyens géophysiques, s'est appuyée sur le retour d'expérience des campagnes passées et sur un programme de R&D destiné à tester les potentialités des différentes techniques et à dégager les pistes de progrès possibles.

“Au sein de la zone de transposition, les données recueillies sont à l’origine de l’identification de la partie la plus favorable, du point de vue de la sûreté, à l’implantation de la zone d’intérêt pour une reconnaissance approfondie.”

La campagne de reconnaissance de 2007/2008

Elle participe à trois grands objectifs :

- acquérir un niveau de connaissance homogène du Callovo-Oxfordien sur l’ensemble de la ZT de manière à offrir un support au processus de définition de la ZIRA, qui fera l’objet d’investigations plus détaillées à partir de 2010 ;
- compléter les données disponibles sur les écoulements et les transferts dans les encaissants (rôle de la fracturation, meilleure représentation dans les simulations hydrogéologiques),
- offrir l’opportunité de mieux cerner le rôle des formations profondes dans les écoulements et les transferts ainsi que le potentiel géothermique du Trias.

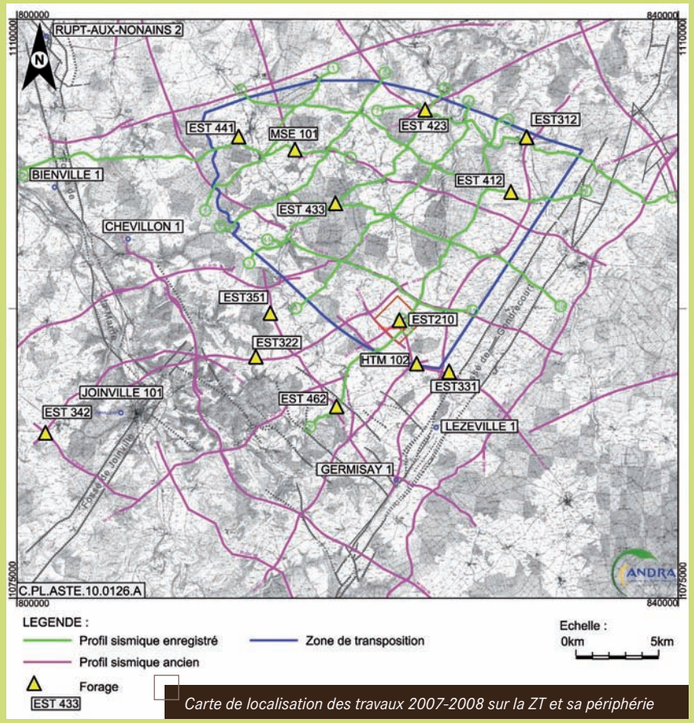
Pour cette campagne, trois types de moyens ont été mis en œuvre (figure ci-contre) :

- **des forages** répartis sur six plateformes, dont quatre implantées dans la ZT (notées de A à D) sur la base d’une analyse des incertitudes résiduelles à la suite des investigations antérieures, et deux (E et F) positionnées à l’ouest en raison de la fracturation présente ; chaque plate-forme comprend plusieurs ouvrages en raison de la difficulté à acquérir des données pour des objectifs différents (Dogger, Callovo-Oxfordien et Oxfordien carbonaté) ; l’un des forages, en position centrale, a été approfondi jusqu’au Trias inférieur ; l’ensemble de la campagne représente 14 forages ;
- **une acquisition de sismique réflexion 2D** d’environ 170 km selon une maille de 2x2 à 3x3 km, adaptée au réseau de failles secondaires possibles, complétée par le retraitement et l’interprétation de 130 km de sismique ancienne de manière à obtenir un jeu de données cohérent ;
- **des levés géologiques de surface** complémentaires sur les zones fracturées à l’extérieur de la ZT : fossé de Gondrecourt, failles de la Marne, etc.

Les résultats de cette campagne ont confirmé les limites de la zone de transposition et les critères de 2005 : absence de failles, épaisseur, variations lithologiques et profondeur maximale du Callovo-Oxfordien. Au sein de la ZT, les données recueillies sont à l’origine de l’identification de la partie la plus favorable, du point de vue de la sûreté, à l’implantation de la ZIRA.

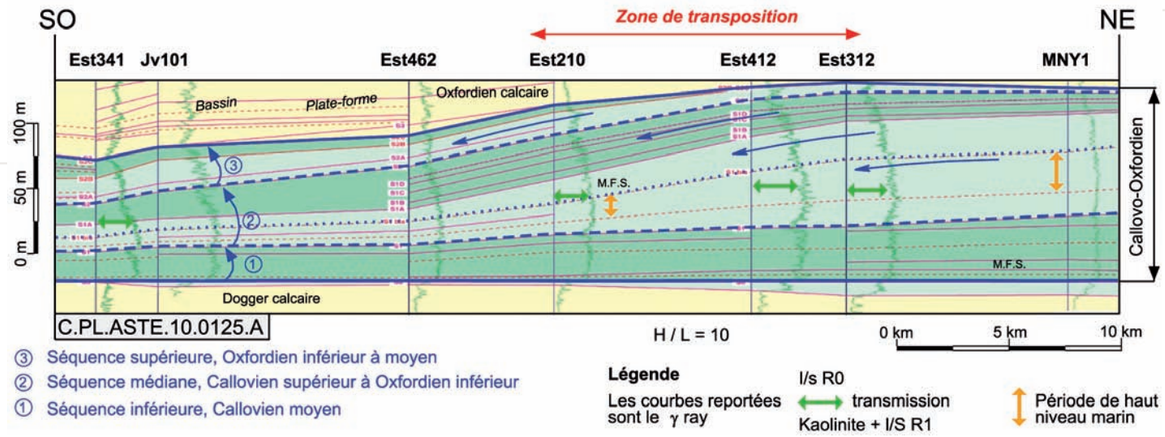
Le forage au Trias EST433 a confirmé l’absence de ressource géothermique exploitable à l’aplomb de la zone. Au-delà des objectifs de l’Andra, ce forage profond donne également une opportunité rare de traverser en continu toute la série de l’est du bassin de Paris du Trias au Jurassique supérieur. Grâce à lui, les données scientifiques sont obtenues avec des techniques modernes.

L’Andra a donc souhaité associer la communauté scientifique à l’acquisition et à l’exploitation des données afin de contribuer aux thématiques scientifiques au-delà du cadre des objectifs de l’Agence. Un partenariat autour d’un programme appelé TAPSS (Transferts actuels et passés dans un système sédimentaire aquifère - aquitard) a ainsi été signé avec 21 laboratoires universitaires afin d’assurer une valorisation scientifique maximale de ce forage.



Carte de localisation des travaux 2007-2008 sur la ZT et sa périphérie

Figure 3 : évolution latérale des corps sédimentaires du Callovo-Oxfordien selon un transect NE-SO (position dans la figure 2)



Le contexte sédimentaire du Callovo-Oxfordien

Dans la formation argileuse, le modèle avec les trois séquences d’ordre 3 (Andra 2005) (figure 3) défini dès 1996, a été largement confirmé avec un cadre biostratigraphique précis, des analyses cyclostratigraphiques et la détermination de l’orientation des minéraux magnétiques. Sont désormais bien connus le sens d’avancée des corps sédimentaires aux différentes périodes, les variations de taux de sédimentation dans le temps et l’espace ainsi que la durée, « en absolu », de certains épisodes géologiques.

Au Callovien moyen, la sédimentation argileuse débute dans le nord de la ZT. Les apports provenant du massif Bohémien, au nord-est (figure 4), progressent vers le sud-ouest, il existe donc un diachronisme, globalement nord - sud, dans l’arrivée des premiers sédiments silicoclastiques fins. Dans le même temps, des sédiments venant du massif de Londres-Brabant, au nord-ouest, se déposent à l’ouest de la zone de transposition, ils vont progressivement envahir toute la ZT au cours du Callovien.

Le passage séquence inférieure - séquence médiane (figure 3) est daté du Callovien supérieur ; il correspond à une sédimentation fortement condensée, voire lacunaire, pendant une durée minimale de 150 000 ans. Les argiles et silts de la séquence médiane (Callovien supérieur-Oxfordien inférieur) proviennent essentiellement du massif Bohémien au nord-est.

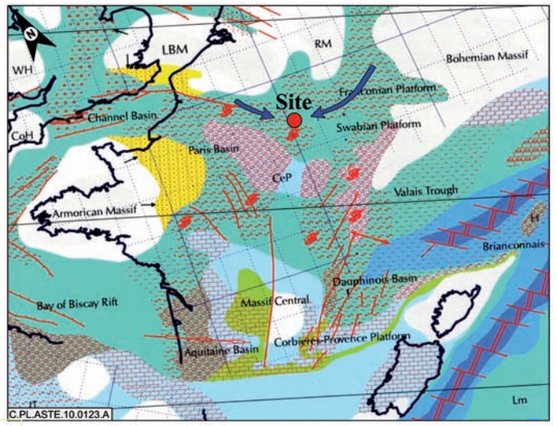


Figure 4 : position du site par rapport aux massifs émergés (en blanc) au Callovien - Extrait de Thierry J. et Borrier E - map 9 - in Atlas Péri-Téthys - 2000
LBM : massif de Londres - Brabant

Cette séquence médiane se caractérise par une longue période de haut niveau marin qui se traduit par un épisode très argileux épais de plusieurs dizaines de mètres au centre et dans l’est de la ZT (figure 3). Pendant cette phase, certains minéraux argileux (kaolinite et interstratifiés illite/smectite R1) présents dans la partie inférieure du Callovo-Oxfordien sont remplacés par des interstratifiés illite/smectite R0 qui perdurent jusqu’à la fin de la formation. Ce changement progressif est diachrone (figure 3), il apparaît en premier dans le nord-est de la ZT, il est retardé de 400 000 ans à sa bordure sud-ouest. Il correspond à l’avancée générale des corps sédimentaires en direction de la mer ouverte occidentale.

Pour l’ensemble du Callovo-Oxfordien, les évolutions sédimentaires latérales sont cependant ténues, sans commune mesure avec la variabilité verticale commandée par le niveau marin relatif. L’origine des sédiments silicoclastiques est éloignée (plusieurs centaines de kilomètres) et les courants marins étaient probablement peu rapides pour permettre le dépôt de fines particules en grands lobes largement étalés. Il en résulte que les rapports relatifs entre les trois constituants principaux (argiles, silts et carbonates) varient peu, au maximum quelques pourcents. Cette variabilité latérale ne modifie pas les propriétés intrinsèques de la formation sur la zone de transposition, notamment en termes de propriétés pétrophysiques (porosité, perméabilité...).

La représentation obtenue a été utilisée pour la création de modèles conceptuels de variabilité qui ont été utilisés pour les calculs de performance réalisés en support au choix de la ZIRA.

Le contexte sédimentaire et diagénétique du Dogger et de l’Oxfordien carbonatés

Le Dogger, tel que défini ici, représente l’encaissant inférieur de la formation du Callovo-Oxfordien. Il regroupe les formations calcaires comprises entre l’Aalénien (quand il existe) et le Callovien inférieur. C’est un ensemble de faciès de plate-forme carbonatée variables dans le temps et l’espace avec, cependant, une répartition des milieux de dépôts qui reste toujours la même : une plate-forme externe argileuse au nord-est passant, *via* des barrières de calcaires plus ou moins grossiers, à des mudstones de lagons au sud-ouest (figure 5).

Bien qu’ayant été initialement forte en raison du mode de dépôt, la porosité observée actuellement est généralement faible sur la ZT en raison d’un colmatage des espaces intergranulaires d’origine diagénétique. La diagenèse qui affecte l’ensemble de ces formations s’est produite en plusieurs phases, en liaison avec les évènements tectoniques régionaux. Le développement de la calcite de blocage qui en résulte s’observe à différentes échelles, des géodes et fissures jusqu’aux espaces intergranulaires. Cependant, certains faciès, tels que les grainstones oolithiques du Bathonien ou des surfaces d’émersion locale ayant induit des dissolutions partielles, peuvent être à l’origine de venues d’eau. La conceptualisation de l’extension des niveaux poreux du Bathonien qui en découle peut désormais être intégrée dans les modèles hydrodynamiques.

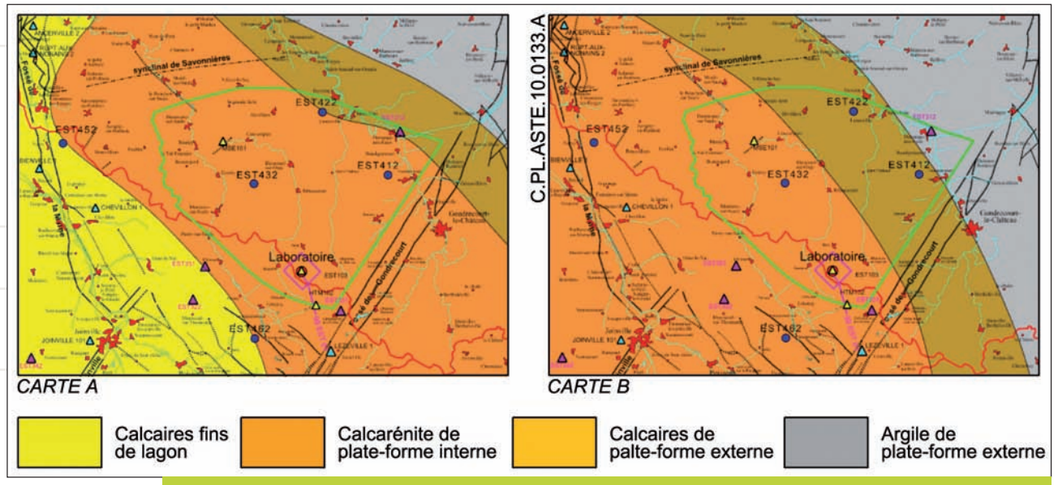


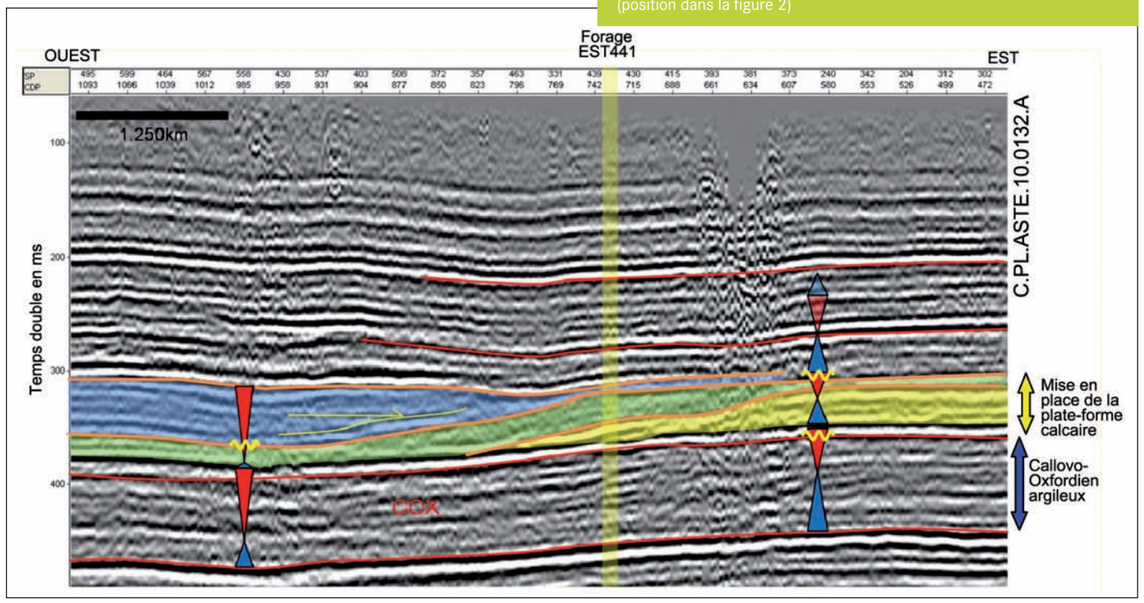
Figure 5 : cartes paléogéographiques du Bathonien (carte a, à gauche) et de la transition Bathonien Callovien (carte b, à droite)

L'Oxfordien calcaire a une paléogéographie inversée par rapport au Dogger : la plate-forme externe est occidentale. Au dessus du Callovo-Oxfordien, la baisse du niveau marin relatif a pour conséquence de réduire l'espace disponible. Les prismes sédimentaires successifs, à dominante marneuse et calcaire, se développent vers l'ouest en moulant la surface supérieure des argilites (figure 6). Au dessus, se développent les faciès récifaux et oolithiques décrits par Carpentier (2004).

Comme pour le Dogger, la formation est affectée par plusieurs générations de calcite de blocage qui se sont succédées de la fin de l'Oxfordien jusqu'à nos jours (Ferry *et al.*, 2007). Mais la faible perméabilité qui résulte du colmatage des pores n'est pas présente sur tout le secteur. L'existence de niveaux poreux est presque systématiquement associée aux faciès fins de lagon avec, comme caractéristique récurrente, un aspect « crayeux » des calcaires. Il existe donc un contrôle stratigraphique de la répartition latérale des horizons poreux, au moins à l'échelle hectométrique à kilométrique. Cette conceptualisation est prise en compte dans la modélisation hydrogéologique qui, par ailleurs, s'appuie sur les propriétés pétrophysiques issues de la géophysique.

La variabilité pétrophysique des encaissants : dans les formations carbonatées, la porosité peut être déduite de l'impédance acoustique obtenue par inversion stratigraphique de la sismique. Ce type de traitement a été entrepris sur les profils de la campagne 2007-2008 pour localiser les horizons les plus poreux. Cependant, pour obtenir une évaluation quantitative, il faut tenir compte de l'argilosité qui influe également sur l'impédance. Une technique d'inversion, dite « inversion élastique », a été testée et a montré sa capacité à distinguer la porosité de l'argilosité dans l'Oxfordien calcaire. L'utilisation de cette méthode pourra apporter des informations qualitatives et quantitatives fiables pour le traitement et l'interprétation du futur bloc sismique 3D prévu sur la ZIRA.

Figure 6 : profil sismique 07EST09 [le forage EST441 marque la limite occidentale de la ZT]
(position dans la figure 2)



Recherche & Développement en appui du programme de sismique réflexion

Différents tests ont été réalisés au cours de la campagne de sismique 2D de 2007-2008 en vue de préparer techniquement la reconnaissance par sismique 3D de la ZIRA, prévue en 2010. L'optimisation du calcul des corrections statiques passe par l'utilisation d'un modèle géologique des formations superficielles, fondé sur les mesures de vitesses. Le modèle élaboré en 2005 a été complété et calé sur les carottages VT réalisés lors de l'acquisition sismique 2007. La qualité de l'image sismique par l'utilisation de ce modèle est nette, mais les hétérogénéités des formations superficielles restent une cause d'artéfacts dans la mesure sismique. Pour la campagne 3D, il est donc prévu d'enregistrer des profils de sismique réfraction en complément des nouveaux carottages VT.

La démarche scientifique en appui à la définition de la ZIRA

Dans le cadre du Dossier 2005, il a été possible de délimiter un domaine à l'intérieur duquel les propriétés de confinement des argilites du Callovo-Oxfordien mesurées dans le Laboratoire souterrain pourraient être transposées. Dans ce domaine, appelé zone de transposition (ZT) (figure 2) l'épaisseur du Callovo-Oxfordien varie de 130 à 160 m. Le niveau *a priori* considéré en référence pour l'implantation du stockage est celui étudié au niveau principal du laboratoire souterrain, il correspond à la partie la plus argileuse de la formation dont l'épaisseur varie de 15 à plus de 35 m du sud au nord.

Étant donné la continuité et l'homogénéité latérale de la couche du Callovo-Oxfordien ainsi que la constance de ses propriétés intrinsèques, le choix de la ZIRA a reposé sur des critères géologiques et géométriques objectifs permettant de réduire progressivement la surface de 250 km^2 à environ 30 km^2.

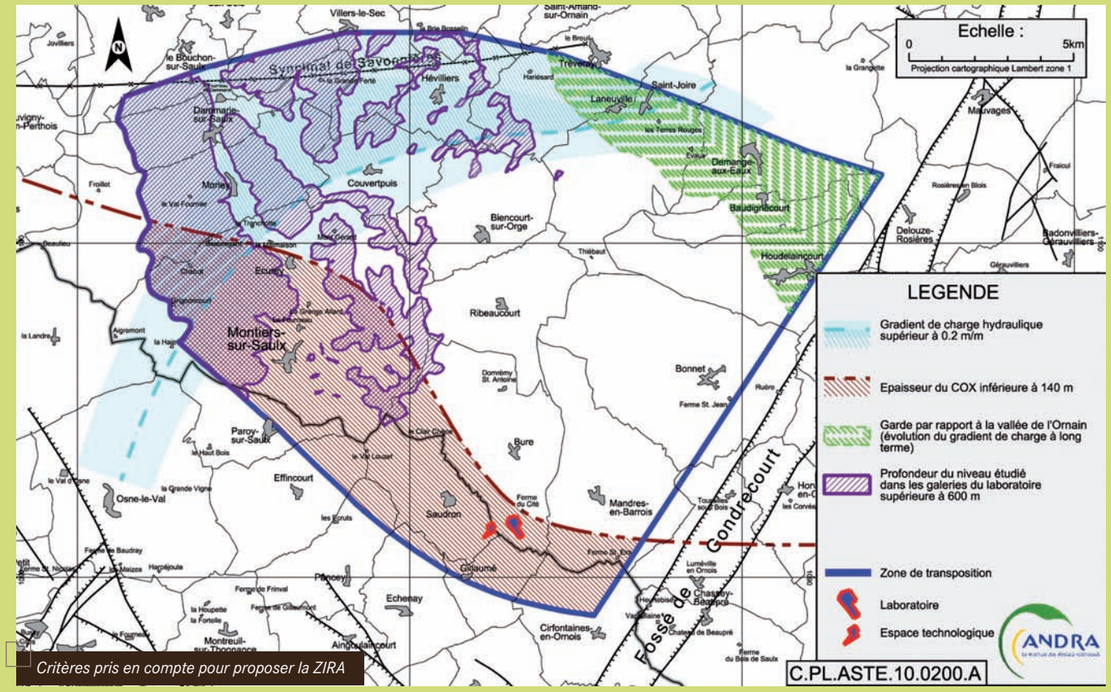
Certaines caractéristiques du Callovo-Oxfordien s'avèrent être encore plus favorables à l'installation d'un stockage que celles retenues pour définir la ZT. Ces critères concernent :

- des paramètres représentatifs des processus de transfert dans la formation : l'épaisseur de la couche (pour ce qui concerne la diffusion) et le gradient de charge (pour ce qui concerne la convection) ;
- un paramètre représentatif des conditions d'exploitation du stockage : la profondeur du niveau étudié dans le laboratoire souterrain et considéré à ce stade comme le niveau de référence pour l'installation du stockage.

Ainsi, sur la base de calculs de performance réalisés, il a été retenu :

- que les zones susceptibles d'être le siège des gradients verticaux les plus élevés apparaissent moins favorables à l'implantation du stockage si les infrastructures souterraines venaient à se dégrader très fortement à long terme ; la zone privilégiée présente des gradients hydrauliques inférieurs à 0.2 m/m ;
- que pour améliorer encore la sûreté à long terme, l'épaisseur minimale pour l'implantation des infrastructures souterraines est portée à 140 m ;
- que pour minimiser d'une part l'endommagement potentiel de la roche lors du creusement et d'autre part les quantités de matériau de soutènement dans les infrastructures de stockage, la profondeur du niveau au sein duquel ces dernières seront localisées devra être inférieure à 600 m.

La variabilité latérale d'autres paramètres tels que les propriétés de rétention, la perméabilité verticale du Callovo-Oxfordien ou les coefficients de diffusion des anions n'a qu'une influence mineure. Les résultats des calculs de performance menés en 5 points de la zone de transposition pour quantifier plus précisément l'effet de telles variabilités latérales indiquent que le débit molaire maximum d'iode129 aux bornes (toit et mur) du Callovo-Oxfordien ne varie quasiment pas et seul le maximum du flux peut être décalé d'environ 100 000 ans. D'autres critères géologiques, par exemple la sismicité ou le cadre structural, ne sont pas suffisamment discriminants pour délimiter une zone. La combinaison des trois principaux critères a conduit à une zone d'environ 95 km^2 (figure ci-dessous) au sein de laquelle a été positionnée la ZIRA, après la prise en compte de critères d'ordre sociologique évoqués lors de la consultation des populations locales. ■



Critères pris en compte pour proposer la ZIRA

Comment peuvent évoluer le milieu géologique et les biosphères à long terme ?

Les évolutions possibles du milieu naturel avec les longues échelles de temps en rapport avec les durées qu'implique un stockage géologique profond ont été conceptualisées à l'aide de données d'origine naturaliste relevant de l'analyse de témoignages des derniers millions d'années et de simulations numériques. Ces dernières n'ont représenté jusqu'alors que des conditions ponctuelles à des périodes clé, et dans le Dossier 2005 (Andra, 2005), seules les situations extrêmes ont été prises en compte pour les évaluations de sûreté.

Depuis 2006, une nouvelle étape a été franchie de façon à disposer d'estimations ne reposant plus sur une approche maximaliste. Pour ce faire, le programme d'études met en œuvre des modélisations qui visent à être plus représentatives :

- des processus mis en jeu (simulations à partir de bases physiques),
- du continuum des évolutions avec un pas de temps de 1 000 ans pendant la durée du million d'années,
- de la variabilité spatiale à l'échelle régionale (le bassin de Paris ou l'Europe, selon la pertinence pour le sujet traité).

Ces études concernent les quatre grands domaines à prendre en compte :
- les évolutions climatiques,
- les mouvements tectoniques,
- la géomorphologie,
- les écosystèmes.

Les deux derniers thèmes concernent les évolutions en surface, ils sont donc très sensibles aux différents scénarios climatiques possibles dans le futur.

Les évolutions du climat

Les nouvelles simulations mettent à profit les améliorations des outils de modélisation du climat intervenues depuis la réalisation du projet européen BIOCLIM. Ce travail de recherche a été réalisé avec le modèle climatique global de complexité intermédiaire CLIMBER du Laboratoire des sciences du climat et l'environnement (LSCE), et un modèle de régionalisation (GAM) développé au LSCE pour les besoins de l'Andra.
L'objectif est de disposer des valeurs de températures et de précipitations en termes de moyennes annuelles et mensuelles, à un pas de temps fin (1 000 ans) pendant la durée du million d'années, avec leur variabilité spatiale à maille fine (1/6 de degré) en Europe de l'ouest. Après un test de calage simulant l'évolution au cours des derniers 130 000 ans, période pour laquelle on dispose de données paléoclimatiques précises, des simulations couplées, associant le modèle de climat global à des modèles de calottes glaciaires des hémisphères nord et sud (GRISLI et GREMELIN), ont été réalisées pendant la durée des prochains 300 000 ans.

Les résultats obtenus donnent l'éventail des changements climatiques possibles, en termes de températures de l'air de surface et de précipitations, avec leur variabilité spatiale à l'échelle de quelques dizaines de kilomètres (figure 7). S'ils ne sauraient être considérés comme de réelles prédictions, en raison d'incertitudes accumulées au cours des différentes étapes de modélisation, ils fournissent cependant un intervalle de variations et une évolution temporelle réalistes, rendant compte des modifications régionales. Ainsi, dans le cas d'une évolution fortement modifiée (rejet total d'origine anthropique de 5 000 gt de CO_2), ils modulent les résultats BIOCLIM ; les épisodes les plus chauds correspondent à une extension en Europe du climat méditerranéen actuel.
De ce fait, ils servent de données d'entrée i) pour les modélisations d'évolution hydrogéologiques réalisées dans le programme simulation, et ii) pour les simulations d'évolution géomorphologique et d'évolution des écosystèmes.

Les mouvements tectoniques

Il a été montré que les effets d'éventuels séismes localisés dans l'est du bassin de Paris n'auraient pas de conséquence sur la stabilité d'un stockage en milieu géologique profond (Andra, 2005). Les mouvements tectoniques sont cependant étudiés car ils constituent un facteur qui, avec le climat, conditionne l'évolution géomorphologique et qui intervient directement sur l'évolution du modèle hydrogéologique.

Pour quantifier les mouvements tectoniques de manière plus précise par rapports aux résultats antérieurs, les études engagées depuis 2006 sont orientées vers de nouvelles datations de terrasses alluviales, d'analyses des données et de modélisations couvrant une large période, depuis l'Oligocène jusqu'à l'actuel.

Les résultats récents confirment, dans le bassin de Paris, la permanence du schéma de répartition spatiale de zones en subsidence et d'autres en surrection relative, avec une accélération des mouvements depuis 2 Ma (30 à 150 m/Ma) alors que les taux de surrection ne dépassaient pas 10 m/Ma sur la période de 30 à 15 Ma. Pour la région de Meuse/Haute-Marne les valeurs de soulèvement sont de l'ordre de 80 m/Ma.

Une avancée récente est la mise en évidence d'une zone en surrection rapide, jusque là non soupçonnée, détectée en Argonne et pouvant se prolonger vers le SO (figure 8). Ce soulèvement a probablement favorisé les captures fluviatiles du passé (Sault-Ornain, Aisne-Aire) et conditionnera l'évolution future de la Meuse.

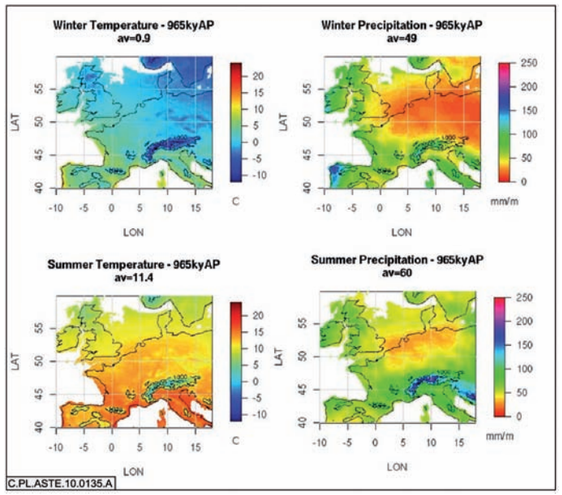


Figure 7 : simulation de l'évolution du climat, exemple du climat saisonnier régionalisé à 965ka AP

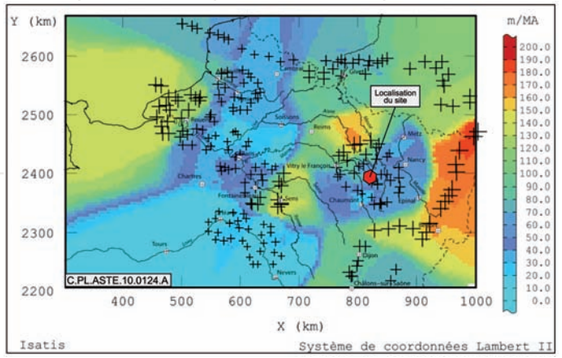


Figure 8 : modèle de répartition spatiale des taux de surrection à l'actuel dans le Bassin de Paris
[échelle de droite : mètres par millions d'années]
Croix : points de contrôle - données de datations

L'évolution géomorphologique

Les premières études ne considéraient que le cas de l'évolution naturelle du climat, sans impact anthropique, à partir de l'extrapolation du passé. Elles n'avaient fourni des résultats que pour le secteur de Meuse/Haute-Marne, avec deux situations géomorphologiques possibles à 500 ka et 1 Ma.

Depuis 2006, les modèles numériques de l'École des Mines de Paris, combinés aux processus déterminés à partir des études de terrain[1], traitent l'évolution géomorphologique de façon continue en intégrant deux hypothèses climatiques (variation naturelle ou évolution due aux actions humaines).

Le secteur de Meuse/Haute-Marne est incorporé dans un modèle d'évolution 3D de l'ensemble du bassin de Paris, à un pas de temps de 1 000 ans et une maille de 250 m (figure 9). Les simulations intègrent la succession des phases d'érosion et de dépôt dans les vallées et l'altération chimique et mécanique des plateaux ; en outre, elles intègrent le nouveau modèle de surrection tectonique.

Les résultats intermédiaires de fin 2009 précisent les lieux, les dates d'apparition et la dynamique d'extension des nouveaux affleurements de calcaires oxfordiens au nord du secteur de Meuse/Haute-Marne. Ces éléments constituent des données d'entrée pour la modélisation hydrogéologique du futur.

Dans le cas du scénario climatique modifié par les actions anthropiques, l'érosion due aux phases glaciaires sera très fortement réduite, voire absente, dans les premières centaines de milliers d'années. En conséquence, l'évolution sera différente de celle qui résulte d'une variation naturelle du climat :

- jusqu'à 500 ka, l'ablation des interfluves sera relativement rapide, avec un alluvionnement dans les vallées, ce qui conduira à un relief mou, avec des vallées larges et peu encaissées, favorable aux captures fluviatiles ;
- au delà de 500 ka, l'érosion dans les vallées reprendra, mais au terme du million d'années, les taux d'incision resteraient nettement inférieurs à ceux obtenus dans le cas du climat naturel.

Les simulations futures vont traiter des captures fluviatiles, en particulier celle de la Meuse en raison de son impact potentiel sur l'aquifère du Dogger. L'évolution climatique modifiée par action anthropique doit être affinée pour mieux définir les biosphères chaudes qui en résulteront.

Les écosystèmes du futur

Pour évaluer les éventuelles conséquences d'un stockage sur les écosystèmes futurs, il est nécessaire de définir des biosphères de référence dont l'évolution dans le temps sera influencée par le climat.

1 Études réalisées par GEGENAA Reims, Edytem Chambéry, CEGUM Metz, CERPA Nancy2

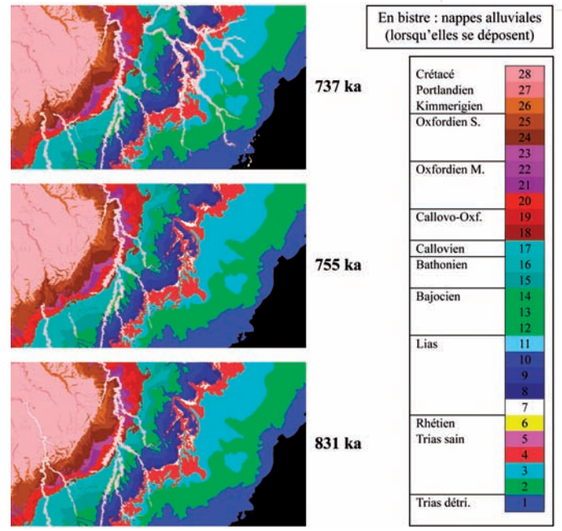


Figure 9 : simulation de l'évolution géomorphologique future - illustration de 3 étapes dans le cas du scénario d'évolution naturelle du climat, extrait couvrant la partie sud-est du Bassin de Paris

Les modifications de contours des affleurements restent minimes pendant la période considérée, les principales évolutions concernent le réseau hydrographique.

Jusqu'en 2005, seul le cas de l'évolution naturelle du climat a été traité. Les biosphères correspondantes sous climats tempérés et froids étaient déduites des analogues naturels retrouvés dans le passé de la région ou actuellement observables dans le monde. Le projet BIOCLIM a mis à disposition des scénarios d'évolution exprimés en termes de succession de grands types de climats, avec une première évaluation des conséquences des activités anthropiques. Ces données ont été contrôlées et complétées avec la réalisation en 2007-2009 de nouvelles simulations de l'évolution climatique à l'échelle du globe.

Les caractéristiques des biosphères de référence devaient donc être consolidées pour les climats froids et tempérés et définies dans le cas d'un réchauffement climatique après avoir déterminé la variabilité spatiale et temporelle des paramètres climatiques (températures, précipitations). C'est l'orientation qu'ont pris les recherches depuis 2007 - 2008 en combinant les analyses d'analogues naturels passés et présents à une modélisation numérique. Cette dernière doit permettre de traiter les évolutions avec de grandes échelles de temps et d'espace.

À ce jour, les travaux sur les analogues naturels ont fourni des premières indications sur la composition prévisible des populations animales et végétales en climat chaud. Il est possible d'en déduire les tout premiers pronostics de composition possible de populations sur le site de Meuse/Haute-Marne ainsi que les caractéristiques des sols.

Grâce au développement du modèle numérique, on dispose, à ce stade, des modèles mécanistes de base permettant la compréhension, l'intégration, et une simplification pertinente des différents processus climatiques et écologiques. La suite des simulations doit permettre, d'ici fin 2012, de déterminer une composition plausible des populations végétales et animales naturelles ainsi que les types d'activités agricoles possibles, pour les différents états climatiques. La première application du modèle numérique portera sur l'estimation des effets possibles du pic de réchauffement global prédit pour les prochains millénaires.

Les interactions eau-roche : facteur clé gouvernant la composition de l'eau porale du Callovo-Oxfordien

La compréhension des phénomènes gouvernant la composition chimique de la solution de pore du Callovo-Oxfordien est nécessaire pour évaluer (i) les comportements chimique (redox, spéciation, sorption, précipitation…) et diffusif des radionucléides et (ii) l'évolution des matériaux présents dans un stockage (métaux, béton, verre, argiles gonflantes). Cette compréhension a été largement acquise dès le Dossier 2005 (Andra, 2005) et a donné lieu à la construction d'un modèle géochimique destiné à calculer des concentrations en éléments majeurs ainsi que les principaux paramètres physicochimiques (pH, Eh, force ionique…) des eaux interstitielles à l'état naturel.

Les principales actions menées dans la période 2006-2009 avaient pour objectifs d'améliorer les connaissances sur trois aspects :

- les réactions eau-roche gouvernant la spéciation de la solution de pore, notamment celles contrôlant le potentiel d'oxydoréduction,
- les effets des interactions physicochimiques entre les solutés et les surfaces des phases argileuses sur la composition chimique de la solution interstitielle dans les pores de différentes tailles (micro, méso, macro),
- les effets sur la composition de certaines perturbations provenant du stockage : augmentation de température, présence d'hydrogène liée à la corrosion des composants en acier.

L'acquisition des données s'appuie sur des mesures sur échantillons et sur des expérimentations dans les laboratoires souterrains du Mont Terri en Suisse et de Bure en Meuse/Haute-Marne. La compréhension phénoménologique des points cités est faite (ou a été faite) en quasi-totalité dans le cadre :

- du partenariat de recherche BRGM/Andra,
- de la partie du projet européen FunMig, dédiée à la compréhension des processus contrôlant la migration des radionucléides dans des formations argileuses,
- du projet européen ReCoSy (2008-2012) traitant, pour partie, de la compréhension des phénomènes physicochimiques gouvernant l'état redox de l'eau interstitielle des argilites saines et perturbées,
- de thèses et post-doctorats financés par l'Andra.

La caractérisation *in situ* de l'eau porale du Callovo-Oxfordien

L'évaluation de la mobilité des radionucléides dans les argilites du Callovo-Oxfordien et des interactions entre la roche et les matériaux du stockage implique une connaissance précise et fiable de la composition chimique et isotopique de l'eau porale. Les laboratoires souterrains constituent des outils exceptionnels pour cette caractérisation.
Ainsi, des premiers essais de caractérisation avaient été menés au Mont Terri, en Suisse. Le retour d'expérience acquis à cette occasion a servi à mettre au point l'expérimentation PAC (Prélèvement et analyses chimiques) qui a été réalisée dans le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne **[voir encadré ci-contre]**.

Les réactions gouvernant la composition de l'eau porale

La confrontation de la spéciation calculée par le modèle géochimique avec les compositions mesurées dans les expérimentations menées dans le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne, a permis de valider les hypothèses principales du modèle (contrôles par équilibres de solubilité avec un jeu de phases minérales pures et de cations échangeables identifiés dans la roche, compensation de l'effet de l'exclusion anionique…). Elle a cependant révélé que deux paramètres présents dans le modèle étaient à revoir : 1) la constante de solubilité de la célestine dans la base de données thermodynamiques était erronée, 2) la sélectivité du K^+ devait être mieux contrainte afin qu'elle soit cohérente avec le taux d'occupation de ce cation dans les conditions spécifiques des argilites (phénomène déjà connu pour les argiles pures).

Le contrôle des réactions redox

D'après la modélisation et les résultats des expérimentations *in situ*, le potentiel d'oxydoréduction des eaux de pore des argilites se situe fortement dans le domaine réducteur, en cohérence avec la présence de pyrite et de matière organique. Un des principaux couples redox susceptible de contrôler et de renseigner sur le potentiel des eaux interstitielles est le couple Fe(II)/ Fe(III). Un effort considérable a été consacré pour mieux caractériser et quantifier la spéciation et la réactivité du Fe(II) dans les argilites. Selon les résultats d'études menées par divers laboratoires sur des phases argileuses de référence, le Fe(II) adsorbé est très réactif (Géhin *et al.* 2007) ; il peut ensuite s'oxyder avec H_2O pour produire une espèce de surface H_2, qui pourra ensuite réduire des éléments tels que Se(IV) en Se(0) (Charlet *et al.* 2007). Grâce à ces résultats, il est également possible de mieux contraindre la limite supérieure de la concentration en Fe(II) dissout dans la solution de pore des argilites, qui doit être inférieure à 10^{-4} mol/L ; il apparaît qu'elle est probablement contrôlée par la solubilité d'un minéral du type sidéroplésite ((Fe, Mg) $[CO_3]$).

Les interactions d'ions avec les surfaces des argiles

Les phénomènes qui se développent à l'interface entre la solution de pore et les surfaces des minéraux argileux ont des conséquences sur la composition de la solution qui est mobilisable par drainage, sur la porosité accessible à la diffusion des radionucléides anioniques et sur le potentiel chimique des espèces et du solvant dans la porosité. Diverses études ont été menées afin d'améliorer la capacité à modéliser et à prédire ces effets physicochimiques.

Un modèle géochimique faisant appel à une extension de l'équilibre de Donnan au cas d'électrolytes multi-ioniques et incorporant une représentation « triple couche électrostatique » (TCE) des interactions soluté-surface, permet une estimation de la composition de la solution présente dans les pores de petite taille (< 10 nm) (Leroy *et al.*, 2007). Les valeurs d'entrée d'un modèle du même type ont été mieux contraintes par les résultats issus de la modélisation en dynamique moléculaire (DM) en intégrant des distributions de cations et d'anions, ainsi que la densité du solvant, en fonction de la distance à la surface basale d'une smectite et d'une illite (Tournassat *et al.*, 2009 et Tournassat, 2008).

Comme le montre la figure 10 (à gauche), la zone d'évolution des concentrations ioniques s'étend sur une épaisseur d'environ 20 nm depuis la surface du minéral. Ces résultats sont en cohérence avec une représentation par un modèle triple couches (figure 10 à droite). Les dépendances observées entre, d'un coté, l'exclusion anionique et, de l'autre coté, la densité du matériau et la force ionique de la solution de pore, sont mieux comprises, ceci pour différents types d'argiles compactes (figure 10, à droite).

Ce même type de modèle a été utilisé pour estimer les effets de la composition de la solution interstitielle sur l'activité du solvant et, par conséquence, sur la pression osmotique générée dans la porosité des argilites (Gueutin *et al.*, 2007 ; Goncalves *et al.*, 2007). L'analyse phénoménologique de l'origine des surpressions mesurées dans le Callovo-Oxfordien (Andra, 2005) en est ainsi affinée. Enfin, les résultats des modélisations à l'échelle moléculaire ont permis de quantifier les énergies d'activation et les probabilités d'échange de cations et d'anions entre la solution externe et l'espace interfoliaire d'une smectite (Rotenberg *et al.*, 2007a, b).

Prélèvement et analyses chimiques : l'expérimentation PAC dans le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne

Pour mettre en œuvre le prélèvement des eaux interstitielles des argilites, dans le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne, un modèle prédictif de la composition de l'eau avait été construit sur des analyses et des essais sur des échantillons de Callovo-Oxfordien et des tests de calage avaient été réalisés au Mont-Terri (Pearson *et al.*, 2003). Il en ressortait que les principales incertitudes portaient sur le pH de l'eau, son état d'oxydoréduction et l'état du système des carbonates dissous. À ces conclusions étaient associées des recommandations pour améliorer les expériences *in situ*.
L'expérience PAC a donc été menée dans des forages carottés avec de l'azote à la place de l'air afin d'éviter la perturbation irréversible d'oxydation de la roche et de son eau porale. De plus, dès la phase de carottage, des précautions microbiologiques ont été prises pour éviter l'apport de micro-organismes et de nutriments organiques dans les forages.

Deux principes expérimentaux ont été mis en œuvre (Vinsot *et al.*, 2008). Le premier a consisté à maintenir une phase gazeuse chimiquement inerte (initialement de l'argon pur) dans l'intervalle de test d'un forage à une pression voisine de 1 bar. La pression d'eau autour des forages étant proche de 40 bars, l'eau porale qui s'écoulait dans le forage malgré la faible perméabilité de la roche, pouvait être recueillie, à l'abri de l'air, dans des dispositifs dédiés situés en galerie. Les débits obtenus ont été de l'ordre de 20 à 40 ml par jour et par m^2 de surface de roche pendant plus de quatre ans.

Le second principe expérimental a consisté à fabriquer une eau synthétique de composition voisine de l'eau porale et à l'injecter dans un autre forage. Cette eau était mise en circulation entre le forage et la galerie et sa composition était suivie au cours du temps. L'hypothèse sous-tendant ce principe était que cette composition allait évoluer sous l'effet des interactions avec la roche pour se rapprocher de la composition de l'eau interstitielle.

Au total, quatre forages ont été dédiés à cette expérience, à des profondeurs comprises entre 430 et 505 m/sol. À ces essais sont venus s'ajouter quelques prélèvements opportunistes dans des forages dédiés à des mesures hydrogéologiques. Ceux-ci ont fourni des résultats représentatifs pour certaines espèces, majeures et mineures, autres que les carbonates.

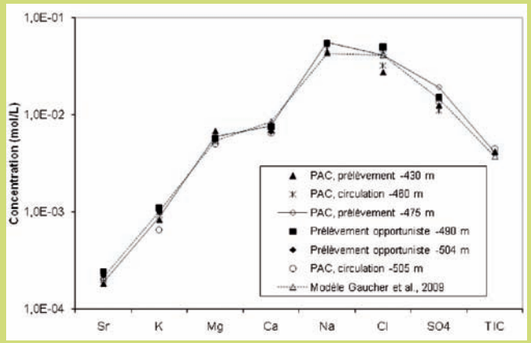
En parallèle de ces expériences *in situ*, des méthodes spécifiques ont été développées pour analyser ces prélèvements d'eau en les perturbant le moins possible.

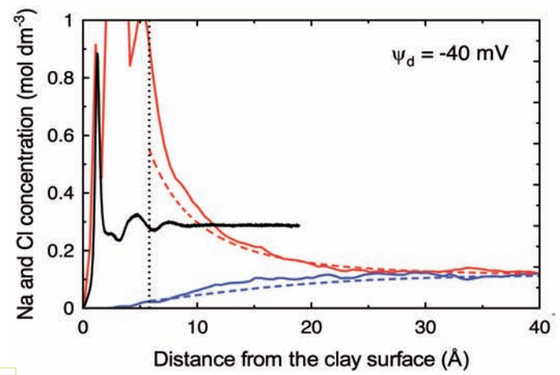
La composition de l'eau porale a finalement été caractérisée à six profondeurs avec trois types de dispositifs expérimentaux.

Les compositions obtenues sont remarquablement similaires les unes par rapport aux autres, quels que soient le principe expérimental et la profondeur (figure ci-dessous). Dans deux cas, le pH, l'état redox et l'état des carbonates ont été déterminés avec précision : le pH est égal à 7,2 ± 0,2 ; la pression partielle de CO_2 est de $10^{-2,0}$ ± 0,2 bar et le potentiel redox est voisin de -200 mV vis-à-vis de l'électrode standard à hydrogène.

Les compositions obtenues par les expériences dans le Laboratoire souterrain ont été comparées à la composition déduite des modélisations prédictives. Les concentrations issues des essais *in situ* s'écartaient initialement de moins d'un facteur 3 des concentrations calculées pour toutes les espèces majeures sauf le potassium et le strontium pour lesquelles l'écart est plus important. À la suite des essais *in situ*, les causes des écarts ont pu être identifiées et le modèle modifié en conséquence (Gaucher *et al.*, 2009). Comme le montre la figure, les valeurs calculées avec ce modèle sont cohérentes avec les valeurs mesurées.

Outre les concentrations en espèces majeures, des teneurs en éléments mineurs tels que Li+, NH4+, I-, Br- et en isotopes stables ont également été obtenues. Ces essais ont aussi apporté des données sur les gaz dissous, en particulier les alcanes. Par ailleurs, les valeurs de concentration en chlorure obtenues dans ces essais contribuent à l'évaluation de la porosité « géochimique », accessible aux ions chlorures, du Callovo-Oxfordien et à la reconstitution de l'histoire des transferts de ce traceur à l'échelle de la série sédimentaire et des temps géologiques.





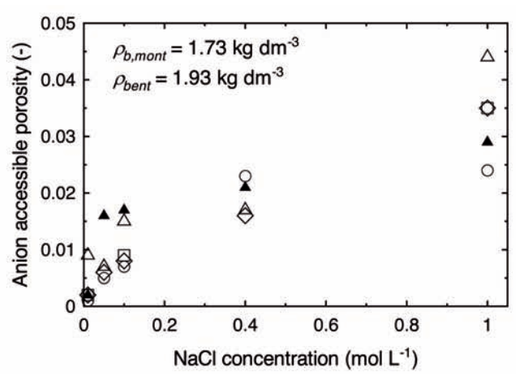


Figure 10 : à gauche, distributions de Cl- (bleu) et Na+ (rouge) calculées par DM (trait plein) et avec un modèle TCE (traits en pointillé) - le trait noir correspond aux molécules H_2O. À droite, comparaison des prédictions des effets de l'exclusion anionique par le modèle TCE (triangles solides) avec des mesures expérimentales pour une montmorillonite compactée, en fonction de la force ionique et la densité de l'argile (Tournassat et al. 2009)

Les effets dus à la température et à la présence d'hydrogène

L'augmentation locale de la température (de relativement courte durée) et l'imposition d'une pression partielle en H_2 élevée pendant une période assez longue (>10^5 ans) sont deux perturbations susceptibles de modifier la composition chimique de la solution interstitielle, principalement dans le champ proche du stockage. En ce qui concerne l'H_2, les études montrent que cette espèce ne réagit pas avec le sulfate présent dans l'eau de pore pour les conditions représentatives des argilites saines, notamment en l'absence d'agents catalyseurs (activité microbienne, présence de fer métallique...) (Truche et al., 2009). En revanche, l'H_2 peut réagir avec la pyrite contenue dans les argilites, la transformant en pyrrhotite, avec une production simultanée d'H_2S. Une évaluation des éventuelles conséquences de cette réaction vis-à-vis du bilan réactionnel du soufre fait partie des actions à venir.

Les effets, sur la composition de l'eau interstitielle, d'une montée en température au sein des argilites fait l'objet de prévisions par modélisation géochimique et d'études réalisées en laboratoire. Les modélisations indiquent qu'une température de 90°C engendrerait des modifications (réversibles) plus ou moins significatives (par rapport aux valeurs établies à 25°C) d'un certain nombre de paramètres tels que le pH (évolution vers des valeurs légèrement acides) et le carbone inorganique total (augmentation d'un facteur 5). Les résultats des expérimentations, attendus pour mi-2010, devraient servir à valider ou à invalider les hypothèses retenues dans l'approche modélisatrice.

Il faudra cependant tenir compte des différentes raisons susceptibles d'être à l'origine de divergences entre modélisation et observations expérimentales : (i) un système expérimental éventuellement hors équilibre à cause des cinétiques très lentes pour certaines réactions, (ii) des insuffisances ou des lacunes dans la base de données thermodynamiques notamment vis-à-vis des phases phyllosilicatées, et (iii) la prise en compte de l'effet de la température sur des phases minérales présentes dans la roche mais non introduites dans le modèle à 25°C. Si des divergences apparaissent, elles seront étudiées dans la suite du travail.

Références bibliographiques :

> Andra (2005) Dossier 2005 - Tome : Évolution phénoménologique du stockage géologique. Andra édit. ISBN 2-916162-21-6

> Carpentier C. (2004) : Géométries et environnements de dépôt de l'Oxfordien de l'Est du Bassin de Paris. Thèse Univ. Henri Poincaré - Nancy, 395 p.

> Charlet, L, A.C. Scheinost, C. Tournassat, J.M. Greneche, A. Gehin, A. Fernandez-Martınez, S. Coudert, D. Tisserand, J. Brendle (2007) Electron transfer at the mineral/water interface: Selenium reduction by ferrous iron sorbed on clay, Geochimica et Cosmochimica Acta 71 (2007) 5731–5749.

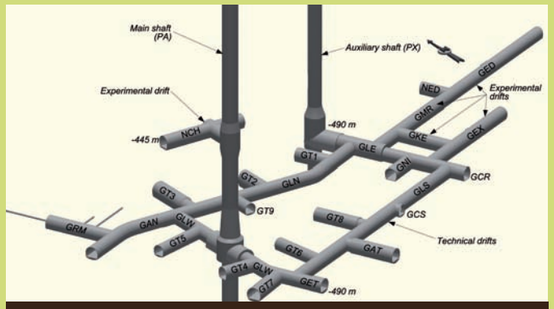
> Pearson, F.J., Arcos, D., Bath, A., Boisson, J.Y., Fernández, A.M., Gäbler, H.E., Gaucher, E., Gautschi, A., Griffault, L., Hernán P., Waber, H.N., 2003. Geochemistry of water in the Opalinus Clay formation at the Mont Terri Rock Laboratory. Report of the Swiss Federal Office for Water and Geology, Geology Series, FOWG N° 5, ISBN 3-906723-59-3, 319 p.

Un outil exceptionnel :
le Laboratoire souterrain

Les investigations depuis la surface permettent d'obtenir des données en géosciences sur de grandes étendues à l'aide de forages et de géophysique. Pourtant ces techniques sont, dans le premier cas, discontinues et intéressent de faible volume ou restent indirectes, dans le second cas. De plus, des échantillons extraits de 500 mètres de profondeur subissent une décompression qui peut modifier certaines propriétés de roches faiblement compactées comme les argiles.

Le Laboratoire souterrain créé à la limite des départements de la Meuse et de la Haute-Marne était destiné à remédier à ces obstacles tout en offrant aux investigations scientifiques un grand volume de roche non perturbée.

Il est implanté dans les argilites du Callovo-Oxfordien. Il est constitué d'une galerie à 445 mètres de profondeur et d'un réseau à 490 mètres. Sa construction a débuté en août 2000 ; son architecture d'ensemble était terminée en 2006. Depuis, des galeries supplémentaires sont creusées pour le besoin de nouvelles expérimentations.



Vue du réseau de galeries en janvier 2010

Les objectifs scientifiques et technologiques étaient de :

- déterminer le comportement de la roche et des fluides, en prenant en compte les phénomènes naturels et les modifications provoquées par la réalisation du stockage ;
- effectuer des mesures sur des roches en place ou sur des fluides aussi peu perturbées que possible ;
- déterminer les méthodes de creusement, de rebouchage et de scellement des cavités.

Le programme de la phase 2000 - 2006 comportait quatre grands types d'expérimentations :

- la création d'ouvrages et l'étude de la réponse de l'argilite endommagée par le creusement en fonction de l'orientation des contraintes naturelles ;
- la détermination des transferts de solutés dans l'argilite, *via* les paramètres de diffusion ;
- la caractérisation des interactions fluides/roches et les équilibres géochimiques gaz/roche ou eau/roche prévalant au sein du milieu géologique non perturbé afin d'en estimer la capacité à tamponner les éventuelles perturbations induites par le stockage ;
- l'évaluation des perturbations thermiques, oxydantes et hydriques sur le comportement mécanique de la roche et ses propriétés de confinement ainsi que les moyens d'y remédier.

En 2006, les résultats principaux étant acquis, une nouvelle étape s'est ouverte autour des thèmes suivants :

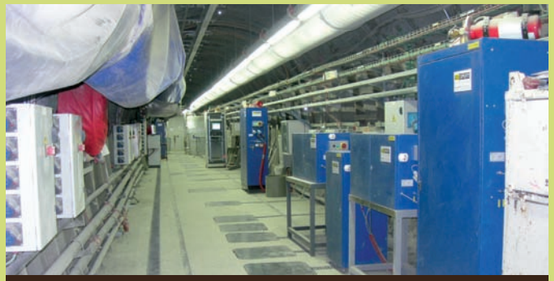
- la variabilité physique et chimique des argilites à l'échelle hectométrique ;
- la mise au point de nouvelles techniques de creusement et leur applicabilité à la construction, l'exploitation et la maintenance de l'installation envisagée ;
- le comportement hydromécanique de chaque type d'ouvrage (alvéoles, galeries de stockage, galeries techniques) pendant l'exploitation et la phase de fermeture du stockage en prenant en compte les options de réversibilité telles qu'elles sont conçues aujourd'hui ;
- le comportement hydromécanique de la zone endommagée par le creusement et ses capacités de cicatrisation ;
- le comportement des roches et fluides interstitiels en contact avec les matériaux apportés dans le stockage - liants hydrauliques, verre, fer et argiles spécifiques ;
- le transfert de gaz dans l'argilite et aux interfaces avec la barrière ouvragée ;
- la conception et la mise au point de concepts et de systèmes de surveillance du stockage au cours de toutes ses phases depuis la période précédant la construction jusqu'à des durées dépassant la phase de réversibilité.

La connaissance géologique et géomécanique

Le suivi scientifique du creusement des galeries constitue en soi une première étape de l'expérimentation. Outre les levés sédimentologiques et structuraux, des équipements de mesure de convergence et de suivi climatologique des galeries sont systématiquement mis en place. Ces équipements complètent les dispositifs de mesures géomécaniques en parement de puits (fissuromètres, capteurs de pression totale derrière les cintres...), en forage (extensomètres, capteurs de pression interstitielle) ou dans les soutènements en béton (cordes vibrantes).

La compréhension du comportement géochimique et hydrogéochimique de la roche

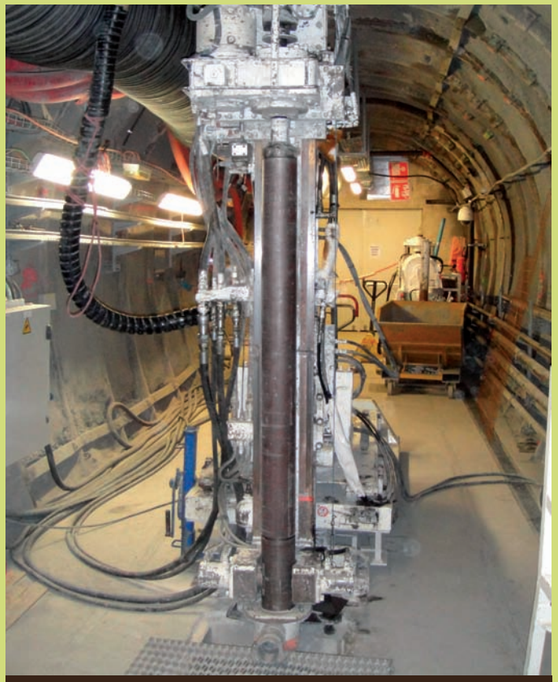
Les expérimentations à but géochimique et hydrogéochimique ont pour caractéristiques communes de faire appel à des dispositifs expérimentaux complexes destinés à faire circuler dans un forage, indépendamment ou d'une façon contrôlée, des gaz ou des eaux synthétiques ou naturelles. Ces fluides sont, dans certains cas, chauffés et mis en contact avec des matériaux du stockage.



Galerie d'expérimentations géochimiques avec les armoires de contrôle des équipements

Ces expérimentations sont très spécifiques d'une formation argileuse où la perméabilité est très faible mais où, compte tenu de la porosité de l'ordre de 18 %, le volume d'eau ou de gaz disponible pour les interactions est relativement important.

D'autres expérimentations sont dédiées à la caractérisation de l'activité bactérienne apportée par l'homme et la ventilation des ouvrages souterrains. Ces expérimentations permettent également de rechercher des éventuels microorganismes autochtones. De tels objectifs nécessitent la mise en œuvre de protocoles assurant la stérilisation des équipements de forages ou de mesures.



Tige de forage, encore emballée dans sa gaine de protection stérile

Les démonstrateurs

Les démonstrateurs peuvent être des ouvrages devant assurer une fonction du stockage (exemple : alvéole ou bouchon de scellement) **(voir encadré « concept de stockage HA-MAVL » p.30)** ou des dispositifs techniques mis en œuvre pour la manipulation des colis (exemple : chaîne pousseuse de colis). Les démonstrateurs constituent une catégorie d'expérimentations évoluée dans la mesure où ils sont susceptibles de représenter, à échelle réelle ou réduite, des composants du stockage. Ils sont généralement instrumentés pour en tester les performances réelles.

Les techniques de creusement

Étant donné leur comportement géomécanique, le creusement des argilites est réalisé par des méthodes minières classiques : foration-tir pour les puits d'accès et la galerie à -455 m, brise-roche hydraulique pour le réseau à -490 m, en raison de la plus grande fragilité de la roche très argileuse et de la profondeur. Le soutènement des galeries a été assuré par des cintres métalliques coulissants et/ou un boulonnage posé à l'avancement du creusement, associés à la mise en place d'un béton projeté. Avec le retour d'expérience du creusement des premières galeries, de nombreuses adaptations, à la fois dans le soutènement des galeries (contre-cintre, radier « flottant », béton projeté fibré, etc.) et dans le creusement, avec l'utilisation d'une machine à attaque ponctuelle, ont été mises en œuvre pour la deuxième phase, démarrée en 2008. Toutes ces modifications ont abouti à la réalisation d'ouvrages souterrains plus soignés et stables dans le temps. Parallèlement, les stratégies d'équipement des galeries avec les réseaux ont évolué pour tenir compte des passages d'engins, de l'évolution de l'architecture et de l'exploitation des installations.

Machine à attaque ponctuelle

L'acquisition et la gestion des données

Dès la phase de conception du laboratoire, l'Andra a considéré comme central l'acquisition, le stockage et la présentation des données issues des expérimentations. Ainsi, il a été mis en place deux outils, le système d'acquisition et de gestion des données (SAGD) et la base GEO.

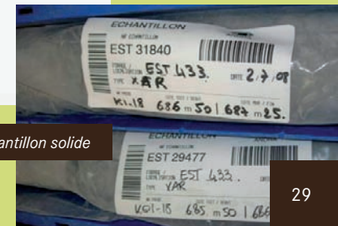
Le réseau SAGD permet de :

- mettre à disposition en temps réel sur un système unique toutes les données expérimentales en cours d'acquisition sur le Centre de Meuse/Haute-Marne et le laboratoire suisse du Mont Terri ;
- visualiser les données enregistrées dans des fenêtres temporelles et à des pas de mesure spécifiés ;
- prendre le contrôle commande à distance des expérimentations ;
- assurer la traçabilité de toutes les informations enregistrées ;
- garantir l'archivage des données.

La base GEO comporte trois fonctionnalités :

- l'acquisition et la gestion de données et fichiers relatifs à des mesures géologiques, géomécaniques, hydrogéologiques et géochimiques sur des échantillons solides et fluides et à des mesures *in situ* (diagraphies, mesures sur prélèvements, logs géologiques...) ;
- la consultation, accessible par l'ensemble du personnel sur le réseau interne, des données liées à un forage et/ou à un échantillon ; de plus, il est possible de réaliser des calculs et des graphes sur des séries de mesures liées à un échantillon ;
- la gestion physique des échantillons fluides et solides stockés qui permet de les localiser d'assurer le suivi de leur expédition vers un organisme et de réaliser des inventaires réguliers.

Page d'accueil du portail Géosciences de la base GEO



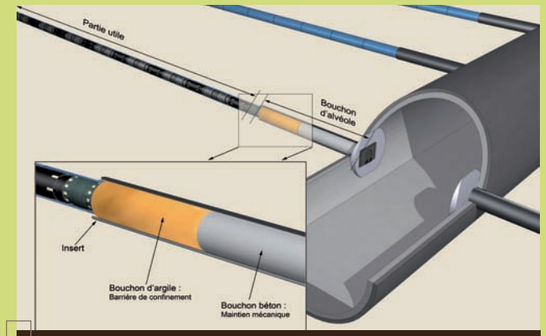
Étiquetage d'un échantillon solide

4 Le stockage et ses interactions
avec l'environnement

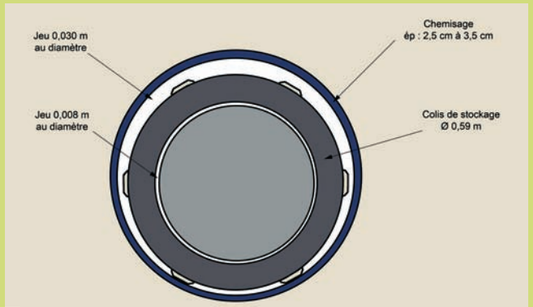
Le concept de stockage en milieu géologique profond de déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue (HA-MAVL).

Dans le concept de stockage réversible de référence (Andra, 2005-a) au sein des argilites du Callovo-Oxfordien, les zones de stockage sont distinctes selon les types de déchets et l'ensemble est fractionné en modules selon les différentes catégories de colis. Des galeries d'accès assurent le transfert des colis, celui des matériaux pour la construction et la ventilation, ces ouvrages sont renforcés de béton pour résister à la pression lithostatique. Après exploitation, si la décision est prise de fermer le stockage, ces galeries seront remblayées d'argilite (éventuellement additionnée d'autres matériaux) et des bouchons de scellements en bentonite positionnés à des emplacements clé en assureront l'isolement.

Dans chaque sous-ensemble du stockage, des alvéoles seront créées dont la forme et le volume tiendront compte du type de déchets à y placer. Pour les alvéoles de déchets vitrifiés (HA) (figure ci-dessous), le concept prévoit un conteneur primaire en acier inoxydable contenant la matrice de verre, introduit dans un surconteneur étanche en acier non allié. L'ensemble est disposé dans une alvéole dont le chemisage en acier non allié est au contact de l'argilite. Ces alvéoles sont des tunnels borgnes de 70 cm de diamètre et de 40 m de long, dont le scellement est assuré par un bouchon en argile gonflante (*a priori*, bentonite) compactée, s'appuyant sur un massif en béton.



Galerie et alvéoles des déchets vitrifiés



Vue en coupe de l'alvéole des déchets vitrifiés

Les colis de déchets MA-VL seront regroupés dans des surconteneurs en béton et stockés dans des tunnels horizontaux de 400 m de long et 9 m de diamètre revêtus de béton armé pour la stabilité mécanique de l'ouvrage. Outre ses qualités mécaniques et sa durabilité favorables à la réversibilité, le béton exerce une fonction de protection chimique des colis et contribue à la rétention de radionucléides. ■

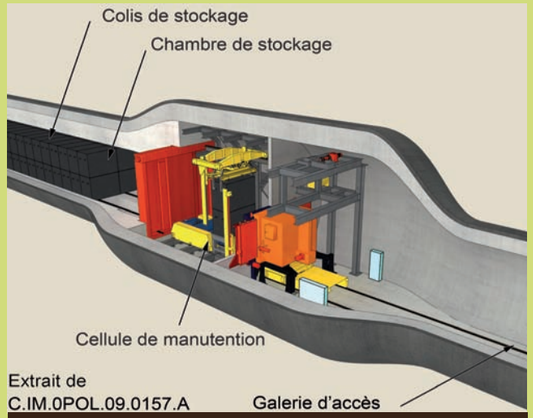


Schéma de concept de stockage des déchets MA-VL

Les argilites et leur comportement THMC dans un stockage HA-MAVL

La construction des ouvrages de stockage doit être conçue en fonction de l'interaction thermohydromécanique et chimique avec la formation géologique hôte, de façon à assurer leur disponibilité et leur maintenabilité pendant les phases d'exploitation et de réversibilité du stockage d'ordre séculaire. Elle doit prendre en compte également les perturbations induites dans la formation, pour en minimiser les conséquences sur la sûreté à long terme du stockage.

Le Dossier 2005 a montré que la formation du Callovo-Oxfordien est apte au creusement par des techniques minières et que la réalisation d'ouvrages n'y induit que des perturbations modérées qui ne sont, *a priori*, pas susceptibles de créer des chemins d'écoulement préférentiels. Il a conclu que la recherche qui pourrait se poursuivre dans une perspective de qualification de site et de développement technologique devait s'appuyer sur la compréhension des phénomènes et de leurs interactions (en grand et *in situ*) en évaluant précisément les marges de sûreté. Les recherches sur la caractérisation du comportement thermohydromécanique et chimique de cette formation se sont ainsi focalisées sur les thématiques suivantes :

- mieux contraindre les réactions des argilites avec les matériaux du stockage (béton, acier...) ;
- améliorer la représentation du couplage hydromécanique dans les modèles de comportement des argilites, en précisant la nature des phénomènes et leur éventuelle compétition compte tenu des interfaces multiples présentes dans les alvéoles de stockage étudiées ;
- avoir les moyens de prévoir l'apparition et le type de fracturation autour des ouvrages de stockage ;
- quantifier la cinétique des mécanismes de déformation différée des argilites sur des échelles de temps allant de la dizaine d'années à la centaine de milliers d'années ;
- préciser l'effet de la température sur le comportement des argilites ;
- évaluer l'évolution de la conductivité hydraulique de l'EDZ.

Elles ont pour objectif d'optimiser certains aspects opérationnels (apport du boulonnage au soutènement, évaluation du report de charge sur le revêtement, possibilité d'utilisation des argilites remaniés dans les noyaux de scellements), d'améliorer la maîtrise des processus et de réduire les incertitudes sur les paramètres intervenant dans les évaluations quantitatives de sûreté, en s'appuyant sur des investigations à différentes échelles (du nanomètre au mètre) et en améliorant, à partir de cette connaissance, les modèles rhéologiques pour réduire les incertitudes dans les calculs de performance des ouvrages de stockage.

Ces recherches sont menées par un groupement de huit laboratoires[1], auquel quatre autres contribuent ponctuellement, ainsi que dans le cadre d'actions de recherche en partenariat avec des organismes français et européens. Une part significative des recherches fait l'objet de différents travaux de thèses. Le programme expérimental, que réalise l'Andra dans le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne **[voir p.28-29]**, représente une contribution importante.

La stabilité des minéraux argileux

Il est nécessaire d'être en mesure de comprendre l'évolution des caractéristiques physicochimiques des matériaux à base d'argile afin de prédire leur comportement en contexte de stockage. Ces modèles nécessitent une base de données thermodynamique comportant les phases principales argileuses.

L'approche mise en œuvre sur la stabilité des minéraux d'intérêt repose sur le développement de modèles prédictifs visant à évaluer certaines grandeurs thermodynamiques (enthalpie, entropie de formation, capacité calorifique). Les relations de phase sont évaluées en définissant des diagrammes de prédominance, et en les vérifiant avec des données indépendantes du développement des modèles. Les chemins réactionnels des principales perturbations en stockage structurent la démarche d'acquisition (ciment-argile, fer-argile, température...) appliquée aux différents systèmes étudiés : ciments, zéolithes et argiles (figure 1).

Les études sur les minéraux cimentaires au contact de l'eau, reposent sur la définition de produits de solubilité des minéraux constitutifs des ciments à différents états d'altération avec des températures comprises entre 10 °C et 100 °C. Elles conduisent à évaluer les grandeurs d'enthalpie et de capacité calorifique, pour le système CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO-Fe_2O_3-CO_2-SO_3-Cl-H_2O, en intégrant les états amorphes et cristallins des phases CSH.

Des exercices de test et de validation ont été réalisés de façon indépendante afin de vérifier que l'ensemble des phases minérales représentatives des situations d'intérêt (Callovo-Oxfordien, matériaux cimentaires) soit bien inclus dans la base de données ThermoChimie, et que les données sélectionnées sont cohérentes et robustes. Des calculs géochimiques ont été réalisés en utilisant ThermoChimie, suivant deux types d'exercices :

- comparaison : un modèle géochimique pour un système d'intérêt est retenu dans la littérature ; ce modèle est alors utilisé avec plusieurs bases de données, parmi lesquelles ThermoChimie ;
- modélisation de résultats expérimentaux : les données expérimentales, issues de la littérature ou d'expériences dédiées au sein du programme, sont interprétées à partir d'un code géochimique et de la base ThermoChimie[2].

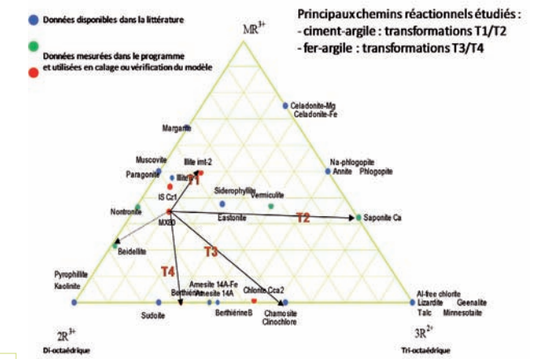


Figure 1 : diagramme ternaire de composition des minéraux argileux. Indication des chemins réactionnels correspondant à des processus attendus en stockage

Une attention particulière a été portée à l'altération des matériaux argileux au contact d'une eau hyperalcaline (correspondant aux interfaces ciments/argiles d'un stockage). Dans la plupart des cas, des zéolites basse température ont été identifiées (en particulier analcime, phillipsite et chabazite).

La stabilité des zéolites étant un paramètre sensible pour l'estimation à long terme de la distance de la perturbation au sein des matériaux argileux, un modèle prédictif a été développé pour un ensemble de minéraux zéolitiques, pour l'évaluation des enthalpies (i) d'hydratation (à partir des volumes molaires et de la composition chimique), et (ii) de formation. Les entropies et coefficients de Maier-Kelley des capacités calorifiques ont également été évalués pour les mêmes minéraux. Ces résultats permettent d'étayer les modélisations chimie-transfert de la perturbation hyperalcaline appliquée à différentes situations du stockage (bouchon et massif d'appui des alvéoles HA, tête d'alvéole MA-VL...). En ce qui concerne les minéraux argileux, la rareté des données disponibles a justifié un important effort d'acquisition au sein du programme du GL, *via* différentes techniques calorimétriques pour accéder à $\Delta H_{f,298}°$, $C_p°(T)$, $S°(T)$, $\Delta G_{f,298}°$, pour différents états

[1] L3S-R, LMSGC et CERMES, EuroGéomat Consulting, LAEGO, CEA/LECBA, LML, LMS, plus ECL, GRS, ERM, LEM)
[2] En 2008 et 2009, des modélisations appliquées au système ciment/Callovo-Oxfordien ont par exemple indiqué la nécessité de réaliser des expériences dédiées à la stabilité de la katoite, afin de mieux caler la sélection de données

d'hydratation. Une difficulté initiale fut de trouver des minéraux suffisamment « purs ». Les phases étudiées recoupent à la fois les principaux minéraux d'intérêt en stockage et les besoins méthodologiques associés au développement ou à la vérification des modèles prédictifs : smectite (Wyoming), illite (Montana), interstratifiés illite/smectite (Slovaquie), beidellite (Californie), chlorite (Californie), saponite (Californie), vermiculite (Afrique du Sud), nontronite (Sud Australie), berthiérine (France). Ces mesures, et les données thermodynamiques déduites, constituent une source d'informations tout à fait exceptionnelle, d'ores et déjà utilisée pour le développement et la vérification de modèles prédictifs.

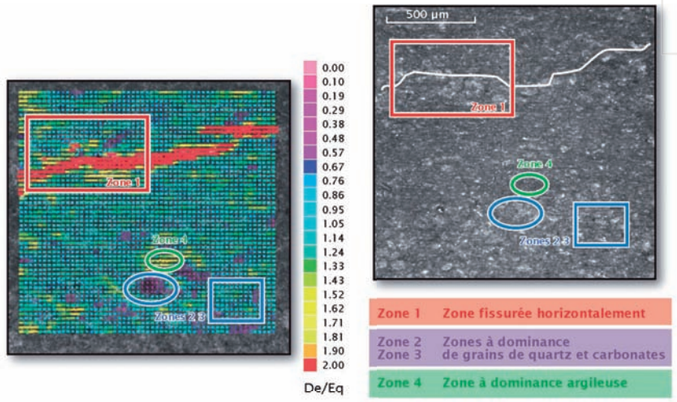
Bien que toujours en développement, les estimations de constantes sont satisfaisantes pour les phases argileuses anhydres. Un important travail reste à mener concernant les constantes d'hydratation. Un exercice de modélisation a été réalisé afin d'évaluer les nouvelles données pour un système ciment/argile, en comparant avec les résultats trouvés en utilisant la base de données du LLNL. Cette comparaison conduit à constater des écarts de répartition des phases secondaires, en raison d'une solubilité plus élevée de la saponite et plus faible pour le gypse ou la goethite en ce qui concerne ThermoChimie par rapport à LLNL. Le nombre des minéraux introduits, notamment les zéolites, est également déterminant sur les résultats *in fine*.

L'amélioration de la représentation du couplage hydromécanique par l'approche des phénomènes physiques

Un consensus s'est dégagé très tôt sur le fait que la microstructure de l'argilite lui confère des spécificités non prises en compte dans les modèles. Toute amélioration de la représentation du couplage hydromécanique passe donc par une approche des phénomènes physiques à l'échelle des constituants et le développement des méthodes de changement d'échelle.

Dans un premier temps, de nouveaux moyens d'observation plus performants ont été mis en œuvre, tels que la nanotomographie aux rayons X au L3R de Grenoble ou l'imagerie MicroDIC au LMS de Palaiseau, afin de différencier le comportement des principaux composants de l'argilite, les minéraux argileux et les grains de calcite et de quartz (figure 2). Cette démarche s'est accompagnée de développements théoriques à l'ENPC, à partir d'une analyse micromécanique. Le modèle morphologique représentant l'argilite est une matrice argileuse renforcée par des inclusions rigides (grains de calcite et de quartz).

Le comportement hydromécanique est d'abord analysé à l'échelle des particules argileuses, constituées d'un ensemble de feuillets cristallins et de couches d'électrolyte intercalées. Le passage à l'échelle macroscopique se fait par une méthode d'homogénéisation, sous l'hypothèse que les inclusions rigides sont suffisamment dispersées pour ne pas être considérées en tant qu'entités et que la matrice argileuse est constituée d'agrégats de particules, qui ne contiennent que des micropores, les pores de plus grande taille ne se trouvant qu'à l'échelle supérieure d'organisation. La loi de comportement obtenue permet de prendre en compte les couplages physicochimiques.



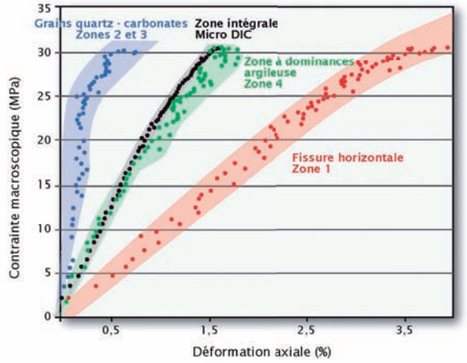


Figure 2 : mesure de la déformation locale dans un échantillon d'argilite à partir d'une image micro-DIC (d'après LMS)

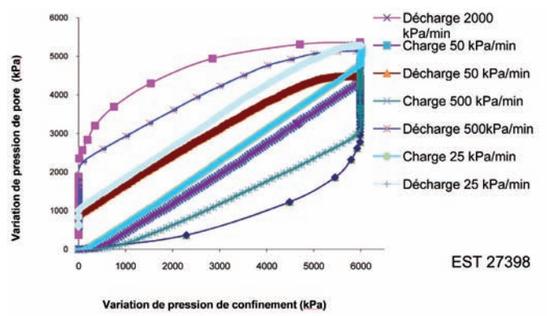


Figure 3 : réponses en pression de pore lors du premier essai en compression non drainée

La compréhension de la fracturation des argilites et la caractérisation des propriétés THM dans l'EDZ

• L'initiation et la propagation de la fracturation

Une première série de travaux vise à caractériser, dans des situations aussi simples que possibles, l'émergence de la déformation localisée et la propagation des microfissures en résultant. Un dispositif de chargement bi-axial a été développé pour mieux cerner ce phénomène dans l'argilite avec une analyse des champs de déformation pour détecter et caractériser l'initiation de l'endommagement (figure 4).
Parallèlement, la modélisation numérique cherche à simuler l'apparition et la géométrie réelle des fractures dans les ouvrages du stockage en

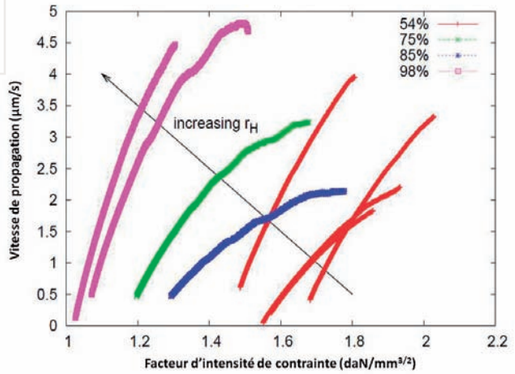


Figure 4 : exemple de résultats d'essais de propagation de fissures par relaxation de contrainte lors d'essais de double torsion

cours d'excavation. Les principaux problèmes à résoudre sont notamment la transition d'un milieu continu à un milieu fracturé, ainsi que les questions d'objectivité (non dépendance du résultat vis-à-vis du maillage). Deux approches sont mises en œuvre afin de les confronter aux observations faites dans le laboratoire souterrain :

- modélisation 2D et 3D de la naissance des bandes de déformation localisées en mode continu, par régularisation du problème post-localisation des déformations au moyen d'une méthode non locale intégrale ;
- modélisation de l'amorçage et de la propagation des fractures EDZ en mode discontinu, par différentes méthodes (éléments finis étendus, méthode des discontinuités de déplacements, etc.).

• Les propriétés hydromécaniques des fractures

De nombreuses mesures ont été réalisées depuis 2004 dans tous les ouvrages du Laboratoire souterrain pour évaluer les propriétés hydromécaniques des fractures (figure 5). Elles aboutissent aux constatations suivantes :

- l'EDZ dans le contexte du site de Meuse/Haute-Marne se limite à la zone de fracturation ouverte autour des ouvrages, soit environ 1,5m pour les galeries parallèles à la contrainte mineure et au plus 1 m pour les galeries parallèles à la contrainte majeure (elle n'a pas été mise en évidence autour du puits d'accès).
- au-delà la perméabilité de l'argilite est légèrement augmentée sur 3 m.

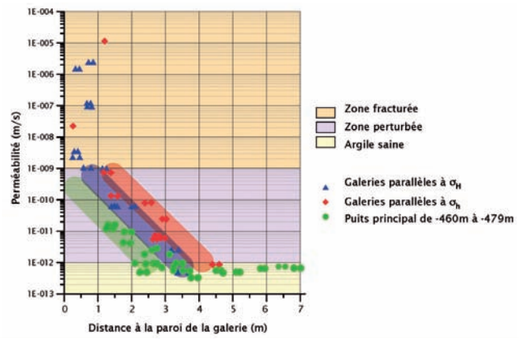


Figure 5 : compilation de mesures de perméabilité autour des ouvrages du Laboratoire souterrain.
Les essais ont été réalisés au gaz sur le premier mètre du fait de la désaturation de l'argilite

L'ouverture de nouvelles voies à l'étude du comportement différé des argilites

La définition des cinétiques de déformation au cours du temps nécessite de connaître les mécanismes à l'origine du comportement différé des argilites et de déterminer s'il existe un seuil de fluage.

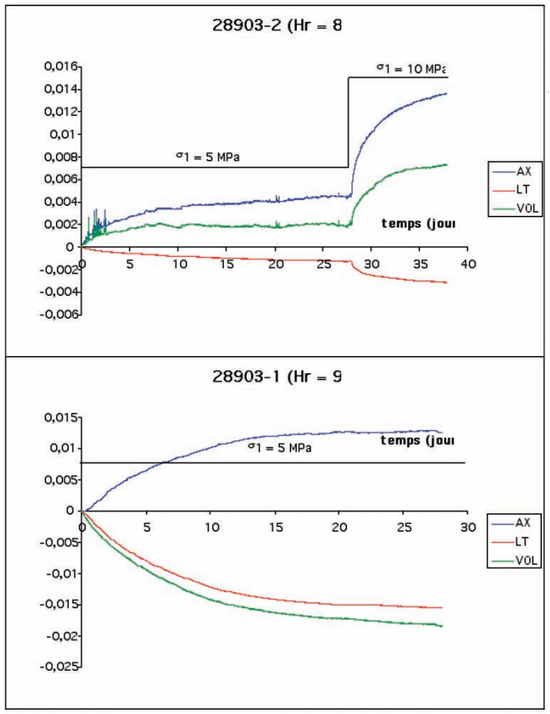


Figure 6 : évolution en fonction du temps des déformations obtenues en cours d'essais de fluage uni-axial à hygrométrie contrôlée

De nouveaux essais de fluage ont été lancés, essais de compression triaxiale non drainée à différentes vitesses de chargement et essais sous sollicitation hydrique cyclique, en faisant varier avec l'état de contraintes et l'humidité relative. Des mesures de vitesses ultrasoniques et des mesures optiques des champs de déformations locales sont également réalisées afin de se prononcer sur le bien-fondé de l'hypothèse du déclenchement de l'endommagement différé et de la rupture par une déformation critique.

L'approche micromécanique est également utilisée pour les modèles de comportement différé. Elle se fonde sur la combinaison de plusieurs mécanismes, viscosité de la matrice argileuse due au glissement des feuillets et au décollement du contact avec les inclusions rigides, propagation subcritique de microfissures dans les inclusions rigides. La viscosité de la phase argileuse aboutit à une déformation asymptotique finie en considérant que les déformations sont localisées dans les amas de feuillets argileux présentant une adhérence parfaite entre eux. L'analyse sera poursuivie en prenant en compte l'influence des grains, de la chimie de l'eau et d'une adhérence imparfaite.

Les premiers essais de (i) flexion trois points et de double torsion à différentes hygrométrie et de (ii) détection de la propagation de fissures par mesures optiques pour l'étude de la propagation subcritique sont en cours d'analyse.

Le comportement global est obtenu par deux approches différentes et complémentaires :

- la méthode d'homogénéisation non linéaire analytique propose un modèle en accord avec deux mécanismes de déformation différée étudiés. La formulation du modèle est finalisée ainsi qu'un premier calage des paramètres. De bonnes concordances sont observées entre les prédictions du modèle et les données expérimentales : les influences des compositions minéralogiques sont bien reproduites et les principaux aspects du comportement différé de l'argilite sont bien décrits. Pour les sollicitations considérées, seul le fluage primaire est observé avec une atténuation progressive de son taux. Celui-ci dépend du niveau du déviateur de contrainte appliqué, une augmentation du déviateur entraînerait un changement du taux de fluage ;

- l'approche asymptotique prend en compte la dépendance temporelle induite par la propagation sous-critique des microfissures. L'homogénéisation permet le passage du comportement à l'échelle des fissures distribuées de façon doublement périodique au comportement macroscopique.
  Une loi de propagation a été introduite dans la loi de conservation d'énergie afin d'avoir l'évolution de l'endommagement en fonction du temps et du champ de déformation, et de déterminer la trajectoire suivie par la fissure lorsqu'elle se propage.
  La suite du travail consistera à implanter ce modèle dans un code éléments finis en 2D puis 3D.

Certains modèles nécessitent encore des développements ou une implémentation dans un code de calcul aux éléments finis. Il sera alors nécessaire de les calibrer à partir des essais expérimentaux et de confronter les modélisations aux mesures de déformation réalisées dans les galeries du Laboratoire souterrain, afin de pouvoir modéliser des situations réalistes de stockage.

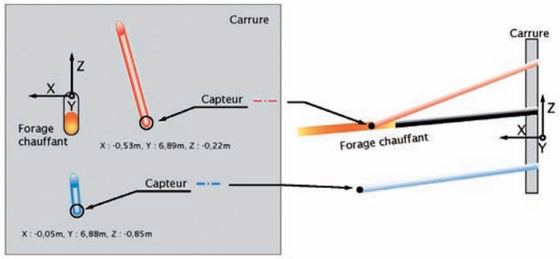
L'effet de la température sur le comportement des argilites

Plusieurs essais destinés à compléter les données existantes sont en cours. Ils s'intéressent 1) à la caractérisation de l'influence de la température sur les propriétés (hydro) mécaniques résiduelles après un cycle thermique, 2) au comportement thermohydromécanique non linéaire couplé des argilites en conditions drainées et quasi non drainées, 3) aux déformations différées, 4) à la propagation subcritique de microfissures sous température.Le coefficient de pressurisation thermique (augmentation de la pression interstitielle lors d'une élévation de température) a pu être mesuré au cours de l'expérimentation thermique (TER) réalisée de 2005 à 2009 dans le Laboratoire souterrain. Il montre un comportement fortement non linéaire avec la température, confirmé par des mesures très précises sur des échantillons effectuées en 2009 au CERMES (figure 7). Cela est sans doute du à un endommagement de l'argilite à partir de 45-50°C.

Deux séries de tests en micro-indentation et mini-compression ont été effectuées à ce jour à 20°C et 40°C pour différentes humidités relatives. Le module élastique et la résistance mécanique diminuent de façon régulière avec la saturation, alors qu'aucun effet de la température n'est visible.

Les essais de chargement thermique, suivant un chemin œdométrique sous contrainte constante, sur des échantillons d'argilite saturés avec du pétrole ou de l'eau de site, fournissent des résultats selon les degrés de surconsolidation. Sous une contrainte axiale de 60 Mpa, c'est-à-dire en consolidation normale, les cycles thermiques produisent des tassements, alors que sous 6 Mpa, en forte surconsolidation, ils induisent des dilatances (figure 8).

En fin de cycle et à volume poral constant, la macroporosité a augmenté alors que la mésoporosité a diminué, ce qui peut traduire une déstructuration de l'argilite liée à un endommagement diffus. Avec les chargements thermiques sous forte surconsolidation, les déformations volumiques de dilatance sont plus grandes pour les échantillons saturés à l'eau que pour ceux saturés au pétrole.



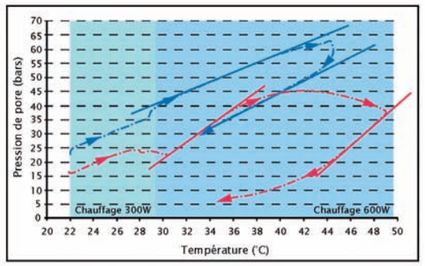


Figure 7 : configuration de l'expérimentation thermique TER et évolution de la pression de pore en deux points en fonction de la température

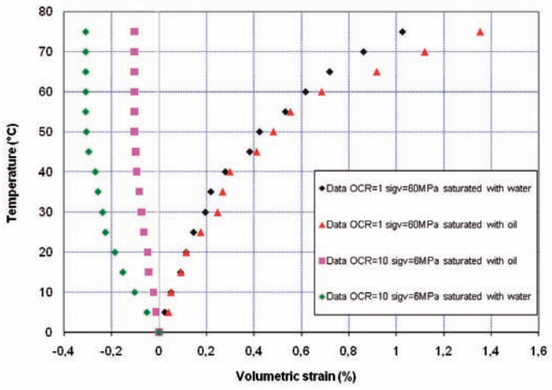


Figure 8 : déformations volumiques résultant de chargements thermiques sur échantillons d'argilite massive

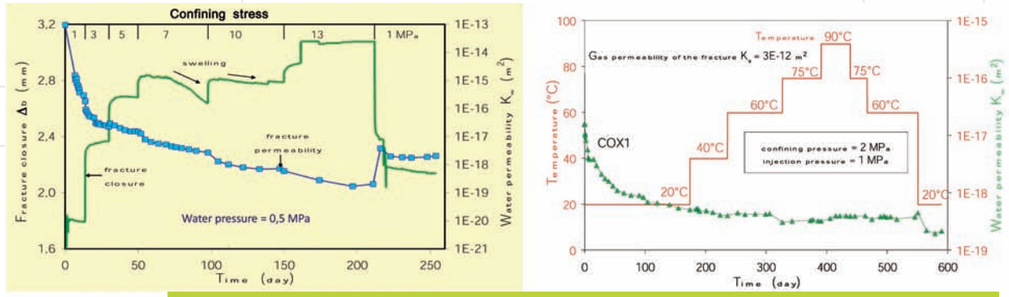


Figure 9 : diminution de la conductivité hydraulique d'une fracture, à gauche avec la resaturation et l'augmentation de contrainte, à droite malgré l'augmentation de la température (d'après GRS)

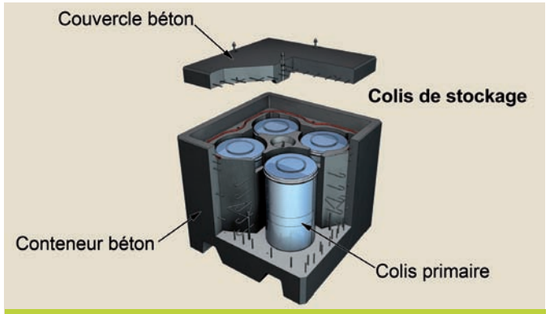


Figure 10 : exemple de surconteneur béton prévu pour le stockage contenant quatre colis primaires de déchets MA-VL

L'auto-colmatage des fractures : une réalité

Dans le tome « Évolution phénoménologique du stockage géologique » du Dossier 2005 Argile, il était indiqué que l'endommagement mécanique créé initialement autour des ouvrages du stockage se cicatrise progressivement (de quelques centaines à quelques milliers ou dizaines de milliers d'années suivant les ouvrages), permettant un retour vers des propriétés d'écoulement et de transfert des solutés dans les argilites en champ proche du stockage voisines de celles à l'état initial avant la réalisation du stockage.

Un effort particulier a été fait, dans le cadre du partenariat de recherche avec l'organisme allemand GRS (figure 9), pour confirmer cette assertion par des données expérimentales prenant en compte l'évolution du stockage (resaturation, effets thermiques, modification de l'état de contrainte). Les résultats montrent que, quelle que soit la situation reproduite, la conductivité hydraulique des fractures tend à diminuer avec le temps. Cet autocolmatage des argiles est principalement dû au gonflement des argilites.

Un travail de thèse a été mené conjointement par l'École Nationale des Ponts et Chaussées et l'École Centrale de Lille pour comprendre les processus impliqués et modéliser la resaturation, la diminution concomitante de la perméabilité à l'eau et l'impact sur la pression d'entrée de gaz dans la fracture.

Les perspectives

Dans cette première phase du programme de recherche, des méthodes expérimentales novatrices ont été mises en œuvre (micro-indentation, microcompression, essais triaxiaux sur cylindre creux, essais uniaxiaux, biaxiaux et triaxiaux avec mesure de champ, suivi observationnel par microtomographie aux rayons X). Ces dispositifs et protocoles expérimentaux ont été validés.

Les essais déjà disponibles, tant à l'échelle des échantillons que du Laboratoire souterrain, et les développements théoriques représentent un avancement significatif en vue de la compréhension des mécanismes et des phénomènes aux différentes échelles. Ils devraient permettre d'ici 2012 de préciser l'analyse phénoménologique des situations de stockage, notamment en phase d'exploitation, et d'améliorer les modèles numériques pour les analyses de performance.

Le comportement des matériaux cimentaires en stockage et en entreposage

Le concept de stockage HA-MAVL prévoit l'utilisation de béton pour les galeries tout autant que pour les colis (figure 10) et les alvéoles de stockage de déchets MA-VL **[voir encadré p.30]**. Si l'évolution chimique à long terme des colis et alvéoles était en grande partie comprise et évaluée dès 2005, il apparaissait nécessaire d'améliorer la caractérisation physique des matériaux cimentaires, tout particulièrement pendant les phases transitoires. En effet, à une échelle séculaire, l'ensemble des composants du stockage subira des variations thermiques, hydriques et mécaniques en relation avec son exploitation ainsi qu'avec les propriétés des déchets et l'évolution du milieu géologique autour des ouvrages.

L'objectif général du programme de R&D mis en place à partir de 2006 est donc de fournir les éléments nécessaires à la représentation des composants en béton, armé ou non, des ouvrages de stockage de déchets MA-VL, lors des phases d'exploitation, de fermeture et de réversibilité.

Afin de répondre au mieux à ces questions, les études sont réalisées dans le cadre d'un groupement de laboratoires « Évolution des structures cimentaires » (GL ESC) dont les compétences permettent de prendre en charge l'ensemble des thématiques à traiter. Ces équipes sont issues du monde universitaire, d'acteurs du nucléaire ou d'organismes de R&D[3]. Par ailleurs, outre son rôle de pilote des actions, l'Andra est aussi « acteur » au travers de la conduite d'expérimentations dans le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne.

Trois axes de recherche sont ainsi dégagés :

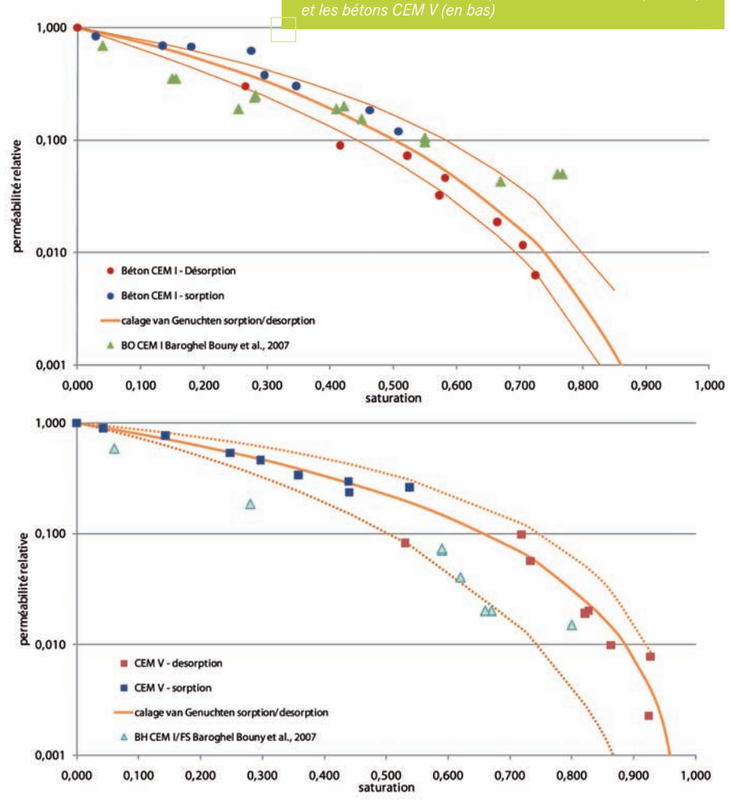
1. le **comportement THM des matériaux cimentaires**, au cours des premières phases de vie du stockage, pour obtenir les éléments de quantification et de description de l'état initial des composants en béton, en particulier vis-à-vis des processus de retrait et de fluage ;

2. la **corrosion des aciers** en milieu cimentaire concerne les composants du stockage et les déchets ; elle doit être étudiée dans les conditions propres au stockage, différentes des conditions en génie civil pour lesquelles il existe un important retour d'expérience ; la quantification des conséquences mécaniques de la corrosion à l'échelle des objets (colis ou alvéole) est l'objectif visé par ce travail ;

3. les **interfaces béton/argile** dont les réactions, avaient été traitées, avant 2006, sous l'angle de la perturbation chimique causée par les bétons dans les argiles gonflantes et uniquement à température ambiante ; pour dimensionner les bouchons d'alvéole, le programme intègre à la fois les argiles gonflantes, l'argilite et le béton, il prend en compte des formulations de béton « bas pH » et leurs paramètres de mise en œuvre.

[3] École Centrale de Lille, INSA de Toulouse, CEA, EDF et BRGM

Figure 11 : évolution de la perméabilité relative au gaz en fonction de la saturation pour les bétons CEM I (en haut) et les bétons CEM V (en bas)



Les perspectives

- **L'état hydrique des bétons et conséquences sur les transferts**

Les colis et les alvéoles MA-VL seront soumis à une désaturation au cours de la période d'exploitation. Leur resaturation sera influencée par la nature des matériaux et leur état physique. De plus, l'état hydrique des bétons conditionne l'évolution de processus comme le fluage et l'évolution des propriétés de transfert (perméabilité, diffusion). Il importait donc d'acquérir ces isothermes de sorption/désorption d'eau sur les matériaux de référence CEM I et CEM V.

À température ambiante, il est très difficile de désaturer ces deux bétons de référence, même à des humidités relatives (HR) assez basses (saturation > 90 % pour des HR de 65 à 75 %) (Chen *et al.*, 2009). Une forte hystérésis a été mesurée entre saturation et désaturation. Les ouvrages massifs n'arriveraient donc jamais à un séchage significatif en phase ventilée, alors que la resaturation serait rapide dès lors que l'HR augmente. L'hystérésis est d'autant plus forte que le niveau de désaturation est important et la température modifie de manière importante ces hystérésis (Poyet, 2009 ; Poyet & Charles, 2009).

Les isothermes à température de 50 et 80°C sont actuellement en fin d'acquisition.

Une caractérisation physique (perméabilité au gaz, déformations) des échantillons a été réalisée en relation avec l'acquisition des isothermes de sorption/désorption. Les courbes d'évolution de perméabilité et de pression capillaire avec la saturation constituent des données d'entrée pour la description de tous les processus impliquant des transferts hydriques. Sur les matériaux sains, la perméabilité présente une très forte hystérésis entre les mesures en imbibition et en drainage. Que ce soit pour les CEM I ou les CEM V, la perméabilité au gaz chute de façon importante pour les saturations supérieures à 80 % ; dans ces conditions, la diminution est de deux à trois ordres de grandeurs entre 85 et 95 % de saturation. Les mesures deviennent ensuite très difficiles à réaliser au point d'arriver aux limites des techniques employées (figure 11).

- **L'état de fissuration des bétons et conséquences sur les transferts**

Si à l'échelle métrique des colis, avec préfabrication maitrisée, la fissuration peut être limitée et rester diffuse, à l'échelle d'ouvrages massifs, coulés en place sur de grandes longueurs, il sera impossible de l'éviter (Perlot *et al.*, 2006 ; Planel *et al.*, 2006). Pour en évaluer les conséquences, les variations de perméabilité ont été mesurées sur des échantillons fissurés, en fonction du confinement mécanique. La fissuration, qui occasionne localement une augmentation de la perméabilité, ne peut être refermée mécaniquement. Sous confinement ≥ 20 MPa, après un ou plusieurs cycles de chargement, la perméabilité au gaz varie peu et reste proche de 10^{-15}m², valeur très supérieure à la perméabilité matricielle de l'ordre 10^{-17} à 10^{-18}m². Après confinement mécanique et fermeture, il subsiste 10 à 20 % de la perméabilité initiale qu'il n'est pas possible de restaurer et ce même à des niveaux de confinement approchant les résistances mécaniques des matériaux (part de transformation irréversible). Ainsi, même fissurés très tôt après leur mise en place, les bétons ne pourront pas retrouver, sous l'effet du confinement dû au milieu géologique, un niveau de performance équivalent à celui des matériaux lors de leur mise en place. En revanche, la circulation d'une eau carbonatée (resaturation par les eaux du Callovo-Oxfordien) dans un réseau de fissures amorce une fermeture liée à une reprécipitation et une carbonatation (à très court terme pour des fissures inférieures à 100µm d'ouverture).

- **Le fluage et le retrait**

Les caractéristiques mécaniques et les propriétés de transfert des matériaux cimentaires peuvent être modifiées par leurs déformations instantanées ou différées (Camps *et al.*, 2008). Fluages et phénomènes de retrait sont étudiés sur des éprouvettes préparées avec les deux types de béton, CEM I et CEM V. En compression uni-axiale, à 30 % de la charge à la rupture, les bétons à base de CEM V ont un coefficient de fluage inférieur à celui du CEM I. La différence entre les deux matériaux diminue légèrement avec la température (entre 25 et 50°C, l'augmentation du coefficient de fluage du CEM V est supérieure à celle du CEM I).

La décalcification a une influence significative sur le fluage à long terme des matériaux. Si des différences de comportement sur les matériaux sains sont mises en évidence en fonction du type de ciment utilisé, les essais sur bétons chimiquement dégradés-décalcifiés/neutralisés tendent vers des déformations similaires.

Comme dans le cas du fluage, l'évolution du retrait est d'autant plus importante que la température est élevée : sur une plage de 25 à 50°C, il semble que les processus soient similaires et conduisent à des évolutions comparables. En revanche, les retraits mesurés à 80°C ont une amplitude et une cinétique beaucoup plus importantes. Les transferts hydriques et leurs conséquences ne sont plus simplement liés à une vidange de la porosité. Un seuil de comportement est franchi entre 50°C et 80°C, dont le détail des processus n'est pas encore complètement éclairci.

Afin de valider les résultats obtenus sur éprouvettes et de les évaluer sur une structure, un essai mécanique a été défini sur un tronçon d'alvéole MA-VL à une échelle de 1/100e. Le chargement est effectué en configuration bi-axiale, tout en conservant une contrainte de déformation plane dans l'axe de la maquette (chargement sur les axes x, y et ajustement des contraintes sur l'axe z pour rester en déformation nulle dans l'axe de la maquette). Les déformations menant à la fissuration à l'intrados de l'alvéole sont bien mesurées, les angles à l'intrados sont les points « singuliers » de faiblesse où le matériau est mis en traction, le reste de la structure restant majoritairement en compression. La première fissuration est apparue à un chargement de 10 MPa et la suivante à 15 MPa dans deux des angles à l'intrados. La rupture de la structure n'intervient qu'à partir de plus de 30 MPa de chargement.

La corrosion des matériaux métalliques

Compte tenu des conditions imposées à une échelle pluriséculaire aux alvéoles de déchets MA-VL réalisées en béton armé (aérées sur la période d'exploitation et anoxiques ensuite), les aciers des armatures se trouveront, sauf cas particuliers, en conditions passives, se traduisant par une cinétique de corrosion très faible (Chitty *et al.*, 2008). Il importe néanmoins d'en quantifier les conséquences mécaniques sur l'état physique des matériaux cimentaires, à ces échelles de temps. Pour cela, les cinétiques de corrosion ainsi que la nature et les propriétés des produits de corrosion doivent être déterminées.

- **La cinétique de corrosion**

La qualité de la surface des aciers est l'un des paramètres qui pilote l'amorce de la corrosion. Une série d'expérimentations avec des échantillons dont les surfaces sont, soit celle d'un fer à béton brut, soit celle d'un acier poli ou précorrodé a été définie à des températures comprises entre 25 et 50°C et des HR variables de 80 à 95 %, pour des durées allant jusqu'à 18 mois. Les premières analyses mettent en évidence des couches de mélanges d'oxydes de fer (II) et (III) sur des épaisseurs qui peuvent atteindre quelques dizaines de microns en milieu aéré. En milieu désaéré, le film d'oxydes en surface de l'acier ne dépasse pas 2 à 3µm en milieu alcalin (pH ~12,5), mais reste un mélange de fer à valences +II et +III. Les différences de cinétiques entre les milieux aérés et désaérés sont mises en évidence dès les premières échéances expérimentales.

Par ailleurs, en milieu saturé avec une solution représentative d'une eau de site, les pertes de masses mesurées sont toujours plus importantes, si l'acier présente une corrosion initiale significative. Cette distinction disparaît si les aciers sont « bruts » (fers à bétons non corrodés).

Les essais mis en place pour caractériser l'impact des défauts d'interface sur le développement de la corrosion mettent en avant le caractère aggravant de ces zones où l'adhérence acier/béton fait défaut.

Après quelques mois d'expérience sur les échantillons de fers à béton, les compositions des couches de produits de corrosion diffèrent suivant les cas : 1) liseré de magnétite dans le cas d'une adhérence acier/ béton ou 2) couche multiple composée de magnétite/wüstite/ ferrihydrite/ goethite/hématite, dans le cas d'une zone de défaut. Il est donc possible d'anticiper des conséquences mécaniques variant en fonction du caractère plus ou moins expansif des produits de ces oxydes.

- **Les propriétés mécaniques des produits de corrosion**

Les propriétés mécaniques des produits de corrosion ne sont actuellement connues que par celles des oxydes de fer considérés séparément. Avec ces valeurs, dont certaines sont plus élevées que celles mesurées pour l'acier, les dommages mécaniques sont significativement plus importants que ce qui est observé. À l'opposé, ne confier aucune propriété mécanique aux couches de produits de corrosion, ne permet pas de rendre compte de la fissuration engendrée à long terme par la corrosion des armatures dans un béton armé. C'est la raison pour laquelle, des travaux ont été engagés sur la « reconstitution mécanique » d'une couche de produits à partir de sa composition. Un premier modèle d'homogénéisation est proposé et doit être validé sur la base du programme d'acquisition en cours.

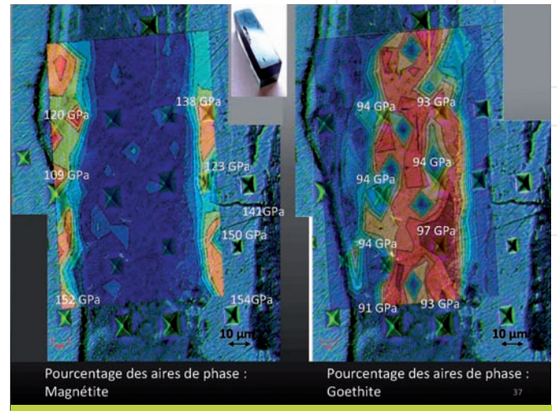


Figure 12 : superposition d'analyses par micro-indentation et analyses Raman d'une couche de produits de corrosion. Modules d'Young en GPA vs domaines de concentration en magnétite (à gauche) ou en goethite (à droite) ; la proportion est d'autant plus élevée que la teinte est rouge

Les résultats acquis en micro-indentation sur des couches âgées de plusieurs dizaines à plusieurs centaines d'années (prélevées sur des monuments anciens de quelques dizaines à quelques centaines d'années), présentent une hétérogénéité à l'image des couches de produits de corrosion, avec un module d'Young variant entre 45 et 220GPa. Les valeurs les plus basses correspondent à des zones majoritairement composées de ferrihydrite, les plus élevées à des zones essentiellement constituées de magnétite. Il convient donc de rapporter ces valeurs aux produits observés dans les expérimentations en cours. Des analyses mécaniques couplées à des analyses chimiques ont été menées au sein d'un assemblage hétérogène de produits de corrosion pour déterminer quels sont les oxydes dans les couches denses et rigides et quelle est la composition des zones moins rigides (figure 12). Ceci a permis de discriminer les zones mécaniquement rigides de celles qui le sont moins et d'associer à chacune d'entre elles des compositions en oxydes majoritaires.

La réactivité aux interfaces ciments - argiles

Deux grands types d'études se sont intéressés à la réactivité aux interfaces bétons/argiles : l'optimisation de formulation de bétons bas pH et la réactivité aux interfaces ciments/argiles en température.

- **Les bétons bas pH**

L'objectif est d'obtenir des formulations « bas pH » de référence pour minimiser la perturbation chimique dans les matériaux argileux placés au contact des matériaux cimentaires. Deux formulations satisfaisant aux exigences ont été mises au point dans le cadre du programme précédent, mais elles restaient à améliorer du point de vue de certains paramètres, comme le retrait (Codina *et al.*, 2008). Des études de sensibilité aux différents paramètres de formulation, il apparaît que la diminution de 15 % à 30 % de la quantité de liant (suivant qu'il s'agit de cendres volantes ou de laitier de haut fourneau) permet de minimiser le retrait, tout en conservant les propriétés physiques exigées.

L'attrition ou le cobroyage de la fumée de silice avec les autres composants lors de la préparation du béton s'avèrent être des solutions intéressantes pour la dispersion de la silice. L'optimisation de sa dispersion au cours de la préparation permet de garantir une réactivité maximale lors de l'hydratation du liant (et donc une poursuite de l'abaissement du pH). En complément à ce travail, une étude chimique des matériaux est conduite pour localiser les cations alcalins dans les ciments hydratés afin d'optimiser les pistes d'abaissement de leur pH et de fournir un modèle de comportement chimique.

- **Les interfaces béton/argilite**

Les études menées sur la réactivité aux interfaces ciments/argiles ont pour but de quantifier les modifications physiques et chimiques aux interfaces entre les composants cimentaires des ouvrages et le milieu

géologique argileux, en température et sur le long terme, à la fois expérimentalement et par modélisation (Gaucher & Blanc, 2006 ; Trotignon *et al.*, 2006 ; Trotignon *et al.*, 2007). Pour déterminer la réactivité du matériau cimentaire à différentes températures et caractériser la création d'une zone d'interface, deux types d'expérimentations ont été conçues : un dispositif de carbonatation sous eau à pCO_2 représentative du milieu géologique à 25 et 50°C et un dispositif dans lequel sont recréées les interfaces béton/argilite. Deux types d'interfaces ont donc été étudiés : béton/eau de site et béton/argilite.

Les essais menés avec de l'argilite du Callovo-Oxfordien directement au contact du béton ont nécessité la mise au point d'un dispositif expérimental particulier qui maintient les échantillons sous confinement mécanique pour éviter leur délitement en présence d'eau. Ces essais menés à 25°C et 50°C sur une durée de quelques mois conduisent à des évolutions minéralogiques proches en termes de nature de phases, mais présentent des profils très différents. La carbonatation à l'interface et dans le matériau cimentaire est beaucoup plus intense à 50°C qu'à 25°C. Si l'on compare ces essais avec ceux où seule l'eau de site est présente, l'extension est moindre dans le cas de la présence d'argilite. Les extensions des modifications (carbonatation et décalcification) sont limitées par les transferts dans l'argilite (apport des réactifs et évacuation des produits).

La réactivité chimique dans les conditions imposées par le Callovo-Oxfordien provoque une carbonatation très intense des matériaux, phénomène qui ne se propage pas en profondeur. La comparaison entre les essais à 25°C et ceux menés à 50°C indique une accentuation de la dégradation chimique des bétons CEM I (décalcification), sans relever de modification importante de la carbonatation (profils et cinétiques). On observe dans les deux cas, la formation d'une zone très peu étendue dans laquelle le carbonate de calcium est la seule espèce formée, sans toutefois atteindre un colmatage de cette interface.

Dans tous les cas, la profondeur d'altération dans le matériau cimentaire est plus conséquente que dans le matériau argileux. La dégradation est de l'ordre de quelques microns côté argileux contre quelques dizaines de microns côté cimentaire et ce d'autant plus que la température est importante. La précipitation de minéraux argileux, non détectée antérieurement, à l'interface et jusque dans le matériau cimentaire impose une modification du modèle géochimique employé jusqu'à présent. Par ailleurs, des analyses menées par RMN ont montré la diminution du rapport CaO/SiO_2 dans la structure des C-S-H en zone dégradée. A court terme, aucune zéolite n'a été caractérisée ni à l'interface des deux matériaux, ni dans les argiles.

En complément des tests en laboratoire, la reconstitution des interfaces est réalisée au Laboratoire souterrain sous forme d'essais « dormants » mis en place en 2009 pour une durée minimale de cinq ans. L'objectif est de laisser se développer les réactions entre ciments (CEM I, CEM V, bas pH) et bentonite dans l'argilite. Ils seront complétés par des essais « dynamiques » de perturbation alcaline ou argileuse où il s'agira de forcer la circulation de fluides au travers des matériaux en interface.

La modélisation de ces expérimentations est destinée à caler un modèle d'évolution à différentes températures. La définition des systèmes chimiques, sur la base de caractérisations à l'état initial, a été simplifiée afin de ne conserver que les hydrates principaux. La base de données de l'Andra a été employée pour définir ce que serait un cortège minéralogique envisageable après réaction.

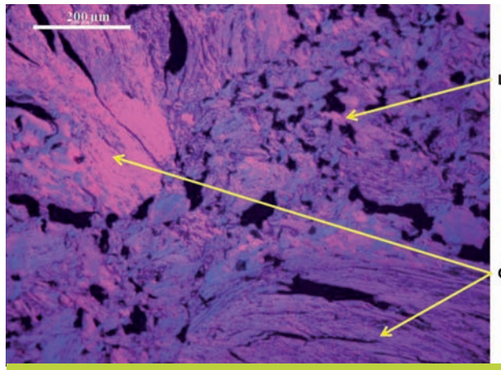


Figure 13 : observation au microscope optique polarisant du graphite vierge de Saint-Laurent A2.
Le liant présente une porosité plus forte que les grains. (image ENS/CNRS)

Les colis de déchets FA-VL et leurs propriétés

Les études sur les déchets graphite visent principalement à préciser les termes sources en chlore 36 et en carbone 14 de ces déchets, mais également à conforter la robustesse de l'inventaire, notamment en explicitant le comportement des radionucléides en réacteur et lors du démantèlement sous eau.

Le pilotage des études s'effectue au sein d'une structure appelée « CT Graphite » qui regroupe l'Andra, EDF R&D et le CEA et associant différents laboratoires académiques. Les thématiques traitées sont le comportement à long terme des déchets et des colis et le comportement à long terme des résines échangeuses d'ions. Ces études sont également mutualisées dans le projet européen Carbowaste (2008-2012), au sein de deux « work packages » qui traitent de la caractérisation du graphite et de son comportement en stockage.

Le comportement à long terme des déchets graphite

Les études sur le comportement à long terme des déchets graphite se focalisent sur deux radionucléides : le chlore 36, qui serait le principal contributeur à la dose car il s'agit d'un radionucléide à vie longue qui n'est pas retenu dans les argiles, et le carbone 14, dont la spéciation conditionne les propriétés de transfert. Pour comprendre les mécanismes de relâchement de ces radionucléides, des études sur l'évolution de la microstructure du graphite en réacteur et sur la reprise d'eau par le graphite ont également été réalisées. Afin de pouvoir comparer l'ensemble des résultats obtenus, tous les travaux ont été réalisé sur des échantillons vierges et irradiés de graphite provenant des réacteurs G2 (réacteur CEA à Marcoule) et Saint-Laurent A2 (SLA2).

L'évolution de la microstructure du graphite

Les études sur la microstructure ont pour objectif de comprendre les modifications qui affectent le graphite en réacteur, en particulier les conséquences sur la formation de défauts et sur des grandeurs macroscopiques (porosité), et d'en évaluer les conséquences sur le piégeage et le relâchement ultérieur des radionucléides.

Les premiers résultats montrent que les graphites vierges de G2 et de SLA2 (figure 13) ont une allure similaire en microscopie optique avec une porosité essentiellement localisée dans le liant, mais les spectres Raman et la diffraction des rayons X indiquent que G2 est mieux cristallisé et donc plus proche d'un graphite modèle.

En réacteur, le graphite est soumis à deux effets opposés, d'une part la fluence dont l'augmentation tend à désorganiser le matériau, et d'autre part la température dont l'augmentation tend à cicatriser le matériau (figure 14).

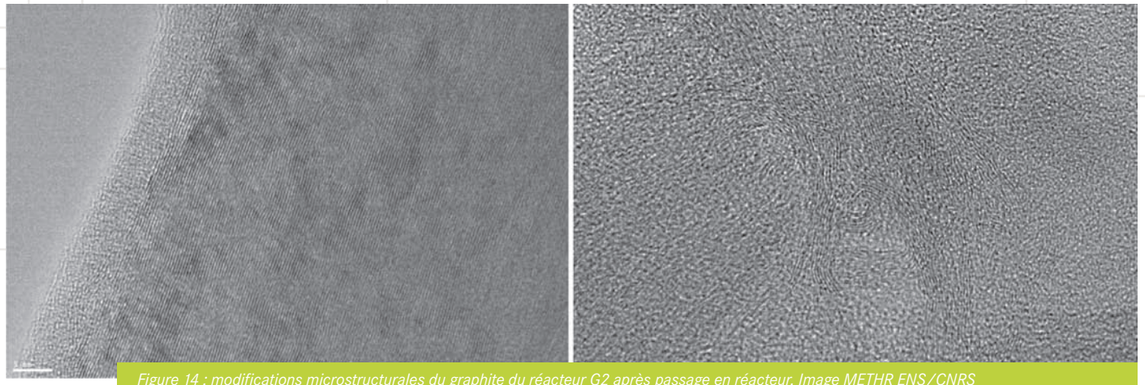


Figure 14 : modifications microstructurales du graphite du réacteur G2 après passage en réacteur. Image METHR ENS/CNRS
La plupart des zones restent bien organisées (à gauche) même si quelques rares zones sont désorganisées (à droite)

La reprise d'eau par le graphite

Les essais d'imprégnation en eau sur du graphite irradié semblent montrer que la reprise d'eau n'est pas un facteur limitant pour le relâchement des radionucléides, ce qui ne serait pas nécessairement le cas pour le graphite vierge dont la reprise d'eau est beaucoup plus lente.

Le comportement du chlore 36

Le chlore 36 est issu de l'activation neutronique de l'isotope 35 stable du chlore en réacteur. Les études par analyse SIMS de graphite vierge et irradié de SLA2 ont mis en évidence une répartition très hétérogène du chlore au sein du graphite ce qui explique des inventaires très hétérogènes sur les différents échantillons.
Des premiers essais avaient montré des taux de relâchement en chlore 36 très variables, de l'ordre de 10 à 80 %. L'hypothèse avancée alors était que cette variabilité était fonction de l'altitude de l'échantillon au sein du réacteur, en lien avec la température. Des essais complémentaires ont confirmé l'effet de la température avec des taux de relâchement du chlore 36 plus importants dans les zones froides du réacteur.

Il faut noter que pour tous les échantillons, la lixiviation conduit à un relâchement très rapide d'une fraction plus ou moins importante du chlore 36 (entre 10 et 80 % comme indiqué ci-dessus), mais que le reste du chlore 36 est lixivié avec une cinétique beaucoup plus faible. Ces deux cinétiques de lixiviation peuvent s'expliquer par plusieurs hypothèses dont celle liée à l'existence de plusieurs formes chimiques du chlore 36 au sein du graphite. Cette hypothèse a été confirmée par des études de l'Institut de Physique Nucléaire de Lyon au moyen d'analyses XPS sur du graphite vierge de SLA2 pour lesquelles on observe 70 % de chlore sous forme organique (liaison chlore – carbone), et 30 % de chlore sous forme inorganique (liaison chlore – oxygène). Ces études montrent également qu'il existe un relâchement préférentiel du chlore sous forme inorganique en température. Les études XANES ont confirmé la présence de chlore 35 sous forme organique.

Le comportement du carbone 14

Les études sur la spéciation du carbone 14 relâché par le graphite visent d'une part à déterminer la fraction gazeuse du carbone 14 et d'autre part à évaluer si une partie du carbone 14 est sous forme organique (avec dans ce dernier cas, un risque de transformation en $^{14}CH_4$ par les microorganismes). Les premiers résultats montrent un relâchement sous forme gazeuse du carbone 14 qui, tout en restant relativement faible, est jusqu'à cinq fois plus important que le relâchement en solution (la fraction relâchée en phase aqueuse à 280 jours est au plus égale à 0,2% de l'activité totale).

Le comportement à long terme et le conditionnement des REI

Les résines échangeuses d'ions (REI) seront notamment utilisées pour filtrer l'eau lors du démantèlement sous eau des réacteurs UNGG. En conditions de stockage, sous l'effet de l'hydrolyse et de la radiolyse, les résines cationiques sont susceptibles de relâcher des ions sulfates alors que les résines anioniques peuvent libérer des ions ammonium. Dans les deux cas, cela peut conduite à une altération du colis de béton. Enfin, la dégradation du squelette pourrait conduite à la formation d'espèces complexantes.

Les études réalisées montrent que ces résines intégreront une dose maximale de 2 MGy à 100 000 ans (figure 15). D'après les données existantes sur la radiolyse des REI (figure 15), il n'existe pas de risque de relâchement d'espèces complexantes.

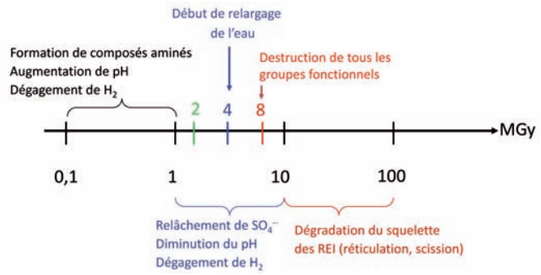


Figure 15 : comportement sous irradiation des REI utilisées dans le démantèlement des réacteurs UNGG

Néanmoins, les études sur la formulation des matériaux cimentaires de remplissage utilisé dans le colis devront prendre en compte la possibilité de relâchement des groupes fonctionnels (ions sulfates et d'ammonium quaternaires).

Les colis de déchets HA-MAVL et leurs propriétés

Les études sur les déchets HA-MAVL portent sur trois grandes catégories de déchets :

1. les **combustibles usés** utilisés dans des réacteurs de recherche ou pour la propulsion nucléaire (les combustibles usés provenant des REP ne sont pas considérés dans le scénario de référence du stockage) ;
2. les **déchets vitrifiés** (ou HA), hautement radioactifs, correspondant aux résidus issus du retraitement des combustibles usés des réacteurs nucléaires ;
3. les **déchets MA-VL** provenant majoritairement de l'industrie électronucléaire (déchets bitumés, déchets de structures compactés ou cimentés, déchets technologiques...).

Les combustibles usés

Un groupe de travail regroupant l'Andra, le CEA R&D, le CEA producteur et le STXN s'est réuni à plusieurs reprises en 2008-2009 pour faire le point sur les connaissances relatives aux combustibles usés et d'identifier les points sur lesquels doivent porter les efforts de recherche d'ici 2012.

Une analyse des données relatives aux combustibles usés oxydes issus de la recherche et de la propulsion nucléaire (taux de combustion, fraction de gaz de fission relâchée, température d'irradiation, géométrie des grains de combustibles, fraction volumique des zones restructurées, surface spécifique, activité spécifique α (et donc quantité d'hélium produite) est en cours et doit permettre de vérifier que celles-ci sont incluses dans le domaine d'application du modèle de relâchement développé initialement pour les combustibles issus des REP.

Pour les combustibles issus du parc REP, les études se sont poursuivies dans le cadre du projet PRECCI (Phase II, 2007-2012). L'objectif est de diminuer les conservatismes du modèle de relâchement des radionucléides développé par le CEA pour ces combustibles et utilisé par l'Andra en 2005. L'incertitude relative aux conséquences de l'accumulation d'hélium produit par auto-irradiation α sur la microstructure des pastilles de combustible UOX avait notamment conduit à retenir des valeurs majorantes pour la fraction de radionucléides relâchés instantanément à l'arrivée de l'eau sur le combustible (IRF). Les études récentes ont permis de lever cette incertitude. De ce fait, le modèle de relâchement des radionucléides a été révisé en 2009. En l'absence d'évolution de la porosité de la zone restructurée en périphérie des pastilles de combustibles, les valeurs d'IRF, correspondent aux seuls inventaires de radionucléides présents dans les volumes libres et les joints de grains.

Les colis de déchets vitrifiés

La R&D est menée au sein du groupement de laboratoires « Verre/Fer/Argile » en ce qui concerne les couplages explicites entre le verre et son environnement, et au sein du projet VESTALE pour le comportement intrinsèque du verre, en particulier sa fracturation, son altération en conditions saturées, ou non, en eau.

Une structure commune a été créée afin d'échanger et de veiller à la bonne coordination et à la planification des études menées dans les différents programmes. L'ensemble des études sur les verres a fait l'objet d'une revue internationale en septembre 2009.

Les études en cours s'intéressent aux différents aspects des propriétés des verres :

- l'effet de **leur auto-irradiation** : gonflement, densité, dureté, ténacité, module d'Young sont modifiés jusqu'à une dose intégrée de 2.10^{18} à 4.10^{18} désintégrations α/g, puis on observe une stabilisation ; l'irradiation n'a pas de conséquences sur la microstructure ni sur le confinement (vitesse initiale, chute de vitesse). Il ne semble pas également y avoir d'effet spécifique de l'hélium jusqu'à des doses intégrées de 10^{19} α/g ;
- **leur fracturation** et l'augmentation des surfaces réactives : l'objectif est de développer, pour fin 2010, un modèle thermomécanique intégrant toutes les étapes depuis sa coulée jusqu'à sa mise en stockage. Dans un premier temps, la recherche a identifié et caractérisé les lois et critères thermomécaniques à prendre en compte, ces lois ont été vérifiées sur des petits blocs de verre. Enfin, un modèle a été développé et implanté dans le code de calcul ABAQUS® qui permet de calculer le champ de contraintes et de température lors du refroidissement du verre ; la fissuration de blocs de verre a été visualisée et quantifiée (échelle 1/10) par tomographies (figure 16). Des travaux sur des fissures modèles ont également montré qu'un écart de température de 5°C pouvait permettre un écoulement thermo-convectif au sein des fissures.

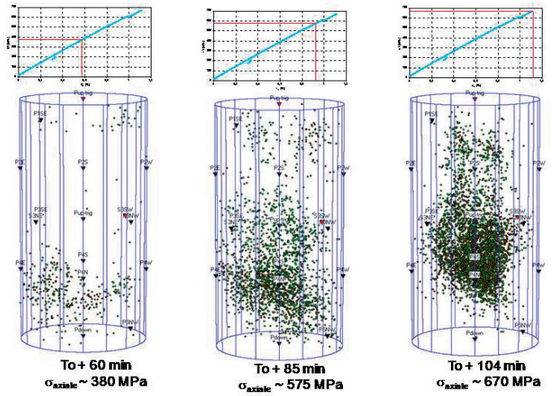


Figure 16 : synthèse des principales étapes d'endommagement d'un bloc de verre sain au cours d'un chargement déviatorique (P_{conf} = 15MPa) à travers l'enregistrement des émissions acoustiques. (Ougier et al. 2010)

Les graphes ($\sigma_{ax}(\varepsilon_{ax})$) permettent de visualiser la déformation correspondant aux taux d'émissions acoustiques enregistrés à chacune des étapes.

Les colis de déchets MA-VL

Dans le cadre du dossier 2005 (Andra, 2005-b), les études sur le comportement des déchets MA-VL portaient principalement sur le relâchement des radionucléides afin de disposer des données d'entrée pour les calculs de sûreté. Depuis le Dossier 2005, la majeure partie des travaux se focalise sur les termes sources gaz (radiolyse de la matière organique et des matériaux cimentaires, corrosion des matériaux métalliques...) et sur les termes sources chimiques (espèces complexantes, espèces agressives...).

Les échanges entre l'Andra et les producteurs sur l'inventaire et sur le comportement à long terme des colis s'effectuent au sein d'un groupe de travail (GT1). Pour traiter spécifiquement du comportement à long terme des déchets MA-VL, un comité de coordination a été créé, qui comprend quatre sous groupes organisés par thématiques : les déchets métalliques et les radionucléides gazeux, les boues bitumées, les déchets MA-VL vitrifiés, les déchets organiques et la radiolyse des matériaux cimentaires (figure 17).

• Les radionucléides gazeux

L'étude du relâchement des radionucléides gazeux vise principalement à répondre à des problématiques liées à l'exploitation du stockage (rejet des installations, ventilation des alvéoles...). Le seul radionucléide gazeux susceptible de poser un problème en post fermeture est le carbone 14 du fait de sa période radioactive plus importante et de sa faible sorption lorsqu'il se trouve sous forme organique (méthane...). Les réflexions en cours ont pour objectif de monter un programme expérimental permettant de déterminer la spéciation du ^{14}C qui est relâché par corrosion des matériaux métalliques du stockage.

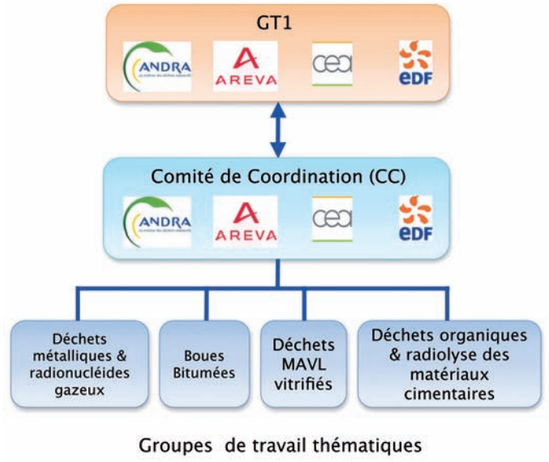


Figure 17 : organisation de la R&D sur les déchets MA-VL

• Les matériaux métalliques

Les études sur la corrosion des matériaux métalliques répondent à deux problématiques : la production d'hydrogène au sein des alvéoles MA-VL et le relâchement des radionucléides activés au sein du métal. Les recherches visent à acquérir les vitesses de corrosion généralisée pour l'Inconel 718, le Zircaloy 4, le M5, le Zirlo, les alliages de magnésium et d'aluminium. Les essais reproduisant les conditions de stockage (eau cimentaire, pH, température, présence de chlorures, milieu désaéré...) ont commencé en 2008 avec des durées longues, jusqu'à 3 ans, pour assurer des cinétiques de corrosion légèrement majorantes.

Ces expériences devraient être complétées par des mesures en milieu aéré pour tenir compte de la phase oxydante du stockage. Les premiers résultats confirment les données retenues pour le Dossier 2005 : vitesses de corrosion très faibles des aciers inoxydables et des alliages de nickel en milieu cimentaire (moins de 30 nm/an), vitesses de corrosion inférieures à la limite de détection (0,1 µm/an) pour les différents alliages de zirconium après 9 à 17 mois d'essai, vitesses de corrosion très importantes de l'aluminium et du magnésium.

• Les verres MA-VL

AREVA envisage de produire des verres MA-VL (appelés CSD-B) qui pourraient être stockés en milieu cimentaire. Ces verres se caractérisent par une très faible thermique (puissance thermique moyenne de l'ordre de 3 à 4 W) et une composition du verre peu éloignée de celle des verres R7T7. Les études entreprises par le CEA sur les radionucléides incorporés au sein d'une matrice vitreuse ont conduit à proposer un modèle de relâchement basé sur la vitesse initiale d'altération du verre, paramétré pour des températures de 30 à 90°C et des pH compris entre 7 et 11, c'est-à-dire des conditions plus représentatives d'une eau argileuse que d'une eau cimentaire.

Des expériences complémentaires vont être réalisées dans des eaux cimentaires traduisant des états d'altération différents du béton. Compte tenu du niveau de dose de ces verres, les conséquences d'irradiation devraient conduire à un gonflement de moins de 1 % qui reprendra partiellement le retrait causé par leur refroidissement dans le conteneur. Par ailleurs, ni les interactions électroniques, ni les interactions nucléaires n'induisent d'effet significatif sur la vitesse initiale d'altération de ces verres.

• Les bitumes

Les études sur les boues bitumées ont pour objectif de déterminer le gonflement des enrobés sous l'effet de la radiolyse (principalement en période d'exploitation et de réversibilité) et de la reprise d'eau (en post fermeture). Les conséquences d'un gonflement peuvent être un débordement du bitume (dans le cas d'un conditionnement en colis de stockage ou de la présence d'un surfût avec du vide) ou une fracturation du colis de stockage, voire même de l'argile. L'autre thématique étudiée concerne la production de gaz et d'espèces chimiques (espèces complexantes susceptibles d'accélérer la migration des radionucléides, espèces agressives susceptibles de dégrader les matériaux cimentaires...) par radiolyse des enrobés.

Les études sur le gonflement des enrobés par reprises d'eau réalisées par les producteurs n'ont pas été concluantes (résultats non reproductibles) ce qui peut s'expliquer par la différence de nature entre les bitumes français et les bitumes belges. Une collaboration avec le SCK•CEN est envisagée pour profiter de leur expérience sur ce type d'expérimentation.

La production d'hydrogène par radiolyse du bitume peut entraîner le gonflement des boues bitumées, avec mise en pression des colis et risque d'éventuels débordements selon les caractéristiques du colis et les conditions de stockage. Aussi, des études ont été menées sur le gonflement des enrobés bitumineux à des températures de 22°C et 27°C en prenant en compte les colis moyens définis à partir des dossiers de connaissances. Des calculs de gonflement, il résulte qu'aucun débordement n'est attendu pour les colis à 27°C, mis à part pour un type de colis produits avant 1996 où des débordements sont possibles entre le fût initial et le surfût.

• Les polymères

Deux programmes des producteurs de déchets prennent en charge l'amélioration des connaissances sur la radiolyse des polymères et les conséquences sur les dégagements gazeux et sur les molécules hydrosolubles libérées (espèces complexantes ou agressives). Ces programmes portent pour le premier sur la radiolyse α des matériaux organiques, et pour le second sur la radiolyse γ. Il s'agit d'estimer les valeurs de rendements radiolytiques représentatives des polymères présents dans le stockage, et d'évaluer l'influence de la température, de l'atmosphère oxydante, du débit de dose et de la dose intégrée sur les rendements et la production des gaz. Les études portent sur les polymères chlorés et fluorés, les polyoléfines et élastomères, la cellulose, les polycarbonates, les polyamides et différents types de polyuréthanes.

La spécificité du volet alpha réside dans la prise en compte de l'auto-absorption d'une partie du rayonnement par les grains de PuO_2. Les premiers modèles opérationnels de prévision des dégagements de gaz étaient disponibles à la fin de 2009, ils seront confortés par des mesures de dégazage de longue durée pour certains futs de déchets plutonifères. L'échéance pour la consolidation des données est prévue à la fin de 2010.

Ces programmes ont pour objectifs de quantifier le relâchement des espèces chimiques minérales en solution, en particulier trois d'entre elles : HCl provenant des matériaux chlorés, les carbonates issus, *via* le CO_2, des polymères et des ions provenant des résines échangeuses d'ions. Les recherches concernent également les espèces organiques potentiellement complexantes vis-à-vis des radionucléides et des toxiques chimiques, tels que les acides acétique, iso-saccharinique, formique, adipique, oxalique et phtalique.

Des travaux de thèse sur la radiolyse du PVC ont révélé que les ions phtalates constituent environ 70 % du COT relâché. Une autre thèse, sur la dégradation des polyuréthanes, a, quant à elle, conduit à déterminer les rendements radiolytiques des productions des gaz et identifier les familles de molécules hydrosolubles formées. Un post-doctorat sur le vieillissement radiochimique des polyoléfines et des élastomères, réalisé dans le cadre du contrat de programmes de recherche COPOLA (COmposite and POLymer Ageing) du CNRS, travaille sur les rendements radiolytiques, valeurs et évolution en fonction du débit de dose et de la dose intégrée... Les résultats obtenus pour le polypropylène montrent que le rendement radiolytique est similaire en condition aérobie ou anaérobie.

- **Les matériaux cimentaires**

Un modèle opérationnel (DOREMI) sur la production d'H_2 par radiolyse est développé en s'appuyant sur deux expériences de radiolyse des matrices cimentaires : ERMITE (2004-2006) et RETIF (2008-2011). La première avait pour but de suivre la production d'H_2 dans des modèles de colis de déchets métalliques cimentés soumis à un rayonnement γ, et de comparer ces mesures à des simulations. La confrontation expérience/simulation a montré que, si le rendement radiolytique obtenu en milieu semi-infini est inférieur au $G(H_2)$ en milieu cimentaire, la sous-estimation est inférieure d'un facteur 2. De plus, en conteneur clos, l'hydrogène produit réagit avec son environnement, il est partiellement consommé. Le taux de relâchement calculé en milieu semi-infini est donc majorant de la production effective d'H_2.
Dans le prolongement de l'expérience ERMITE, le programme RETIF vise à améliorer la description de la chimie secondaire dans les simulations de la radiolyse γ des matériaux cimentaires. Il s'agit d'inclure dans les simulations les effets de la température et la chimie du fer.

Les interactions entre le verre, le fer et l'argile

L'enjeu global consiste à déterminer le comportement physicochimique des composants d'une alvéole de déchets vitrifiés en considérant l'ensemble des interactions entre les trois types de matériaux :

- le verre subit un processus de dissolution, dont la cinétique est variable dans le temps : elle est élevée en phase initiale, puis elle chute de plusieurs ordres de grandeur avant d'atteindre une vitesse résiduelle ;
- les aciers non alliés du surconteneur et du chemisage se corrodent en fonction de l'évolution de leur environnement : atmosphère humide, milieu insaturé, milieu aqueux avec ou sans contact avec l'argilite… avec une phase transitoire à forte activité thermique et une chimie évoluant d'un milieu oxydant, soumis à un rayonnement βγ, à un milieu réduit ;
- l'argilite au contact du chemisage subira différentes transformations liées aux gradients thermiques et hydriques, aux processus d'oxydation et d'interaction avec le fer provenant de la corrosion des matériaux métalliques, et les éléments issus de l'altération du verre.

Devant la complexité des processus mis en jeu et leurs interactions, les études menées sur cette thématique se font dans le cadre d'un « GL », groupement de seize laboratoires du CEA, d'EDF, du CNRS, d'écoles d'ingénieurs, d'universités et d'un prestataire industriel.

Les objectifs du groupement de laboratoires consistent donc à :

- définir un terme source (relâchement des radionucléides) des déchets vitrifiés en s'appuyant sur l'identification des mécanismes d'altération du verre et en prenant en considération la complexité physicochimique de l'environnement ;
- déterminer les cinétiques de corrosion des aciers non alliés, qui contribueront au dimensionnement du surconteneur et la définition du terme source d'hydrogène, en intégrant l'évolution de l'environnement ;
- vérifier l'absence de risque de rupture prématurée du surconteneur, notamment par corrosion sous contrainte ;
- apporter les éléments de connaissance permettant de modéliser l'extension des interactions fer/argilites ;
- caractériser l'évolution du milieu argileux en contact avec le fer et le verre afin de mieux comprendre leurs processus d'altération.

Pour la majorité des expérimentations, une phase de faisabilité et de mise en place a été nécessaire au cours de l'année 2007 et la plupart des essais ont débuté courant 2008, plusieurs d'entre eux ont une durée prévisionnelle supérieure à une année. *In fine*, la connaissance de l'ensemble des processus doit permettre d'établir un (ou des) modèle(s) de relâchement des radionucléides par les colis de déchets vitrifiés, mais également des modèles de corrosion des enveloppes métalliques et de comportement de l'interface fer/argilite.

La réactivité du verre dans l'environnement

- **La dissolution du verre au contact de l'eau**

Dès 2005, les vitesses initiales et résiduelles de dissolution du verre étaient acquises en eau pure, mais le modèle retenu ne prenait pas en compte la phase intermédiaire de chute de vitesse. Les études actuelles visent à évaluer le rôle d'un environnement plus complexe sur la dissolution du verre et notamment l'influence de la chimie de l'eau provenant du milieu géologique et des produits de corrosion du surconteneur.

Les expériences en dynamique d'altération du verre en eau pure à fort rapport {surface sur volume d'eau} avec des concentrations variables en silicium ont mis en évidence que le temps d'atteinte de la vitesse résiduelle est très rapide et peu sensible au pH, et que les vitesses résiduelles décroissent dans le temps et qu'elles sont d'autant plus faibles que la concentration en silice est importante.

Avec l'eau interstitielle du Callovo-Oxfordien, l'altération conduit aux mêmes processus (vitesse initiale, chute de vitesse et atteinte d'une vitesse résiduelle), mais avec des vitesses initiales supérieures d'un facteur 5 environ. La cause semble être liée à certains ions présents dans l'eau interstitielle capables de modifier l'angle des liaisons ou l'épaisseur de la couche d'inter-diffusion. De même, la chute de vitesse conduit à des cinétiques globalement plus élevées (facteur 3), probablement du fait d'un pH moins élevé qu'en eau pure. Enfin, les vitesses résiduelles sont également un peu plus importantes (facteur <2), probablement sous l'effet combiné du pH et du magnésium.

- **L'influence des produits de corrosion et de l'argilite sur l'altération du verre**

Le démantèlement de l'essai intégré ArCorr 2006, dont l'objectif était de simuler la dégradation accélérée électrochimiquement d'un microconteneur en acier au contact de l'argilite et contenant un barreau de verre, a permis de caractériser l'interface verre/fer (figure 18).

Côté verre, on observe un gel d'altération de 3 à 4µm d'épaisseur qui contient les éléments habituels constitutifs d'un gel (Si, Al, Ca, Zr) mais qui est également enrichi en fer. Côté fer, on observe systématiquement une pellicule altérée de silicates de fer d'environ 3µm. Un gel riche en fer et des silicates de fer sont également observés au sein de fissures radiales altérées. Il faut noter que l'épaisseur d'altération est la même dans les fissures et à la surface du verre.

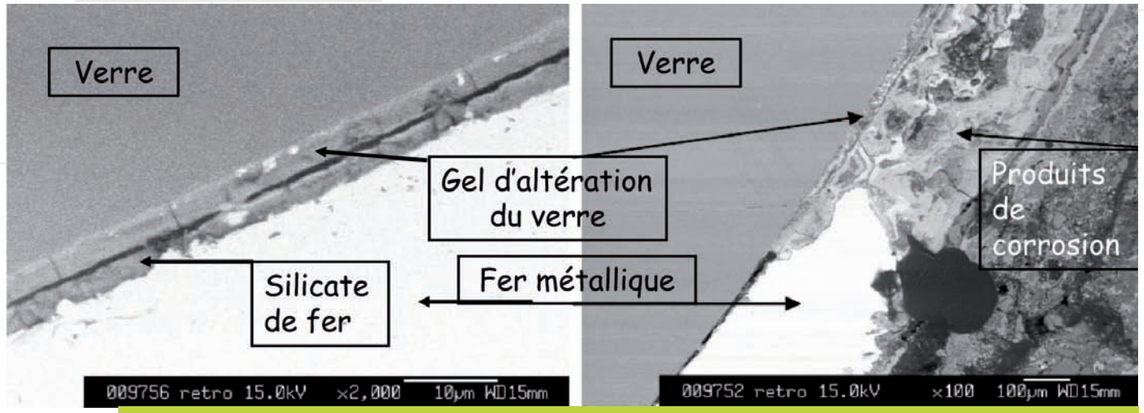


Figure 18 : altération du verre à l'interface verre/fer (à gauche) et au sein d'une fissure (à droite) dans l'expérience ArCorr 2006 (travaux CEA)

- **Les expérimentations au Laboratoire souterrain**

Le programme du groupement de laboratoires verre/fer/argile combine des essais de laboratoire (actif et inactif), des modélisations, des tests *in situ* et des études sur analogues naturels. L'expérimentation MVE, par exemple, fait partie de la démarche expérimentale au Laboratoire souterrain pour pouvoir étudier l'interaction verre/fer/argilites et l'influence des conditions environnementales (température, hygrométrie…) sur des durées pluriannuelles. MVE (figure 19) a été conçue pour vérifier les vitesses de dissolution du verre en condition *in situ* avec présence ou non de fer dans un voisinage proche et en regardant l'influence de la température.

Les premières phases de la cinétique d'altération sous eau des verres, où la vitesse d'altération est la plus importante, sont majoritairement dépendantes de la composition chimique et de la stabilité intrinsèque de la matrice vitreuse. En revanche, la phase suivante où la vitesse a sensiblement diminué après l'apparition d'un gel protecteur sur la surface réactive, dépend fortement des conditions dans lesquelles le gel se forme, et notamment, les caractéristiques de régulation géochimiques et de transport de la silice par l'environnement. Le temps caractéristique de cette phase coïncide avec la phase initiale d'un stockage où les colis HA induisent une élévation de température. Un premier essai a donc été défini pour être réalisé à 50°C afin d'étudier la chute de vitesse (essai « MVE - phase transitoire »). À plus long terme, avec l'atteinte de conditions quasi stationnaires en silicium dissout, dites « conditions de saturation », on mesure une vitesse d'altération très faible. Cette vitesse d'altération est appelée vitesse résiduelle (V_f).

Le second essai a pour objectif d'étudier cette phase (essai « MVE - long terme »). Dans le cadre de cette expérimentation, il est important également d'acquérir des informations sur des durées plus longues que les essais dynamiques, de tester différentes interfaces verre/fer/argilites et de tester également différentes formulation (SON68, AVM…) de verre (essais dormants).

La corrosion des aciers non alliés

Dans le Dossier 2005 (Andra, 2005-b), il est établi que le surconteneur et le chemisage subiront une corrosion généralisée avec des cinétiques de quelques dixièmes à quelques microns par an, en considérant une phase oxydante courte. Ces vitesses de corrosion ont servi au dimensionnement du surconteneur et du chemisage, et à la quantification du « terme source hydrogène ».
Avec les recherches actuelles, il s'agit de :

- vérifier que les cinétiques de corrosion dans les différents milieux sont suffisamment faibles pour ne pas produire un dégagement d'hydrogène trop important ;
- vérifier l'absence de risques de rupture prématurée du surconteneur liés au développement d'une corrosion localisée (fragilisation par l'hydrogène, milieu hétérogène…) ;
- caractériser les produits de corrosion afin de confirmer leur caractère protecteur et de déterminer leurs propriétés vis-à-vis de la dissolution du verre (sorption et/ou coprécipitation de silicium) ou des contraintes mécaniques qu'ils pourraient exercer sur l'environnement.

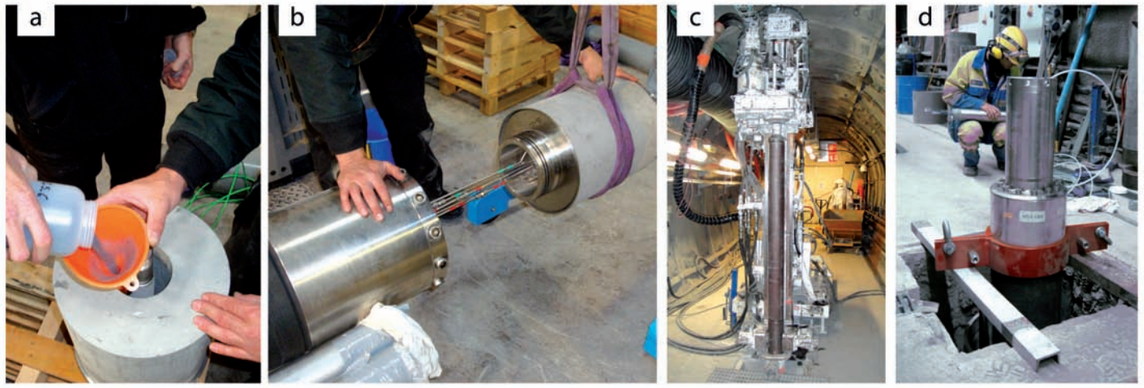


Figure 19 : installation de l'essai « MVE - long terme ». A- Remplissage de l'intervalle de la complétion avec le cylindre creux d'argilite et la poudre de verre B- Montage de la complétion (chambre de test + obturateur) C- Forage en Ø 350mm D- Mise en place de la complétion dans le forage

• Les cinétiques de corrosion généralisée

La corrosion atmosphérique est attendue durant l'entreposage en surface des colis ainsi que dans les conditions initiales du stockage. Des essais réalisés sur une durée de plus de 2 ans, à 25 et à 90°C, dans une atmosphère humide non polluée, d'humidité relative comprise entre 33 et 95 %, avec et sans oxygène montrent que une vitesse de corrosion extrêmement faible à 90°C (< 0,2 µm.an^{-1}).

Dans le stockage, en phase de resaturation de l'alvéole, les composants métalliques du chemisage peuvent être en contact avec l'eau interstitielle de l'argilite ou avec une argile partiellement saturée. On note qu'en dessous d'un seuil d'humidité relative de ≈50 %, la vitesse de corrosion généralisée est inférieure à 0,3 µm.an^{-1}, à 25 et à 90°C. Au dessus du seuil, elle augmente avec le degré de saturation de l'argile et semble passer par un maximum pour une humidité relative de l'ordre de 90 %. Les vitesses supérieures à 30µm.an^{-1} correspondent vraisemblablement, comme dans d'autres milieux poreux, à un optimum entre la saturation et le transport de l'oxygène disponible pour la corrosion. La comparaison avec le comportement de plaquettes exposées à l'atmosphère humide, sans contact avec l'argile, montre nettement que l'argile favorise l'amorçage de la corrosion et parfois un développement de piqûres.

En conditions argileuses anoxiques, le comportement attendu de l'acier non allié est celui d'un matériau passivable, protégé par des produits de corrosion, dont la vitesse de corrosion généralisée sera d'autant plus faible qu'elle sera mesurée sur de plus longues durées. Les premiers résultats obtenus sur des aciers non alliés au contact d'argilite massive, confirment des vitesses de corrosion de quelques microns par an après quelques mois d'essai. Les essais se poursuivent sur des durées de plusieurs années. Il faut toutefois noter que des essais de courtes durées réalisés dans des suspensions argileuses ont conduit à des vitesses de corrosion élevées, de l'ordre de 100µm.an^{-1} et à l'absence de néoformations à la surface du métal. Des investigations complémentaires sont en cours pour en comprendre les mécanismes et déterminer si le processus est pérenne ou transitoire.

L'essai de corrosion en Laboratoire souterrain débuté en 2009 **[voir encadré ci-contre]** vise à acquérir des cinétiques de corrosion en milieu anoxique, en phase aqueuse et gazeuse (atmosphère résiduelle humide).

Le développement d'une modélisation mécaniste de la corrosion généralisée a permis de proposer un modèle et une première version d'un code de calcul, appelé Calipso. Ce modèle décrit les différentes réactions se produisant aux interfaces, la formation et le transport des espèces réactives dans les couches successives.

• Les produits de corrosion - apport des objets archéologiques

La qualité des couches de produits de corrosion protégeant l'acier non allié dépend de la chimie du milieu (pH, redox, éléments) et des conditions dans lesquelles elles se sont construites. Une attention particulière a été portée à la structure des couches formées sur le fer et l'acier non allié en présence d'argile en conditions anoxiques représentatives du stockage géologique, pour mieux comprendre comment fonctionne le système (influence de l'hydrogène, localisation des réactions anodique et cathodique de la corrosion). Ce programme s'appuie sur la caractérisation de couches d'oxydes formés sur des analogues archéologiques conservés en conditions anoxiques mais également sur des expérimentations intégrées de type « maquette », comme l'essai ArCorr.

À titre d'exemple, la figure 20 montre la réduction du cuivre (II) en Cu (0) à la surface des produits de corrosion sur un objet archéologique remis dans une solution contenant Cu^{2+}. Cette expérimentation permet de montrer que la réaction cathodique (réduction de l'eau) lors de la réaction de corrosion ne se produit pas uniquement sur la surface du métal.

Avec les résultats obtenus, il est possible de distinguer systématiquement, du métal vers l'argile, une couche de produits denses, puis le milieu transformé et enfin la matrice argileuse. Sur les échantillons au contact de l'argilite, la couche interne est principalement constituée de magnétite Fe_3O_4 ; la couche externe s'apparente à un silicate de fer (phyllosilicate), elle est surmontée d'une sous-couche enrichie en sidérite ($FeCO_3$) ou en solution solide $Fe_{1-x}Ca_xCO_3$, en partie dispersée dans l'argilite au contact (Schlegel *et al.*, 2008). Dans certains cas, cette organisation apparaît localement plus désordonnée, notamment sur les objets archéologiques. Ceci traduit vraisemblablement des ruptures de couches et de transport dans les fissures créées entre les couches (Saheb *et al.*, 2008).

Figure 20 : réduction du cuivre sur les produits de corrosion pour identifier les zones de réaction cathodique (cercles rouges) - Travaux du CEA/LAPA

• Les risques de corrosion localisée

La corrosion localisée par piqûres peut être évaluée par une loi empirique conservative en reliant la profondeur des piqûres à la perte de métal par corrosion généralisée. Pour donner une interprétation mécaniste et une valeur prédictive à ces observations, un travail de thèse a été lancé fin 2008 à l'institut de Bourgogne.

Certains travaux menés pour évaluer le risque de corrosion sous contrainte mettent en évidence un risque d'amorçage de fissures en pâte argileuse à 90° C, sur un acier non allié possédant une structure non optimisée vis-à-vis des phénomènes observés (figure 21) : présence de bandes de perlite sur le métal de base, dureté élevée du métal fondu et de la zone affectée thermiquement lors des opérations de soudage.

Mise en place de l'essai MCO « États de corrosion »

Après scellement d'une alvéole HA, le chemisage sera dans un environnement anoxique et réducteur, soit au contact d'une phase gazeuse, soit d'une phase liquide (eau porale) ou de l'argilite.

L'essai « MCO - états de corrosion » installé en juin 2009, dans un forage vertical descendant de 12,3 m de long à - 490 m du Laboratoire souterrain, vise à caractériser la cinétique de corrosion anoxique et les produits de corrosion formés pour différentes nuances d'acier (aciers non alliés E24, P235, S516, échantillon pré-oxydé, joint de soudure, crevasse) au contact de l'eau interstitielle des argiles ou d'une phase gazeuse surnageante (cf. schéma du dispositif).

Sept cannes de prélèvements permettent de retirer, à des échéances choisies, les 140 échantillons initialement ontroduits pour estimer les cinétiques de corrosion. La composition de l'eau et du gaz de la chambre réactionnelle est suivie au cours du temps.

Une première canne de prélèvement a été retirée 66 jours après l'installation à 22°C.

Il apparaît :
- une très faible corrosion dans la phase gaz (Vcorr ~1µm/an)
- une corrosion plus élevée dans la phase eau (31 à 76 µm/an)
- un faible effet matériau (49 à 76 µm/an entre S516 et P235)
- aucun effet de crevasse
- une moindre corrosion de la zone soudée
- aucune corrosion par piqûres.

L'essai MCO a été mis en chauffe le 22/10/09, pour atteindre une température de 85°C.

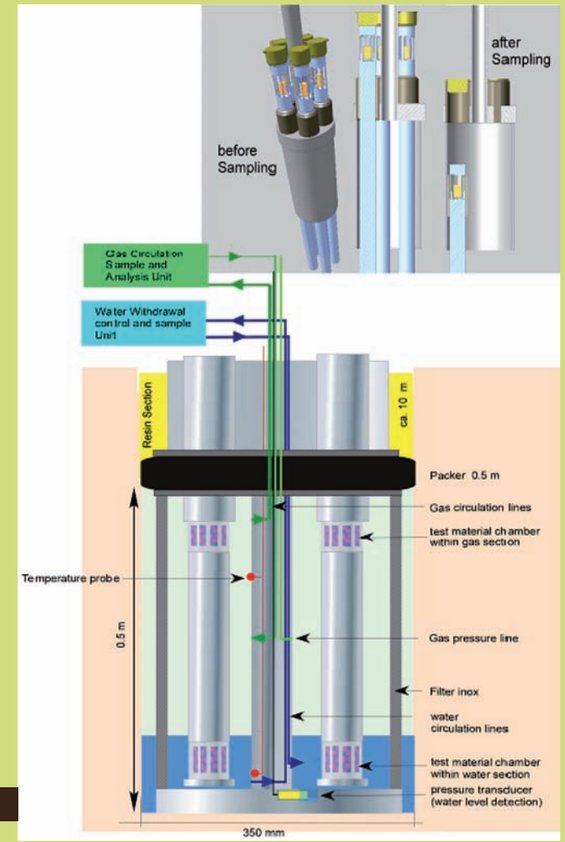


Schéma du dispositif expérimental pour l'essai MCO

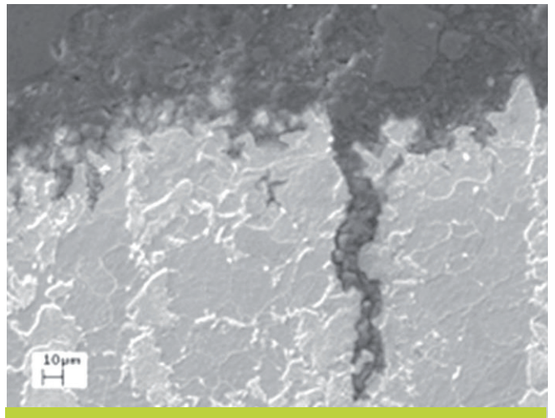


Figure 21 : amorce de fissures sur l'acier P265, localisées sur les bandes de perlites (matériau non optimisé) – Thèse A. Didot (à paraître)

Un programme a été mis en place pour définir, en lien avec le programme d'ingénierie de l'Andra, des matériaux et des procédures de fabrication optimisés pour assurer la résistance à la corrosion sous contrainte.

• L'influence de la radiolyse de l'eau sur la corrosion

Des travaux sur l'effet de la radiolyse de l'eau sur la corrosion (Lapuerta, 2006) ont montré une cinétique de corrosion du métal en milieu anoxique plus faible qu'en présence d'oxygène.

Afin de poursuivre ce travail dans des milieux plus représentatifs de la chimie de l'eau du site géologique, des essais ont été effectués pour déterminer l'évolution du système fer - eau du Callovo-Oxfordien sous irradiation γ, en milieu aéré dans un premier temps, pour des débits de dose élevés, compris entre 450 et 650 Gy.h^{-1}. L'irradiation, quelle que soit la dose, a pour effet d'accroître significativement l'acidité du milieu, de fortes doses induisant des pH <5. Cette acidification est attribuée à la production de HNO3 résultant de l'oxydation de l'azote de l'air. L'étude sera poursuivie, d'une part avec des débits de dose plus représentatifs des colis de déchets HA et, d'autre part en milieu désaéré et en présence d'hydrogène.

Les transformations de l'argilite

Les travaux réalisés jusqu'en 2005 avaient mis en évidence une affinité importante du fer pour la surface de l'argile (Gehin *et al.*, 2007 ; Tournassat *et al.*, 2008), la formation de minéraux argileux non gonflants et l'incorporation du fer dans les smectites (Charpentier *et al.*, 2006 ; Devineau *et al.*, 2006 ; De Combarieu *et al.*, 2007). Les essais mettaient en avant l'importance du contrôle de paramètres expérimentaux.
Les enjeux actuels consistent à s'assurer du comportement de l'interface fer/argilite sous l'effet des conditions physicochimiques (gradient

Le stockage et ses interactions
avec l'environnement

thermique, teneur en eau, contact avec le fer, pCO_2, pH_2, oxydation initiale du matériau). In fine, un modèle réactionnel suffisamment complet devra permettre de calculer l'extension de la perturbation liée au fer (Marty, 2006), depuis la mise en place du colis jusqu'au long terme, et de rendre compte de l'évolution des conditions physico-chimiques du milieu argileux vis-à-vis de l'altération des composants métalliques et de la matrice vitreuse.

• Les effets de l'oxydation et de la teneur en eau sur l'argilite

L'évolution des minéraux de l'argilite se produit en trois étapes :

- l'oxydation des pyrites en présence d'eau provoque la mise en solution de sulfates, d'ions Fe^{3+} et de protons ; puis la neutralisation par les carbonates et la dissolution des illites enrichissent le fluide en Mg^{2+}, Ca^{2+} et en K^+, d'où des échanges Ca<->Na et K<->Na dans les smectites ;
- l'évaporation de l'eau provoque une sursaturation des solutions et une précipitation de gypse (ou d'anhydrite à T>70°C), de célestite, de jarosite et de natrojarosite et de goethite ;
- après quelques mois, peuvent se former des sulfates plus complexes (métavoltine) et du soufre élémentaire.

Dans l'argilite massive, les transformations se développent rapidement puis se stabilisent à une profondeur de 80 cm en 1 an ; le processus est hétérogène, il se concentre autour des pyrites. La réhydratation de la roche oxydée conduit à un fluide enrichi en sulfate, sodium et potassium, avec un pH neutre, voire légèrement basique, s'il est en équilibre dans le système CO_2- carbonates.

La compréhension de ces processus et des conséquences des cycles d'hydratation - déshydratation sur la structure des argiles est nécessaire pour l'interprétation de certaines expériences de corrosion ou d'altération du verre en présence d'argilite.

Ainsi, les méthodes et moyens d'études (diffusion et diffraction des neutrons, tomographie X, en cellules de confinement à humidité contrôlée), mis au point pour étudier les effets de l'hydratation sur la porosité de la bentonite MX80 compactée (Devineau *et al.*, 2006 ; Bihannic *et al.*, 2009), vont être appliqués pour l'étude du Callovo-Oxfordien.

• Les transformations à l'interface fer/argilite

Les phénomènes à l'interface fer/argile, d'après les travaux acquis sur des bentonites à des pH proches de la neutralité, se résumaient par une faible transformation des smectites en serpentines ou en chlorites, en fonction des rapports liquide/roche et Fe/argile, de la température et de l'état redox. À pH basique, les argiles évoluaient vers les vermiculites.

L'argilite était supposée réagir de façon analogue aux bentonites. Les travaux en cours se proposent d'étudier la spécificité réactionnelle de l'argilite et l'impact des paramètres expérimentaux. Les résultats acquis aux temps courts mettent en évidence une réactivité importante de l'illite, des interstratifiés illite/smectite et de la kaolinite, comparée à la smectite dans des conditions comparables (De Combarieu *et al.*, 2007). Au contact direct avec le fer, des serpentines riches en fer se forment dès les basses températures (90°C) ou à rapport liquide sur roche élevé. De la chlorite ferromagnésienne est détectée à haute température (300°C). En s'éloignant de cette interface, il apparaît des saponites riches en fer. En revanche, il n'y a pas de fer en position échangeable dans les smectites préservées. Selon la pCO_2 dans les expériences, des phases carbonatées néoformées (sidérite, chukanovite) sont observées en plus de la magnétite habituelle.

Il est à noter que de nombreuses expériences sont encore en cours, notamment sur le système verre-fer-argile, et les premiers résultats présentés devront être réintégrés dans une analyse plus globale.

Références bibliographiques :

> Andra (2005-a) Dossier 2005
Tome : Architecture et gestion du stockage géologique.
Andra édit. ISBN 2-916162-21-6

> Andra (2005-b) Dossier 2005
Tome : Évolution phénoménologique du stockage géologique.
Andra édit. ISBN 2-916162-21-6

> Ougier-Simonin A., Fortin J., Guéguen Y., Schubnel A., and Bouyer F., Cracks in glass under triaxial conditions, submitted to International Journal of Fracture.

5 Les phénomènes de transferts
au sein d'un stockage

"...approfondir la compréhension des processus fondamentaux gouvernant la migration de radionucléides dans la géosphère en lien avec le stockage de déchets radioactifs..."

La maîtrise des constantes thermodynamiques

Les bases de données thermodynamiques constituent une part essentielle des modèles utilisés pour les évaluations de performance, principalement pour déterminer les limites de solubilité, la spéciation et l'évolution géochimique des radionucléides et toxiques chimiques au sein des divers compartiments d'un stockage de déchets radioactifs.

Les études liées au programme ThermoChimie sont développées dans le cadre d'un groupement de laboratoires comprenant quatre contributeurs principaux[1]. Chaque objectif du programme est développé en vue de l'obtention de grandeurs thermodynamiques, utilisable dans le cadre de modélisations numériques. La base de données ThermoChimie fournit l'ensemble des grandeurs thermodynamiques disponibles, et leurs incertitudes, associées aux rapports techniques justificatifs.

Le bilan du programme est présenté en trois parties :

1 la chimie des radionucléides et des toxiques chimiques, organisée sur des revues de la littérature et des estimations régulièrement mises à jour ;

2 la stabilité des minéraux en conditions de stockage, qui s'appuie sur une approche parallèle de développement de modèles et d'acquisition expérimentale ;

3 la complexation de radionucléides par les ligands organiques, qui repose sur des travaux expérimentaux visant à combler autant que possible les lacunes préalablement identifiées dans la littérature.

Chaque partie comprend un volet modélisation sur des évaluations en situations de stockage (ex. : limites de solubilité, évaluation d'un panache alcalin, effet de l'inventaire organique d'un colis de déchet...). Ces modélisations sont également conçues pour évaluer la sensibilité des choix de données dans le processus de mise à jour de la base, au regard d'indicateurs macroscopiques (ex. : étendue du panache hyperalcalin, teneurs en fer et redox associé...).

La base ThermoChimie est également comparée avec d'autres bases de données internationales analogues, en identifiant les espèces et valeurs de constantes présentant des écarts. Ces comparaisons seront reconduites en 2010-2011, en raison de l'activité internationale récente dans ce domaine [développement des bases de la Nagra (CH), de HATCHES (GB), de JNC (Japon) et de NWMO (Canada)].

[1] Amphos21 associé à UP Catalogne, BRGM/EPI, G2R, HydrAsa

La chimie des radionucléides et des toxiques chimiques

La mise à jour des données est périodiquement réalisée à partir des publications du projet TDB de l'AEN et de la littérature ouverte. Une identification systématique est opérée concernant les données publiées sur les radionucléides, ce qui permet de compléter les argumentaires supportant la sélection des données.

L'évaluation des effets de la température sur le comportement chimique des radionucléides a motivé une recherche systématique des données enthalpiques disponibles. La plupart de ces lacunes identifiées dans ce domaine ont été comblées en développant différentes méthodes d'estimation pour les grandeurs enthalpiques et entropiques, associant l'entropie des espèces aqueuses à leur charge (figure 1).

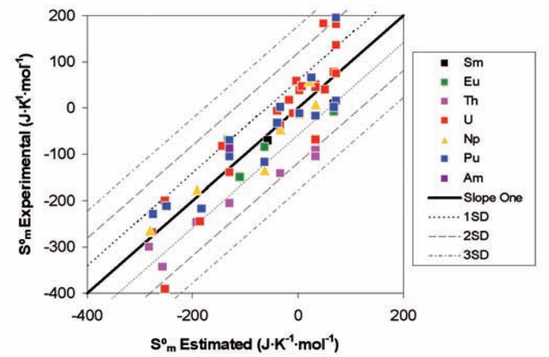


Figure 1 : estimation des entropies de lanthanides et actinides

La base de données ThermoChimie est périodiquement testée et exploitée pour les calculs de solubilité des radionucléides et toxiques au sein de la formation du Callovo-Oxfordien et en milieu cimentaire. Les valeurs calculées sont comparées à des mesures disponibles en conditions similaires ou encore vis-à-vis d'analogues naturels, permettant ainsi de disposer d'informations de calage. Les approches par solution solide ont été évaluées dans l'optique d'une utilisation pour les évaluations de performance.

En effet, la limite de solubilité de certains radionucléides ou toxiques peut varier de plusieurs ordres de grandeur, selon le choix d'un solide stœchiométrique ou de la solution solide susceptible de contrôler la concentration en solution. Il existe donc un enjeu tout particulier pour les éléments chimiques pour lesquels des solutions solides sont observées pour des conditions attendues en stockage. L'inventaire des systèmes pouvant incorporer un radionucléide a été réalisé, et les possibilités de les inclure dans ThermoChimie ont été définies.

La complexation de radionucléides par les ligands organiques

Les argilites du Callovo-Oxfordien (0,4 à 1,5 % de carbone organique total) constituent la première source de composés organiques potentiellement mobilisables. Les produits d'altération (par oxydation, altération hyperalcaline) du kérogène (partie de la matière organique insoluble dans les solvants organiques habituels) conduisent à la production de substances fulviques réactives, susceptibles d'interagir avec de nombreux radionucléides.

La structure des substances humiques peut être approchée par des assemblages supramoléculaires de composés de faibles poids moléculaires, présentant essentiellement des fonctions carboxyliques et phénoliques. Les propriétés thermodynamiques des supramolécules sont ainsi évaluées suivant un principe d'additivité. Des acides fulviques ont été synthétisés et utilisés pour des expériences de complexation avec des radionucléides tels que U(VI), U(IV), Ni, Sm, Se et I. Les réactions sont étudiées suivant différentes techniques, notamment par spectrophotométrie UV-visible, ESI-MS et fluorimétrie.

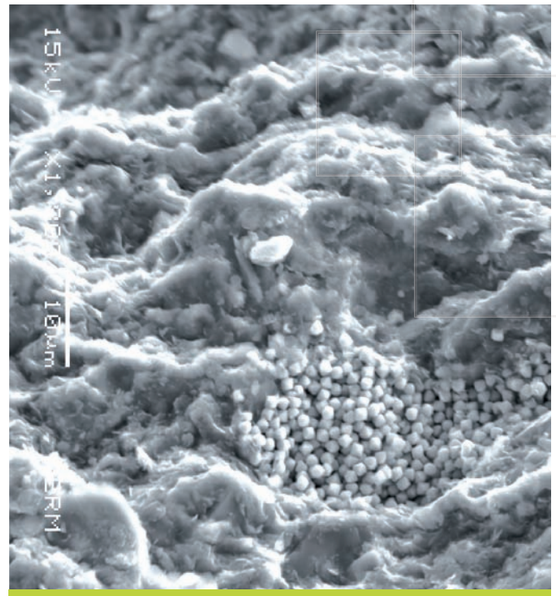
Une seconde partie expérimentale, initiée en 2008 afin de répondre aux besoins d'une approche d'additivité des propriétés, traite de la complexation de U(VI) et de Th par des molécules de faible poids moléculaire, le phénol, l'acide benzoïque et l'acide salicylique (représentant les groupes fonctionnels identifiés dans la matière organique naturelle du Callovo-Oxfordien). Les propriétés thermodynamiques des kérogènes, des composés fulviques et des complexes fulvates de radionucléides ont été estimées à partir d'algorithmes de contribution de groupes. Ces évaluations rendent compte de constantes d'équilibre pour la transformation du kérogène en acides fulviques et en composés de plus petits poids moléculaires, ainsi que de la complexation des radionucléides par les substances fulviques et autres molécules plus petites. Les propriétés thermodynamiques de composés d'iode organique ont également été calculées. Les perspectives de ce travail consistent à déterminer les constantes de stabilité des complexes radionucléides-fulvates et radionucléides-molécules de faibles poids moléculaires, à partir de mesures potentiométriques.

Une autre source de composés organiques a pour origine certains colis de déchets MA-VL au cours de leur dégradation en conditions alcaline. Les lacunes de connaissance identifiées relèvent à la fois de la variabilité des ligands organiques possibles, et du manque d'études réalisées en milieux hyperalcalins. Ceci a conduit à mettre en œuvre un programme expérimental dédié, intégrant :

- les conditions hyperalcalines, en identifiant le rôle du calcium,
- les conditions des eaux interstitielles du Callovo-Oxfordien, en considérant un panache organique au sein des argilites en pourtour des alvéoles MA-VL,
- les ligands jugés potentiellement les plus pénalisants : ISA, EDTA, gluconate,
- Th(IV), U(VI), Ni.

Un enjeu particulier est la stabilité de complexes ternaires RN-OH-Ligand. Des mesures de solubilité et de spéciation UV-vis à différentes forces ioniques ont permis de définir un ensemble de constantes thermodynamiques des différents complexes prédominants sous conditions hyperalcalines [par exemple : $Th(OH)_4(ISA)^-$, $Th(OH)_4(GLU)_2^{2-}$, $Th(OH)_2(EDTA)^{2-}$]. L'évaluation de l'effet des complexants organiques a été appliquée au cas du colis de déchets S5 (déchets MELOX compactés présentant un fort inventaire organique avec du plutonium). La modélisation montre une forte sensibilité au terme source organique, comprenant notamment la cinétique de dégradation de la cellulose sous conditions cimentaires, et indique une forte sensibilité du plutonium à

[2] BRGM, CEA, L3S, LGIT, LMTG, SUBATECH



Argilites du Callovo-Oxfordien. Minéraux argileux et grains de pyrite

la teneur en acide iso-saccharinique au sein de l'alvéole, puis à la teneur en phtalates au sein des argilites en pourtour de l'alvéole. Il est ainsi établi que le plutonium est relâché sous forme organique dans les conditions examinées.

La valorisation de la base de données ThermoChimie est par ailleurs assurée *via* une politique constante de communication scientifique (six communications orales et neuf publications, fin 2009) prochainement supportée par la mise en place d'un site web dédié, afin de permettre son libre accès.

Les transferts de radionucléides et d'autres solutés dans les argilites

Les études antérieures ont clairement démontré le rôle primordial de la diffusion dans les processus de transfert, ainsi que l'importance de la rétention des radionucléides au sein des argilites. Tout en poursuivant les expérimentations de diffusion dans le Laboratoire souterrain, le programme d'études 2006-2009 a donc été guidé par trois objectifs principaux :

- approfondir la compréhension des processus susceptibles de limiter la migration des radionucléides (^{129}I, ^{36}Cl, ^{79}Se, ^{41}Ca) contribuant le plus largement à l'impact calculé lors des évaluations de sûreté ;
- définir la démarche et acquérir les données permettant l'établissement d'un modèle de transfert multi-échelles, depuis le nanomètre jusqu'au centimètre ;
- appréhender les processus de chimie-transport en champ perturbé par le stockage et la dégradation de ses matériaux, et évaluer leurs effets sur les propriétés de transfert des radionucléides.

Ces études ont été principalement menées dans le cadre du projet Euratom FunMig (2005-2008) **[voir encadré p.50]** et, depuis 2007, au sein du groupement au Laboratoires Transfert[2]. Elles sont associées à un important programme expérimental au Laboratoire souterrain.

FUNMIG

FUNMIG (Fundamental Processes of Radionuclide Migration) est un projet intégré du 6e « Framework Programme » de la Commission européenne qui s'est déroulé de janvier 2005 à décembre 2008. Il associait 15 pays européens et 48 organisations, dont 9 en France. Son budget total de 20 M€, était subventionné à 40 % par la Communauté européenne.

Son objectif était d'approfondir la compréhension des processus fondamentaux gouvernant la migration (spéciation, transport et rétention) de radionucléides dans la géosphère en lien avec le stockage de déchets radioactifs en profondeur dans divers types de formation hôte.

Il s'est focalisé sur l'amélioration des « outils » utilisables pour traduire l'essentiel des processus se déroulant dans le champ lointain de la formation hôte pour les besoins des modèles de sûreté. De nouvelles méthodes ont été mises au point pour modéliser de manière plus efficace les effets (i) des hétérogénéités spatiales naturelles, à diverses échelles, des propriétés physicochimiques du milieu géologique, (ii) de processus physicochimiques affectant la migration des radionucléides (sorption, complexation, oxydoréduction, formation de solutions solides....) et, (iii) de phénomènes de transport encore mal expliqués (diffusion « de surface » de certains cations, diffusion dans la matrice solide...).

FUNMIG a été construit autour de six « Research & Technology Development Components » (RTDC), complétés par un thème consacré à la dissémination des connaissances acquises. Les six RTDC portent sur les différents processus (connus ou moins bien caractérisés) et leur étude dans le cadre de trois types de formations géologiques (argile, granite et sel). L'Andra assurait la coordination du RTDC 3 portant sur les formations argileuses, dans lequel étaient impliqués neuf organismes français et dix partenaires étrangers (belges, suisses, allemands, espagnols et hongrois) ayant un intérêt pour des concepts de stockage dans ce type de milieux.

RTDC 3 était organisé en 4 « Work packages » (WP), s'adressant chacun à une échelle ou à un niveau de complexité spécifique :

- WP1 a amélioré la compréhension de la mobilité, la distribution spatiale et la forme chimique de radioéléments à l'échelle des interfaces solide – solution dans les pores des minéraux argileux, c'est-à-dire à une échelle de la dizaine de nanomètres ;
- WP2 a été focalisé sur l'étude de phénomènes se déroulant dans des petits volumes de roche (échelle centimétrique) provenant de différentes formations géologiques argileuses ; les résultats ont aidé à mieux comprendre l'influence de la complexité réelle de l'espace poral et de la composition et l'agencement minéralogique de la roche sur les propriétés de diffusion et de rétention chimique de solutés ;
- Le WP3 a profité des bases de données sur le transport et rétention chimique issues les expériences à plus grande échelle (décimétrique à métrique) menées dans trois laboratoires de recherche souterrains : à Bure en France, à Mont Terri en Suisse et à Mol en Belgique afin de valider les modèles de transport mis au point dans le WP2 ;
- Le WP4 démontré la faisabilité de diverses méthodes de changement d'échelle de modèles de diffusion de radionucléides jusqu'aux échelles d'espace - temps géologiques. ■

Les expérimentations de diffusion *in situ*

Afin d'analyser la capacité de prédiction des modèles de diffusion-rétention utilisés pour les analyses de sûreté d'un stockage, sept expérimentations de Diffusion de traceurs Inertes et Réactifs (regroupées sous le sigle DIR) ont été conduites dans le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne à partir de 2005. L'objectif était de reconnaître, sur une distance pluricentimétrique, les comportements-types :

- du comportement de la molécule d'eau (HTO), qui donne accès à la géométrie de la porosité,
- des traceurs subissant l'effet de l'exclusion anionique ($^{36}Cl^-$, $^{125}I^-$),
- des traceurs subissant l'effet de la rétention chimique ($^{22}Na^+$, $^{85}Sr^+$, $^{134}Cs^+$),

Les essais se répartissent de la façon suivante :

- 3 essais au niveau de la galerie -445 m, dans la partie du Callovo-Oxfordien contenant de interstratifiés I/S de type R0 ;
- 3 essais au niveau de la galerie -490 m et un à 542 m de profondeur dans un forage réalisé depuis la surface dans la partie du Callovo-Oxfordien renfermant des I/S-R1, de façon à voir si ce changement minéralogique a un effet sur la diffusion.

Après plusieurs années de suivi, la mesure de l'activité en traceurs dans les fluides :

- met en évidence que les espèces anioniques subissent l'effet de l'exclusion anionique et que les espèces cationiques réagissent chimiquement avec la roche et se sorbent ; le césium se sorbe plus fortement que le sodium ;
- fournit une première évaluation des paramètres de diffusion.

D'un point de vue de la modélisation, les résultats convergent pour trois types de modèles utilisés (modèle 3D CAST3M, modèle 1D radial PhreeqC couplant la chimie et le transport et modèle CORE2D). Il ressort qu'il est nécessaire de tenir compte d'une zone perturbée de l'ordre de 2 à 3 cm autour de chaque forage, avec une perméabilité plus importante que celle de la roche saine. Ce résultat est cohérent avec les tests hydrodynamiques menés pour caractériser les propriétés locales.

Il existe une bonne adéquation entre la gamme des valeurs des coefficients de diffusion calculée et celle issue des tests en laboratoire. Comme attendu, les distances de migration du césium sont faibles par rapport au ^{22}Na.

L'ensemble de ces résultats est valable pour les deux minéralogies des argilites du Callovo-Oxfordien.

En septembre 2009, les essais du niveau -490 m ont été démantelés en vue d'analyser les profils de diffusion dans la roche. 100 % des surcarottes des 3 forages ont été récupérées et 55 profils de roche ont été conditionnés. Les analyses sont en cours mais les premiers résultats, qui concernent le tritium, le sodium et le césium fournissent des profils qui se superposent pour ces 3 traceurs et présentent une bonne reproductibilité (figure 2).

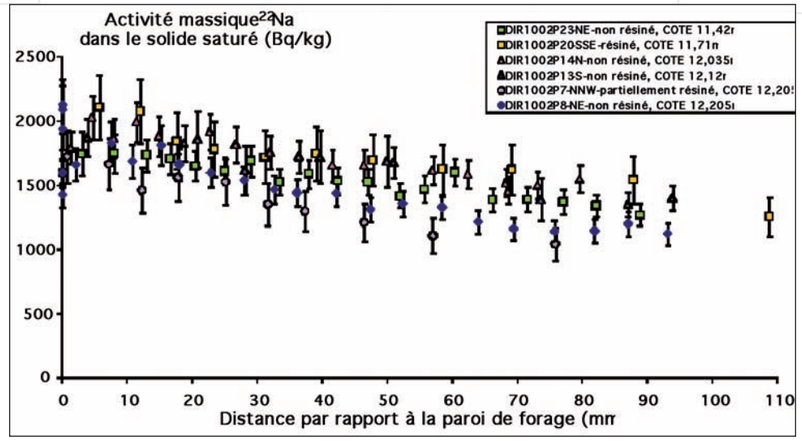


Figure 2 : profils de diffusion du ^{22}Na dans l'argilite à 490 m de profondeur

Les phénomènes de transfert des solutés et des radionucléides mobiles dans les argilites saines

Un effort important a été consacré à la simulation des caractéristiques de diffusion des différents traceurs (anioniques, cationiques, neutres) dans un milieu poreux simplifié. Le modèle, fondé sur la résolution des équations couplées du transport (Navier-Stokes et Nernst-Planck) adapté à l'échelle de ce milieux poreux (Rotenberg *et al.* 2008), montre un ordre relatif des coefficients de diffusion en accord avec les observations expérimentales ($D_+ > D_0 > D_-$).

Les chemins de diffusion sont reliés à la porosité traversée par les traceurs concernés. La couche diffuse - qui constitue un faible volume, mais connecté à travers toute la porosité - agit comme un guide pour les cations à travers la porosité. Les anions, exclus de la surface des particules, explorent en revanche un volume plus petit, devant passer, pour explorer la totalité du volume qui leur est accessible, par les plus petits pores, agissant comme des « goulets électrostatiques ».

Une autre avancée significative concerne l'influence de la distribution spatiale de la matrice argileuse sur les caractéristiques de la porosité accessible à la diffusion (figure 3a). Il est notamment montré que les grains de carbonates et de tectosilicates présentent une orientation préférentielle de leur plus grand axe, parallèlement au plan de sédimentation (figure 3b).

Les modélisations numériques réalisées en utilisant la géométrie de l'espace poral à cette échelle, montrent clairement que cette orientation préférentielle induit une anisotropie de diffusion à l'échelle macroscopique.
L'interprétation de cette anisotropie de diffusion doit également prendre en compte l'arrangement des minéraux argileux dans la matrice argileuse, eux-mêmes préférentiellement orientés par rapport au plan de sédimentation (Wenk *et al.*, 2008).

Parallèlement, les mesures en forages sur la ZT ont mis en évidence :

- la confirmation du contrôle des variations de porosité par la proportion de minéraux argileux ;
- une augmentation progressive de la porosité de l'ouest vers l'est, à l'échelle de la zone ;
- une augmentation progressive de la salinité des eaux interstitielles des argilites sur la ZT (0,07 Mol/L à 0,17 Mol/L), avec les valeurs les plus élevées dans la partie nord-ouest.

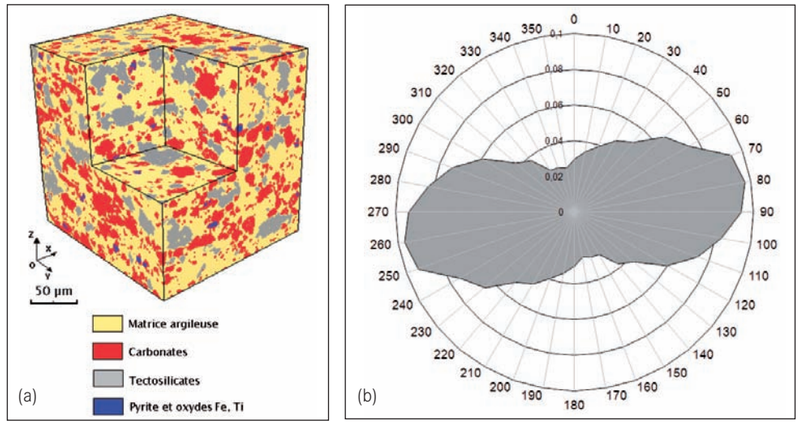


Figure 3 (a) distribution spatiale des minéraux déterminé par microtomographie synchrotron (coté cube ~ 150µm) (b) rosace d'orientation des grains de carbonate relative au plan de sédimentation (90°)

Par ailleurs, l'étude complémentaire de traceurs géochimiques naturels (^{37}Cl, ^{11}B, ^{18}O, ^{2}H, gaz rares), mesurés à l'échelle de la zone de transposition, confirment une forte différenciation des eaux du Dogger et de l'Oxfordien. Ils témoignent de l'efficacité des argilites comme barrière hydraulique, sur le plan des mécanismes convectifs à l'échelle des durées géologiques.

L'apport en chlorures dans les niveaux producteurs profonds de l'Oxfordien est expliqué par la diffusion à travers le Callovo-Oxfordien, généré par le gradient de concentration entre le Dogger et l'Oxfordien (4 g/l à 0,015 g/l). Cette interprétation semble en accord avec les teneurs en traceurs naturels (Mazurek *et al.*, 2009) ainsi qu'avec les études sur la diagenèse des argilites et les expériences de transferts réalisées en laboratoire.

5 Les phénomènes de transferts
au sein d'un stockage

Le transfert de radionucléides fortement sorbés

Un effort a été consacré à la mesure et la modélisation de la migration dans les argilites de cations fortement sorbés, tels que les actinides. La détermination expérimentale du Kd pour une masse compacte d'une roche riche en argile est rendue difficile par les temps très longs nécessaires pour atteindre un état d'équilibre. Ceci est démontré par les résultats d'expériences menées sur l'argile d'Opalinus (Mont-Terri, CH) lors du projet « FunMig » : environ 500 jours pour le Cs^{+}, le double pour Co^{+2} (figure 4a). Les résultats ne montrent pas de différence significative entre Kd mesuré sur roche broyée et sur roche intacte pour le césium (figure 4b). Ce résultat, transposable pour d'autres cations sorbants essentiellement par échange cationique, conforte les observations contenues dans le Dossier 2005 (Andra, 2005) indiquant la comparabilité de Kd (batch) et Kd (roche intacte) pour le césium dans les argilites du Callovo-Oxfordien. Cette approche expérimentale directe de l'équivalence des Kd (roche broyée/intacte) ne peut pas être mise en œuvre pour les éléments à fort Kd en raison du facteur temps. Néanmoins, l'évaluation du Kd pour ces éléments est théoriquement possible si l'on dispose : (i) de l'évolution de la concentration dans la solution en contact avec la roche et, (ii) du profil de concentration de l'élément dans la roche.

Le développement et l'application de deux méthodes : (1) la micro-ablation laser LIBS « laser-induced breakdown spectroscopy » (Menut *et al.*, 2006) et (2) la micro-abrasion ont permis d'obtenir des profils de diffusion pour des profondeurs de pénétration de quelques centaines de micromètres (figure 5).

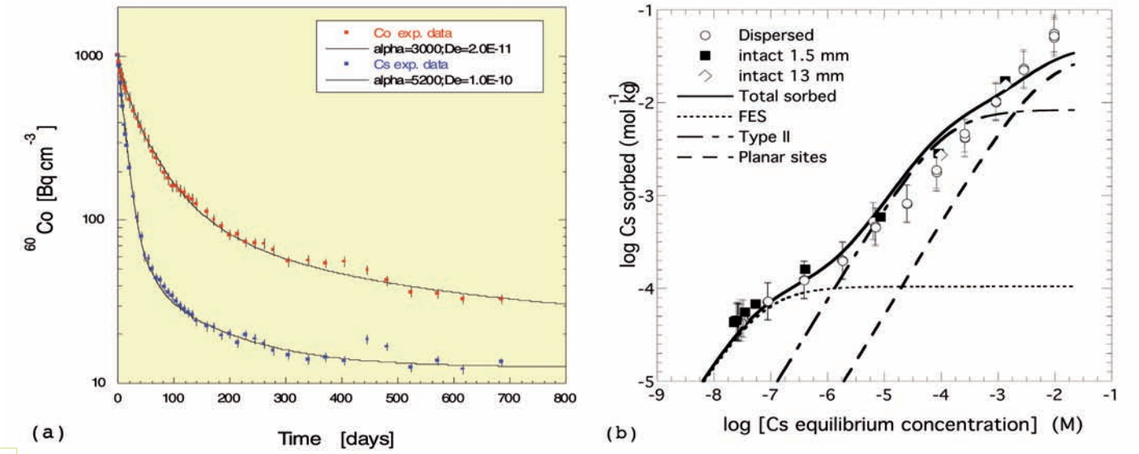


Figure 4 : (a) concentration en Co et Cs en solution lors de l'équilibration avec une pastille de l'argile à Opalinus.- (b) Isothermes de sorption pour Cs (argile à Opalinus) en forme broyée, pour 2 systèmes à roche intacte.
Le trait plein correspond à l'isotherme calculé avec un modèle thermodynamique *(Jakob* et al.*, 2009)*

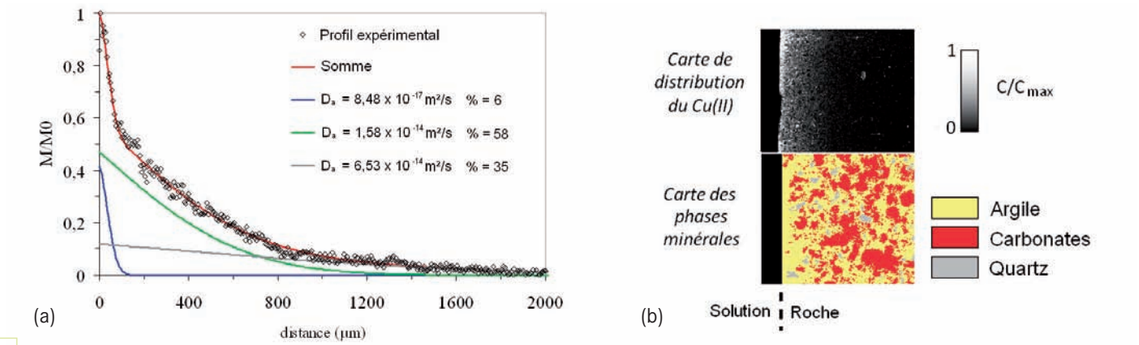


Figure 5 : (a) profil du Cu(II) dans l'argilite du Callovo-Oxfordien, en partant de la surface en contact avec la solution (x = 0), avec courbes d'ajustement de Da (~ De/Kd). - (b) Comparaison de la carte minérale (en bas) et de la distribution du Cu (en haut) ;
la carte minérale montre la déstructuration importante du bord de l'échantillon en contact avec la solution (Robinet, 2008).

Que ce soit dans les argilites ou dans l'argile à Opalinus, l'interprétation des profils expérimentaux nécessite la prise en compte de l'effet combiné de deux, voire trois couples De/Kd. Une explication est fournie par les observations en LIBS montrant une importante perturbation structurale de la roche au contact du réservoir. Ainsi, le début de chaque profil n'est pas représentatif du matériau intact, caractérisable, par le couple De/Kd, dans la partie la plus éloignée du profil.

Le transfert de radionucléides dans les argilites perturbées par le stockage

Depuis 2007, la plupart des études concernent la phénoménologie du champ proche. Dans cette optique, il a fallu développer et/ou adapter, des méthodes, moyens expérimentaux et modèles dédiés. Fin 2009, la conception, la réalisation et la validation des approches et des montages expérimentaux étaient achevés.

On soulignera par exemple les expérimentations concernant la réactivité de H_2, ou encore la diffusion des ions dans les argilites partiellement saturées en eau, pour lesquelles l'ensemble du banc expérimental a été développé au sein de ce programme. On notera également la réalisation de cellules dédiées aux expériences de percolation qui permettront de multiplier les conditions explorées.

Enfin, d'un point de vue expérimental, la microtomographie X est exploitée pour suivre l'évolution des épontes de fractures et dans une moindre mesure la mobilité de particules. Il convient également de souligner l'effort de conception et de réalisation de cellules de diffusion de dimensions pluridécimétriques, devant permettre l'étude de différentes perturbations, notamment en température, dans des conditions eau/roche mieux maîtrisées que pour des échantillons centimétriques.

En parallèle, les méthodes numériques ont été développées, permettant par exemple l'interprétation des essais de diffusion en milieu partiellement saturé en eau. Une approche de type Lattice-Boltzmann a également été mise en œuvre pour rendre compte des échanges de matière à échelle interparticulaire argileuse.

• Les études visant à la compréhension phénoménologique

Les essais de diffusion sur des échantillons ayant subi un cycle thermique, assurant une meilleure maîtrise de la cinétique de descente en température (figure 6), a permis de retrouver les paramètres de diffusion de solutés avant un cycle thermique (l'évolution irréversible des propriétés diffusives de la roche, obtenue antérieurement, étaient donc un artefact expérimental). Le traitement d'une élévation de température s'appuie également sur le développement d'un modèle d'équilibre eau/roche adéquat, réalisé en parallèle.

Les premiers résultats des essais de diffusion sur des échantillons partiellement saturés en eau, réalisés après une étape de développement de la méthode osmotique, montrent une diminution cohérente de la diffusion de HTO et de Br suivant l'état de saturation des échantillons (80 à 100 %), les variations les plus importantes étant entre 90-95 % de saturation. Les essais se poursuivent avec différents cations et avec l'iode.

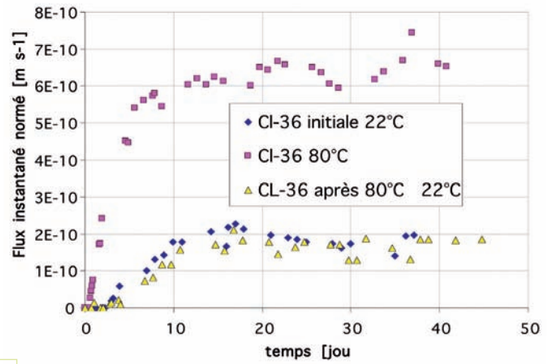


Figure 6 : comparaison des flux instantanés normés du Chlore-36 sur l'échantillon EST19496 (EST207, à 470m de profondeur) à 20°C, à 80°C et après le cycle thermique, à 20°C (d'après Savoye et al., 2008)

Des essais de convection menés en parallèle permettent d'accéder à la composition de l'eau interstitielle (notamment à son inventaire organique mobilisable) et d'étudier les propriétés de transfert d'espèces et colloïdes très peu mobiles, sous différentes conditions (chimie, endommagement des échantillons...).
Ainsi, la caractérisation systématique de l'inventaire mobilisable de la matière organique naturelle du Callovo-Oxfordien a permis d'identifier des mono et diacides, principalement des aldéhydes et des acides aminés, dotés pour certains de pouvoirs complexants. La quantification de ces molécules, et l'évaluation de leur éventuel effet de mobilisation sur les radionucléides, est en cours. Il a été montré que des molécules telles que le PMA (poly-malic acid) migrent au travers d'échantillons d'argilite intacte, malgré une masse de 5 000 daltons.

Les essais de diffusion de molécules organiques (EDTA, ISA) et de complexes organiques (Eu-EDTA) indiquent un comportement intermédiaire entre solutés cationiques et anioniques, préjugeant de considérations stériques ou chimiques à prendre en compte (Descostes *et al.* 2010). La synthèse de molécules de phtalate marquées au ^{14}C a également permis d'étudier leur comportement diffusif en parallèle à celui des ^{14}C-oxalates. Les quatre molécules étudiées permettent de comparer la diffusion des molécules en fonction de leur taille et de leur charge, afin de proposer une approche généralisée.

La caractérisation à grande échelle de l'iode et de sa localisation au sein du Callovo-Oxfordien (figure 7) a permis d'établir des associations minérales et des mécanismes différents des schémas jusqu'à présent disponibles. Ainsi, l'iode, caractérisé dans de multiples échantillons du Callovo-Oxfordien, est identifié non pas en association avec la matière organique, mais principalement sous forme inorganique en association avec les carbonates.

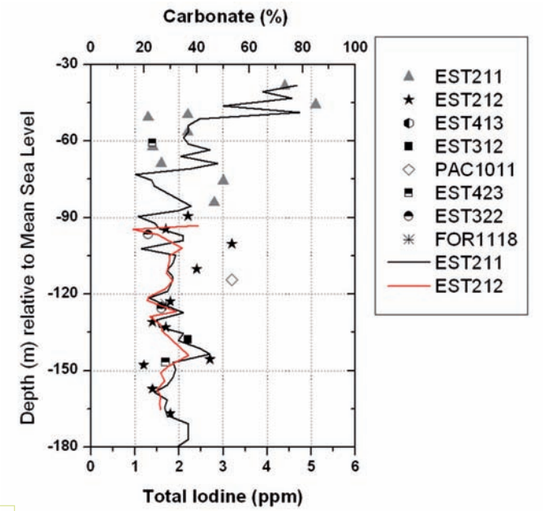


Figure 7 : mise en évidence de l'association de concentration en iode total avec les minéraux carbonatés à l'échelle de la formation du Callovo-Oxfordien

Cette localisation de l'inventaire initial en iode indique une faible accessibilité à l'échange avec ^{129}I, confirmant l'absence de retard à la migration. Cette approche, décrivant le Callovo-Oxfordien comme son propre analogue vis-à-vis de la migration des radionucléides, est développée également pour le sélénium et le nickel.

Les axes d'études futures

Outre la poursuite des actions en cours, des orientations futures concernent en particulier les approches fondamentales aux petites échelles. Les développements visés correspondent :

- aux actions concernant la porosité accessible aux anions ;
- à la mise en cohérence des modèles de Donnan et de doubles couches électrostatiques ;
- au développement d'un modèle numérique à l'échelle porale permettant de rendre compte de situations examinées dans le GL (température, états partiellement saturés en eau, fracturation et transfert particulaire...) à partir d'un modèle de géométrie de réseau poreux, développé en cohérence avec la problématique de migration des gaz. L'acquisition de la géométrie réelle du réseau poreux de l'argilite par imagerie est également prévue dans le projet européen « Catclay » ;
- à la poursuite des actions concernant l'état de l'eau et le modèle de porosité, en utilisant les mesures de RMN à basse température. Un modèle à double porosité sera exploité pour l'interprétation du transfert de Cl et de HTO en fonction de la pression.

D'autres actions programmées concernent :

- l'ajout de mesures de diffusion en conditions de saturation en eau plus élevée (~95 %), en cohérence avec les représentations du réseau poreux des argilites et les apports du GL Gaz et du projet européen Catclay ;
- le renforcement de l'étude de la réactivité de H_2, en lien avec les travaux menés dans le cadre du projet européen ReCoSy, notamment sur les aspects d'oxydoréduction ;
- la finalisation du modèle d'échange d'ions en milieu compacté ;
- le développement d'un modèle électrostatique prenant en compte de la titration de surface et la sorption d'éléments bivalents en milieu compact (smectite sodique) ;
- la fourniture d'une synthèse des lois cinétiques recommandées (pôles des argilites et des ciments) mises en cohérence avec les acquisitions en cours dans le cadre du GL ThermoChimie.

Un nouvel objectif est par ailleurs attribué aux processus irréversibles, qui n'ont été que partiellement abordés lors de la définition initiale du programme. Il conviendra de renforcer l'étude des mécanismes d'incorporation, visant une mise en cohérence entre sorption, solubilité et piégeage irréversible.

La modélisation du transfert colloïdal au sein des argilites reste à développer, suivant le concept de filtration partielle. L'approche s'appuie sur l'exclusion de taille plus classiquement utilisée en chromatographie.

Les expérimentations sur échantillons pluridécimétriques devront fédérer les activités du GL sur la dernière partie du programme, en visant les développements en termes de caractérisation et de modélisation de perturbations : panache salin, panache organique, cycle thermique.

La même démarche de croisement devra être appliquée aux expérimentations *in situ* menées au Laboratoire souterrain : les essais DRN (diffusion de radionucléides) exploreront des conditions complémentaires aux essais DIR, notamment en étendant les distances de transfert accessibles au regard de temps d'injection significativement plus longs.

Les transferts de gaz dans les argilites

Des gaz, essentiellement de l'hydrogène, peuvent être générés dans le stockage, principalement par corrosion des composants métalliques. L'Andra a donc engagé un programme de recherche pour étudier les perturbations possibles concernant notamment : (i) les risques d'endommagement des matériaux de confinement du fait de surpressions, (ii) la dynamique de resaturation des ouvrages, (iii) la migration d'éventuels gaz radioactifs, (iv) la modification des écoulements d'eau et les conséquences sur la migration des radionucléides solubles.

La campagne d'acquisition de données, débutée dès 2006, s'est attachée à acquérir les paramètres et lois de comportement (courbes de rétention capillaire, perméabilités à l'eau et au gaz en fonction de la saturation, coefficients de diffusion H_2 dissous et gazeux dans des milieux poreux partiellement saturés...) indispensables aux modélisations (généralement décrits par des modèles continus bi-phasiques basés sur la loi de Darcy généralisée).

Ces modélisations du transfert de gaz dans les divers éléments du stockage sont effectuées en considérant également les couplages avec d'autres processus physiques du milieu concerné (mécanique, thermique, comportement chimique).

On s'est par ailleurs intéressé aux zones pouvant jouer un rôle clé dans le transfert du gaz, telles que les interfaces argilites/bentonites présentes autour des scellements de galeries et des bouchons d'alvéoles, ainsi que les interfaces métal/argilite des alvéoles HA.

Enfin, une attention toute particulière a été accordée aux effets d'échelles et à la variabilité spatiale des matériaux étudiés : (i) les mesures sur échantillons ont été quasi-systématiquement associées à des mesures in situ, (ii) les échantillons sélectionnés pour analyses sont représentatifs de la variabilité du matériau (pour l'argilite, à plusieurs profondeurs du Callovo-Oxfordien).

Le programme de recherche s'appuie principalement sur le groupement de laboratoires « Transfert de Gaz » regroupant plusieurs laboratoires européens[3]. Par ailleurs, l'Andra participe un projet européen (7e PCRD) dédié à la migration du gaz dans les stockages, regroupant 24 organismes de recherche et gestionnaires européens de déchets radioactifs. En outre, l'Agence assure la coordination de la modélisation, activité transverse au sein du projet européen « Forge ». La caractérisation des matériaux et de leur comportement au gaz se fait en combinant :

- des expérimentations dédiées sur échantillons, pour l'acquisition de données ciblées ;
- des expérimentations intégrées sur échantillons, sur le couplage entre plusieurs phénomènes ;
- des expérimentations *in situ*, permettant de représenter les processus de transfert à grande échelle et dans des conditions représentatives de celles du stockage ;
- des modélisations participant au dimensionnement et à l'interprétation des expérimentations.

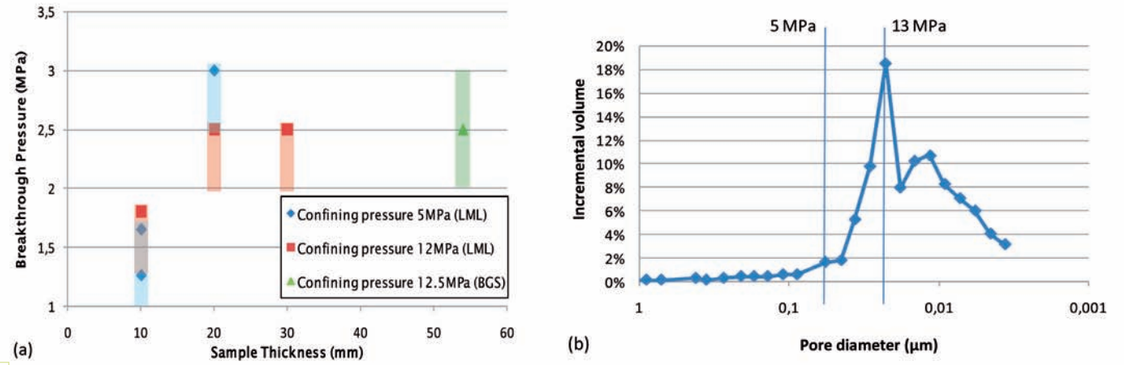


Figure 8 : (a) mesures de pression d'entrée de gaz, (b) porosimétrie au mercure (indication des pressions d'entrée de gaz équivalentes pour un système eau/gaz)

Les gaz dans les argilite saines

- **La pression d'entrée de gaz dans l'argilite**

Plusieurs études ont donc été menées en parallèle pour préciser la valeur de pression d'entrée de gaz dans l'argilite : essais sur échantillons de faible épaisseur (10 à 30 mm) ou épais (> 50 mm), mesures de pression d'entrée sur un chemin d'imbibition, mesures *in situ* dans le Laboratoire souterrain.

Ces expérimentations ont permis de monter que la pression d'entrée des gaz dans l'argilite du Callovo-Oxfordien est inférieure à 5 MPa, sans qu'il ne soit cependant possible d'établir de corrélation entre la valeur de pression d'entrée gaz, la pression de confinement et l'épaisseur de l'échantillon (figure 8a). L'interprétation des résultats à partir de la distribution de la porosité des argilites (Andra, 2005) et des « porosimétries mercure » pour des échantillons de Callovo-Oxfordien (figure 8b) suggère l'existence d'un volume poreux accessible au gaz pour des valeurs de pression inférieures à 5 MPa, sans toutefois donner d'indications suffisantes sur la connectivité de cette porosité.

Ces résultats illustrent en revanche la nature de l'intrusion du gaz dans l'argilite. Pour des valeurs de pression d'entrée inférieures à 5 MPa, il ne faut pas s'attendre à une invasion massive du réseau poreux et seule une faible fraction de la porosité sera concernée. L'entrée massive de gaz se fait vraisemblablement pour des pressions de gaz de l'ordre de 15 MPa, valeur compatible avec les courbes de rétention capillaire mesurées par ailleurs, mais impossible à atteindre dans le stockage sans provoquer un endommagement de l'argilite (fracturation). La faible désaturation de l'argilite ($\theta > 98$ %), ainsi que les approches par réseau de pores et l'analyse à partir de la théorie du drainage en milieu poreux, confortent par ailleurs la description de la migration du gaz par des modèles continus s'appuyant sur la loi de Darcy généralisée.

- **L'acquisition des courbes de perméabilité relative au gaz et de rétention capillaire**

La première phase du programme d'acquisition a également permis de donner une estimation de l'évolution de la perméabilité relative au gaz (figure 9a) et de la pression capillaire (figure 9b) en fonction de la saturation en eau. Elle a en outre montré que la notion de perméabilité intrinsèque est difficilement applicable pour ce type de milieu.

Le suivi en déformation sur un cycle complet d'imbibition/drainage a permis de montrer que les variations dimensionnelles demeurent faibles (en général <1 %) et homogènes. En revanche, le lien entre la variation dimensionnelle et la teneur en minéraux gonflants ne semble pas évident, suggérant la prédominance d'un effet structurel associé aux variations de pression capillaire dans l'échantillon. De plus, une cinétique extrêmement rapide des pertes et prises de masse a été mise en évidence.

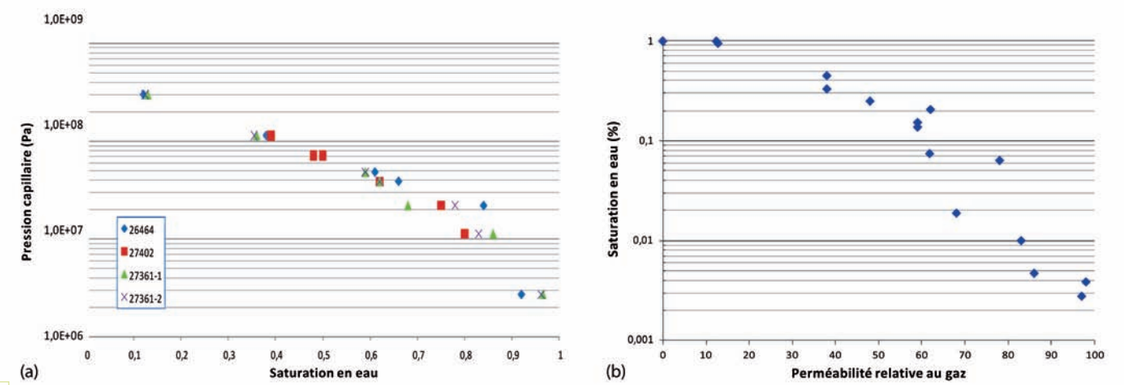


Figure 9 : perméabilité au gaz (a) et de la pression capillaire (b) en fonction de la saturation en eau

[3] British Geological Survey, CEA, EDF, Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, Laboratoire Environnement Géomécanique et Ouvrages, Institute of Geology and Geochemistry of Petroleum and Coal of Aachen University, Laboratoire des Matériaux et des Structures du Génie Civil, Laboratoire de Mécanique de Lille, Laboratoire de Mécanique des Solides, Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement, Université de Liège.

5 Les phénomènes de transferts
au sein d'un stockage

- **Les effets d'échelle et la variabilité des propriétés de transfert de la couche hôte**

La première campagne d'acquisition sur des échantillons prélevés à plusieurs profondeurs dans la couche hôte a mis en évidence une réelle variabilité des courbes de rétention capillaire, sans toutefois, permettre, à ce stade, d'établir une corrélation directe avec la minéralogie.

Le transfert des gaz dans l'argilite perturbée

Les argilites fracturées et endommagées en périphérie des ouvrages étant susceptibles de constituer des voies de transfert préférentielles pour le gaz, l'Andra a étudié : (i) le comportement au gaz d'une fissure, (ii) la migration de gaz dans un réseau de fissures, (iii) le couplage entre comportement mécanique, variation d'humidité et migration de gaz, (iv) la modélisation des processus de transfert dans l'EDZ.

- **Le transfert de gaz dans une fissure : mise en évidence d'une cicatrisation au gaz**

Les résultats concernent des échantillons fissurés, resaturés en eau, n'ayant pas travaillés en cisaillement et confinés à une contrainte isotrope proche de celle *in situ*. Ces échantillons présentent une pression d'entrée de gaz et une perméabilité à l'eau du même ordre de grandeur que celles obtenues sur un échantillon intact. Ce processus est rapide puisque la fissure n'est plus reconnue d'un point de vue hydraulique après quelques heures d'injection d'eau et s'apparente à une cicatrisation y compris vis-à-vis du gaz.

Les expérimentations sur de l'argilite soumise à des perturbations hydrique et mécanique cycliques ont permis d'obtenir : (i) des courbes de retrait/gonflement en fonction de la saturation en eau, en drainage et en cours d'imbibition, (ii) des données de résistance à la traction en fonction de la saturation.

Un dispositif de mesure des perméabilités au gaz dans une fissure en fonction de son ouverture et de l'humidité relative du gaz a été mis en place pour compléter les mesures à l'échelle d'une fissure. En parallèle, les transferts de gaz dans des milieux présentant une fissuration diffuse ont été caractérisés.

- **Des modèles en développement**

En support au programme expérimental, un modèle HM-gaz couplant la déformation et l'évolution de la perméabilité et prenant en compte l'impact du gaz sur l'EDZ a été développé sur les bases des expériences réalisées par le GL et des données acquises notamment dans le Laboratoire souterrain.

Les gaz dans les argiles gonflantes

Les mécanismes qui régissent l'entrée de gaz dans les argiles gonflantes ne sont pas encore bien connus. Ainsi, le programme de recherche inclut des expérimentations en laboratoire sur différents type d'argiles gonflantes (blocs précompactés, mélange poudre/pellets (figure-10b), briques...), des expérimentations *in situ* dans le Laboratoire souterrain et des modélisations. Des données sur la dynamique de gonflement en fonction de la reprise d'eau ont été acquises pour des bentonites compactées et sur les mélanges pellets/poudre (figure 10). Les essais visent à mesurer les pressions d'entrée de gaz, les courbes de rétention capillaire et la perméabilité au gaz en fonction des teneurs en eau.

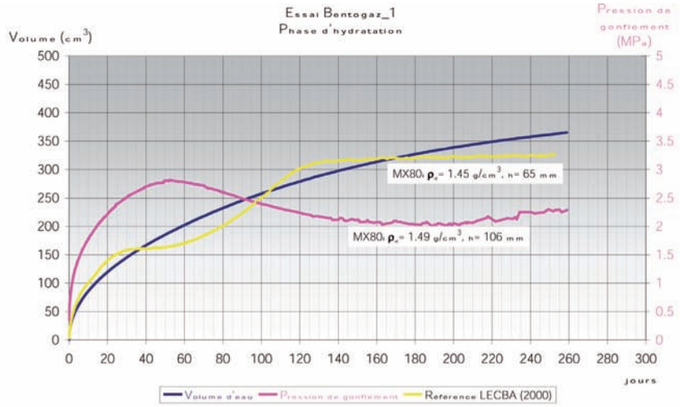


Figure 10 : évolutions de la pression de gonflement au cours de la phase de resaturation d'un mélange pellets/poudre

- **Le transfert de gaz aux interfaces**

Les interfaces ayant une influence potentielle directe sur la circulation du gaz dans le stockage sont : (i) l'interface métal/argilite autour des alvéoles HA; (ii) l'interface bentonite/argilite, au niveau des bouchons et scellements qui conditionne le transfert du gaz entre les différents compartiments du stockage. C'est pourquoi, différents types d'essais ont été systématiquement conçus afin d'étudier le comportement du gaz à ces interfaces.

- **L'interface métal/argilite**

L'originalité de l'expérimentation Argaz réside dans la génération d'hydrogène directement sur l'interface métal/argile et dans le suivi électrochimique de l'avancée du front de gaz dans l'échantillon ; l'ensemble étant complété par des mesures plus classiques de pressions et de débit de gaz. En effet, contrairement aux autres essais, il n'y a pas de volume tampon entre l'argilite et la source de gaz. L'H_2 produit n'a pas d'autre possibilité que de se dissoudre dans l'eau interstitielle, de pénétrer dans l'échantillon si la pression d'entrée de gaz est dépassée, ou de migrer le long de l'interface. Les essais préliminaires réalisés en 2009 ont montré la faisabilité, dans ce montage, de suivre par des mesures d'impédance la variation de saturation en eau dans l'échantillon. L'essai sera opérationnel courant 2010.

- **L'interface bentonite/argilite**

Les essais consistent à faire gonfler par un apport d'eau des cylindres de bentonite dans des tubes d'argilite instrumentés. L'injection de gaz dans le cylindre mixte bentonite/argilite totalement resaturé en eau fournit des indications sur le comportement au gaz de l'interface.

La première campagne d'essais avait permis d'obtenir des pressions d'entrée de gaz comprises entre 3,5 MPa et 4,5 MPa et de mettre en évidence un passage du gaz préférentiellement par l'interface bentonite/argilite et non dans l'argilite ou la bentonite massive. Les essais réalisés pour le GL vont compléter ces études (Davy *et al.*, 2009) : (i) en reprenant des protocoles d'injection de gaz similaires à ceux utilisés pour l'argilite saine afin d'avoir un base de comparaison commune, (ii) en mesurant la perméabilité au gaz de cette zone (iii) en caractérisant le comportement poromécanique de ce milieu composite.

Les axes d'études futures

À la fin de l'année 2009, le bilan réalisé sur ce thème constitue un point d'avancement d'une série d'actions pluriannuelles commencées en 2007. Les résultats acquis apportent des réponses concrètes à certains questionnements identifiés lors de la constitution du dossier 2005 (Andra, 2005).

La suite du programme comportera des études visant à conforter certains résultats majeurs déjà acquis tels que la pression d'entrée de gaz dans les argilites (probablement inférieure à 3 MPa), à compléter l'acquisition des paramètres nécessaires à la modélisation du transfert de gaz à l'échelle du stockage et à améliorer la compréhension de certains processus physiques.

L'accent sera mis en particulier sur : (i) le couplage entre les propriétés de transfert et la température, l'ensemble des essais ayant été jusqu'alors réalisés à température ambiante, (ii) les conséquences de l'anisotropie de l'argilite sur les propriétés de transfert comme la perméabilité au gaz, (iii) la vérification de la validité du modèle biphasique continu pour les argilites faiblement désaturées, (iv) la caractérisation de l'EDZ vis-à-vis de la problématique gaz.

Les résultats des expérimentations *in situ* sont disponibles depuis fin 2009. Leur interprétation renforcera la compréhension des transferts de gaz à grande échelle et apportera une base de comparaison importante par rapport à l'ensemble des essais réalisés sur des échantillons.

L'objectif est de disposer en 2012 d'un niveau de connaissance suffisant pour être en mesure de proposer, pour chacun des matériaux du stockage, d'un modèle de transfert prenant en compte les effets d'échelles, la variabilité des matériaux et les couplages majeurs ayant une influence sur le déplacement du gaz dans le stockage.

Les transferts dans la biosphère

Les calculs d'impact réalisés en 2005 ont mis en évidence l'importance de l'^{129}I, du ^{36}Cl et du ^{79}Se en tant que contaminants potentiellement relâchés dans l'environnement et contributeurs principaux à l'exposition du public.

Compte tenu de plus faibles incertitudes associées au transfert de ^{129}I dans la chaîne alimentaire, les nouvelles études mises en œuvre dans la période 2006-2009 ont privilégié le renforcement des connaissances sur le comportement du ^{36}Cl et du ^{79}Se dans l'environnement en ciblant les aspects suivants :

- depuis 2005, l'Andra utilise un modèle d'activité spécifique du ^{36}Cl (Modèle Chlore 36 Aqua_Cl36) dont le concept se fonde sur la connaissance des teneurs en Cl stable dans l'environnement et suppose un équilibre isotopique entre les compartiments de l'environnement (eau incidente, sol, plante, animaux) ; la consolidation du modèle d'activité spécifique pour diverses conditions environnementales nécessite des jeux de données appropriées, ce qui implique de réduire l'incertitude associée aux teneurs en chlore stable pour différents écosystèmes et à la spéciation du Cl (organique et inorganique) dans les sols.
- Dans les écosystèmes terrestres, la présence de sélénium à différents degrés d'oxydation et la disparité des valeurs du coefficient de distribution eau/sol [Kd] trouvées dans la littérature compliquent la paramétrisation des modèles de transfert ; une meilleure prise en compte de l'effet de la spéciation (sélénite/séléniate) du terme source sur la rétention de Se dans des sols d'intérêts est apparue nécessaire pour préciser le domaine de validité des paramètres de transfert (Kd, TF) dans les modèles.
- La dynamique de contamination des plantes par voie foliaire est mal documentée, en particulier pour l'iode, le chlore et le sélénium. En raison du manque de données qui caractérise le transfert foliaire pour ces éléments, il convient d'acquérir les valeurs du facteur de translocation spécifique à Se, Cl et I pour pouvoir préciser l'impact d'une contamination par irrigation.

[4] Subatech, Université de Pau, IRSN

Compte tenu de la diversité des thématiques, les différentes actions entreprises pour enrichir les connaissances correspondent à des études spécifiques confiées à des partenaires ou à des prestataires spécialisés dans le domaine d'intérêt[4]. À l'échelle internationale, la participation de l'Andra au forum BIOPROTA permet de solliciter et d'encourager des groupes de travail dédiés à des études particulières de synthèse ou à l'intercomparaison des modèles de transfert.

La chloruration de la matière organique des sols et la mobilité du chlore

Une meilleure description des flux et des changements de forme du Cl (organique et inorganique) dans les sols est essentielle pour renforcer la connaissance du cycle biogéochimique de cet élément et consolider les modèles de transfert. La chloruration de la matière organique des sols est un phénomène majeur qui en contrôle l'accumulation dans ce milieu. Afin de réduire l'incertitude associée à la variabilité des rapports Cl_{org}/Cl_{inorg} dans les sols en fonction du type d'environnement, un premier travail de recherche spécifique a été initié en 2008 avec l'étude « CHLORIC » en collaboration avec Subatech et le réseau Renecofor (ONF) sur des sols forestiers caractérisés par des propriétés contrastées. Des premiers résultats obtenus sur les humus (figure 11), il se confirme que l'accumulation du Cl dépend largement de la fertilité de la station et du turnover de la matière organique. Les humus de mauvaise qualité caractérisés par un faible coefficient de décomposition peuvent agir comme un puits de chlore sous forme organique. On estime qu'à long terme, une accumulation maximum potentielle correspond à un taux net de chloruration de la matière organique de 0,1g $Cl.m^{-2}.an^{-1}$.

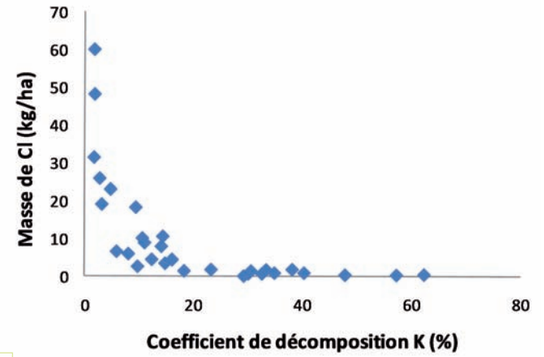


Figure 11 : pool de chlore en fonction du coefficient de décomposition de l'humus d'une série de sols forestiers aux propriétés contrastées

Les teneurs en chlore organique et inorganique dans les horizons sous-jacents du profil de sol sont en cours d'analyse ; d'autres échantillons (sol et végétation) issus d'écosystèmes typiques du secteur de Meuse/Haute-Marne ont aussi été collectés et seront traités en 2010. La détermination du temps de résidence de cet élément dans tout le profil de sol sera utilisée pour compléter la hiérarchisation des écosystèmes en termes d'accumulation du Cl.

Parmi les études en perspective, un post-doctorat prévu en 2010-2011 viendra renforcer les connaissances acquises dans le projet CHLORIC en intégrant dans la base de données une gamme de valeurs pour des sols de culture et de prairie qui sont probablement caractérisés par une dynamique d'accumulation du chlore très différente. Par ailleurs, une collection de données partagées avec SCK•CEN sera utilisée pour décrire quantitativement le cycle du Cl dans un peuplement de conifères et nourrir un modèle « forêt » adéquat pour la biosphère froide.
La vérification de la robustesse du modèle d'activité spécifique pour différents écosystèmes nécessitera une comparaison avec des modèles de complexités différentes. Ces études alimenteront une synthèse des jeux de données produits pour caractériser le cycle du chlore dans différents environnements spécifiques.

Les phénomènes de transferts
au sein d'un stockage

La spéciation du sélénium dans les sols et les facteurs de rétention

Pour évaluer l'impact d'une contamination du sol par le séléniate (forme hypothétique majeure dans le terme source), l'Andra a lancé en 2007 (Tolu, thèse en cours), en partenariat avec l'IRSN, l'étude du « Devenir du séléniate dans les sols : cinétique de réduction et de mobilité ». Dans une première approche, des tests de sorption/désorption en batch ont été menés avec du séléniate et diverses matrices minérales pures (silice, goethite, hydroxyde d'aluminium, bentonite et carbonate), un acide humique et deux sols (acide et alcalin) pour tester la capacité de sorption des divers composants. Il apparait que la goethite (à pH acide) et l'hydroxyde d'aluminium sont les seules phases pures capables d'adsorber significativement le séléniate. Indépendamment du pH des sols, cette propriété expliquerait un taux de sorption supérieur observé dans le sol alcalin, plus riche en oxyhydroxyde d'aluminium que le sol acide. Dans ce cas, une hystérèse entre sorption et désorption suggère une irréversibilité de la réaction de sorption, probablement associée à la réduction du séléniate ou à un changement de complexe surfacique.

L'étude plus détaillée de l'« Influence de paramètres abiotiques et biotiques sur la spéciation de sélénium présent dans les sols et son transfert » fait l'objet d'une nouvelle thèse Andra initiée en 2008 avec le LCABIE de l'université de Pau. Trois jalons s'avèrent opportuns dans ce travail :

- les développements analytiques permettant la spéciation de Se dans le sol ;
- la relation spéciation/mobilité (Kd) qui sera traitée à partir d'une collection de sols adéquats impliquant un gradient de matière organique qui reflète l'effet du climat et de la végétation ;
- la relation spéciation/biodisponibilité qui se fondera sur l'utilisation d'un biotest « sol-plante » comme modèle d'étude simplifié.

Les développements analytiques ont été appliqués dans un premier temps à un sol de prairie. L'analyse de spéciation du Se dans ce sol ont permis de distinguer et de quantifier des espèces inorganiques (Se(IV) et Se(VI)) et des acides aminés séléniés dans les phases dissoutes après extraction (eau ; $CaCl_2$; KH_2PO_4/K_2HPO_4 ; HNO_3 ; NaOH). L'espèce majoritaire présente dans les extraits est Se(IV) (>80 %). La présence en faible quantité de Se(VI) et de sélénocystine a été observée dans la phase dissoute seulement pour les extractions avec l'eau et $CaCl_2$.

Après les développements analytiques nécessaires pour maîtriser la spéciation du sélénium dans les sols, la suite des travaux sera axée sur l'acquisition de Kd spécifiques au sélénite et séléniate pour différents sols de Meuse/Haute-Marne avec une identification des formes dominantes et la quantification de la fraction colloïdale. Le domaine de validité du Kd et du TF sera revisité en fonction du terme source et du temps de réaction du Se dans le sol. Des constantes cinétiques de stabilisation du séléniate dans les sols seront proposées avec, si besoin est, un modèle alternatif au modèle Kd seul (modèle Kd + cinétique).

L'irrigation et le transfert foliaire

Une étude *in situ* du transfert foliaire de ^{129}I, ^{36}Cl et ^{79}Se vers les organes consommables de 4 plantes cultivées a été mise en œuvre dans la zone de Tchernobyl dans le cadre d'une collaboration Andra-IRSN (2007-2010). Les premiers essais sur le terrain ont été conduits en 2008 pour éprouver le protocole initial. Des résultats préliminaires ont été obtenus pour le ^{36}Cl en termes de facteur de translocation suite à une aspersion ponctuelle. Le transfert de 5 à 17 % d'une contamination foliaire initiale vers les parties comestibles à la récolte classerait le chlore parmi les éléments qui ont un comportement « absorption/mobilité dans la plante » très élevé.

Les premiers résultats relatifs aux tests de transfert foliaire doivent être confirmés par plusieurs expériences en conditions de plein champ lors des prochains cycles de culture. À terme (2011), des valeurs inédites du facteur de translocation seront disponibles pour consolider l'évaluation des transferts de I, Cl et Se à partir de l'eau d'irrigation.

Références bibliographiques :

> Andra (2005) Dossier 2005
Tome : Évolution phénoménologique du stockage géologique.
Andra édit. ISBN 2-916162-21-6

> M. Descostes, J. Klein, B. Grenut, J. Radwan, D. Lebeau, et A. Dannoux. Sorption and diffusive parameters of EDTA and ISA through the Callovo-Oxfordian argillite (Meuse/Haute-Marne, France). Soumis à Applied Geochemistry.

> Jakob, A., Pfingsten, W., Van Loon, L.R. (2008)
Effects of sorption competition on caesium diffuson through compacted argillaceous rock a case study.
Geochimica et Cosmochimica Acta

> Mazurek M., Alt-Epping P., Bath A., Gimmi T., Waber N. (2009), Natural Tracer Profiles across Argillaceous Formations: The CLAYTRAC Project. NEA N°6253, 361p.

> Menut D., Descostes M., Meier P., Radwan J., Mauchien P., Poinsot C. (2006), Europium migration in argilaceous rocks: on the use of micro Laser-induced Breakdown Spectroscopy as a microanalysis tool. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. (13), p. 918-932

6 L'observation-surveillance
d'un stockage et de son environnement

L'observation-surveillance[1] d'un stockage contribue à sa gestion, à sa sécurité et à sa sûreté en vue de l'objectif fondamental de protection de l'homme et de l'environnement. Elle concerne, à la fois les installations et infrastructures industrielles et l'environnement naturel de surface.
Dans le cadre du projet HA-MAVL, le monitoring doit intégrer la spécificité du stockage géologique, notamment l'échelle de temps séculaire ; elle intervient donc en appui du développement du stockage et au processus décisionnel associé, en particulier sur la période de réversibilité.

La stratégie et les techniques d'auscultation à long terme[2]

L'observation-surveillance du stockage géologique profond de déchets HA-MAVL a pour objectif de suivre l'évolution des différents ouvrages afin de s'assurer de leur durabilité ou de détecter, le cas échéant, une nécessité d'action pour préserver les différents choix de gestion. Elle doit être en mesure d'apporter des informations utiles pour comprendre l'évolution des processus qui s'y déroulent, pour la gestion et la prise de décision associées aux exigences de réversibilité, mais également pour contribuer à la transparence de ces processus. Elle contribue ainsi à conforter la confiance dans la sûreté à long terme en vérifiant la cohérence avec les calculs réalisés sur les premières décennies de la vie du stockage.

Le programme mis en place par l'Andra vise à concevoir la stratégie et les dispositifs d'auscultation du stockage. Les recherches et développements, ainsi que les essais de qualifications, sont menés par l'Andra au sein du groupement de laboratoires « R&D moyens et stratégie d'auscultation », fédérant depuis mi-2008, universités, établissements publics[3] et entreprises. Les axes de recherche du GL couvrent tous les domaines de mesures THMC (Thermique-Hydraulique-Mécanique-Chimique) pour analyser les processus se déroulant dans le stockage et comprendre ainsi le comportement global de l'ouvrage. Il s'agit également, à travers ces développements, de répondre aux exigences de durabilité des moyens de mesures, de réaliser le durcissement des capteurs dans des conditions environnementales contraintes (thermicité, rayonnements, etc.), d'évaluer leur vieillissement et enfin, de maîtriser les dérives temporelles des capteurs par une qualification et un étalonnage métrologique et des essais menés dans la durée.

Les conditions et les moyens d'auscultation

Le dispositif d'auscultation doit être adapté à la conception des ouvrages (figure 1), à l'évolution de l'architecture et à la fermeture par étapes des ouvrages. Il doit apporter des informations techniques tout au long du processus de stockage, avec deux spécificités :

- la longévité, d'ordre séculaire, durée à la fois très longue devant la durabilité des dispositifs d'auscultation et très courte en regard de certains des phénomènes en jeu ;
- les ouvrages les plus sensibles, les alvéoles de stockage, une fois instrumentées et exploitées, ne seront plus accessibles que par des moyens robotisés dès la mise en place du premier colis.

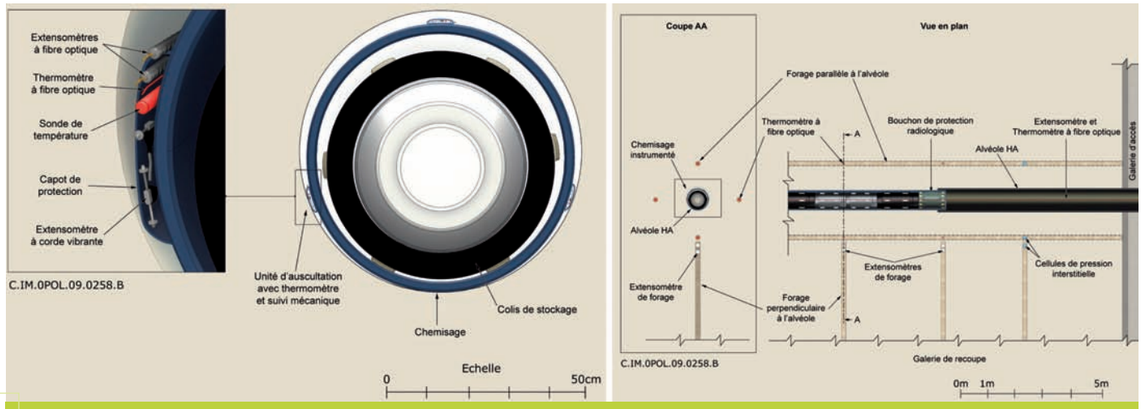


Figure 1 : exemple de dispositions prévues pour l'observation-surveillance d'alvéoles HA

[1] Les termes « observation » et « surveillance » sont utilisés pour traduire le terme anglais de monitoring. On entend ici par « surveillance » le contrôle permanent du déroulement d'un processus, du bon état de dispositifs, de systèmes, le respect d'un domaine de fonctionnement. On entend par « observation » l'action de considérer avec attention des choses, des êtres, des événements. L'observation et la surveillance reposent sur l'« auscultation », ensemble de dispositifs permettant l'acquisition des mesures, ainsi que leur analyse et leur interprétation. Un dispositif d'auscultation est rarement utilisé isolé, plusieurs capteurs et méthodes non destructives sont associés pour former un système global indispensable à des interprétations fiables

[2] L'Andra coordonne le projet MoDeRn [Monitoring Developments for safe Repository operation and staged closure - http://www.modern-fp7.eu/], cofinancé par la Commission européenne dans le cadre du programme EURATOM (7e PCRD) auquel participent 17 partenaires présents en Europe, États-Unis et Japon

[3] EPST, EPIC, Université Technologique de Troyes, Université St Etienne (Laboratoire Hubert Curien), LAAS-CNRS, LCPC, Inéris, LNE, BRGM, EDF R&D, société PACT, société Cémentys

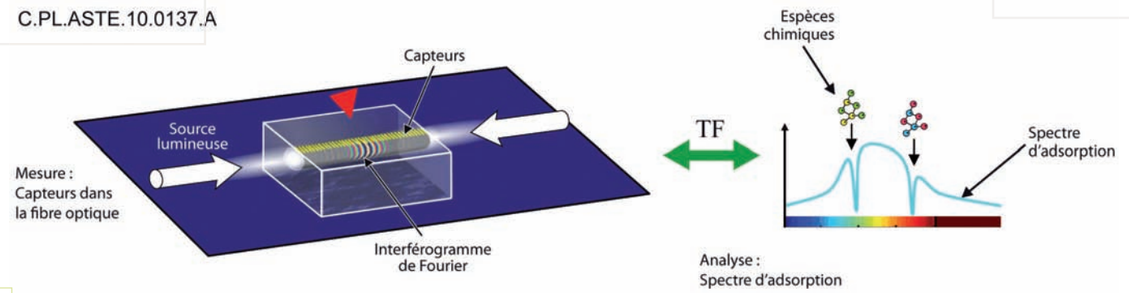


Figure 2 : capteur à fibre optique exploitant l'absorption du spectre lumineux pour identifier et quantifier la présence de certaines molécules

Pour concevoir un système d'observation-surveillance durable, la stratégie repose sur la mise en œuvre d'approches d'auscultation complémentaires et redondantes qui prennent en compte les contraintes de mise en œuvre et les coûts afférents.

Le dispositif d'auscultation doit être robuste et fiable pendant des durées décennales et dans des conditions d'environnement agressives (rayonnement, température). À cette fin, de nombreux retours d'expériences d'ouvrages de génie civil instrumentés ont été recensés et analysés pour les mesures ponctuelles de température et de déformation : barrages hydrauliques (capteurs depuis plus de 50 ans), Centre FMA de l'Aube (plus de 15 années de mesures disponibles), Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne équipé de plus de deux mille capteurs dans le contexte spécifique des argilites du Callovo-Oxfordien.

Mais l'auscultation vise aussi le suivi de l'hygrométrie et de la chimie des matériaux ainsi que le suivi de l'atmosphère des alvéoles exploitées. Une telle disponibilité de moyens durables n'étant pas assurée pour ce type de mesures, de nouvelles technologies seront intégrées progressivement pour améliorer la qualité globale du dispositif.

Les pistes de recherche et de développement identifiées comme prioritaires concernent la détection de certains gaz, la mesure de saturation de la roche ou du béton et le suivi des évolutions chimiques des matériaux ou de l'atmosphère des alvéoles.

La R&D pour se doter des outils adaptés

- **Les capteurs chimiques**

Le développement de capteurs chimiques plus durables et fiables est en cours pour le suivi localisé de l'atmosphère des alvéoles et de l'évolution chimique des matériaux les composant ou les entourant. Les capteurs actuels de mesure de la teneur en hydrogène de l'atmosphère nécessitent une maintenance et/ou des étalonnages réguliers. Par conséquent, seule une mesure par piquage sur la ventilation peut être envisagée à ce stade.

L'Andra a lancé les premiers développements de capteurs chimiques viables adaptés à l'environnement du stockage et répondant au critère de durabilité. Une étude porte sur la conception d'un spectromètre optique miniature (figure 2) réalisé à partir de composants semi-conducteurs et de nanotechnologies.

Le travail de modélisation réalisé depuis deux ans a servi à définir un premier ensemble de paramètres optogéométriques qui a abouti à la réalisation de deux premiers démonstrateurs. Outre leurs perfectionnements, la suite du projet portera sur la conception et la réalisation de la partie sensible correspondante.

- **Les capteurs thermomécaniques**

Plusieurs technologies permettent d'effectuer des suivis thermomécaniques en fonction du milieu d'emploi (béton, argilites, argilites remaniées). Les extensomètres à corde vibrante (ECV) ont été retenus car ils font l'objet d'un retour d'expérience très favorable depuis près de 70 ans (Lamour *et al.*, 2009). L'Andra réalise des tests en ambiance environnementale contrôlée et sur chantiers réels depuis près de 15 ans. L'Agence entreprend aussi le développement et la qualification de capteurs à fibre optique capables de fournir des mesures thermomécaniques de façon continue ou répartie sur des longueurs élevées (Dewynter-Marty *et al.*, 2008, Dubois *et al.*,2009).

Outre ces études en laboratoire, des capteurs à fibre optique ont été noyés dans le dallage de l'Espace technologique de Saudron (figure 3) et en surface d'une poutre métallique de la charpente à l'été 2008 pour réaliser des mesures réparties de déformations. L'Andra disposera ainsi d'un recul de près de 15 ans sur la durabilité de ces capteurs à l'horizon de la mise en service industrielle du stockage.

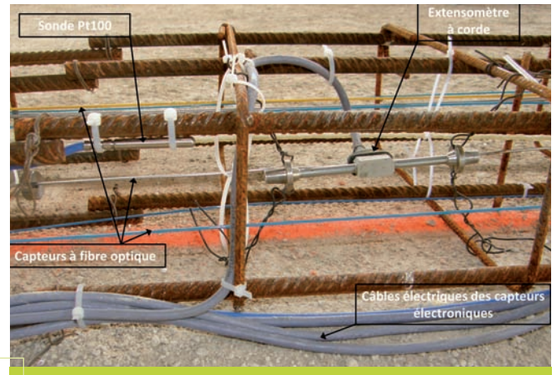


Figure 3 : ECV et capteurs à fibre optique avant coulage du béton dans un ouvrage pour mesures de température et déformation

Les recherches au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne vont s'intéresser à l'instrumentation du chemisage métallique d'une alvéole HA, fin 2010, et d'une section de galerie à revêtement béton type MA-VL en 2011. Par ailleurs, le durcissement des technologies aux radiations est engagé, tant pour les capteurs récents à base de fibres optiques, que pour des capteurs très éprouvés tels que les extensomètres à corde vibrante.

- **Les enregistrements et les transmissions sans fil**

En plus de l'adaptation ou de la qualification de systèmes et d'instruments éprouvés, l'Andra engage des recherches sur de possibles innovations, tels que les systèmes sans fil, avec deux types d'actions :

- des développements permettant le suivi à distance du stockage, *via* la transmission sans fil d'informations à travers la roche (ou un scellement lorsque l'alvéole sera scellée) ;
- des développements sur les réseaux de capteurs sans fil qui pourraient permettre un suivi en phase d'exploitation de l'alvéole.

La propagation des ondes étant perturbée par l'environnement confiné, il s'agit d'évaluer l'impact des trajectoires multiples sur la qualité des transmissions. De nouveaux tests de transmissions sans fil en galeries souterraines ont été engagés à la fin 2009, pour étudier cette question dans le cas des ondes électromagnétiques. Les recherches ont d'ores et déjà montré la faisabilité de la transmission sans fil à travers 25 m de roche dans le Laboratoire souterrain. Ces essais seront poursuivis en 2010 et 2011.

L'autre limitation de cette technique concerne la distance de transmission possible du signal et le besoin d'embarquer l'énergie nécessaire au fonctionnement en zone fermée (en l'absence de câble fournissant cette énergie). Les développements en cours comparent deux technologies disponibles et évaluent leurs performances sur la distance de transmission, la durée de fonctionnement et la gestion de l'énergie disponible.

D'autres études portent sur le potentiel de la transmission sans fil en exploitation. Les technologies sans fil, dans l'idéal passives, présentent un intérêt par leur miniaturisation et leur faible perturbation potentielle vis-à-vis des critères de sûreté. Un projet a été lancé fin 2009 pour évaluer le potentiel d'un réseau de capteurs sans fil dans des installations souterraines de stockage. Cette évaluation de la capacité à transmettre dans le stockage se fondera sur des essais de transmission qui seront réalisés en souterrain. En fonction de la technologie retenue, cette thématique pourrait donner lieu à des recherches sur la récupération des énergies, notamment thermique (les colis de déchets dégagent pour la plupart de la chaleur) ou sur des technologies de capteurs passifs ne nécessitant aucune énergie.

L'observatoire pérenne de l'environnement (OPE)

La mise en place de l'Observatoire

Afin d'assurer le suivi environnemental d'une infrastructure industrielle telle qu'un stockage dont la durée d'exploitation sera, *a minima*, de l'ordre du siècle, il est apparu nécessaire à l'Andra de créer un véritable pôle de recherche en environnement reposant sur un réseau de mesures diversifié et durable qui va bien au-delà des obligations réglementaires imposées aux installations industrielles. Ainsi, l'Observatoire pérenne de l'environnement (OPE) a été mis en place progressivement depuis 2007 pour décrire précisément l'environnement avant la construction du stockage et pour en suivre l'évolution.

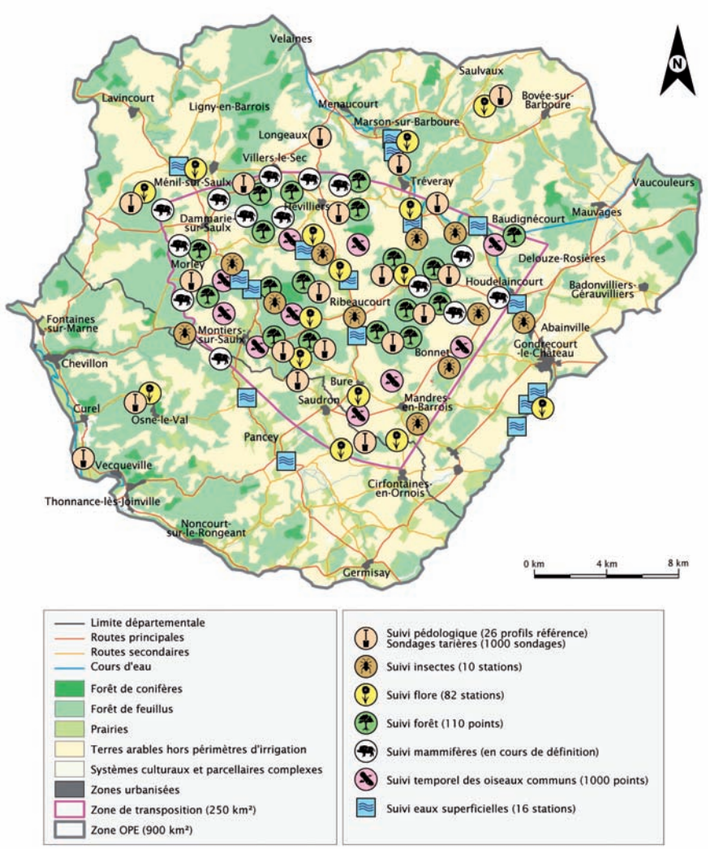


Figure 4 : carte des suivis et des inventaires de la zone OPE sur le centre de Meuse/Haute-Marne en 2008

Les principales missions de l'OPE, sont :

- d'établir, sur dix ans, un état des lieux représentatif de l'environnement avant la création du stockage ;
- de préparer le plan de surveillance qui accompagnera la gestion réversible du futur stockage en définissant les éléments, paramètres et moyens de mesure les mieux adaptés ;
- de comprendre les interactions entre les différents milieux environnementaux et de suivre leur évolution en vue de connaître précisément l'impact du futur stockage.

L'originalité de l'OPE repose sur un programme d'observation multidisciplinaire (eau, air, sols, flore, faune et homme) à une échelle centennale. Le secteur de référence couvre une superficie d'environ 250 km^2 autour de la zone proposée pour l'implantation des installations du stockage, il est élargi à un territoire d'environ 900 km^2 (figure 4) pour adapter ses contours aux repères naturels (cours d'eau, limites de forêt...) ou anthropiques (routes...).

La diversité des sols et des paysages de ce territoire et la présence de trois écosystèmes : forêt, prairie et cultures, présentent un réel intérêt pour y mener des programmes scientifiques. Pour cela, l'OPE mobilise déjà de nombreux bureaux d'études spécialisés et une dizaine de laboratoires de recherche tels que l'INRA, le Muséum national d'histoire naturelle, l'université de Lorraine, l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire ou le CNRS. Il s'appuie sur l'ONF, les fédérations de chasse et de pêche et les chambres d'agriculture locales. Dans la majorité des domaines, l'OPE conduit ses études selon les mêmes méthodes que les réseaux nationaux et européens de surveillance environnementale.

L'OPE est, actuellement, en phase d'acquisition de données. Afin de gérer et de faciliter la diffusion des résultats recueillis pour l'OPE, une base de données DESIREE a été développée à partir de l'application utilisée depuis plusieurs années pour les centres de surface Andra. Cette base a été couplée à un système d'information géographique pour faciliter l'accès aux données. Les premiers résultats sont en cours d'analyse et feront l'objet d'une valorisation scientifique.

Une « écothèque » **[voir encadré ci-dessous]** est prévue afin de conserver à long terme tous les échantillons prélevés dans le cadre de l'Observatoire.

La mémoire de l'environnement

Afin de garantir la traçabilité des mesures environnementales, en particulier celles permettant de définir l'état initial du site de Meuse/Haute-Marne, il est prévu d'ouvrir une « écothèque » dès le début 2013. Il s'agit de conserver à long terme les échantillons agricoles (eau, air, sols, herbes, céréales, légumes, lait, fromage, œufs, volailles, bœufs) et forestiers (champignons, lichen, mousses, insectes, vers de terre, feuilles, aiguilles, bois, sols, gibier) prélevés dans le cadre de l'Observatoire.

Outre la traçabilité, cet établissement permettra de suivre l'évolution des teneurs en contaminants sur des chroniques de plusieurs décennies et de réaliser des analyses rétroactives sur les échantillons préservés, si un besoin futur se présentait (par exemple, détection d'un type d'impact non recensé lors de l'état initial) ou avec de nouvelles techniques analytiques.

En attendant sa construction et mise en service sur la commune de Bure, une conservation temporaire est actuellement assurée par l'IPREM au LCABIE à Pau qui dispose de l'expérience et des moyens de conservation.

Trois modes de conservation sont développés selon les matrices à conserver :

- conditions sèches pour les sols et végétaux secs dans une salle dédiée appelée « pédothèque » ;
- cryogénie (-150°C) pour les matrices biologiques broyées et certains sols (photo ci-dessous) ;
- surgélation (-80°C) pour les eaux et certaines matrices biologiques entières (non traitées). ■

Conservation d'échantillons en Allemagne dans de l'azote liquide à -150°C

Au delà des perspectives décrites précédemment par milieu, des stations pérennes viendront compléter prochainement ce réseau d'observation : des stations de mesure des flux de matières et d'énergie entre le sol, l'eau, l'air et la biosphère (2010-2011), une station atmosphérique de suivi climatique et de surveillance de la qualité de l'air (2010), des stations de mesure en continu sur les cours d'eau (2010). Enfin, les moyens de télédétection satellitaire et aéroportée seront mis en œuvre.

La climatologie et la surveillance de la qualité de l'air

Une première analyse de la climatologie régionale a été réalisée à partir des données historiques des stations de Météo-France et de celle du Laboratoire souterrain. Elle a été complétée par la définition de modèles destinés à mieux connaître l'évolution du climat local.

Une station atmosphérique pour le suivi de l'air à long terme enregistrera la température, le taux d'humidité, la force des vents, la concentration de gaz à effet de serre au sol et à différentes hauteurs d'un pylône de 120 mètres. D'autres mesures sont prévues pour identifier les propriétés des poussières et les concentrations des principaux gaz. Des relations seront recherchées entre la qualité de l'air et la santé des écosystèmes et de l'homme. En effet, l'ozone, le monoxyde et le dioxyde de carbone, le méthane et le dioxyde de soufre ont une influence directe sur l'environnement (accroissement de l'effet de serre, réduction de la couche d'ozone, pluies acides...) et la santé de l'homme (atteinte du système respiratoire notamment).

L'Observatoire utilisera aussi des bio-indicateurs. Par exemple, le suivi de la qualité chimique et radiologique des lichens permet de mesurer les retombées atmosphériques éventuelles et notamment celles du tritium et du carbone14.

L'état de référence des sols

La caractérisation des sols constitue un des premiers volets d'études menées par l'Observatoire pérenne de l'environnement avec la réalisation de la carte pédologique de l'ensemble de la zone. Pour en préciser la qualité et l'évolution à l'échelle de la décennie, plusieurs suivis physico-chimiques ont été associés à la cartographie en renouvelant, en 2008, les analyses sur les profils de référence effectués en 2001et 2002.

L'Andra, étant partenaire du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) mis en place en 2002 par le Groupement d'Intérêt Scientifique SOL (GISSOL) de l'INRA d'Orléans, réalise sur ces bases un état de référence de la qualité des sols depuis 2009.

Les mesures radiologiques réalisées pour compléter l'état de référence donnent des résultats d'une radioactivité naturelle (potassium, thorium, uranium, béryllium) très faible par rapport à des régions granitiques ou volcaniques comme la Bretagne, le Massif central ou les Vosges. Pour un des sols, une activité significative en plomb, elle aussi d'origine naturelle, a été détectée.

Par ailleurs, plusieurs sites en forêt et en agrosystèmes ont fait l'objet de mesures de la pédofaune, indicateur de la qualité des sols, en retenant les techniques d'étude de la biodiversité proposées par le programme européen ENVASSO. Ce premier état de référence de la biologie des sols a révélé des différences significatives en fonction de leur nature et de leur végétation d'une part, et des pratiques agricoles d'autre part. Globalement, les trois grands types d'usages (prairies, cultures et forêts) sont bien discriminés par les paramètres biologiques avec la mise en évidence d'une forte influence des pratiques agricoles.

Le suivi des eaux

Depuis 1999, un suivi régulier de la qualité physicochimique, microbiologique, et hydrobiologique est réalisé sur les eaux superficielles et souterraines, dans le cadre du plan de surveillance du Laboratoire souterrain. Un réseau de surveillance des paramètres quantitatifs et qualitatifs des eaux a été mis en place d'octobre 2007 à décembre 2008 sur la zone de l'OPE au niveau de 16 points répartis sur les rivières de la Saulx, de l'Orge, de l'Ornain, de l'Ormançon, de la Maldite et du canal de la Marne au Rhin. Ce suivi chimique et biologique a été complété par des mesures sur des sédiments et des mousses aquatiques (bryophytes).

6 L'observation-surveillance
d'un stockage et de son environnement

Il apparaît une évolution contrastée des eaux superficielles selon le type considéré. La qualité générale est marquée par les teneurs en nitrates, en liaison avec le contexte agricole de la zone d'étude. La qualité bactériologique et la qualité pesticide et micropolluant est très variable selon les stations étudiées.

Pour les eaux souterraines, l'importance des contaminations est contrastée pour certains pesticides et pour l'antimoine, élément chimique dont l'origine industrielle est suspectée. Enfin, le suivi des eaux superficielles et souterraines a été complété par un fond radiologique dont les résultats sont compatibles avec les valeurs habituellement rencontrées.

En 2009, une étude complémentaire a été engagée avec la collaboration de l'Agence de l'eau Seine-Normandie pour mesurer la variabilité spatio-temporelle, par microbassin, des principaux cours d'eau de la zone. Les résultats serviront à la définition d'un réseau pérenne de surveillance de la qualité des eaux qui, par ailleurs, pourrait faire partie des nouveaux mécanismes des agences de bassin pour l'application de la directive cadre sur l'eau. Dès 2010, une étude plus globale des milieux aquatiques (faune/flore et bio-accumulateurs) sera associée à ce suivi de la qualité des eaux superficielles.

La biodiversité

Les équipes de l'Observatoire ont identifié quatorze espèces végétales remarquables et/ou protégées dans les milieux ouverts (prairies, fourrés, friches...) et mis en évidence la présence d'une nouvelle plante remarquable, l'orobanche du thym (figure 5) qui est une plante parasite.

Au delà de la recherche d'espèces protégées, de nouveaux inventaires et suivis de la flore permettent de trouver des espèces caractéristiques de la santé des écosystèmes, de suivre l'évolution de la biodiversité au cours du temps ou encore de déterminer des plantes bio-accumulatrices.

Plusieurs inventaires faunistiques sont actuellement conduits selon les protocoles du Muséum national d'histoire naturelle, en particulier le suivi temporel des oiseaux communs. Ainsi 85 espèces d'oiseaux ont été identifiées, preuve de la richesse ornithologique de la zone.

De même, douze espèces d'amphibiens pour lesquelles des mesures de conservation ont été définies au niveau européen, national ou régional ont été observées dans la zone d'étude.

Un inventaire des grands mammifères (cerf, chevreuil et sanglier) a été mené également sur l'ensemble de la zone en 2008 ; plusieurs espèces protégées y ont été découvertes, comme le chat forestier ou les chiroptères telle que la petite chauve-souris rhinolophe.

L'objectif de ces études est surtout de mettre en évidence les populations les plus vulnérables aux changements du milieu et les populations charnières dans la chaîne alimentaire. Des nouvelles études seront menées pour compléter ce travail d'inventaire dans les milieux encore méconnus telle la faune aquatique et apicole.

Figure 5 : orobanche, espèce remarquable, découverte sur le secteur

7 L'évaluation
des performances d'un stockage

Un des principaux objectifs des recherches menées dans le cadre du projet HA-MAVL est d'établir l'évolution phénoménologique attendue du stockage et du milieu géologique environnant, depuis la période d'exploitation séculaire jusqu'à la phase de postfermeture, de l'ordre du million d'années, afin de vérifier que le stockage répond aux objectifs de conception et de sûreté.

Cet objectif général implique de comprendre le fonctionnement d'un système qui, d'une part, fait intervenir les multiples composants du stockage et les différentes formations géologiques, dont le Callovo-Oxfordien et, d'autre part, de nombreux phénomènes [Thermiques, Hydrauliques, Mécaniques, Chimiques (et Radiologiques) - THMC(R)] et leurs interactions. *In fine*, il s'agit d'évaluer l'évolution du système au regard des fonctions allouées aux différents composants du stockage et au milieu géologique. Que ce soit dans une logique d'analyse du fonctionnement phénoménologique ou dans un but d'évaluation des fonctions, le travail de description repose sur une base solide de connaissances des processus, et leur capitalisation dans des outils de simulation, principal moyen d'accéder à la quantification temps-espace de l'évolution du stockage. À la suite du Dossier 2005, l'Andra s'est engagée dans un important programme de simulation pour répondre aux objectifs du dossier de DAC de 2014, avec une représentation des phénomènes liés au stockage :

- en période d'exploitation, la description fine des processus majeurs au regard de la durabilité des composants du stockage et de la gestion progressive et réversible du stockage ;
- en phase postfermeture, la consolidation des acquis du Dossier 2005 Argile et notamment une représentation plus complète et détaillée des phénomènes.

En parallèle, l'Andra a poursuivi le développement de ses outils de simulation **[voir encadré ci-dessous]** afin de pouvoir intégrer une phénoménologie dans les évaluations de performance/sûreté du stockage.

Le développement des outils de simulation

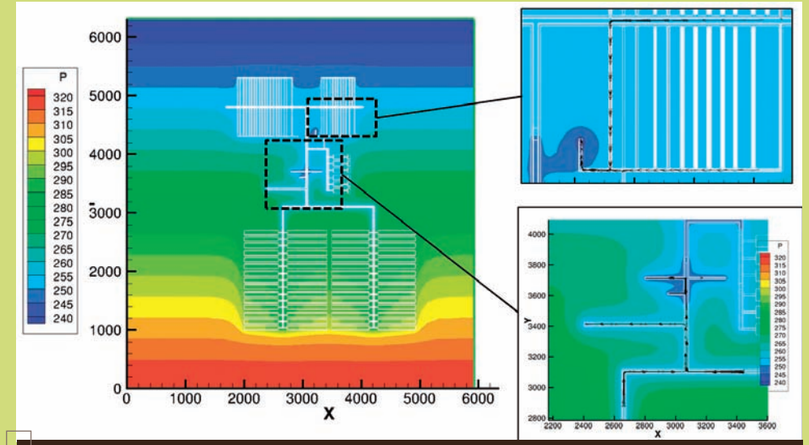
La maîtrise des processus liés au stockage s'appuie sur un important programme de simulations, en lien étroit avec le développement d'outils numériques et l'acquisition de connaissances scientifiques et technologiques, notamment les données des expériences engagées dans le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne.

En raison des échelles de temps considérées, de la nature des phénomènes physiques et des composants multiples d'un stockage, les outils et les méthodes de résolution numériques sont des outils privilégiés pour répondre aux besoins de conception, de représentation de l'évolution phénoménologique et d'évaluation de sûreté des stockages et des entreposages de déchets radioactifs. Si l'Andra confie des travaux de simulation aux organismes de recherche publique et aux entreprises privées, elle développe, depuis plus de dix ans, des compétences et des capacités de calcul en simulation numérique.

L'accroissement et l'approfondissement continus des connaissances phénoménologiques, ainsi que le besoin de représentations de plus en plus fines du fonctionnement des installations de stockage (figure ci-contre) et d'entreposage dans le temps, par exemple en support à la réversibilité et à la durabilité du stockage géologique de déchets HA-MAVL, ont conduit l'Agence à engager, dès 2006, une nouvelle étape de développement de ses outils de simulation sur trois thématiques essentielles : 1) l'hydraulique et le transport en saturé, 2) le transport diphasique multi-composants gaz et 3) le transport réactif. Cette évolution s'inscrit dans la voie du calcul haute performance avec (i) l'ajout de fonctionnalités phénoménologiques, et plus particulièrement le traitement des couplages entre thermique-hydraulique et transport de soluté-gaz et la capacité de représenter les évolutions temps-espace des propriétés d'écoulement et de transport en lien avec les processus chimiques et mécaniques, (ii) la mise en œuvre du calcul parallèle, (iii) la définition et la gestion des gros maillages (jusqu'à 12 millions à ce jour), (iv) l'ajout de nouvelles méthodes d'analyse, (v) l'acquisition de machines de calcul plus performantes (type multiprocesseurs, GPU, grille de calcul...) et (vi) l'optimisation des outils de simulation (parallélisme, décomposition de domaine, optimisation algorithmique...).

La stratégie de développement retenue par l'Andra vise non seulement à consolider et à renforcer les capacités des outils existants (la plate-forme Alliances, les codes Porflow®, Cast3m®, Traces®, PhreeqC®...), mais aussi à développer ou à acquérir de nouveaux outils.

Grâce à la définition plus précise et détaillée du stockage obtenue (exemple des résultats hydrauliques en phase d'exploitation – figure ci-dessous), les nouvelles itérations sont mieux adossées à ce que serait l'exploitation industrielle d'un stockage : gestion par étape, développement progressif subordonné à des processus décisionnels (temps d'attente, rythme d'exploitation...).



Exemple de résultats hydrauliques pour des écoulements orientés selon les galeries principales du stockage vers les puits de retour d'air

La maîtrise des processus d'évolution des composants du stockage et de son environnement géologique

L'analyse des différents processus à l'origine de l'évolution des phénomènes qui se produiront au sein du stockage pendant la période d'exploitation et après sa fermeture, a pour objectif, *in fine*, d'identifier l'origine du relâchement des radionucléides par les colis de déchets, les voies de leurs transferts dans le stockage, puis leur migration dans l'environnement géologique sur des échelles de temps pouvant atteindre le million d'années. Pour déterminer, de façon la plus exhaustive possible, les différents phénomènes qui se produiront, l'Andra a développé une méthode analytique de l'évolution du stockage : l'APSS **[voir encadré ci-dessous]**.

L'analyse phénoménologique des situations de stockage

Pour appréhender le fonctionnement complexe d'un stockage, l'Analyse Phénoménologique des Situations de Stockage [APSS] développée par l'Andra est fondée sur une segmentation du temps et de l'espace, en « situation », chacune d'elles étant une tranche de vie d'une partie du stockage ou de son environnement. Une même durée de la vie du stockage peut ainsi faire l'objet de plusieurs situations mettant en jeu des composants d'échelles différentes afin de couvrir toutes les dimensions spatiales des processus.

La segmentation dans l'espace s'appuie sur la décomposition du stockage et du milieu géologique en composants du plus macroscopique au plus petit (arborescence matérielle), par exemple d'une zone de stockage de déchets vitrifiés à la matrice vitreuse des déchets.

Celle en temps s'appuie, pour la période d'exploitation, sur l'enchaînement des opérations depuis la réalisation des ouvrages d'accès jusqu'à leur fermeture (chronogrammes d'exploitation) et, pour la période postfermeture, sur les durées caractéristiques des grands processus THMCR. Cette segmentation est rendue possible par les différents temps caractéristiques des phénomènes mis en jeu.

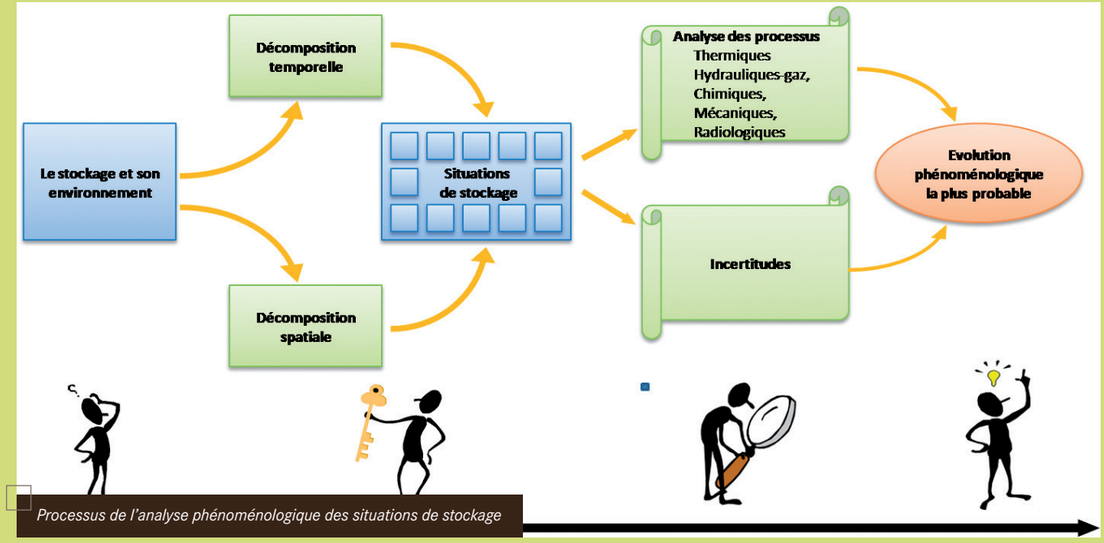
Elle est facilitée par la conception modulaire du stockage, notamment la séparation en zones de stockage distinctes et éloignées pour chaque type de déchets (HA, MA-VL) et un fractionnement des zones en modules séparés. Les interactions phénoménologiques entre zones de stockage sont nulles ou limitées. Les alvéoles et les modules d'une même zone ont des comportements similaires. L'évolution phénoménologique s'en trouve ainsi simplifiée et plus maîtrisable, gage d'une robustesse de l'analyse.

Sur la base des connaissances scientifiques et techniques du moment, chaque situation fait l'objet d'une analyse exhaustive des processus mis en jeu sur les échelles de temps et d'espace considérées. Il s'agit de décrire et de quantifier :

- la nature, l'amplitude et l'évolution (espace-temps) des phénomènes THMCR, ainsi que leurs couplages, qui affectent les composants ; l'analyse s'attache particulièrement à identifier les temps caractéristiques des processus, leurs extensions spatio-temporelles, leurs niveaux de couplage et leurs prédominances relatives sur la tranche de vie que représente la situation ;
- le relâchement et la migration des radionucléides et des toxiques chimiques, en lien avec les processus THMCR.

L'analyse trace de manière lisible non seulement l'argumentation scientifique et technique, notamment son origine, sa nature, et son caractère éventuellement multiple et indépendant (expérimentations, notamment au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne ; démonstrateurs ; analogues naturels ; simulations numériques ; jugement d'expert...), mais aussi les incertitudes de toute nature associées à la description, en pesant notamment leur poids sur cette dernière.

In fine, l'assemblage des situations donne les images successives et spécifiques du « film » phénoménologique d'un stockage et de son environnement géologique jugé le plus probable au regard des connaissances du moment. L'APSS est ainsi un référentiel pour les analyses de sûreté, notamment en identifiant les incertitudes subsistant au stade de l'analyse. Enfin, en décrivant l'état des installations et des colis sur l'échelle de temps séculaire de l'exploitation, elle contribue à la définition des procédés de maintenance et de retour en arrière ainsi qu'à la définition de la stratégie d'observation et de surveillance du stockage (voir le chapitre sur l'observation-surveillance du stockage p.60).



Processus de l'analyse phénoménologique des situations de stockage

7 L'évaluation
des performances d'un stockage

La période d'exploitation

En 2005, l'APSS a établi le cadre général de l'évolution des processus en phase d'exploitation. Pour le jalon 2009, la nouvelle itération de choix d'options de conception, sûreté et réversibilité et la logique opérationnelle qui prévaut à l'établissement du dossier de DAC en 2014, nécessitaient de consolider et de détailler les processus mis en jeu au sein des alvéoles et aux interfaces du stockage avec le Callovo-Oxfordien (amplitude temps-espace) dans le but de prévoir le fonctionnement phénoménologique du stockage pour :

- conforter l'image d'un stockage durable ;
- contribuer à définir l'observation-surveillance ;
- vérifier que ce fonctionnement est conforme au domaine autorisé/défini, notamment en termes de sûreté opérationnelle ;
- prévoir le fonctionnement pour aider et anticiper les décisions ;
- disposer d'une connaissance de l'état des composants et des conditions d'environnement en cas de retour en arrière.

En focalisant l'analyse sur la période d'exploitation, en y apportant les avancées de connaissances scientifiques et techniques réalisées depuis le Dossier 2005 Argile (notamment les simulation, les études en laboratoires jour et les expériences au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne), l'APSS-Exploitation du jalon 2009 a fourni une description plus approfondie et plus précise, notamment en justifiant l'analyse par une meilleure quantification des processus (comportement des colis de stockage inclus), et des temps caractéristiques des phénomènes affectant chaque composant. Les principaux processus qui pilotent les conditions d'environnement des composants et leur évolution intrinsèque sur une période séculaire ont ainsi été dégagés. Les éléments clé sont les suivants :

- **l'hygrométrie** de l'air de ventilation et l'état hydrique des composants du stockage, en lien avec l'organisation spatiale et temporelle de la ventilation, le développement progressif de l'architecture interne et les échanges avec le Callovo-Oxfordien et les colis de stockages exothermiques ;
- **la décharge hydraulique** dans le stockage due à l'excavation des ouvrages (déconfinement de la roche et EDZ), afin d'appréhender plus finement les temps caractéristiques de resaturation et les masses d'eau drainées par l'air de ventilation ;
- **le devenir de l'hydrogène**, avec sa production dans les alvéoles MA-VL et HA et sa migration, en fonction des concepts, en lien avec l'état hydrique de l'alvéole ou du colis jusqu'à la zone de stockage ;
- **le couplage entre la charge thermique et la ventilation** durant les phases d'exploitation pour évaluer les temps et les amplitudes des évolutions concomitantes de la température et de l'humidité relative de l'air de ventilation ;
- **les comportements hydraulique et THM des alvéoles HA**, avec les modalités de chargement mécanique de leur chemisage et leur saturation interne couplée à la production et la migration d'hydrogène, dans le cas d'un chemisage non étanche ;
- **la surpression hydraulique interstitielle** d'origine thermique au droit des alvéoles HA en lien avec leurs comportements hydraulique et THM.

• Les conditions hygrométriques au sein des ouvrages

L'air de ventilation est réparti suivant un réseau de galeries entre les puits d'entrée et de retour d'air jusque dans les différentes zones de stockage, les circuits aérauliques entre ces zones étant néanmoins indépendants par conception. L'humidité relative dans le stockage est contrôlée essentiellement par les échanges de chaleur entre l'air et l'argilite. Le Callovo-Oxfordien a un rôle prépondérant puisqu'il impose progressivement, au fur et à mesure de la circulation de l'air dans le réseau de galeries, une température quasi constante de 22°C qui résulte du gradient géothermique à la profondeur du stockage.

En raison de la faible perméabilité du Callovo-Oxfordien, le flux d'eau drainé par les galeries est insuffisant pour augmenter significativement la quantité d'eau vapeur dans l'air au regard des débits de ventilation ; la formation argileuse lisse les variations hygrométriques naturelles de surface. Cet effet tampon se poursuit asymptotiquement sur des distances d'ordre plurihectométrique, jusqu'à quasi stabilisation du couple température - humidité relative après environ 2 km dans les galeries de liaison. Au delà de cette distance, l'humidité relative évolue très faiblement (hors zones de stockage de colis exothermiques). L'évolution de l'hygrométrie dans le stockage est dès lors très peu liée à son architecture (figure 1).

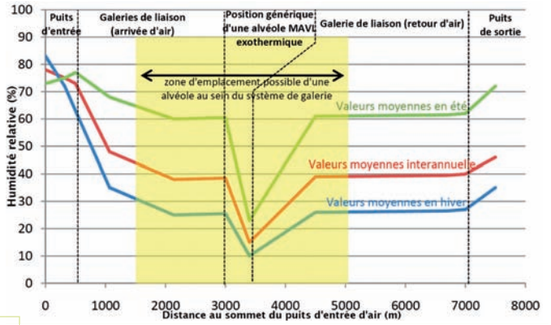


Figure 1 : évolution de l'humidité relative de l'air de ventilation du puits d'entrée d'air vers le puits de retour d'air via la zone de stockage MA-VL

Le dégagement de chaleur des colis HA est à l'origine d'échanges thermiques convectifs avec l'air des galeries ; ces échanges varient dans le temps avec la puissance des colis et la diffusion de la chaleur dans le Callovo-Oxfordien et dans l'espace, suivant la position dans le module. En phase d'exploitation et de ventilation actives, l'air entre dans un module à 22 °C (figure 2) et s'échauffe progressivement de quelques degrés tous les 10 ans, jusqu'à atteindre un régime asymptotique vers 40 ans. L'augmentation de température entraîne une diminution de l'humidité relative en sortie de module, jusqu'à 20 % après dix ans.

Après la mise en place des colis de déchets, et avant la fermeture, en raison d'une plus faible ventilation, la température de l'air augmente de manière significative jusqu'à atteindre environ 40 °C après une dizaine d'années et 50 °C environ à 40 ans ; corrélativement, l'humidité relative diminue jusqu'à environ 10 %. Après 40 ans, la décroissance thermique des colis entraîne une décroissance de la température. Que l'on soit en phase d'élévation ou de décroissance de température, il faut des débits supérieurs à la centaine de m^3/s pour revenir à des températures inférieures à 30 °C en quelques jours.

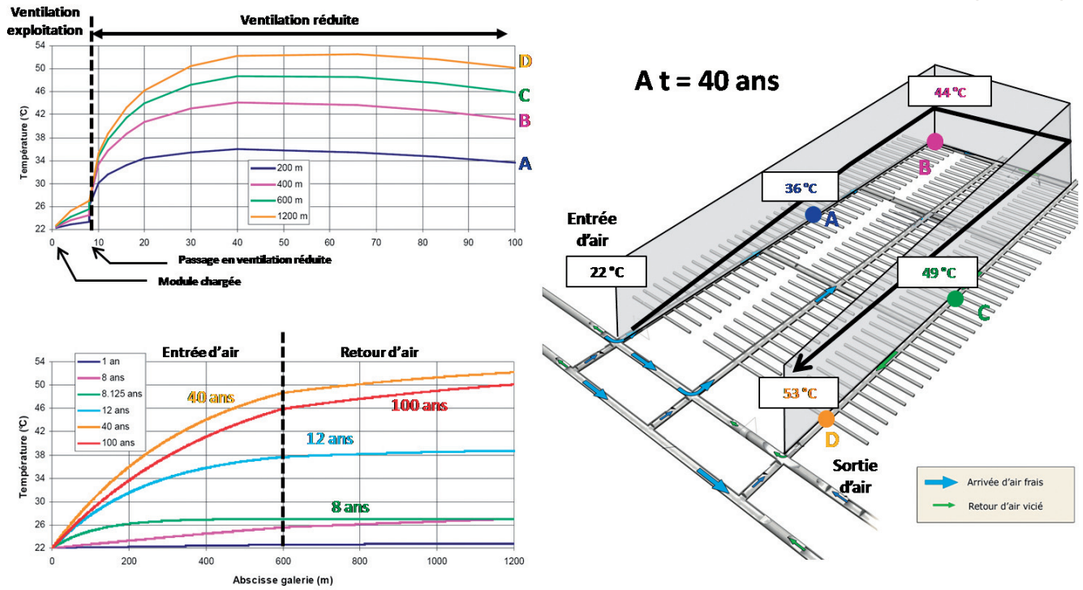


Figure 2 : évolution de la température de l'air de ventilation dans l'espace et dans le temps dans un module HA

Dans une alvéole MA-VL, l'air de ventilation impose un environnement thermohydrique pseudo-stationnaire et homogène dans le temps, avec une répartition hétérogène des températures en lien avec la géométrie des sections de passage de l'air. Les élévations et gradients de température s'estompent avec la décroissance thermique des colis : à 40 ans, la température des colis est de l'ordre de 28°C à 30°C, celle de l'air en partie haute de l'alvéole de l'ordre de 25°C. À 100 ans, l'échauffement n'est plus que de 5°C au sein de l'alvéole et du béton. Bien que la cartographie de température soit hétérogène, l'humidité relative est de l'ordre de 20 % en sortie d'alvéole.

• Les comportements hydraulique-gaz des alvéoles HA

Les options de conception prévues spécifient l'étanchéité des connexions de chemisage, l'objectif étant de créer un environnement physicochimique favorable à l'intégrité des colis de stockage pendant la période d'exploitation. Dans ces conditions, le vide à l'extrados du chemisage, d'environ 0,8 m^3, est directement accessible à l'eau. Au regard des débits de drainage par les argilites, de l'ordre de 50 $ml/m^2/jour$, la saturation totale en eau de ce vide interviendrait en moins d'un an. La saturation provoquerait la corrosion du chemisage de l'alvéole, avec consommation du peu d'oxygène disponible. Les conditions anoxiques qui en résultent diminueraient la cinétique du phénomène (de l'ordre du µm/an) et provoqueraient la génération d'hydrogène (environ 50 mol/an). Les quantités de gaz produites resteraient faibles et ne modifieraient pas l'organisation des écoulements d'eau autour de l'alvéole. L'étanchéité du chemisage limite *de facto* la production d'H_2 par la seule contribution de l'extrados du chemisage et d'une partie de l'extrados de l'insert. Un régime permanent s'établit alors en quelques années entre production et migration par diffusion sous forme dissoute dans les argilites et par convection sous forme gazeuse vers la galerie via les interfaces les plus transmissives. Les débits de ventilation garantissent une concentration en H_2 dans l'air de plusieurs ordres de grandeur inférieure au seuil d'explosivité. Il en va de même au sein de l'alvéole du fait de l'absence même d'oxygène.

Si le chemisage n'est pas étanche (cas envisageable au regard du nombre important d'alvéoles), les temps de saturation sont de quelques dizaines d'années, en raison des plus grands volumes de vide (figure 3). Sans prise en compte de la production de gaz, le temps de saturation totale de l'alvéole varie de quelques années à quelques dizaines d'années selon la transmissivité hydraulique des connexions de tronçons de chemisage. Ces temps restent courts au regard de ceux relatifs à la production d'hydrogène.

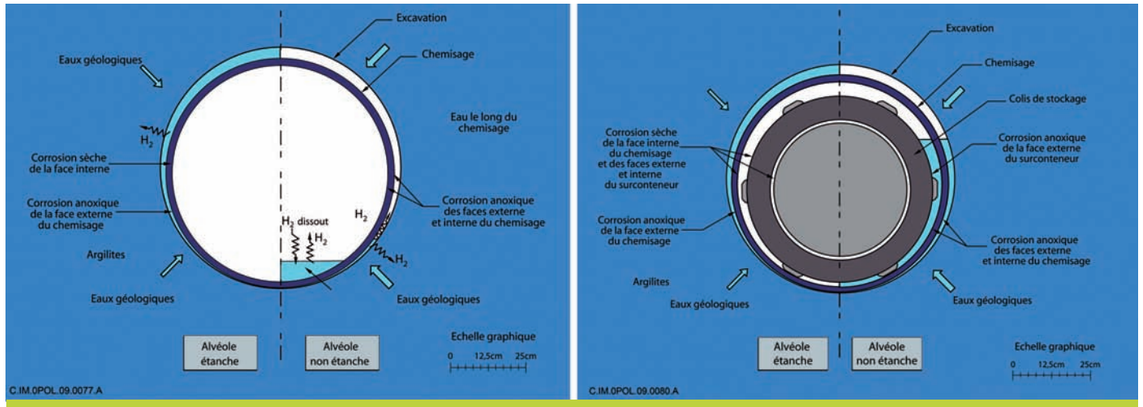


Figure 3 : schématisation du transitoire hydraulique/gaz avant et après la mise en place des colis selon les propriétés d'étanchéité des connexions entre tronçons de chemisage

7 L'évaluation
des performances d'un stockage

Les mécanismes hydraulique et hydraulique - hydrogène deviennent alors plus complexes, notamment l'organisation du schéma de saturation en eau des vides externe et interne au chemisage. Parallèlement, la surface d'acier accessible à l'eau est plus importante, et la production d'H_2 associée augmente jusqu'à un maximum de 150 mol/an environ, ce qui reste néanmoins limité pour que de l'hydrogène s'accumule significativement en phase gazeuse au sein de l'alvéole pendant la période d'exploitation.

- **Les gaz dans les alvéoles MA-VL**

La production d'hydrogène provient essentiellement de la radiolyse de la matière organique contenue dans certains déchets et, dans une moindre mesure, de celle de l'eau occluse dans les composants cimentaires soumis aux rayonnements. Les conditions d'environnement, caractérisées par une faible hygrométrie garantissant un état non saturé du béton de colisage, permettent à l'hydrogène de migrer dans le conteneur de stockage en béton sans monter en pression. La ventilation permet alors de diluer puis d'évacuer l'H_2 produit. Les concentrations au sein des colis et dans les jeux fonctionnels de l'alvéole (figure 4) sont toujours très inférieures au seuil d'inflammabilité préservant ainsi des risques d'atmosphère explosivité (ATEx). L'adoption d'évents dans le conteneur de stockage favorise encore plus l'évacuation de l'hydrogène.

À l'échelle de l'alvéole, même si l'organisation thermo-aéraulique des écoulements conduit à des hétérogénéités significatives de vitesse et de température d'air entre les jeux longitudinaux et transversaux, les concentrations d'H_2 sont globalement homogènes et de plusieurs ordres de grandeur en deçà de la limite explosive, y compris dans les zones mortes où la diffusion moléculaire contribue à garantir des concentrations basses. En cas d'arrêt de ventilation dans une alvéole, la concentration en H_2 augmente uniformément dans l'alvéole, grâce à la mise en place de boucles de thermoconvection naturelle dans le cas de déchets faiblement exothermiques. Les temps caractéristiques d'augmentation des concentrations sont bien supérieurs au délai d'intervention pour le rétablissement de la ventilation : il faut plusieurs mois sans ventilation pour que la teneur en hydrogène atteigne le pourcent en volume dans le colis puis dans l'alvéole. Ces temps sont similaires pour une configuration après fermeture de l'alvéole.

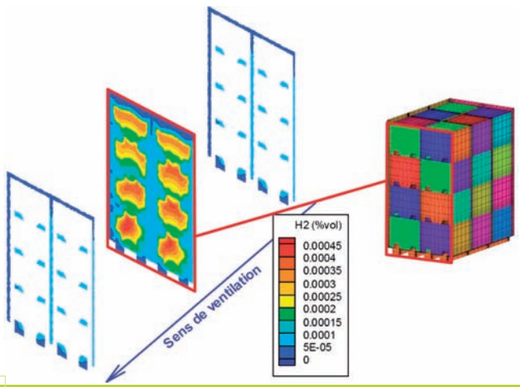


Figure 4 : valeur maximale de concentration en hydrogène dans une alvéole MA-VL pleine avec une ventilation de 3 m³/s

- **L'évolution de la charge thermique dans les alvéoles de déchets HA en fonction des phases d'exploitation**

La charge thermique en phase d'exploitation a fait l'objet d'une évaluation beaucoup plus fine que pour le Dossier 2005 Argile, en lien avec le développement progressif du stockage : construction, chargement des colis, fermeture des alvéoles, fermeture des galeries d'accès du module, fermeture de la zone, incluant des phases d'attente intermédiaires plus ou moins longues en lien avec les conditions d'exploitation, variables au cours du temps (notamment en terme de débit de ventilation).

Les travaux d'analyse consolident l'image d'une évolution de la charge thermique caractérisée par une succession de transitoires liés à l'enclenchement de ces différentes phases d'exploitation et dont les conséquences phénoménologiques sont d'importance inégale.

D'une manière générale, la cinétique de propagation de la chaleur dans le Callovo-Oxfordien est plus lente que celle de l'enchaînement des phases d'exploitation aux différentes échelles concernées (alvéoles, modules, et zones) garantissant l'absence d'interactions significatives entre modules.

À l'échelle d'une zone de stockage, les modules évoluent indépendamment l'un de l'autre pendant l'exploitation du stockage.

À l'échelle d'une alvéole HA, les modalités de transfert vers le Callovo-Oxfordien en considérant le vide apical des colis primaires, le surconteneur, les patins, le chemisage, les intercalaires, les jeux fonctionnels remplis d'air et/ou d'eau… sont tributaires :
- des propriétés thermiques des patins, à l'origine de points chauds au niveau des contacts avec le chemisage (+ 4°C pour des patins en Alumine, +2°C pour des patins en Zircone) ;
- des caractéristiques thermiques des intercalaires : plus elles sont faibles, plus, à court terme, (quelques années), les profils longitudinaux de température sont en dents de scie (variation maximale de l'ordre de 55 °C dans l'axe de l'alvéole, 20 °C le long du chemisage et 10 °C en paroi de l'alvéole dans les argilites) ; ces variations s'estompent néanmoins en quelques années.

En revanche, le vide apical a un effet limité sur les variations longitudinales de température et le rôle de drain thermique du chemisage métallique est restreint au regard des dimensions de l'alvéole.

- **L'impact de la charge thermique sur le champ de charge hydraulique**

L'augmentation de la température dans les argilites au droit des alvéoles génère une surpression interstitielle instantanée. Ce phénomène est bien caractérisé dans différentes expérimentations conduites en laboratoire souterrain. Les simulations ont mis en évidence les paramètres influents tels que la perméabilité des argilites, l'emmagasinement (ou son homologue mécanique, le coefficient de Biot) et l'entraxe entre alvéoles. Les incertitudes ont été resserrées en évaluant l'intensité du paroxysme, sa localisation et son évolution spatiotemporelle en lien avec la décroissance thermique et la diffusion thermique et le comportement hydromécanique des argilites.

Une relation a été établie entre la localisation du paroxysme de surpression, l'état de saturation en paroi d'alvéole et l'existence, ou non, d'un vide entre l'extrados du chemisage et la paroi de l'alvéole. Au regard des incertitudes sur les couplages hydromécaniques des argilites, la surpression maximale peut atteindre une valeur comprise entre 7 et 12 MPa sur une zone de 20 m à partir de la paroi des alvéoles, quelques dizaines d'années après la mise en place des colis. Au-delà, la décroissance de leur puissance thermique entraîne une diminution progressive du champ de pression interstitielle, sur une durée supérieure à la période d'exploitation.

- **La durabilité physicochimique des composants métalliques et cimentaires**

Les modalités de dégradation chimique des composants pendant la période d'exploitation telles qu'elles avaient été obtenues en 2005 ont été confirmées grâce à de nouveaux calculs.
Les processus conduisant à la carbonatation des bétons composant le soutènement des alvéoles/galeries ou le voile des colis de stockage MA-VL ont été investigués par des simulations couplant chimie et transport en conditions insaturées. Ces simulations menées par le CEA Cadarache avec l'outil numérique Toughreact ont ainsi permis de reproduire les phénomènes de séchage et d'altération des bétons pendant une durée couvrant la période de réversibilité (Trotignon *et al.*, 2009). Les résultats (profils de saturation liquide, de phases minérales, de pH, de solutés) permettent de visualiser et de quantifier la dynamique du phénomène de carbonatation pour les différentes configurations (nature du béton, sensibilité à la température…). Cette dynamique peut varier de façon importante selon le modèle de tortuosité retenu ; de façon générale, le processus de carbonatation ne conduit pas à un colmatage dans le béton dégradé sauf dans les cas où la saturation liquide peut rester élevée suffisamment longtemps.

De même, une étude dédiée à la perturbation oxydante des argilites du Callovo-Oxfordien a été entreprise avec le logiciel de transport réactif Phreeqc, afin de prévoir l'impact de l'oxygène présent dans l'air de ventilation sur la minéralogie du Callovo-Oxfordien et la chimie des eaux interstitielles en champ proche pendant la période de réversibilité. Les réactions susceptibles de se produire dans les argilites avec l'oxygène ont alors été identifiées et mis en œuvre dans ces simulations.
Il a été montré que la tendance à l'acidification combinée à l'hydrolyse des carbonates dans les argilites oxydées conduit à une production nette de CO_2. Les processus de diffusion permettent à la perturbation chimique de l'eau interstitielle des argilites de s'atténuer sur une distance de l'ordre de deux mètres, en s'éloignant de la paroi de la galerie, sur la durée de 200 ans couverte par la simulation.

- **La reprise des vides et les modalités de chargement par les argilites**

La mise en perspective des connaissances sur le comportement mécanique des argilites depuis le Dossier 2005 Argile conduit à dégager un ensemble de mécanismes susceptibles de piloter la déformation des argilites. Il s'agit non seulement de mécanismes d'ordre strictement mécaniques mais aussi de mécanismes physicochimiques, par exemple la décharge élastique endommageable, la consolidation mécanique, la consolidation et/ou l'endommagement thermique, la propagation de fissures, le fluage des argilites, et le gonflement ou le délitement des argilites endommagées en présence d'eau. Appliqués aux alvéoles HA, et indépendamment des incertitudes sur ces mécanismes, il est attendu que leurs mises en jeu partielles ou totales, successives ou concomitantes, contribuent à ce que, pendant la période d'exploitation, il se forme autour du chemisage, un pseudo-matériau qui réalise une interface mécanique intime entre le chemisage et les argilites.

En effet, bien que le vide à l'extrados soit rapidement saturé en eau (moins d'un an dans le cas de référence correspondant à une alvéole étanche), les temps caractéristiques des différents mécanismes envisagés sont suffisamment courts pour que ce vide soit progressivement « comblé » sur l'échelle de temps de l'exploitation ; ainsi par exemple, en considérant uniquement des déformations différées purement mécaniques et des vitesses de déformation de l'ordre de 10^{-10} s^{-1} comme observées au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute Marne, la reprise du vide interviendrait en quelques dizaines d'années.

La période de postfermeture

- **L'évolution mécanique des ouvrages**

Des études du comportement mécanique des alvéoles MA-VL sans et avec jeu fonctionnel couplé à la dégradation chimique (théorique) des bétons ont fait l'objet d'analyses spécifiques. La fracturation des composants en béton (revêtement soutènement) ainsi que l'extension de l'EDZ résultant de la fracturation de ces composants ont été analysés. Dans le Dossier 2005, les taux de vide au sein de l'alvéole MA-VL représentaient environ 5 % du volume excavé. Ils ont fait en 2009, en lien avec les options de conception, l'objet d'une évaluation jugée plus réaliste (augmentation d'environ 10 % du taux de vide global).

D'un point de vue mécanique, ces jeux sont autant de surfaces et de volumes libres autorisant des déformations potentiellement importantes. Actuellement une étude mécanique, fondée sur des modèles continus et discrets, est réalisée à l'aide des logiciels Flac3D et UDEC pour répondre à la question de la maîtrise de l'évolution de l'EDZ en lien avec les taux de vide dans les alvéoles MA-VL (figure 5). Au final, on retient les grands enseignements suivants : peu d'évolution au cours de la période d'exploitation, une rupture des structures cimentaires et un premier contact du revêtement avec les colis en quelques milliers d'années.

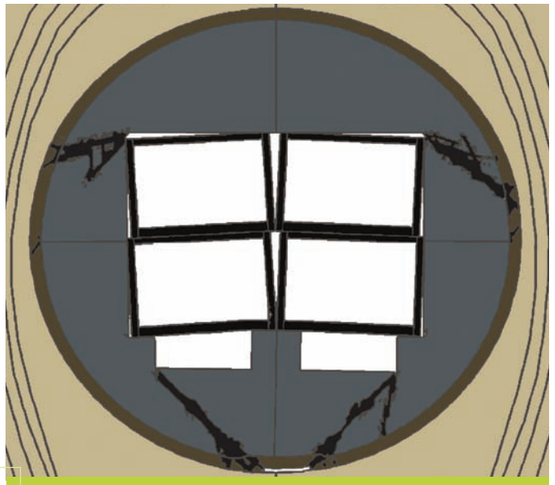


Figure 5 : simulation de l'évolution mécanique d'une alvéole MA-VL à 100 000 ans

- **La production et le devenir de l'hydrogène à l'échelle du stockage**

Pour la première fois, des simulations à grande échelle ont été réalisées en intégrant dans un même calcul la représentation des différentes zones de stockage et du milieu géologique. Les simulations menées avec Tough2 rendent compte de la production et de la migration de l'hydrogène à l'échelle complète du stockage depuis sa fermeture jusqu'au million d'années avec une méthodologie de calcul permettant de mener des simulations diphasiques à l'échelle spatiale du stockage.

Au cours des premiers milliers d'années, période correspondant à la plus forte production d'hydrogène, celui-ci se répand dans le stockage mais n'atteint pas la zone des accès (puits, descenderie). Cet envahissement se fait sous forme gazeuse, H_2 migrant préférentiellement dans les ouvrages du stockage par convection et, dans une bien moindre mesure, dans les argilites du Callovo-Oxfordien sous forme gazeuse.

Au-delà de quelques milliers d'années, du fait notamment de la baisse de la production, la diffusion de l'hydrogène dissout devient le processus de transfert dominant et ce, radialement à l'axe des ouvrages vers le Callovo-Oxfordien et, *in fine*, dans toute l'épaisseur du Callovo-Oxfordien vers les encaissants (Oxfordien et Dogger).

Dans la zone HA, H_2 généré dans les alvéoles migre préférentiellement par convection vers les galeries d'accès au cours des 5.000 premières années. Par la suite, c'est la dissolution/diffusion qui devient le phénomène dominant. Il en est de même dans la zone HA-C0/CU3.

Après fermeture, dans les alvéoles MA-VL, l'hydrogène migre vers les galeries de liaison secondaire et dans une moindre mesure vers les galeries de retour d'air en fond d'alvéole. Au-delà de 10 000 ans le flux H_2 lié à la dissolution/diffusion devient du même ordre de grandeur que le flux convectif.

7 L'évaluation
des performances d'un stockage

Avec les hypothèses utilisées pour ces calculs, on retiendra les grands enseignements suivants :

- aucun flux significatif d'hydrogène sous forme gaz ne s'échappe par les puits ;
- il n'y a pas d'interaction de l'hydrogène gazeux entre les zones de stockage HA et MA-VL ;
- la pression d'eau dans le stockage reste toujours inférieure à la pression hydrostatique de 5 MPa, il n'y pas de surpression interstitielle dans le Callovo-Oxfordien due à l'hydrogène, la pression d'hydrogène n'est jamais supérieure à 6 MPa.

La consolidation du modèle hydrogéologique

La construction d'un modèle hydrogéologique résulte d'un processus itératif entre l'acquisition de données géohydrologiques de caractérisation, notamment celles issues des campagnes sismiques et de forages, leur conceptualisation physique et numérique pour un code donné, et enfin la réalisation de simulations numériques afin de représenter au mieux les écoulements de l'eau en terme de direction et de vitesse. Ce processus itératif peut être schématisé par quatre étapes principales.

1) La construction d'un volume (hydro)géologique fini et sa décomposition en sous-volumes correspondant aux unités hydrogéologiques identifiées : Il s'agit d'identifier à partir des formations géologiques les unités hydrogéologiques type aquifères, aquitards ou aquicludes qui constituent le système aquifère, puis de déterminer leurs géométries.

Le modèle hydrogéologique 3D multicouches région-secteur est issu (i) d'un modèle numérique litho-stratigraphique (Dionisos® de l'IFP) calé sur les surfaces stratigraphiques de référence et sur les environnements lithologiques et (ii) de modélisations géométriques des surfaces de référence affectées par les failles majeures. La structure du domaine (hydro)géologique est constituée de 27 unités hydrogéologiques résultant de 146 couches lithologiques du Trias à l'actuel et de cinq surfaces de référence, comprises entre le Buntsandstein et l'Oxfordien, interpolées sur des marqueurs pointés sur plus de 3 300 forages et contraintes par les rejets des failles retenues sur les profils régionaux totalisant un linéaire de 2 780 km.

2) La définition des structures (failles, zones faillées...) affectant tout ou partie du volume et identifiées comme jouant (pouvant jouer) un rôle dans les écoulements : on complète la géométrie du volume (hydro)géologique par l'introduction des structures reconnues ou supposées, qui jouent ou peuvent jouer un rôle dans les écoulements, sous forme d'objets géométriques.

Plus de 140 failles, y compris les failles secondaires, ont été représentées sous forme de plans et séries de plans verticaux, d'épaisseurs finies. La zone particulière de petite fracturation reconnue à l'ouest de la ZT, près de la vallée de la Marne a été générée par un modèle stochastique (Gringarten, 1996 & 1998) sur la base des données géométriques des failles majeures et des mesures effectuées à l'affleurement et dans les puits du Laboratoire souterrain.

3) L'habillage en propriétés hydrodynamiques (perméabilité, porosité...) des objets géologiques (unités hydrogéologiques et failles).

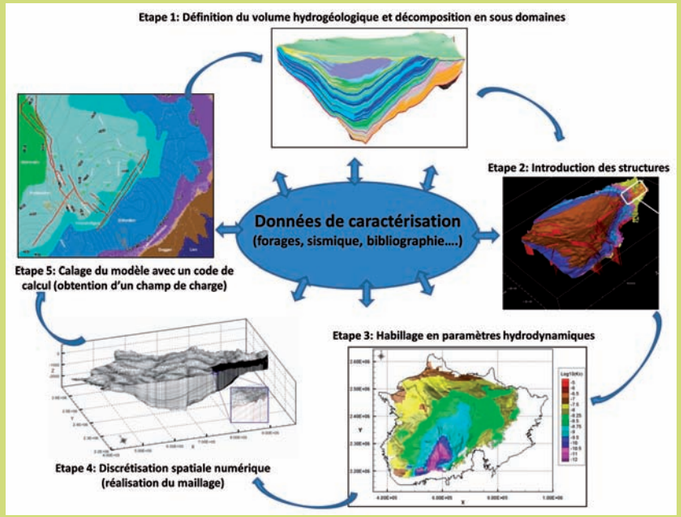
Pour le modèle hydrogéologique de Meuse/Haute-Marne, perméabilité et porosité ont été déterminées à partir (i) des faciès du modèle lithostratigraphique : la porosité a été calculée en fonction de l'enfouissement et de la composition lithologique de chaque faciès, et la perméabilité par la loi de Kozeny-Carman pour la lithologie détritique et par la loi de Lucia pour la lithologie carbonatée, (ii) des mesures réalisées *in situ* (tests en forages) et en laboratoires sur des carottes et des cuttings.

4) La discrétisation spatiale numérique, la définition des conditions hydrauliques aux limites, puis in fine le calage, à l'aide du code de calcul : la discrétisation numérique spatiale consiste à décomposer les unités hydrogéologiques et les failles en une somme de mailles en tenant compte des aires d'affleurement et du réseau hydrographique qui sont les conditions aux limites de surface du système. L'équation d'écoulement de l'eau en milieu poreux est numériquement résolue sur le domaine discrétisé : le résultat final est un champ de charges hydrauliques, ensemble des solutions de charge obtenues dans les différentes mailles. De ce champ de charges, sont déduites les directions et les vitesses d'écoulement de l'eau. Le processus de résolution peut être itérer autant que nécessaire, en remontant aux étapes précédentes, jusqu'à obtenir une solution jugée plausible au regard des données : on parle ainsi de calage du modèle.

Le modèle numérique d'écoulement de Meuse/Haute-Marne a ainsi été développé sur la base de l'approche simple milieu équivalent poreux et de la méthode numérique des éléments finis Galerkin. La discrétisation spatiale du modèle conceptuel est un maillage non structuré en éléments finis linéaires : (i) 3-D (prismes, pyramides et tétraèdres) représentant les couches avec ou sans fracturation diffuse et (ii) 2-D (triangles) représentant les failles et la couche superficielle. Le calage du modèle 3-D d'écoulement région-secteur en régime permanent a ainsi été réalisé au moyen du code GroundWater (Cornaton, 2009) et de l'estimation de paramètres PEST (Doherty, 1998) sur 1255 mesures de charge.

À l'échelle du secteur de Meuse/Haute-Marne, les écoulements dans les encaissants du Dogger et de l'Oxfordien ont été calés sur 23 points de mesure de charge, les cartes piézométriques construites à partir de l'ensemble des données hydrogéologiques et géologiques et une activité hydraulique de certaines failles majeures et de la zone de fracturation diffuse.

L'ensemble du processus de construction du modèle hydro-géologique de Meuse/Haute Marne est illustré dans le schéma ci-dessous.



- **Le fonctionnement du système hydrogéologique à l'actuel et son évolution future**

En considérant que le transfert des radionucléides au-delà du Callovo-Oxfordien a pour moteur les mouvements d'eau dans les aquifères, la modélisation hydrogéologique réalisée en 2005 a été reprise avec, comme objectif, le dépôt du DAC de 2014. L'amélioration de cette modélisation repose, d'une part sur la construction d'un nouveau modèle avec un maillage continu couvrant l'ensemble du bassin de Paris et intégrant les failles **[voir encadré ci-contre]** et, d'autre part, sur l'intégration progressive des nouvelles données de terrain : celles issues de la campagne de reconnaissance de 2007-2008, puis celles prévues sur l'emprise de la ZIRA à partir de 2010. Les simulations sont menées à l'aide du code de calcul Ground Water®, fondé sur la méthode des éléments finis qui est développé à l'université de Neuchâtel. Ce code résoud les écoulements de fluides à densité variable, le couplage implicite des écoulements de surface et souterrains, ainsi que le transport de masse et du transfert de chaleur. Les résultats consolidés sont attendus pour 2012.

Les options de conception et performances du stockage

Le cadre et les objectifs des évaluations conduites pour la sûreté à long terme du stockage

En 2005, la faisabilité du stockage de déchets HA-MAVL a été établie sur un principe d'architecture totalement borgne (des alvéoles aux zones de stockage) et des ouvrages de liaison surface-fond (puits) groupés. Les calculs de performance/sûreté à long terme ont montré le caractère robuste de cette architecture, notamment vis-à-vis d'événements comme un défaut généralisé des scellements. Néanmoins, ce type d'architecture a soulevé des interrogations quant à sa robustesse en période d'exploitation, notamment la capacité de la ventilation à gérer un incendie dans cette configuration.

L'Andra a donc engagé, dès 2007, une nouvelle itération de choix de concepts de stockage. Différentes options, regroupées en quatre grands thèmes relatives aux zones de stockage et/ou aux alvéoles ont fait l'objet d'une évaluation comparée de leurs performances vis-à-vis du critère de sûreté après la fermeture. Par exemple, pour la zone de stockage MA-VL, une option 2009 dite « à puits de retour d'air dégroupés et distants », avec alvéoles passantes, puits de retour d'air propres aux (sous) zones MA-VL B1 et B2 et situés à leur extrémité a été comparée à l'architecture 2005 dite « tous puits groupés » avec alvéoles MA-VL borgnes et retour d'air commun aux deux (sous) zones MA-VL.

Dans le Dossier 2005, il était montré qu'en scénario d'évolution normale (dispositif de scellements efficace), les radionucléides sont transférés principalement par le Callovo-Oxfordien en raison du faible gradient de charge hydraulique au sein du stockage et de la faible perméabilité et du gradient de charge ascendant réduit dans le Callovo-Oxfordien.

Les performances après fermeture des concepts non borgnes ont été évaluées avec le scénario « tous scellements défaillants » pour l'iode 129. En effet, cette architecture est susceptible de mobiliser significativement la voie de transfert par le stockage (depuis les alvéoles jusqu'au toit des argilites, via les galeries et les puits) pour les radionucléides à vie longue, solubles et non sorbés, comme I^{129}. Les hypothèses, les modèles et les valeurs des paramètres définis en référence en 2005 ont été conservés afin de mener une intercomparaison pertinente des performances des options de 2009 avec celles de 2005 qui avaient permis de statuer sur la faisabilité du stockage.

Les indicateurs retenus ont été les débits molaires de I^{129}, au toit de la formation hôte pour la voie de transfert « Callovo-Oxfordien », et aux sorties des galeries et des puits et descenderies au toit du Callovo-Oxfordien pour la voie de transfert « stockage ». Le gradient de charge horizontal dans l'Oxfordien calcaire a été pris en compte, afin d'évaluer l'existence, ou non, de situations de circulation en U dans le stockage. Enfin, les colis-types considérés ont été ceux du scénario de gestion des déchets S1a (Andra, 2005).

Les évaluations de la performance ont été menées en deux temps, d'abord pour toutes les options, en considérant chaque zone HA et MA-VL prise séparément, mais en tenant compte des effets hydrauliques des autres zones, puis avec les options de conception retenues *in fine*, pour le stockage en grand, combinant les deux zones, afin de vérifier le caractère enveloppe des évaluations par zone séparée.

Tous les calculs d'hydraulique et de transfert d'I^{129} ont été réalisés avec le code Porflow®, version 6.0.4 puis version 6.11.3. Celles-ci ont permis de réaliser des simulations de grande taille (jusqu'à 10 millions de mailles), nécessaires à l'évaluation de performance précise des options étudiées pour 2009.

Les figures 6 et 7 illustrent les séquences de calculs, sur deux exemples de maillage mis en œuvre avec Porflow.

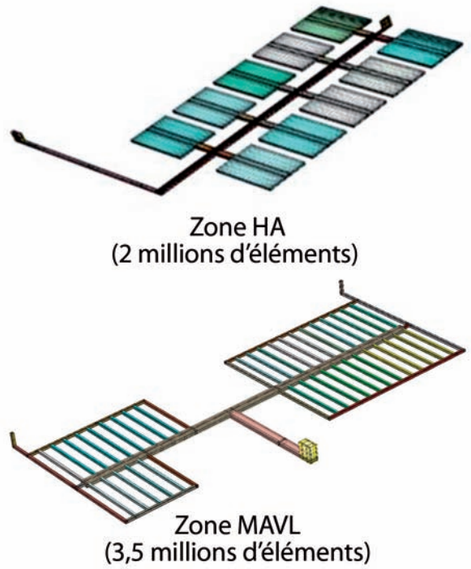


Figure 6 : exemples de maillages établis pour l'évaluation de performance des options de conception étudiées pour le jalon 2009. Traitement par zone séparée

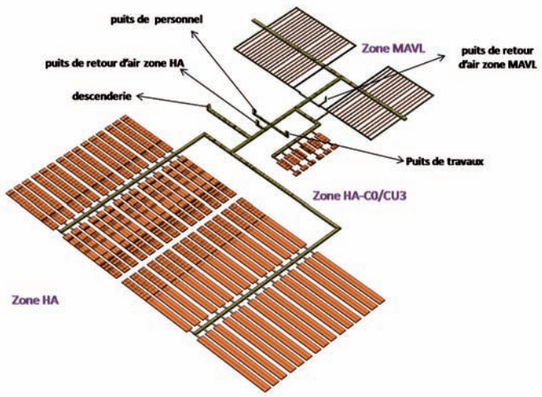


Figure 7 : exemple de maillage établi pour l'évaluation de performance des options de conception étudiées pour le jalon 2009. Traitement du stockage en grand

"Les évaluations de performance menées pour le choix des options de conception du jalon 2009 ouvrent la voie à la réalisation des futures évaluations de performance intégrant l'ensemble du stockage."

L'analyse des résultats

Des résultats obtenus à ce stade, il faut retenir que, de manière générale, pour l'ensemble des options étudiées, et en considérant un scénario de défaillance des scellements, le Callovo-Oxfordien reste la voie de transfert prédominante, avec des débits molaires d'I^{129} identiques, ou très proches, de ceux obtenus avec l'architecture de référence de 2005. Les figures 8 et 9 donnent un exemple de résultats obtenus pour les déchets HA et les MA-VL.

Seule l'architecture de la zone de stockage HA avec des puits de retour d'air situés en extrémité des galeries de liaison secondaires entraîne une prédominance précoce, de durée limitée à quelques dizaines de milliers d'années, de la voie de transfert par le stockage ; le maximum de débit molaire d'I^{129} reste inférieur d'au moins 2 ordres de grandeur au maximum de débit molaire de la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien.

L'architecture à puits de retour d'air situés en extrémité de galeries de liaison principales de la zone HA offre une robustesse hydraulique similaire à celle du concept à puits groupés de 2005 ; les maxima de débit molaire d'I^{129} sortant dans cette configuration et leurs dates d'occurrence sont inférieurs d'un ordre de grandeur à ceux des puits situés en extrémité des galeries secondaires.

La présence de groupes d'ouvrages de liaison {fond/surface} dédiés et séparés (descenderie, puits d'entrée d'air et puits de retour d'air), rend le fonctionnement hydraulique du stockage complexe. Par exemple, selon la position de la descenderie (amont/aval) par rapport au sens de l'écoulement dans l'Oxfordien carbonaté, les comportements hydrauliques du stockage peuvent être très différents : le débit d'eau par les accès peut être entrant et/ou sortant, et une circulation en U dans le stockage est créée ou non.

Dans tous les cas, les écoulements d'eau dans le stockage restent lents et

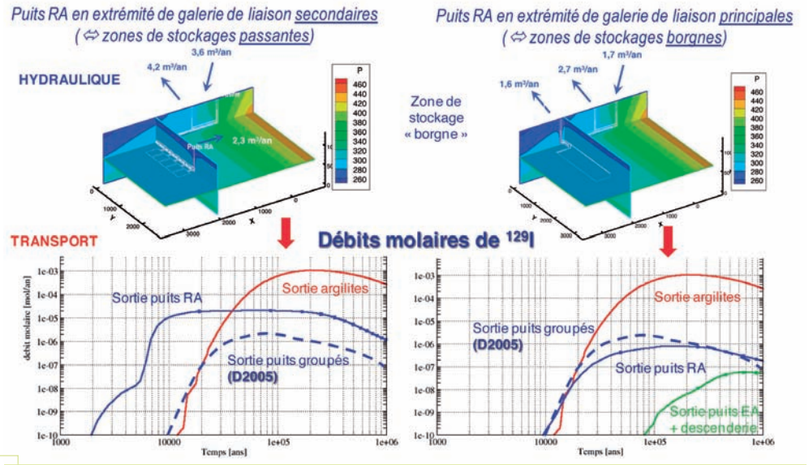


Figure 8 : déchets HA : évolution des débits molaires d'iode 129 en sortie des ouvrages et des argilites du Callovo-Oxfordien - Architecture « à puits de retour d'air dégroupés » étudiée pour le jalon 2009 : comparaison entre la situation avec zones de stockage passantes (à gauche) et celle avec zones de stockage borgnes (à droite)

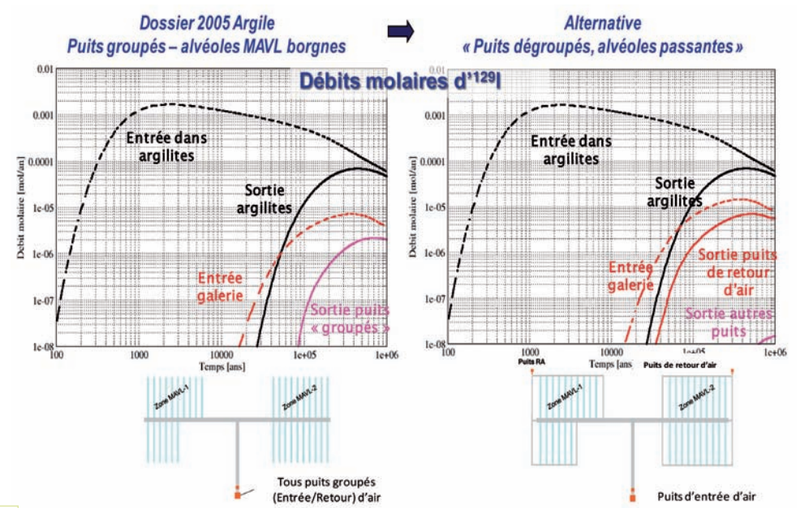


Figure 9 : déchets MA-VL : évolution des débits molaires d'iode129 en sortie des ouvrages et du Callovo-Oxfordien (argilites) - comparaison entre l'architecture « à puits groupés et alvéoles borgnes » du Dossier 2005 Argile (à gauche) et l'architecture « à puits de retour d'air dégroupés et distants » avec alvéoles passantes étudiée pour le jalon 2009 (à droite)

limités, les débits d'eau par les puits n'excèdent jamais quelques mètres cube par an.

Pour toutes les architectures MA-VL étudiées (combinant position de puits de retour d'air et position des ouvrages par rapport au sens des écoulements dans l'Oxfordien carbonaté), aucune prédominance de la voie de transfert par le stockage n'est observée.

La longueur de plusieurs centaines de mètres des alvéoles MA-VL et leur diamètre d'ordre plurimétrique à décamétrique favorisent le transfert de l'I^{129} par diffusion vers le Callovo-Oxfordien, limitant ainsi son transfert vers la galerie. Le débit molaire d'I^{129} sortant par la formation hôte est inchangé quelle que soit l'option de conception étudiée pour 2009. Toutefois l'architecture à puits de retour d'air unique et commun aux deux sous-zones MA-VL apparaît comme la plus robuste sur le plan hydraulique.

Le rôle hydraulique d'une descenderie déroulée sur la performance du stockage est identique à celui de la descenderie enroulée présentée en 2005. Les débits molaires d'I^{129} sortant des puits de retour d'air ne sont pas modifiés quelle que soit la configuration hydraulique étudiée : le « moteur hydraulique » généré par la descenderie n'est pas suffisant pour ajouter une perturbation significative dans le stockage, son effet de drain ou d'apport d'eau est masqué par la circulation d'eau en U entre la descenderie et les puits d'entrée d'air.

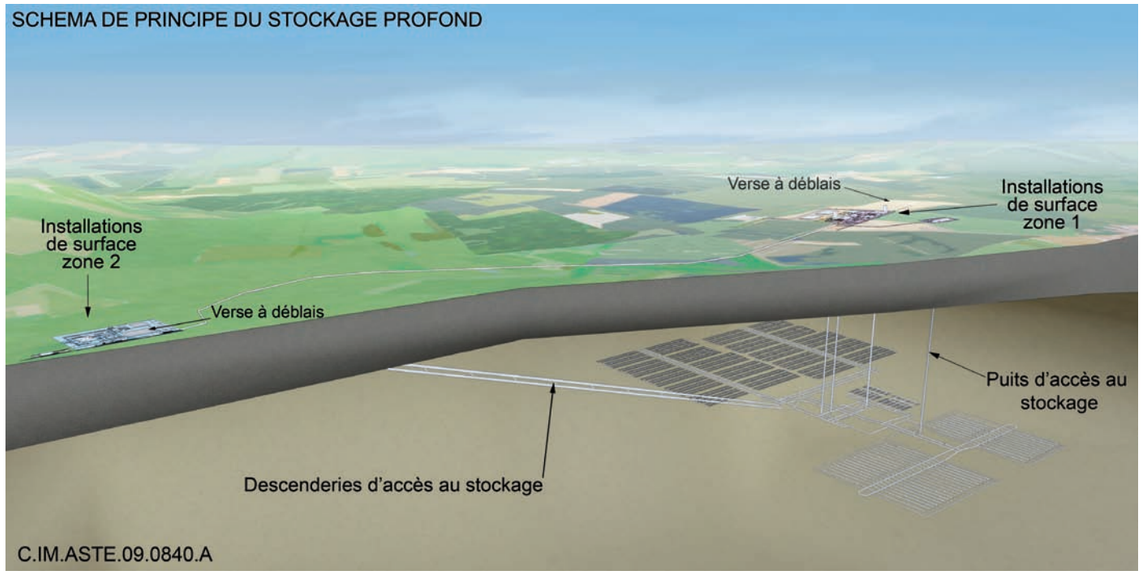
Ainsi, le Callovo-Oxfordien contrôle et limite toujours les écoulements dans le stockage grâce à sa faible perméabilité et au faible « gradient hydraulique » vertical qui lui est appliqué. Ceci permet de garantir une flexibilité des positionnements des ouvrages du stockage par rapport aux sens des écoulements dans l'Oxfordien carbonaté. Quelles que soient les architectures de stockage HA et MA-VL étudiées, les autres éléments de conception (nombre de modules HA ou de galeries HA et MA-VL, diamètres des galeries et des puits de retour d'air, ou gabarits des alvéoles MA-VL) ne modifient pas les enseignements ci-dessus.

Les perspectives

Les évaluations de performance menées pour le choix des options de conception du jalon 2009 ouvrent la voie à la réalisation des futures évaluations de performance intégrant l'ensemble du stockage. La poursuite du développement des outils de simulations doit permettre d'accroître le niveau de représentation détaillée du stockage en termes d'architecture générale, de nombre de zones de déchets et d'architecture détaillée de chaque zone jusqu'aux alvéoles de stockage, offrant ainsi la possibilité à l'optimisation et la gestion progressive du stockage sur la ZIRA.

Références bibliographiques :

> Andra (2005) Dossier 2005 - Tome : Évolution phénoménologique du stockage géologique. Andra édit. ISBN 2-916162-21-6
> Gringarten (1996) 3-D geometric description of fractured reservoirs. Mathematical Geology 28(7), 881- 893
> Gringarten (1998) FRACNET, stochastic simulation of fractures in layered systems. Computers & Geosciences Vol. 24, No. 8, pp. 729-736



La diffusion des résultats
et la valorisation scientifique

“La volonté de l’Andra de contribuer de manière scientifique à l’effort de recherche fondamentale et appliquée, nécessaire à la résolution des objectifs qui lui ont été fixés, s’exprime au travers des publications, des thèses et des congrès.”

Les publications

Les publications en 2006

> ANDRE, G., PROUDHON, B., REBOURS, H. et WILEVEAU, Y. (2006), Paramètres contrôlant la distribution de la fracturation : exemple dans une série marno-calcaire du Jurassique supérieur (est du bassin de Paris), Geosciences Numéro spécial, 338, 12-13, 931-941.

> ASHWORTH, D.J. et SHAW, G. (2006), Effect of moisture content and redox potential on in-situ Kd values for radioiodine in soil, Science of the total environment, 359, 244-254.

> BOURG, I. (2006), Tracer diffusion in compacted, water-saturated bentonite, Clays and clay minerals, 54, 3, 364-376.

> CASSIAUX, M., PROUST, D., SIITARI-KAUPPI, M., SARDINI, P. et LEUTSCH, Y. (2006), Clay minerals formed during propylitic alteration of a granite and their influence on primary porosity: a multi-scale approach, Clays and clay minerals, 54, 5, 541-554.

> CHARPENTIER, D., DEVINEAU, K., MOSSER-RUCK, R. et VILLIERAS, F. (2006), Bentonite-iron interactions under alkaline condition: an expérimental approach, Applied clay science, 32, 1-2, 1.13.

> COLLIN, P.Y. et COURVILLE, P. (2006), Sedimentation and palaeogeography of the eastern part of the Paris Basin (France) at the middle-Upper Jurassic boundary, Geosciences Numéro spécial, 338, 12-13, 824-833.

> COURTINAT, B., FERRY, S. et COURTINAT, S. (2006), Les Kystes de dinolagellés des argiles Ostréenne du bassin de Paris, France, Revue de la Micropaelontologie, 49, 1, 11-19.

> DELAY, J., TROUILLER, A. et LAVANCHY, J.M., (2006), Propriétés hydrodynamiques du Callovo-Oxfordien dans l’Est du bassin de Paris : comparaison des résultats obtenus selon différentes approches. Geosciences Numéro spécial, 338, 12-13, 892-907.

> DEVINEAU, K., BIHANNIC, I., MICHOT, L., VILLIERAS, F., MASROURI, F., CUISINIER, O., FRAGNETO, G. et MICHAU, N. (2006), In situ neutron diffraction analysis of the influence of geometric confinement on crystalline swelling of montmorillonite, Applied clay science, 31, 76-84.

> DEWONCK, S., DESCOTES, M., BLIN, V., TEVISSEN, E., RADWAN, J., POINSSOT, C., CARTALADE, A., BRISSET, P. et COELHO, D. (2006), In situ diffusion experiments in Callovo-Oxfordian mudstone, Geochimica et Cosmochimica Acta, 70, 18, 1.

> ECHEVARRIA, G., MASSOURA, S., STECKEMAN T., T., SCHWARTZ, C. et MOREL, J.L. (2006), Assessment and control of the bioavailability of nickel in soils, Environmental toxicology and chemistry, 25, 3.

> ESTEBAN, L., BOUCHEZ, J. et TROUILLER, A. (2006), The callovo-Oxfordien argillites from eastern Paris basin : magnetic data and petrofabrics. Geosciences Numéro spécial, 338, 12-13, 867-881.

> ESTEBAN, L., GERAUD, Y. et BOUCHEZ, J.L. (2006), Pore network geometry in low permeability argillites from magnetic fabric data and oriented mercury injections, Geophysical research letters, 33, 18, L18311.

> FERRAND, E., DUMAT, C., LECLERC-CESSAC, E. et BENEDETTI, M., (2006), Phytoavailability of zirconium in relation to its initial added form and soil characteristics, Plant Soil, 287, 313-325,

> FERRAND, K., ABDELOUAS, A., et GRANBOW, B., (2006), Water diffusion in the simulated French nuclear waste glass SON 68 containing silica rich solutions : experimental and modeling, Journal of Nuclear Materials, 355, 1-3, 54-67.

> GARGANI, J., STAB, O., COJAN, I. et BRULHET, J. (2006), Modelling the long-term fluvial erosion of the Somme river during the last million years, TERRA NOVA, 18, 2, 118.

> GAUCHER, E. et BLANC, P. (2006), Cement, clay interactions A review : expriments, natural analogues, and modeling, Waste management, 26, 776-788.

> GAUCHER, E., BLANC, P., ALTMANN, S., BARDOT, F., BRAIBANT, G., BUSCHAERT, S., CROUZET, C., GAUTIER, A., GIRARD, J.P., JACQUOT, E., LASSIN, A., NEGREL, G. et TOURNASSAT, C. (2006), Modeling the porewater chemistry of the Callovian-Oxfordien formation at the regional scale, Geosciences, 338, 12-13, 917-930.

> GIBERT, D., LEMOUEL, J.L., LAMBS, L., NICOLLIN, F. et PERRIER, F. (2006), Sap flow and daly electric potential variations in a tree trunk, Plant science, 171, 5, 572-584.

> GIBERT, D., NICOLLIN, F., KERGOSIEN, B., BOSSART, P., CONIL, F., HOTEIT, N., MOUEZY-GRISLIN, A. et NUSSBAUM, R.H. (2006), Electrical tomography monitoring of the excavation damaged zone of the gallery 04 in the Mont Terri Rock Laboratory : Field experiments and preliminary results, Applied clay science, 33, 1, 21-34.

> GIOT, R., GIRAUD, A. et HOMAND, F. (2006), Three-dimensional finite element modelling of stress relaxation tests in anisotropic clayey medium: direct problem and back analysis, Geotechnical and Geological engineering, 24, 919-947.

> GRAMBOW, B., FATTAHI, M., MONTAVON, G., MOISAN, C. et GIFFAUT, E., (2006), Sorption of Cs, Ni, Pb, Eu(III), Am(III), Cm, Ac(III), Tc(IV), Th, Zr, and U(IV) on MX80 bentonite : An experimental approach to assess model uncertainty, Radiochimica acta, 94, 9-11, 627-636.

> GUPTA, A., ADLER, P.M. (2006), Stereological analysis of fracture networks along cylindrical galleries. The direct problem, Mathematical Geology, 38, 3, 233-267.

> HAUTEVELLE, Y., MICHELS, R., LANNUZEL, F., MALATRE, F. et TROUILLER, A. (2006), The confined pyrolysis of extant land plants : contribution to paleochemotaxonomy , Organic geochemistry, 37, 11, 1546-1561.

> HAUTEVELLE, Y., MICHELS, R., MALARTRE, F. et TROUILLER, A. (2006), Vascular plant biomarkersas proxies for palaeoflora and palaeoclimatic changes at the Dogger, Malm transition of the Paris Basin (France), Organic geochemistry, 37, 5, 610-625.

> HOMAND, F., SHAO, J.F., GIRAUD, A., AUVRAY, D. et HOXHA, D. (2006), Pétrofabrique et propriétés mécaniques des argilites. Geosciences Numéro spécial, 338, 12-13, 882-891.

> KADIRI, I., MERRIEN-SOUKATCHOFF, V. et GUGLIELMI, Y. (2006), Analysis of the in situ hydromechanical bahavior of a fractured calcareous rock mass, Rock mechanics and rock engineering, 39, 1, 1-24.

> LANDAIS, P. (2006), Advances in geochemical research for the underground disposal of high level long lived radioactive waste in a clay formation, Journal of geochemical exploration, 88, 1-3, 32-36.

> LAPUERTA, S., BERERD, N., JAFFREZIC, H., MILLARD-PINARD, N. et MONCOFFRE, N. (2006), Role of proton irradiation and relative air humidity on iron corrosion, Journal of Nuclear Materials, 352, 174-181.

> LAPUERTA, S., MONCOFFRE, N., BERERD, N., JAFFREZIC, H., MILLARD-PINARD, N. et CRUSSET, D. (2006), Ion beam analysis tof the effect of O2 and H2O on the oxidation of iron under irradiation, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 249240, 1-2, 470-473.

> LATRILLE, C., LY, J. et HERBETTE, M. (2006), Retention of Sn(IV) and Pu(IV) onto four argillites from the Callovo-Oxfordien level at Bure (France) from eight equilibrated sedimentary waters. Radiochimica acta, 94, I8, 421-427.

> LE GONIDEC, Y. et GIBERT, D. (2006), The Wavelet Response as a Multiscale Characterization of Scattering Processes at Granular Interfaces, Ultrasonics, 44, 4, 381-390.

> LEBON, P. (2006), Stocker dans les argiles ? Où en est la recherche ?, Revue du palais de la découverte, 339, 54-63.

> LEROY, P., REVIL, A. et COELHO, D. (2006), Diffusion of ionic species in bentonite, Journal of colloid and interface science, 296, 1, 248-255.

> LEROY, P., REVIL, A. et COELHO, D. (2006), Diffusivity of a binary salt and ions in a porous bentonite, Journal of colloid and interface science.

> LOSSON, B., CORBONNOIS, J., ARGANT, J., BRULHET, J., PONS-BRANCHU, E. et QUINIF, Y. (2006), Interprétation paléoclimatique des remplissages endokarstiques de la vallée de la Moselle à Pierre la Treiche (Lorraine, France), Géomorphologie, 1, 37-48.

> MALIKOVA, N., CADENE, A., MARRY, V., DUBOIS, E. et TURQ, P. (2006), Diffusion of water in clays on the microscopic scale : Modeling and experiment, Journal of physical chemistry.. B : condensed matter, 110, 7, 3206-3214.

> MASSOURA, S., ECHEVARRIA, G., BECKER, T., GHANBAJA, J., LECLERC-CESSAC, E. et MOREL, J.L. (2006), Control of Nickel availability by nickel bearing minerals in natural and anthropogenic soils, GEODERMA, 136, 28-37.

> NEGREL, P., CASANOVA, J. et BRULHET, J. (2006), REE and Nd isotope stratigraphy of a late jurassic carbonate platform, eastern Paris Basin, Journal of sedimentary research, 76, 605-617.

> NGUYEN, T.S., SELVADURAI, A.P.S., et ARMAND, G. (2006), Modelling of the Febex THM experiment using a state surface approach, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Abstracts, 42, 5-6, 639-651.

> OCHS, M., DAVIS, J.A., OLIN, M., PAYNE, T.E., TWEED, J., ASKARIEH, M. et ALTMANN, S. (2006), Use the thermodynamic sorption models to derive radionucleïde Kd values for performance assessment : selected results and recommendations of the NEA sorption project, Radiochimica acta, 94, 9-11, 779-786.

> OCHS, M., POINTEAU, I. et GIFFAUT, E. (2006), Caesium sorption by hydrated cement as a function of degradation state : experiments and modelling, Waste management, 26, 7, 725-732.

> PASZKUTA, M., ROSANNE, M. et ADLER, P. (2006), Transport coefficients of saturated compact clays. Geosciences Numéro spécial, 338, 12-13, 908-916.

> PELLENARD, P. et DECONINCK, J.F. (2006), Mineralogical variability of Callovo-Oxfordian clays from the Paris Basin and the Subalpine Basin. Geosciences Numéro spécial, 338, 12-13, 854-866.

> PERLOT, C., VERDIER, J. et CARCASSES, M. (2006), Influence of cement on transport properties and chemical degradation : Application to nuclear waste storage, Material and structures, 39, 5, 511-523.

> PLANEL, D., SERCOMBE, J., LE BESCOP, P., ADENOT, F. et TORRENTI, J.M. (2006), Long-Term Performance of Cement Paste during Combined Calcium Leaching-Sulfate Attack Part 1 Experimental results, Cement and Concrete Research, 36, 1, 137-143.

> POINTEAU, I., HAINOS, D., COREAU, N. et REILLER, P. (2006), Effect of organics on selenite uptake by cementitious materials, Waste management, 26, 7, 733-740.

> POINTEAU, I., REILLER, P., MACE, N., LANDESMAN, C. et COREAU, N. (2006), Measurement and modeling of the surface potential evolution of hydrated cement pastes as a function of degradation, Journal of colloid and interface science, 300, 1, 33-44.

> REVIL, A., LEROY, P., GHORBANI, A., FLORSCH, N. et NIEMEIJER, A.R. (2006), Compactional response of quartz sands by pressure solution using a Cole-Cole distribution of relaxation times, Journal of Geophysical Research, 111, B09205.

> REVIL, A. et LINDE, N. (2006), Chemio-electromechanical coupling in micropourous media, Journal of colloid and interface science, 302, 682-694.

> ROTENBERG, B., DUFRECHE, J.F., BAGCHI, B., GIFFAUT, E., HANSEN, J.P. et TURQ, P. (2006), Ion dynamics in compacted clays : derivation of a two-state diffusion-reaction scheme from the lactice Fokker-F, The Journal of chemical physics, 124, 12 Pages.

> SHAO, J.F., JIA, Y., KONDO, D. et CHIARELLI, A.S. (2006), A coupled elastoplastic damage model for semi-brittle materials and extension to unsaturated conditions , Mechanics of Materials, 38, 3, 218-232.

> SU, K. et LEBON, P. (2006), Andra’s feasibility study on deep geological disposal of high-level long-lived radioactive waste, Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 25, 4, 813-825.

> TECHER, I., KHOURY, H.N., RASSINEUX, F., SALAMEH, E., CLAUDE, C., CLAUER, N., PAGEL, M., LANCELOT, J., GRIFFAULT, L. et JACQUOT, E., (2006), Propagation of alkaline fluids in an argillaceous formation : study of the khushaym Matruk natural analogue (centre Jordan), Journal of geochemical exploration, 90, 53-67.

> TERTRE, E., BERGER, G., SIMONI, E., CASTET, S., GIFFAUT, E., LOUBET, M. et CATALETTE, H. (2006), Europium retention onto clay minerals from 25 ro 150°C : experimental measurements, spectroscopic features and sorption modelling, Geochimica et Cosmochimica Acta, 70, 18, 4563-4578.

> TERTRE, E. CASTET, S., BERGER, G., LOUBET, M. et GIFFAUT, E. (2006), Surface chemistry of kaolinite and Na-montmorillonite in aqueous electrolyte solutions ar 25 and 60°C : experimental and modeling study, Geochimica et Cosmochimica Acta, 70, 18, 4579-4599.

> THIERRY, J., MARCHAND, D., FORTWENGLER, D., BONNOT, A. et JARDAT, R. (2006), Les ammonites du Callovo-Oxfordien des sondages Andra dans l’Est du Bassin de Paris : Synthèse biochronostratigraphique, intérêts palaeéocologique et palaeobiogéographique. Geosciences Numéro spécial, 338, 12-13, 834-853.

> TROTIGNON, L., PEYCELON, H. et BOURBON, X. (2006), comparison of performance of concrete barriers in a clayey geological medium, Physics and Chemistry of the Earth, Parts A, B, C, 31, 10-14, 610-617.

> TROUILLER, A. (2006), Le Callovo-Oxfordien du bassin de Paris : du contexte géologique à la modélisation de ses propriétés. Geosciences Numéro spécial, 338, 12-13, 815-823.

> ZHANG, C., ROTHFUCHS, T., WIECZOREK, K., JOCKWER, N. et WILEVEAU, Y. (2006), Monitoring and modeling of responses of the Opalinus Clay to heating, Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 25, 4, 659-669.

> ZHANG, C., WANG, J. et SU, K. (2006), Concepts and tests for disposal of radioactive waste in deep geological formations, Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 25, 4, 750-767.

Les publications en 2007

> ABOU-CHAKRA GUERY, A., CORMERY, F., SHAO, J.F. et KONDO, D. (2007) Micromechanics based modeling of the callovo-oxfordian argillite mechanical behavior. Mécanique et industrie, 8, 225-234.

> ANDRIEU-PONEL, V., TEXIER, D., BRULHET, J., BEAULIEU, J.L., BEGEOT, C., CHEDDADI, R., GANDOUIN, E., GOODESS, C., GUITER, F., HAMELIN, B., LOUTRE, M.F., MAGNY, M. et MASSON-DELMOTTE, V. (2007) Climate and environmental evolution scenarios for the Meuse/Haute-Marne region, France. Mémoires de la société géologique de France, 178, 115-134.

> BAZER-BACHI, F., DESCOTES, M., TEVISSEN, E., MEIER, P., GRENUT, B., SIMONNOT, M.O. et SARDIN, M. (2007) Characterization of sulphate sorptionon Callovo-Oxfordian argillites by batch, column and through-diffusion experiments. Physics and chemistry of the earth, 32, 552-558.

La diffusion des résultats
et la valorisation scientifique

> BERGERAT, F., ELION, P., FRIZON DE LAMOTTE, D., PROUDHON, B., COMBES, P., ANDRE, G., WILEVEAU, Y., LAURENT-CHARVET, S., KOURDIAN, R., LEROUGE, G. et OTT D'ESTEVOU, P. (2007) 3D multiscale structural analysis of the easten Paris basin : the Andra constribution. Mémoires de la société géologique de France, 178, 15-35.

> BLANC, P., LEGENDRE, O. et GAUCHER, E. (2007) Estimate of clay minerals amounts from XRD pattern modelling : The arquant model.Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 32, 135-144.

> BLUMLING, P., BERNIER, F., LEBON, P. et MARTIN, C.D. (2007) The excavation damaged zone in clay formations time-dependent behaviour and influence on performance assessment.Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 32, 588-599.

> BOURG, I.C., SPOSITO, G. et BOURG, A. (2007) Modeling the acid-base surface chemistry of montmorillonite. Journal of colloid and interface science, 312, Issue 2.

> BOURG, I.C., SPOSITO, G. et BOURG, A.C.M. (2007) Modeling cation diffusion in compacted water saturated sodium bentonite at low ionic strength. Environmental Science and Technology, 41, 23, 8118-8122.

> BUSCHAERT, S.,GIANNESINI, S., LAVASTRE, V., BENEDETTI, L., GAUCHER, E.C., LACROIX, M., LAVIELLE, B., FRANCE-LANORD, C., BOURLES, D., LANCELOT, J., BENABDERRAHMANE, H., DEWONCK, S., VINSOT, A. et MICHELOT, J.L. (2007) The contribution of water geochemistry to the understanding of the regional hydrogeological system. Mémoires de la société géologique de France, 178, 91-114.

> CAI, M., KAISER, P.K., SUORINENI, F.T. et SU, K. (2007) A study on the dynamic behavior of the Meuse/Haute-Marne argillite. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 32, 907-916.

> CALVARUSO, C., TURPAULT, M-P., LECLERC E. et FREY-KLETT P. (2007) Impact of Ectomycorrhizosphere on the funtional diversity of soil bacterial and fungal communities from a forest stand in relation to nutrient mobilization processes. Microbial Ecology, 1-1.

> CARPENTIER, C., LATHUILIERE, B., FERRY, S. et SAUSSE, J. (2007) Sequence stratigraphy and tectonosedimentary of the Upper Jurassic of the Eastern Paris Basin (lower and Middle Oxfordian, Notheastern France). Sedimentary geology, 197, 235-266.

> CARTALADE, A., MONTARNAL, P., FILIPPI, M., MUGLER, C., LAMOUREUX, M., MARTINEZ, J.M., CLEMENT, F., WILEVEAU, Y., COELHO, D. et TEVISSEN, E. (2007) Application of inverse modeling methods to thermal and dffusion experiments at Mont Terri Rock Laboratory. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 32, 491-506.

> CLAUER, N., FOURCADE, S., CATHELINEAU, M., GIRARD, J.P., VINCENT, B., ELIE, M., BUSCHAERT, S. et ROUSSET, D. (2007) A review of studies on the diagenetic evolution of the Dogger to Tithonian sedimentary sequence in the eastern Paris Basin. Impact on the physical and chemical rock porperties. Mémoires de la société géologique de France, 178, 59-71.

> COJAN, I., BRULHET, J., CORBONNOIS, J., DEVOS, A., GARGANI, J., HARMAND, D., JAILLET, S., JOUVE, A., LAURAIN, M., LEJEUNE, O., LE ROUX, J., LOSSON, B., MARRE, A., MOREAU, M.G., RICORDEL, C. et SIMON-COINCON, R. (2007) Evolution géomorphologique de l'Est du Bassin Parisien : surfaces anciennes et incisions quaternaires. Mémoires de la société géologique de France, 178, 135-155.

> DAVID, C., ROBION, P. et MENENDEZ, B (2007) Anisotropy of elastic, magnetic and microstructural properties of the Callovo-Oxfordian argillite. Physics and chemistry of the earth, 32, 145-153.

> DAVY, C., SKOCZYLAS, F., BARNICHON, J.D. et LEBON, P. (2007) Permeability of macro-craked argillite under confinement: Gas and water testing. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 32, 667-680.

> DE COMBARIEU, G., BARBOUX, P. et MINET, Y. (2007) Iron corrosion in Callovo-Oxfordian argilite: from experiments to thermodynamic:kinetic modelling. Physics and chemistry of the earth, 32, 346-358.

> DEDECKER, F., CUNDALL, P., BILLAUX, D. et GROEGER T. (2007) Evaluation of damage-induced permeability using a three-dimentional Adaptive Continuum/Diiscontinuum Code (AC/DC). Physics and chemistry of the earth, 32,681-690.

> DELAY, J., DISTINGUIN, M. et DEWONCK, S. (2007) Characterization of a clay-rich rock through development and installation of specific hydrogeological and diffusion test equipment in deep boreholes. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 32, 393-407.

> DELAY, J., REBOURS, H., ROBIN, P. et VINSOT, A. (2007) Scientific investigation in deep wells for nuclear waste disposal studies at the Meuse/Haute-Marne underground research laboratory, Northeastern France. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 32, 42-57.

> DELAY, J., VINSOT, A., KRIEGUER, J.M., REBOURS, H. et ARMAND, G. (2007) Making the underground scientific experimental programme at Meuse/Haute-Marneunderground research laboratory, North Eastern France. Physics and chemistry of the earth, 32, 2-18.

> DISTINGUIN, M. et LAVANCHY, J.M. (2007) Determination of hydraulic properties of the Callovo-Oxfordian argillite at the Bure site : Synthesis of the results obtained in deep boreholes using several in situ investigations techniques. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 32, 379-392.

> DIXON, D.A., MARTINO, J.B., VIGNAL, B., MASUMOTO, K. et FUGITA, T. (2007) Overview of the evolution performance and state of a bentonite-based tunnel seal after 5 years of operation. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C,32, 741-752.

> ELIE, M., TECHER, I., TROTIGNON, L., KHOURY, H., SALAMEH, E., VANDAMME, L., FOURCADE, S. et BOULVAIS, P. (2007) Cementation of kerogen-rich marls by alkaline fluids released during weathering of thermally metamorphosed marly sediments. Part II: organic matter evolution, magnetic suceptibility and metals (Ti, Cr, Fe) at the Khushaym Matruk natural analogue (Central Jordan). Applied Geochemistry, 22, 1311-1328.

> ESTEBAN, L., GERAUD, Y. et BOUCHEZ, J.L. (2007) Pore network connectivity anisotropy in Jurassic argillite specimens from eastern Paris Basin (France). Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 32, 161-169.

> FAURE, P. et PEIFFERT, C. (2007) Lixiviation of argillaceous rocks : impact of oxidation degree states on organic compound mobilization. Fuel, 86, 426-433.

> FERRY, S., PELLENARD, P., COLLIN, P.Y., THIERRY, J., MARCHAND, D., DECONINCK, J.F., ROBIN, C., CARPENTIER, C., DURLET, C. et CURIAL, A. (2007) Synthesis of recent stratigraphic data on Bathonian to Oxfordian deposits of the eastern Paris basin. Mémoires de la société géologique de France, 178, 37-57.

> FOURCADE, S., TROTIGNON, L., BOULVAIS, P., TECHER, I., ELIE, M., VANDAMME, L., SALAMEH, E. et KHOURY, H. (2007) Cementation of kerogen-rich marls by alkaline fluids released during weathering of thermally metamorphosed marly sediments. Part 1: Isotopic (C,O) study of the Khushaym Matruk natural analoque (central Jordan). Applied Geochemistry, 22, 1293-1310.

> GAILHANOU, H., VAN MILTENBURG, J.C., ROGEZ, J., OLIVES, J., AMOURIC, M., GAUCHER, E. et BLANC, P. (2007) Thermodynamic properties of anhydrous smectite MX-80, illite IMt-2 and mixed-layer illite-smectite ISCz-1 by calorimetric methods Part.1 Heat capacities, heat contents and entropies. Geochimica et Cosmochimica Acta, 71, 22, 5463-5473.

> GEHIN, A., GRENECHE, J.M., TOURNASSAT, C., BRENDLE, J., RANCOURT D.G. et CHARLET, L. (2007) Reversible surface-sorption-induced electron-transfer oxidation of Fe (II) at reactive sites on a synthetic clay mineral. Geochimica et Cosmochimica Acta, 71, 863-876.

> GENS, A., VAUNAT, J., GARITTE, B. et WILEVEAU, Y. (2007) In situ behaviour of a stiff layered clay subject to thermal loading : observations and interpretation. Géotechnique, 57, 2, 207-228.

> GONCALVES, J., GUEUTIN, P. et REVIL, A. (2007) Introducing interacting diffuse layers in TLM calculations. A reappraisal of the influence of the pore size on the swelling pressure and the osmotic efficiency of compacted bentonites. Journal of colloid and interface science, 316, 92-99.

> GUEUTIN, P., ALTMANN, S., GONCALVES, J., COSENZA, P. et VIOLETTE, S. (2007) Osmotic interpretation of overpressures from monovalent based triple layer model, in the Callovo-Oxfordian at the Bure site. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 32, 434-440.

> GUPTA, A., COELHO, D. et ADLER, P.M. (2007) Influence of stern layer on electrokinetic phenomena. Journal of colloid and interface science, 316, 140-159.

> HAUDIN, C.S., FARDEAU, M.L., AMENC, L., RENAULT, P., OLLIVIER, B., LECLERC-CESSAC, E. et STAUNTON, S. (2007) Responses of anaerobic bacteria tosoil amendment with selenite. Soil biology and biochemistry, 39, 2408-2413.

> HAUDIN, C.S., RENAULT, P., HALLAIRE, V., LECLERC-CESSAC, E. et STAUNTON, S. (2007) Effect of aeration on mobiliy and reactions of selenium in aggregated soil columns as influenced by straw amendment and tomato plant growth. Geoderma, 141, 98-110.

> HAUDIN, C.S., RENAULT, P., LECLERC-CESSAC, E. et STAUNTON, S. (2007) Effect of straw and selenite additions on microbial activity and dynamics in three soils. Soil biology and biochemistry, 39, 2670-2674.

> HAUTEVELLE, Y., MICHELS, R., MALARTRE, F., ELIE, M. et TROUILLER, A. (2007) Tracing of variabilities within a geological barrier by molecular geochemistry. Case od the Callovo-Oxfordian sedimentary series in the East of the Paris Basin France. Applied Geochemistry, 22, 4, 736-759.

> HOKMARK, H., LEDESMA, A., LASSABATERE, T., FALTH, B., BORGESSON, L., ROBINET, J.C., SELLALI N. et SEMETE, P. (2007) Modelling heat and moisture transport in the ANDRA/SKB temperature buffer test. Physics and chemistry of the earth, 32, 753-766.

> HOXHA, D., GIRAUD, A., HOMAND, F. et AUVRAY, C. (2007) Saturated and unsaturated behaviour modelling of Meuse/ Haute-Marne argilite. International Journal of Plasticity, 23, 733-766.

> JIA, Y., SONG, X., DUVEAU, G., SU, K. et SHAO, J.F. (2007) Elastoplastic damage modelling for argillite in partially saturated condition and application. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 32, 656-666.

> JIA, Y., WILEVEAU, Y., SU, K., DUVEAU, G. et SHAO, J.F. (2007) Thermo-hydro-mechanical modelling of an in situ heating experiment. Géotechnique, 57, 10, 845-855.

> JOST, A., VIOLETTE, S., GONCALVES, J., LEDOUX, E., GUYOMARD, Y., KAGEYAMA, M., RAMSTEIN, G., SUC, J.P. et GUILLOCHEAU, F. (2007) Long-term hydrodynamic response induced by past limatic and geomorphologic forcing : The case of the Paris basin, France. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 32, 368-378.

> JOURDE, H., FENART, P., VINCHES, M., PISTRE S. et VAYSSADE, B. (2007) Relationship between the geometrical and structural properties of layered fractured rocks and their effective permeability tensor. A simulation study. Journal of hydrology, 32, 117-132.

> KAZMIERCZACK, J.B., LAOUAFA, F., GHOREYCHI, M., LEBON, P. et BARNICHON, J.D. (2007) Influence of creep on water pressure measured from borehole tests in the Meuse/Haute-Marne Callovo-Oxfordian argillites. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 32, 917-921.

> KULL, H., JOCKWER, N., ZHANG, C., WILEVEAU, Y. et PEPA, S. (2007) Measurement of thermally-induced pore-water pressure increase and gas migration in the Opalinus Clay at Mont Terri. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 32, 937-946.

> LAPUERTA, S., MILLARD-PINARD, N., MONCOFFRE, N., BERERD, N., JAFFREZIC, H., BRUNEL, G., CRUSSET, D. et MENNECART, T. (2007) Origin of the hydrogen involved in iron corrosion under irradiations. Surface and Coatings Technology, 201, 8197-8201.

> LAPUERTA, S., MONCOFFRE, N., BERERD, N., JAFFREZIC, H. et MILLARD-PINARD, N. (2007) Use of the point defect model to interpret the iron oxidation kinetics under proton irradiation. Journal of applied geophysics, 101, 064905-1-064905-7.

> LEBON, P. (2007) Introduction to the memoir. Mémoires de la société géologique de France, 178, 7-12.

> LEROY, P., REVIL, A., ALTMANN, S. et TOURNASSAT, C. (2007) Modeling the composition of the pore water in a clay-rock geological formation (Callovo-Oxfordian, France). Geochimica et Cosmochimica Acta, 71, 1087-1097.

> LINDE, N., JOUGNOT, D., REVIL, A., MATTHAI, S., ARORA, T., RENARD, D. et DOUSSAN, C. (2007) Streaming current generation in two-phase flow conditions. Geophysical research letters, 1-17.

> MACE, N., LANDESMAN, C., POINTEAU, I., GRAMBOW, B. et GIFFAUT, E. (2007) Characterisation of thermally altered cement pastes. Influence on selenite sorption. Advances in cement research, 19, 4, 157-165.

> MAILLANT, S., SHEPPARD, M., ECHEVARRIA, G., DENYS, S., VILLEMIN, G., TEKELY, P., LECLERC-CESSAC, E. et MOREL, J.L. (2007) Aged anthropogenic iodine in a boreal peat bog. Applied Geochemistry, 22, 873-887.

> MARTINO, J.B., DIXON, D.A., KOZAK, E.T., GASCOYNE, M., VIGNAL, B., SUGITA, Y., FUJITA, T. et MASUMOTO, K. (2007) The tunnel sealing experiment : An international study of full-scale seals. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 32, 93-107.

> MAUGIS, P. et IMBERT, C. (2007) Confined wetting of FaCa clay powder: pellet mixtures: Experimentation and numerical modeling. Physics and chemistry of the earth, 32, 795-808.

> MELKIOR, T., YAHIAOUI, S., THOBY, D., MOTELLIER, S. et BARTHES, V. (2007) Diffusion coefficients of alkaline cations in Bure mudrock. Physics and chemistry of the earth, 32, 453-462.

> MONTARNAL, P., MUGLER, C., COLIN, J., DESCOSTES, M., DIMIER, A. et JACQUOT, E. (2007) Presentation and use of a reactive transport code in porous media. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 32, 507-517 494.

> PHAM, T.P., VALES, F., MALINSKY L., NGUYEN MINH, D. et GHARBI, H. (2007) Effects of desaturation-resaturation on mudstone. Physics and chemistry of the earth, 32, 646-655.

> PIEDEVACHE, M., ARMAND, G., MOREL, J. et LETTRY Y. (2007) Laboratoire de recherche Meuse/Haute-Merne mesures hydromécaniques dans une roche argileuse profonde. Tunnels et ouvrages souterrains (Villeurbanne), 204, 1-6.

> PONEL, P., GANDOUIN, E., COOPE, G. R., ANDRIEU-PONEL, V., GUITER, F., VAN VLIET-LANOE, B., FRANQUET, E., BROCANDEL et M., BRULHET, J. (2007) Insect evidence for environmental and climate changes from Younger Dryas to Sub-Boreal in a river floodplain at St-Momelin (St-Omer basin, northern France), Coleoptera and Trichoptera. Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeocology, 245, 3-4, 483-504.

> REVIL, A. (2007) Thermodynamics of ions and water transport in porous media. Journal of colloid and interface science, 307, 254-264.

> REVIL, A., LINDE, N., CEREPI, A., JOUGNOT, D., MATTHAI, S. et FINSTERLE, S. (2007) Electrokinetic coupling in unsaturated porous media. Journal of colloid and interface science, 313, 315-327.

> ROBION, P., DAVID, C. et COLOMBIER, J. C. (2007) Temperature-related (induced) evolution of the elastic and magnetic anisotropy in argillite samples from Bure underground research laboratory, eastern France. Geological Society of London.

> ROTENBERG, B., MARRY, V., DUFRECHE, J.F., GIFFAUT, E. et TURQ, P. (2007) A multiscale approach to ion diffusion in clays: Building a two-state diffusion-reaction scheme from microscopic dynamics. Journal of colloid and interface science, 309, 289-295.

> ROTENBERG, B., MARRY, V., DUFRECHE, J.F., MALIKOVA, N., GIFFAUT, E. et TURQ, P. (2007) Modeling water and ion diffusion in clays: a multiscale approach. Comptes Rendus Chimie, 10, 1108-1116.

> ROTENBERG, B., MARRY, V., VUILLEUMIER, R., MALIKOVA, N., SIMON, C. et TURQ, P. (2007) Water and ions in clays: Unraveling the interlayer/micropore exchange using molecular dynamics. Geochimica et Cosmochimica Acta, 71, 5089-5101.

> SANDEN, T., GOUDARZI, R., DE COMBARIEU, M., AKESSON, M. et HOKMARK, H. (2007) Temperature buffer test - design, instrumentation and measurements. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 32, 77-92.

La diffusion des résultats
et la valorisation scientifique

> SAROUT, J., MOLEZ, L., GUEGUEN, Y. et HOTEIT, N. (2007) Shale dynamic properties and anisotropy under triaxal loading : experimental and theoretical investigations. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 32, 896-906.

> STROES-GASCOYNE, S., SCHIPPERS A., SCHWYN, B., POULAIN, S., SERGEANT, C., SIMONOFF, M., LE MARREC, C., ALTMANN, S., NAGAOKA, H., MAUCLAIRE L., MAC KENZIE, A.B., DAUMAS, S., VINSOT, A., BEAUCAIRE, C. et MATRAY, J.M. (2007) Microbial community analysis of Opalinus clay drill core samples from the Mont terri underground research laboratory, Switzerland. Geomicrobiology journal, 17, 1-17.

> TELES, V., MAUGIS, P., MOUCHE, E., BRULHET, J., WENDLING, J. et VIGNERON, G. (2007) Impact of the landscape evolution on the hydraulic boundary conditions of the Callovo-Oxfordian formation. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 32, 359-367.

> THEVENIAUT, H., QUESNEL, F., WYNS, R. et HUGUES, G. (2007) Palaeomagnetic dating of the «Borne de fer» ferricrete (NE France): Lower Cretaceous continental weathering. Paleogeogeography, Paleoclimatology, Paleoecology, 253, 271-279.

> TOURNASSAT, C., GAILHANOU, H., CROUZET, C., BRAIBANT, G., GAUTIER, A., LASSIN, A., BLANC, P. et GAUCHER, E , (2007) Two cation exchange models for direct and inverse modelling of solution major cation composition in equilibrium with illite surfaces. Geochimica et Cosmochimica Acta, 71, 5, 1098-1114.

> TOURNASSAT, C., GAUCHER, E., FATTAHI, M. et GRAMBOW, B. (2007) On the mobility and potential retention of iodine in the Callovo-Oxfordian formation. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 32, 539-551.

> TROTIGNON, L., DEVALLOIS, V., PEYCELON, H., TIFFREAU, C. et BOURBON, X. (2007) Predicting the long term durability of concrete engineered barriers in a geological repository for radioactive waste. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 32, 259-274.

> VINCENT, B., EMMANUEL, L., HOUEL, P. et LOREAU, J.P. (2007) Geodynamic control on carbonate diagenesis: petrographic and isotopic investigation of the Upper jurassic formations of the Paris Basin (France). Sedimentary geology, 197, 267-289.

> VUILLEMIN, B., OLTRA, R., COTTIS, R. et CRUSSET, D. (2007) Consideration of the formation of solids and gases in study state modelling of crevice. Electrochimica acta, 52, 7570-757.

> WILEVEAU, Y., CORNET, F.H., DESROCHES, J. et BLUMLING, P. (2007) Complete in situ stress determination in an argillite sedimentary formation. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 32, 866-878.

> YVEN, B., SAMMARTINO, S., GERAUD, Y., HOMAND, F. et VILLIERAS, F. (2007) Mineralogy, texture and porosity of Callovo-Oxfordian argilites of Meuse/Haute-Marne (Eastern Paris Basin). Assemblage mineralogique texture et porosité des argilites du Callovo-Oxfordien. Mémoires de la société géologique de France, 178, 73-90.

> ZHANG, C., ROTHFUCHS, T., SU, K. et HOTEIT, N. (2007) Experimental study of the thermo-hydro-mechanical behavior of indurated clays. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 32, 957-965

Les publications en 2008

> ALTMANN, S. (2008) Geochemical research: a key building block for nuclear waste disposal safety cases. Journal of Contaminant Hydrology, 102, 174-179.

> APPELO, C.A.J., VINSOT, A., METTLER, S. et WECHNER S. (2008) Obtaining the porewater composition of a clay rock by modeling the in and out diffusion of anions ans cations from an in-situ experiment. Journal of Contaminant Hydrology. 101, 1-4, 67-76.

> BILLIOTTE, J., YANG, D. et SU, K. (2008) Experimental study on gas permeability of mudstones. Physics and chemistry of the earth, 33, 231-236.

> BOULILA, S., HINNOV, L., HURET, E., COLLIN, P.Y., GALBRUN, B., FORTWENGLER, D., MARCHAND. D., et THIERRY, J. (2008) Astronomical calibration of the Early Oxfordian (Vocontian and Paris basins, France): consequences of revising time scale. Earth and planetary science letters, 276, 40-51.

> BOULIN, P., ANGULO-JARAMILLO, Rafael, DAIAN, J.F., TALANDIER, J. et BERNE, P. (2008) Pore gas connectivity analysis for parameters identification related to gas transfer in Callovo-Oxfordian argillite. Applied clay science, 42, 1-2, 276-283.

> BOULIN, P., ANGULO-JARAMILLO, R., DAIAN, J.F., TALANDIER, J. et BERNE, P. (2008) Experiments to estimate gas intrusion in Callovo-Oxfordian argillites. Physics and chemistry of the earth, 33, 225-236.

> BOURDOISEAU. J-A,, JEANNIN. M,, SABOT, R., REMAZEILLES. C. et REFAIT, P. (2008) Characterisation of mackinawite by Raman spectroscopy: Effects of crystallisation, drying and oxidation. Corrosion science, 50, 11, 3247-3255.

> BOURG, I.C., SPOSITO, G. et BOURG, A.C.M. (2008) Modeling the diffusion of Na+ in compacted water-saturated Na- bentonite as a fuctionof pore water ionic strength. Applied Geochemistry, 23, 3635-3641.

> CAMPS, G., TURATSINZE, A., SELLIER, A., ESCADEILLAS, G. et BOURBON, X. (2008) Steel fibre-reinforcement and hydration coupled effects on concrete tensile behaviour. Engineering Fracture Mechanics, 75,5207-5216.

> CATTANT. F, CRUSSET, D. et FERON, D. (2008) Corrosion issues in nuclear industry today. Materials today, 11, 10, 32-37.

> CHITTY, W.J., DILLMANN, P., MILLARD, A. et L'HOSTIS, V. (2008) Long-term corrosion of rebars embedded in aerial and hydraulic binders- Parametric study and first step of modelling. Corrosion science, 50, 3047-3055.

> CODINA, M., CAU-DIT-COUMES, C., LE BESCOP, P., VERDIER, J., OLLIVIER, J.P., BOURBON, X. et PETIT, L. (2008) Design and characterization of low-heat and low-alkalinity cements. Cement and Concrete Research, 38, 4, 437-448.

> COSENZA, P., GHORBANI, A., REVIL, A., ZAMORA, M., SCHMUTZ M., JOUGNOT, D. et FLORSCH, N. (2008) A physical model of the low-frequency electrical polirization of clay-rocks. Journal of geophysical research. Part B : Solid earth, 113, B8.

> CRESPY, A., REVIL, A., LINDE, N., BYRDINA, S. et JARDANI, A. (2008) Detection and localisation of hydromechanical disturbances in a sandbox using the self-potential method. Journal of geophysical research. Part B : Solid earth, 113, B1.

> CRUCHAUDET, M., CROISE, J. et LAVANCHY, J.M. (2008) In-situ osmotic experiment in the Callovo-Oxfordian argillaceous formation at the Meuse/Haute-Marne URL (France): data and analysis. Physics and chemistry of the earth, 33, 114-124.

> CUISINIER, O., MASROURI, F., PELLETIER, M., VILLIERAS, F. et MOSSER-RUCK, R. (2008) Microstructure of a compacted soil submitted to an alkaline plume. Applied clay science, 40, 1-4, 159-170.

> DELAY, J., LESAVRE, A. et WILEVEAU, Y. (2008) The French underground research laboratory in Bure as a precursor for deep geological repositories. Engineering Geology, XIX, 97-111.

> DELOS, A., WALTHER, C., SCHAFER, T. et BUCHNER, S. (2008) Size dispersion and colloid mediated radionuclide transport in a synthetic porous media. Journal of colloid and interface science, 324, 212-215.

> DENIAU I., DEVOL-BROWN, I., DERENNE S. et LARGEAU C. (2008) Comparison of the bulk geochemicall features and thermal reactivity of kerogens from Mol, Bure and Tournemire underground research laboratories. Science of the total environment, 389, 475-485.

> DESCOSTES, M., BLIN, V., BAZER-BACHI, F., MEIER, P., GRENUT, B., RADWAN, J., SCHLEGEL, M.L., BUSCHAERT, S., COELHO, D. et TEVISSEN, E. (2008) Diffusion of anionic species in Callovo-Oxfordian argillites and Oxfordian limestones. Applied Geochemistry, 23, 4, 655-677.

> DUC, M., CARTERET, C., THOMAS, F. et GABORIAUD, F. (2008) Temperature effect on the acid-base behaviour of Na-montmorillonite. Journal of colloid and interface science, 327, 472-476.

> ERN, A. et STEPHANSEN, A. (2008) Aposteriori energy-norm error estimates for advection-diffusion equations approximated by weighted interior penalty methods. Journal of computational mathematics, 26, 4, 488-510.

> FERON, D., CRUSSET, D. et GRAS, J.M. (2008) Corrosion issues in nuclear waste disposal. Journal of Nuclear Materials, 379, 16-23.

> GAILHANOU, H., ROGEZ, J., VAN MILTENBURG, J.C., VAN GENDEREN, A., GRENECHE, J.M., GILLES, C., JALABERT, D., MICHAU, N., GAUCHER, E.C. et BLANC, P. (2008) Thermodynamic properties of chlorite CCa-2. Heat capacities, heat contents and entropies. Geochimica et Cosmochimica Acta, 73, 16, 4738-4749.

> GAONA, X., MONTOYA, V., COLAS, E., GRIVE, M. et DURO, L. (2008) Review of the complexation of tetravalent actinides by ISA and gluconate under alkaline to hyperalkaline conditions. Journal of Contaminant Hydrology, 102, 3-4, 217-227.

> GARCIA-GUTIERREZ, M., CORMENZANA, J.L., MISSANA, T., MINGARRO, M., ALONSO, U., SAMPER, J., YANG, Q.S. et YI, S. (2008) Diffusion experiments in Callovo-Oxfordian clay from the Meuse/Haute-Marne URL. Experimental setup and data analyses. Physics and chemistry of the earth, 33, 125-130.

> GONCALVES, J. et GUEUTIN, P. (2008) Molecular-scale model for the mass density of electrolyte solutions bound by clay surfaces: application to bentonites. Journal of colloid and interface science, 320, 590-598.

> GUERY, A., CORMERY, F., SHAO, J.F. et KONDO, D. (2008) A micromechanical model of elastoplastic and damage behavior of a cohesive geomaterial. International Journal of solids and structures, 45, 1406-1429.

> GUERY, A., CORMERY, F., SU, K. et LEBON, P. (2008) A micromechanical model for the elasto-viscoplastic and damage behavior of a cohesive geomaterial. Physics and chemistry of the earth, 33, 416-427.

> GUEUTIN, P., GONCALVES, J. et VIOLETTE, S. (2008) Osmotic efficiency in Callovo-Oxfordian argilites: Experimental vs. theoretical models. Physics and chemistry of the earth, 33, 106-116

> GUPTA, A., COELHO, D./ADLER, P.M. (2008) Universal electro-osmosis formulae for porous media. Journal of colloid and interface science, 319, 549-554.

> JIA, Y., DUVEAU, G., SU, K. et SHAO, J.F. (2008) Hydromechanical modeling of shaft excavation in Meuse/Haute-Marne laboratory. Physics and chemistry of the earth, 33, 422-435.

> LAOUAFA, F., KAZMIERCZAK J.B. et ARMAND, G. (2008) Three-dimensional and time stepping of the whole Meuse-Haute Marne URL. Physics and chemistry of the earth, 33, 448-456.

> LEFRANC, M., BEAUDOIN, B., CHILES, J.P., GUILLEMOT, D., RAVENNE, C. et TROUILLER, A. (2008) Geostatistical characterization of the Callovo-Oxfordian clay variability from high resolution log data. Physics and chemistry of the earth, 33, 2-13.

> LEROY, P., REVIL, A., COSENZA, P., KEMNA A. et GHORBANI, A. (2008) Complex conductivity of water-satured packs of glass beads. Journal of colloid and interface science, 321, 103-117.

> MARCHAND, E., CLEMENT, F., ROBERTS, J.E. et PEPIN, G. (2008) Deterministic sensitivity analysis for a model for flow in porous media. Advances in water resources, 31, 8, 1025-1037.

> MARRY, V., ROTENBERG, B. et TURQ, P. (2008) Structure and dynamics of water at a clay surface from molecular dynamics simulation. Physical chemistry chemical physics, 10, 32, 4802-4813.

> MARTIN F.A., BATAILLON, C. et SCHLEGEL, M.L. (2008) Corrosion of iron and low alloyed steel within a water saturated brick of clay under anaerobic deep geological disposal conditions: an integrated experiment. Journal of Nuclear Materials, 379, 80-90.

> MAZUREK, M., GAUTSCHI, A., MARSCHALL, P., VIGNERON, G., LEBON, P. et DELAY, J. (2008) Various sources (study sites, underground rock laboratories, natural analogues) to support safety cases for radioactive waste repositories in argillaceous formations. Physics and chemistry of the earth, 33, 95-105.

> NICOLLIN, F., GIBERT, D., BOSSART, P., NUSSBAUM, C. et GUERVILLY, C. (2008) Seismic tomography of the excavation damaged zone of the gallery 04 in the Mont Terri rock laboratory. Geophysical journal international, 172, 1, 226-239.

> POINTEAU, I., COREAU, N. et REILLER, P. (2008) Uptake of anionic radionucleides onto degraded cement pastes and competing effect of organic ligands. Radiochimica acta, 96, 367-374.

> REVIL, A. et JOUGNOT, D. (2008) Diffusion of ions in unsaturated clay-rocks. Journal of colloid and interface science, 319, 226-235.

> ROTENBERG, B., PAGONBARRAGA I. et FRENKEL D. (2008) Dispersion of charged tracers in charged porous media. Europhysics Letters, 83, 34004.

> SAHEB, M., NEFF, D., DILLMANN, P., MATTHIESEN, H. et FOY. E, (2008) Long-term corrosion behaviour of low-carbon steel in anoxic environment: Characterisation of archaeological artefacts. Journal of Nuclear Materials, 379, 118-123.

> SAMPER, J., YANG, Q.S., GARCIA-GUTIERREZ, M., MISSANA, T., MINGARRO, M., ALONSO, U. et CORMENZANA, J.L. (2008) Numerical modeling of large-scale solid-source diffusion experiments in Callovo-Oxfordian clay. Physics and chemistry of the earth, 33, 208-215.

> SAROUT, J. et GUEGUEN, Y. (2008) Anisotropy of elastic wave velocities in deformed shales: Part 2 - Modeling results. Geophysics, 73, 5, 91-103.

> SAROUT, J. et GUEGUEN, Y. (2008) Anisotropy of elestic wave velocities in deformed shales: Part 1 - Experimental results. Geophysics, 73, 5, 75-89.

> SCHLEGEL, M.L., BATAILLON, C., BENHAMIDA K., BLANC, C., MENUT D. et LACOUR J-L. (2008) Metal corrosion and argillite transformation at the water-saturated, high temperature iron-clay interface: a microscopic-scale study. Applied Geochemistry, 23, 2619-2633.

> SHAO, H., SCHUSTER, K., SONNKE, J. et BRAUER, V. (2008) EDZ development in indurated clay formations in situ borehole measurements and coupled H-M modeling. Physics and chemistry of the earth, 33, 388-395.

> TERTRE, E., HOFMANN, A. et BERGER, G. (2008) Rare earth element sorption by basaltic rock: experimental data and modeling results using the 'Genaralised Composie approach. Geochimica et Cosmochimica Acta, 72, 1043-1056.

> TOURNASSAT, C., LEROUGE C., BLANC, P., BRENDLE, J., GRENECHE, J.M., TOUZELET, S., GAUCHER, E.C. (2008) Cation exchanged Fe (II) and Sr compared to other divalent cations (Ca, Mg) in Bure Callovian-Oxfodian formation. Implications for poewater composition modelling. Applied Geochemistry, 23, 4, 641-654.

> VINSOT, A., APPELO, C.A.J., CAILTEAU, C., WECHNER S., PIRONON, J., DE DONATO, P., DE CANNIERE, P., METTLER, S., WERSIN, P. et GABLER, H.E. (2008) C02 data on gas and pore water sampled in situ in the Opalinus Clay at the Mont Terri rock laboratory. Physics and chemistry of the earth, 33, 54-60.

> VINSOT, A., METTLER, S. et WECHNER S. (2008) In-situ characterization of the Callovo-Oxfordian pore water composition. Physics and chemistry of the earth, 33, 76-86.

> WENK H.R., VOLTOLINI M., MAZUREK, M., VAN LOON, L. et VINSOT, A. (2008) Preferred orientations and anisotropy in shales: Callovo-Oxfordian shale (France) and Opalinus clay (Switzerland). Clays and clay minerals, 56, 285-306.

> WERSIN, P., SOLER, J.M., VAN LOON, L., EIKENBERG, J., BAEYENS, B., GROLIMUND, D., GIMMI, T. et DEWONCK, S. (2008) Diffusion of HTO, Br-, I-, Cs+, 85Sr2+ and 60Co2+ in a clay formation: Results and modelling from an in situ experiment in Opalinus Clay. Applied Geochemistry, 23, 4, 678-691.

> WILEVEAU, Y. et BERNIER, F. (2008) Similarities in the hydro-mechanical response of Callovo-Oxfordian clay and boom clay during gallery excavation. Physics and chemistry of the earth, 33. 343-349.

> WOHLFARTH, B., VERES, D., AMPEL, L., LACOURSE, T., BLAAUW, M., PREUSSER, F., ANDRIEU-PONEL, V., KERAVIS, d., LALLIER-VERGES, E., BJORCK, S., DAVIES, S.M., DE BEAULIEU, J.L. et RISBERG, J. (2008) Rapid ecosystem response to abrupt climate changes during the last glacial period in western Europe, 40-16 ka. Geology, 36, 5, 407-410.

La diffusion des résultats
et la valorisation scientifique

Les publications en 2009

> ALBRECHT A., MIQUEL S. (2009) Extension of sensitivity and uncertainty analysis for long term dose assessment of high level nuclear waste disposal sites to uncertainties in the human behavior, Journal of Environmental Radioactivity, 101,55-67

> BALLAND C., MOREL J., ARMAND G., PETTITT W. (2009) Ultrasonic velocity survey in Callovo-Oxfordian argillaceous rock during shaft excavation, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 461,69-79

> BIHANNIC I., DELVILLE A., DEMÉ B., PLAZANET M., VILLIÉRAS F., MICHOT L.J. (2009) Clay swelling: new insights from neutron based techniques, in Neutron Applications in Earth, Energy, and Environmental Sciences, Liang, Liyuan; Rinaldi, Romano; Schober, Helmut (Eds.), Springer, 2009 p. 521-546. ISBN: 978-0-387-09415-1

> BORNERT M., VALES F., GHARBI H., NGUYEN M.D. (2009) Multiscale full-field strain measurements for micro-mechanical investigations of the hydromechanical behaviour of clayey rocks, STRAIN

> BRIGAUD B., DURLET C., DECONINCK J-F., VINCENT B., PUCEAT E., THIERRY J., TROUILLER A. (2009) Facies and climate, environmental changes recorded on a carbonate ramp: A sedimentological approach on Middle Jurassic carbonates (Paris Basin France), Sedimentary geology, 222, 3-4, 181-206

> BRIGAUD B., DURLET C., DECONINCK J-F., VINCENT B., THIERRY J., TROUILLER A. (2009) The origin and timing of multiphase cementation in carbonates: impact of European scale geodynamic events on the middle jurassic limestones diagenesis (Paris Basin France), Sedimentary geology, 222, 3-4, 161-180

> CALVARUSO C., MARECHAL L., TURPAULT Marie-Pierre, LECLERC E. (2009) Rapid clay weathering in the rhizosphere of Norway Spruce and Oak in an acid forest ecosystem, Soil Science Society of America journal, 7311-8

> CALVARUSO C., TURPAULT Marie-Pierre, UROZ S., LECLERC E., KIES A., PASCALE F-K. (2009) Laccaria bicolor S238N improves Scots pine mineral nutrition by increasing root nutrient uptake from minerals but does not increase mineral weathering, Plant and soil

> CHEN. X-T., CHEN W., DAVY C.A., AGOSTINI F., SKOCZYLAS F., BOURBON X. (2009), Experimental evidence of a moisture clog effect in cement-based materials under temperature, Cement and Concrete Research, 39, 12, 1139-1148

> CLARET F., LEROUGE C., LAURIOUX T., BIZI M., CONTE E., GHESTEM. JP., WILLE G., SATO T., GAUCHER E., GIFFAUT E., TOURNASSAT C. (2009) Natural iodine in a clay formation: implications for iodine fate in geological disposals, Geochimica et Cosmochimica Acta, 74, 1, 16-29

> COLLE Claude, MADOZ-ESCANDE C., LECLERC E. (2009) Foliar transfer into the biosphere: review of translocation factors to cereal grains, Journal of Environmental Radioactivity, 100, 683-689

> CUISINIER O., DENEELE D., MASROURI F. (2009) Shear strength behaviour of compacted clayey soils submitted to an alkaline plume, Engineering Geology 1083-4, 177-188

> DAVY C.A., SKOCZYLAS F., LEBON P., DUBOIS T. (2009) Gas migration properties through a bentonite, argilite interface, Applied clay science, 42, 639-648

> GAILHANOU H., ROGEZ J., VAN MILTENBURG J.C., VAN GENDEREN A., GRENECHE J.M., GILLES C., JALABERT D., MICHAU N., GAUCHER E.C., BLANC P. (2008) Thermodynamic properties of chlorite CCa-2. Heat capacities heat contents and entropies, Geochimica et Cosmochimica Acta 73, 16, 4738-4749

> GANDOUIN E., PONEL P., ANDRIEU-PONEL V., GUITER F., BEAULIEU J.L., DJAMALI,M., FRANQUET E., VAN VLIET-LANOE B., ALVITRE M., MEURISSE M., BROCANDEL M., BRULHET J. (2009) 10 000 years of vegetation history of the a palaeoestuary St-Omer Basin northern France, Review of palaeobotany and palynology, 156, 3-4, 307-318

> GAUCHER E.C., TOURNASSAT C., PEARSON F.J., BLANC P., CROUZET C., LEROUGE C., ALTMANN S. (2009) A robust model for pore-water chemistry of clayrock, Geochimica et Cosmochimica Acta, 73, 21, 6470-6487

> GHORBANI A., COSENZA P., REVIL A., ZAMORA M., SCHMUTZ M., FLORSCH N., JOUGNOT D. (2009) Non-invasive monitoring of water content and textural changes in clay-rocks using spectral induced polarization: a laboratory investigation, Applied clay science 43, 3-4, 493-502

> GUEGUEN Y., SAROUT J. (2009) Crack-induced anisotropy in crustal rocks: Predicted dry and fluid-saturated Thomsen's parameters, Physics of the earth and planetary interiors, 172,1-2, 116-124

> GUERY A., CORMERY F.,SHAO J.F., KONDO D. (2009) Application of a micromechanical model to cavity excavation analysis in argillite, International journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 46,5, 905-917

> GUEUTIN P., DE GREEF V., GONCALVES J., VIOLETTE S., CHANCHOLE S. (2009) Experimental device for chemical osmosis measurement on natural clay-rock samples maintained at in situ conditions: Implications for formation pressure interpretations, Journal of colloid and interface science, 337, 106-116

> HODGKINSON D., BENABDERRAHMANE H., ELERT M., HAUTOJARVI A., SELROOS J.O., TANAKA Y., UCHIDA M. (2009) An overview of task 6 of the Aspo Task Force: modelling groundwater and solute transport: improved understanding of radionucleide in fractured rock, Hydrogeology Journal, 17, 5, 1035-1049

> HUIBAN Y., NOIREZ S., PRINZHOFER A., GIRARD J.P., CHAPPELLAZ J. (2009) Chemical and isotopic analysis of hydrocarbon gas at trace levels: methodology and results, Chemical Geology, 265, 3-4, 363-368

> JARDAT M., DUFRECHE J.F., MARRY V., ROTENBERG B., TURQ P. (2009) Salt exclusion in charged porous media: a coarse-graining strategy in the case of montmorillonite clays, PCCP. Physical chemistry chemical physics, 11, 2023-2033

> JIA H., BIAN HB., DUVEAU G., SU K., SHAO J.F. (2009) Numerical modelling of in situ behavior of the Callovo-Oxfordian argillite subjected to the thermal loading, Engineering Geology, 109, 3-4, 262-272

> JORDAN N.,LOMENECH C., MARMIER N., GIFFAUT E., EHRHARDT J.J. (2009) Sorption of selenium (IV) onto magnetite in the presence of silicic acid, Journal of colloid and interface science, 329, 17-23

> JORDAN N., MARMIER N., LOMENECH C.,GIFFAUT E., EHRHARDT J.J. (2009) Competition between selenium (IV) and silicic acid on the hematite surface, Chemosphere, 75, 1, 129-134

> JOUGNOT D., REVIL A., LEROY P. (2009) Diffusion of ionic tracers in the callovo-Oxfordian clay-rock using the Donnan equilibrium model and electrical formation factor, Geochimica et Cosmochimica Acta, 73, 102712-2726

> LANSON B., SAKHAROV B.A., CLARET F., DRITS V.A. (2009) Diagenetic smectite to illite transition in clay rich sediments: A reappraisal of x-ray diffraction results using the multi-specimen method, American Journal of Science, 139, 476-516

> MARTY N., TOURNASSAT C., BURNOL A., GIFFAUT E., GAUCHER E.C.(2009) Influence of reaction kinetics and mesh refinement in the numerical modelling of concrete, clay interactions, Journal of hydrology, 364 58-72

> MELKIOR T., GAUCHER E.C., BROUARD C., YAHIAOUI S., THOBY D., CLINARD F. W. J., CLINARD C., FERRAGE E., GUYONNET D., TOURNASSAT C., COELHO D. (2009) Na+ and HTO diffusion in compacted bentonite. Effect of surface chemistry and related texture, Journal of hydrology, 3701-49-20

> MONTAVON G., GUO Z., TOURNASSAT C., GRAMBOW B., LE BOTLAN D. (2009) Porosities accessible to HTO and iodide on water-saturated compacted clay materials and relation with the forms of water: a low field proton NMR study, Geochimica et Cosmochimica Acta, 73, 24, 7290-7302

> PIRONON J., DE DONATO P., BARRES O., GARNIER C., CAILTEAU C., VINSOT A., RADILLA G. (2009) On-line greenhouse gas detection from soils and rock formations, ENERGY PROCEDIA, 2375-2382

> POYET S. (2009) Experimental investigation of the effect of temperature on the first desorption isotherm of concrete, Cement and Concrete Research, 3911, 1052-1059

> POYET S., CHARLES S. (2009) Temperature dependence of the sorption isotherms of cement based materials: Heat of sorption and Clausius-Clapeyron formula, Cement and Concrete Research, 39, 1060-1067

> PRINZHOFER A., GIRARD J.P., BUSCHAERT S., HUIBAN Y., NOIREZ S. (2009) Chemical and isotopic characterisation of hydrocarbon gas traces in porewater of very low permeability rocks: the example of the Callovo-Oxfordian argillites of the eastern part of the Paris Basin, Chemical Geology, 260, 3-4, 269-277

> ROGER G., DURAND VIDAL S., BERNARD O., TURQ P. (2009) Electrical conductivity of mixed electrolytes: Modeling within the mean spherical approximation, Journal of physical chemistry B, 113, 8670-8674

> ROTENBERG B., MOREL J-P., MARRY V., TURQ P., MOREL-DESROSIERS N. (2009) On the driving force of cation exchange in clays: Insights from combined microcalorimetry experiments and molecular simulation, Geochimica et cosmochimica acta, 73, 14, 4034-4044

> ROTENBERG B., PAGONABARRAGA I., FRENKEL D (2009) Coarse-grained simulations of charge current and flow in heterogeneous media, Faraday discussions of the Royal Society of Chemistry, 144, 223-243

> SAROUT J., JERJANI M., GUEGUEN Y.(2009) A semi-automatic processing technique for elastic-wave laboratory data Ultrasonics, 49, 452-458

> SCHOLTUS N., LECLERC E., DE DONATO P., MOREL J.L., SIMONNOT M.O.(2009) Eluto-frontal chromatography to simulate chemical weathering of COx by low-molecular-weight organic compounds and early pedogenesis processes, Soil science, 60, 71-83

> TOURNASSAT C., CHAPRON Y., LEROY P., BIZI M., BOULAHYA F.(2009) Comparison of molecular dynamics simulations with triple layer and modified Gouy-Chapman models in a 0.1 M NaCl-montmorillonite system, Journal of colloid and interface science, 339,2, 533-541

> TOURNASSAT C., GAILHANOU H., CROUZET C., BRAIBANT G., GAUTIER A., GAUCHER E.C. (2009) Cation exchange selectivity coefficient values on smectite and mixed-layer illite, smectite minerals, Soil Science Society of America journal, 73, 3, 928-942

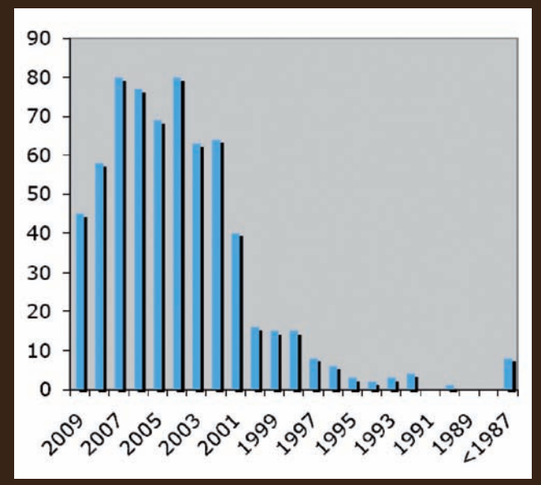
> TRUCHE. L, BERGER G., DESTRIGNEVILLE. C,, PAGES P., GUILLAUME D., GIFFAUT E., JACQUOT E. (2009) Experimental reduction of aqueous sulphate by hydrogen under hydrothermal conditions: implication for nuclear waste storage, Geochimica et Cosmochimica Acta, 73, 16, 4824-4835

> VARGA B., LECLERC E., ZAGYVAI P. (2009) The role of analogues in radioecology, Journal of Environmental Radio-activity, 100, 802-805

> VIEILLARD P., MATHIEU R. (2009) A predictive model for the enthalpies of hydration of zeolites, American mineralogist, 94, 565-577.

L'évolution des publications scientifiques

Après une période d'acquisitions et de traitement de données liée à la recherche de sites potentiels pour un stockage de déchets radioactifs de haute activité et à vie longue, l'Andra a engagé, dès 1997, une politique de partenariats de recherche et de soutiens de thèses qui s'est rapidement traduite par des publications scientifiques de rang A. Passant de 16 publications scientifiques par an entre 1997 et 2000, la moyenne annuelle est montée à plus de 60 à partir de 2002 (graphique). Ce sont ainsi 575 articles scientifiques qui ont été publiés entre 2001 et 2009, dont 50 à 60 % sont signés ou cosignés par un doctorant et/ou un ingénieur de l'Agence. Si l'impact factor moyen des publications des années 2005 à 2008 évolue entre 1,52 et 1,84, il faut noter celui de 2009 qui atteint 2,40. La volonté de contribuer de manière significative à l'effort de recherche fondamentale et appliquée, nécessaire à la résolution des objectifs qui lui ont été fixés par ses autorités de tutelle, s'exprime au travers de ces publications. Ce bilan montre l'effort d'ouverture que l'Andra mène par rapport à ses partenaires de la recherche en les incitant à participer à des programmes dédiés et par rapport aux citoyens avec un réel souci de transparence de ses travaux destinés à résoudre les questions que pose le stockage souterrain de déchets radioactifs HA-MAVL, mais aussi le stockage de déchets à vie courte dans les centres de surface. ■



Les congrès

Les congrès organisés par l'Andra

• Le colloque de Lille

Le troisième colloque international sur les propriétés de confinement des argiles («Clays in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement») s'est tenu au palais des Congrès de Lille, du 17 au 20 septembre 2007. Il a regroupé 427 participants (en provenance de 24 différents pays), représentant de nombreux instituts, universités et laboratoires de recherches impliquées dans les études sur les argiles, ainsi que la plupart des organisations nationales de gestion des déchets radioactifs. Une large gamme de sujets scientifiques, appliqués à l'isolement des déchets, a été couverte au travers de 19 sessions orales (85 présentations) et de 7 sessions thématiques posters (215 affiches).

À partir de ces présentations (orales et posters), 74 manuscrits ont été publiés dans deux types d'ouvrages :

- 12 manuscrits, présentant plus particulièrement les aspects stratégiques de gestion des déchets radioactifs dans différents pays, les programmes de caractérisation de site, des expériences multidisciplinaires et des approches intégrés ont été publiés dans un numéro spécial de la série « Science et Technologie » de l'Andra (n°334) ;
- 62 manuscrits, sélectionnés par un comité de lecture pour leur qualité scientifique, ont été publiés dans un numéro spécial de la revue scientifique Elsevier «Physics & Chemistry of the Earth» (volume 33, supp.1). Ces articles concernent notamment la caractérisation géologique et hydrologique, les processus de transport et la caractérisation des paramètres hydrodynamiques, la rétention et transport des radionucléides, la génération et le transport de gaz dans l'argile naturelle et la bentonite, les processus d'altération, les réactions aux interfaces ciment/argile, les perturbations alcalines, les processus liés à la zone endommagée par l'excavation, les processus de THM dans les formations de l'argile naturelle et dans les systèmes de barrières ouvragées.

La diffusion des résultats
et la valorisation scientifique

• Le congrès sur la réversibilité

Ce congrès s'est tenu à Nancy, en juin 2009. Pour plus de précisions, voir l'encadré de la partie « Réversibilité du stockage sous le prisme des sciences humaines et sociales ».

Les participations à des congrès

Les ingénieurs de la direction scientifique participent aux congrès et workshops scientifiques correspondant à leurs spécialités. Lors de ces différentes manifestations, ils sont amenés à faire des présentations, seuls ou comme co-auteurs, des principaux résultats obtenus. La liste des actes des colloques pendant la période écoulée est reportée ci-dessous.

Les actes des colloques 2006

> ABOU-CHAKRA GUERY A.,CORMERY F.,SHAO J.F.,KONDO D., Micromechanics-based modeling of elastoplastic damage in hard clay, RST 2006

> ANDRE L.,AZAROUAL M.,PAUWELS H.,ALBRECHT A.,ROMERO M.A., Réactivité des nitrates dans les différents compartiments des sites de stockage de déchets de type B, RST 2006

> ANDRIEU-PONEL V.,BEAULIEU J.L.,BELMECHERI S., BJORCK S.,BRULHET J.,COSTE G.,GANDOUIN E.,GUITER F., KERAVIS d., KUKLA G.SALTZMAN,LALLIERS-VERGES E., MACKAY A.L.,MORLEY D.,NICOUD G.,PONEL P.,PREUSSER F., Impact des flucuations climatiques sur la structure des végétations de l'avant-pays nord-alpin au cours des 140 000 dernières années, RST 2006

> ARMAND G.,CRUCHAUDET M., Mesure de la perméabilité de l'EDZ dans le laboratoire souterrain de Bure, Vème Colloque du GdR Forpro 2au 3 mai 2006 La grande Motte France

> ARMAND G.,SOULEY M.,SU K.,RENAUD V.,WILEVEAU Y., Hydromechanical response to a mine by test experiment in a deep claystone, Conférence de Geotechnique

> ARMAND G.,SU K., Hydrolechanical coupling phenomena observed during a shaft sinking experiment in a deep argillaceous rock, GEoproc 2006

> AZAR G.,LOTH L.,MIGUEZ R.,PEPIN G., Safety calculation for underground repository for radioactive waste : the first objective of the Alliances calculation software platform, IVème Colloque du GdR Forpro 2au 3 mai 2006 La Grande Motte France

> BEN LAGHA S.,CRUSSET D.,MABILLE I.,TRAN T.T.U.M., BERNARD M. C.,SUTTER E., Atmospheric corrosion of iron at high temperature. A study for radioactive waste canisters storage, Congrès de l'E-MRS European material research society Nice juin 2006

> BENABDERRAHMANE H.,LEBON P.,TROUILLER A.,LE GALLO Y., GRANJEON D., Hydrogeological conceptualisation using stratigraphic and petrographic modeling, Colloque international 30 mai au 1 juin 2006 Dijon - France.

> BRULHET J.,VAN VLIET-LANOE B.,TELES V., Modelling of permafrost penetration over one climate cycle and permafrost properties ; Meuse/Haute-Marne underground laboratory site East of France, EGU 2006

> CAILTEAU C.,DE DONATO P.,PIRONON J.,JACQUOT E.,VINSOT A., Mesure des pressions partielles de gaz à l'équilibre avec les eaux de formation des argilites de Bure après forage, RST 2006

> CASANOVA J.,GIRARD J.P.,GUERROT C.,INNOCENT C., MILLOT R.,MOTELICA M.,BUSCHAERT S., Isotopic study (B Li Fe U Th) of two confined aquifers in the eastern part in the Paris basin : implication for hydrological and WRI processes, Colloque international 30 mai au 1 juin 2006 Dijon - France.

> CATHELINEAU M.,MOSSER-RUCK R.,GUILLAUME D., CHARPENTIER D.,ROUSSET D.,DEVINEAU K.,DUBESSY J., VILLIERAS F.,MICHAU N.,Experimental conversion of di-octahedral smectite to berthierine chlorite vermiculite or spanite : effects of iron,clay ratio Ph and temperature. Congrès GFA Oléron les 5 et 6 juin 2006

> CHANUT S.,THIBAUX T.,PINEAU F.,ROULET A., Development & performance assessment of a fibred HPC concrete container for muclear waste management projects, CONSEC 07 Tours

> COELHO D.,DEWONCK S.,BLIN V.,TEVISSEN E.,DESCOTES M., RAWAN J.,CARTALADE A.,LE POTIER C., In situ diffusion experiments in Callovo-Oxfordian mudstone, Conférence TRACER'4

> DELAY J.,DEWONCK S.,CRUCHAUDET M.,VINSOT A., Hydrogeological and hydrogeochemical investigations at the Andra Meuse/Haute-Marne underground research laboratory, 4th Swiss Geosciences Meeting Bern 2006

> DESCHAMPS P.,HAMELIN B.,LANCELOT J.,ANDRE G., BUSCHAERT S., Datation des carbonates secondaires des remplissages de fractures du site de ure : l'apport des systématiques U-Th et U-Pb, IVème Colloque du GdR Forpro 2 au 3 mai 2006 La Grande Motte France

> DESCHAMPS P.,HILLAIRE-MARCEL C.,MICHELOT J.L., HAMELIN B.,BUSCHAERT S., Traçage de la mobilité de l'urabnium dans les formations mésozoïques du site de Bure à l'aide des déséquilibres radioactifs (234U,238U), IVème Colloque du GdR Forpro 2au 3 mai 2006 La Grande Motte France

> DEWONCK S.,DESCOTES M.,BLIN V.,CARTALADE A.,COELHO D., In-situ diffusion experiments in Callovo-Oxfordien mudstone, Goldschmidt 2006

> ESTEBAN L.,BOUCHEZ J.L.,GERAUD Y.,TROUILLER A., Les argilites du Callovo-Oxfordien du bassin Parisien : minéralogie magnétique anisotropes minérale et de porosité, IVème Colloque du GdR Forpro 2au 3 mai 2006 La Grande Motte France

> ESTEBAN L.,GERAUD Y.,BOUCHEZ J.L., Recherche des anisotropies dans les argilites du Callovo-Oxfordien : nouvelles approches en magnetisme thermique et connectivité de la porosité, IVème Colloque du GdR Forpro 2au 3 mai 2006 La Grande Motte France

> ESTEBAN L.,GERAUD Y.,BOUCHEZ J.L.,TROUILLER A., Anisotropie de géométrie du réseau poreux dans des argilites très peu perméables : complémentarité des injections au mercure et au ferrofluide, RST 2006

> FAURE P.,MICHELS R.,ELIE M.,BELCOURT O., HAUTEVELLE Y., JEANNEAU L.,PEIFFERT C.,CATHELINEAU M.,BUSCHAERT S., Suivi de la perturbation oxydante de l'EDZ du laboratoire souterrain de Bure par l'étude de la réactivité de la matière organique et de son micro-environnement immédiat : principes, outils géochimiques, calibrages et résultats attendus, IVème Colloque du GdR Forpro 2 au 3 mai 2006 La grande Motte France

> GANDOUIN E.,FRANQUET E.,VAN VLIET-LANOE B., ANDRIEU-PONEL V.,KEEN D.H.,BRULHET J.,BROCANDEL M., Late glacial - Holocene chironomid (Insect : Diptera) assemblages in a river floddpain (St Omer basin northern France) : environmental and climate changes, Colloque Q5 MNHN février 2006

> GIANNESINI S.,FRANCE-LANORD C., Stable isotope analysis of pore waters in low porosity claystone : comparison of analytical methods, IVème Colloque du GdR Forpro 2 au 3 mai 2006 La Grande Motte France

> GIBERT D.,NICOLLIN F.,KERGOSIEN B.,BOSSART P.,NUSSBAUM C., GRISLIN-MOUEZY A.,CONIL F.,HOTEIT N., Suivi de l'évolution de l'EDZ par tomographie électrique : expériences dans le laboratoire souterrain du Mont Terri, IVème Colloque du GdR Forpro 2 au 3 mai 2006 La Grande Motte France

> GIOT R.,GIRAUD A.,HOMAND F.,SU K., Interpretation of in situ rock stress measurements by inverse method, International Symposium on in-situ Rock Stress Trondheim Norvège 2006

> GIRARD J.P.,FLEHOC C.,GAUCHER E.C.,BUSCHAERT S., Composition isotopique du CO2 et H2O2-vapeuir libérés par les argilites du COx : apport pour la caractérisation de l'eau porale, IVème Colloque du GdR Forpro 2 au 3 mai 2006 La Grande Motte France

> GRENIER C.,MOUCHE E.,BERNARD-MICHEL G., BENABDERRAHMANE H., Oveview of the modeling work conducted at the Aspo Hard Rock laboritory (Sweden) within the SKB Task Force, Colloque 3F - Faille - Fluide - Flux 17-19 octobre 2006 Oléron France

> GUERY A.,CORMERY F.,SHAO J.F.,KONDO D., Homogénéisation du comportement élastoplastique dilatant : application à un géomatériau, Mécamat 2006 à Aussois

> HAUTEVELLE Y., Technique development and validation of experimental paleochemataxonomy. Future implications for paleofloral and paleoclimatic reconstructions, European Colloque Union

> HAUTEVELLE Y., The evolution of paleoenvironmental conditions throught the Jurassic in the Paris Basin (France). An organic geochemical approach, European Colloque Union

> HAUTEVELLE Y.,The initiation a d the end of a major mesozoïc crisis of carbonate productivity (Callovo-Oxfordian zpisod) as recorded by organic geochemical proxies. Relations with oceanic anoxic events and paleoclimatic changes, European Colloque Union

> HAUTEVELLE Y.,MICHELS R.,LANNUZEL F.,FARRE B., MALARTRE F.,TROUILLER A., Artificial maturation of conifers by confined pyrolisis. Contribution to paleofloral and paleoclimatic reconstructions, Pyrolysis 2006

> HAUTEVELLE Y.,MICHELS R.,MALARTRE F.,ELIE M.,TROUILLER A., Le traçage des variabilités au sein des barrières de confinement par la géochimie organique. Application aux dépôts du Callovo-Oxfordien de l'Est du bassin de Paris, RST 2006

> HOXHA D.,HOMAND F.,GIRAUD A.,AUVRAY C.,SU K, Poromechanical bahavior of Meuse,Haute-Marne argillite : laboratory evidences and modeling, Eurock 2006 symposium

> HOXHA D.,JIANG Z.,HOMAND F.,GIRAUD A.,SU K.,WILEVEAU Y., Impact of THM constitutive bahavior on the rock-mass response : case of HE-D experiment in Mont Terri Underground Rock Laboratory, Eurock 2006 symposium

> HURET E.,GALBRUN B.,COLLIN P.Y.,BOULILA S.,ELION P., RAVENNE C., Magnetic susceptibility and cuclostratigraphy of upper jurassic marly formations (Andra underground research laboratory Bure Eastern Paris Basin) : record of Milankovitech cycles sedimentary gaps and implications for regional correlation, American Geophysical union (AGU) Baltimore du 23 au 26 mai 2006

> HURET E.,GALBRUN B.,COLLIN P.Y.,BOULILA S.,HINNOV L., ELION P.,RAVENNE C., Cyclostratigraphic analysis of upper Jurassic marly formations (Andra underground research laboratory Bure Eastern Paris Basin) : comparion of differents tools record of sedimentary gaps and implications for regional correlation, 7ème congrès international du Jurassic Septembre Cracovie

> HURET E.,GALBRUN B.,COLLIN P.Y.,RAVENNE C.,ELION P., Recherche des hiatus sédimentairres par la méthode des spectrogrammes d'amplitudes : exemple des séries argileuses callovo-oxfordiennes de l'Est du Bassin de Paris (Bure Meuse,Haute-Marne), RST 2006

> INNOCENT C.,CASANOVA J.,BUSCHAERT S., Isotopic measurement of ng quantities of Th in natural waters. Coupling 234U,238U and 230Th,232Th ratios to provide time-constraints on the evolution of aquifer groundwaters, Congrès «Aquifer system management» Dijon mai 2006

> JIA Y.,SU K.,DUVEAU G.,SHAO J.F., Hydromechanical modelling of shaft excavation experiment in deep hard clay, RST 2006

> JOUVE A.,STAB O.,COJAN I.,BRULHET J., Evolution morphologique à long terme de la vallée de la Marne : modélisation et premiers résultats, RST 2006

> LAPUERTA S.,MONCOFFRE N.,MILLARD-PINARD N.,JAFFREZIC H., BERERD N.,CRUSSET D.,FERON D., Influence of the relative humidity and atmosphere nature (air nitrogen) on the corrosion of iron under proton irradiation, EUROCORR 2006

> LAVIELLE B.,THOMAS B.,GILABERT E.,GIANNESINI S., Caractérisation et évolution de l'EDZ par les gaz rares en aroi de galerie du laboratoire souterrain de recherche de Meuse/Haute-Marne, RST 2006

> LAVIELLE B.,THOMAS B.J.,GILABERT E.,GIANNESINI S., Caractérisation et évolution de l'EDZ par les gaz rares en paroi d e galerie du laboratoire souterrain de recherche de Meuse/Haute-Marne, IVème Colloque du GdR Forpro 2 au 3 mai 2006 La Grande Motte France

> LAVIELLE B.,THOMAS B.J.,GILABERT E.,LAVASTRE V., Développement de la méthode de datation des eaux souterraines basées sur la mesure de 81r 85Kr par spectrométrie de masse RIS-TOF : progrès et perspectives, IVème Colloque du GdR Forpro 2 au 3 mai 2006 La Grande Motte France

> LEBON P., Propriétés de transfert des géomatériaux pour le stockage des déchets radioactifs en formation géologique : Concept de confinement et grands axes de recherche et développement, Colloque transfert 2006 Lille

> LEFRANC M.,BEAUDOIN B.,CHILES J.P.,ETCHECOPAR A. A., GUILLEMOT D.,RAVENNE C.,TROUILLER A., Geostatistical characterization of orbital cyclicity of clay properties from log data (Callovian-Oxfordian clay Bure Meuse France), international association for mathematical biology - IAMG Liege Belgique 03-08 septembre 2006

> LEFRANC M.,BEAUDOIN B.,CHILES J.P.,GUILLEMOT D., Valorisation des outils diagraphiques dans les argilites du Callovo-Oxfordien du site de Bure (Meuse/Haute-Marne), RST 2006

> LEFRANC M.,BEAUDOIN B.,CHILES J.P.,TROUILLER A., Caractérisation géostatique des cycles orbitaux pour l'étude des variations et de la variabilité spatiales des argilites du Callovien-Oxfordien (Bure Meuse France), RST 2006

> LEROY P.,REVIL A., Modélisation des phénomènes de transport dans les argilites du COx et les bentonites, IVème Colloque du GdR Forpro 2au 3 mai 2006 La grande Motte France

> MAILLANT S.,ECHEVARRIA G.,GURY M.,VAN VLIET-LANOE B., LECLERC-CESSAC E.,MOREL L., Evolution of the soil cover of a limestone plateau as a consequence of climate cooling : a predictive approach, Workshop on modelling of pedogenesis Orléans 2-4 octobre 2006

> MARCHIOL A.,ROMERO M.A.,BENNETON J.P.,DUMAS P., GAUTIER J.L., Examen après 12 ans de service d'une géomembrane bitumeuse utilisée en couverture de stockage de déchets, 6ème rencontre du Comité Français des Géosynthètiques 0-12 juin 2006

> MARTY N.,FRITZ B.,CLEMENT A.,MICHAU N., Modelling of a bentonite engineered barrier system : effects of mineralogical modifications on physical properties, Congrès GFA Oléron les 5 et 6 juin 2006

> PONEL P.,GANDOUIN E.,ANDRIEU-PONEL V.,VAN VLIET-LANOE B., FRANQUET E.,BROCANDEL M.,BRULHET J.,ALVITRE M., Late glacial - Holocene palaeotemperature and palaeoenvironments at St Omer (Pas de Calais) reconstructed using insect remains, Colloque Q5 MNHN février

> POULAIN S.,SERGEANT C.,LE MARREC C.,SIMONOFF M., ALTMANN S., Microbiology of deep subsurface environments evaluated for potential nuclear waste repositories, 11th International Symposium on Microbial Ecology Vienne Autriche 20-25 Aout 2006

> POULAIN S.,SERGEANT C.,VESVRES M.H.,LE MARREC C., SIMONOFF M.,ALTMANN S., Diversité microbiologique en formations argileuses : minorités indigènes et populations colonisatrices des sites expérimentaux du Mont Terri et de Meuse/Haute-Marne, IVème Colloque du GdR Forpro 2 au 3 mai 2006 La Grande Motte France

> PROUDHON B.,MANGEOT A.,REBOURS H., Fracturation induite par le creusement d'ouvrages souterrains et relation avec les contraintes régionales : cas des argilites callovo-oxfordiennes (Est du Bassin de Paris), RST 2006

> ROUSSET D.,GUILLAUME D.,CATHELINEAU M.,DUBESSY J., MOSSER-RUCK R., TROUILLER A.,MICHAU N., Experimental reactivity of bentonite under linear thermal gradient, Congrès GFA Oléron les 5 et 6 juin 2006

> SAROUT J.,MOLEZ L.,GUEGUEN Y., Propriétés physiques des roches argileuses : essais de déformation triaxiale et modélisation micromécanique, IVème Colloque du GdR Forpro 2 au 3 mai 2006 La Grande Motte France

> SHAO J.F.,ATA N.,OZANAM O., An elastoplastic model for unsaturated rocks and concrete, Int. Workshop on hydromechanicals behavior of argilites Balkema

La diffusion des résultats
et la valorisation scientifique

> SOULEY M.,SU K.,ARMAND G.,GHOREYCHI M., Poromechanical behaviour of deep claystone and permeability changes around shaft, Cemodel Workshop

> SU K.,BAUER C., Comportement thermohydromécanique couplé du scellement d'une alvéole de stockage en argile gonflante, JNGG 2006

> SU K.,CHAVANT C.,SOULEY M., Constitutive Model for a Deep Argillaceous Rock using Hoek-Brown Criteria, ISRM Lisbonne 2007

> TALANDIER J.,MAYER G.,CROISE J., Simulations of the hydrogen migration out of intermediate-level radioactive waste disposal drifts using tough2, Tough symposium 2006

> TECHER I.,CLAUER N.,AUBOURG C.,LIEWIG N.,POZZI J.P., WILEVEAU Y., Caractérisation minéralogique géochimique et isotopique initiale des argiles à Opalinus du laboratoire souterrain de Mont Terri (Suisse) avant l'expérience thermique HE-D, IV^{ème} Colloque du GdR Forpro 2au 3 mai 2006 La Grande Motte France

> TELES V.,MOUCHE E.,BRULHET J., Impact of lanscape and climate evolution og the hydrogeology of the Meuse,Haute-Marne site, RST 2006

> TELES V.,MOUCHE E.,VAN VLIET-LANOE B.,BRULHET J., BENABDERRAHMANE H., Impact of permafrost 3D distribution growth and decay over one climate cycle on regional grounwater flow, EGU 2006

> THIRY M.,RICORDEL C.,SIMON-COINCON R.,BRULHET J., Géodynamique du Massif Central durant le mésozoïque : apport des paléo-altérations, RST 2006

> WILEVEAU Y.,KAZMIERCZACK J.B.,RENAUD V.,ARMAND G., Rheological characterization oof a clay formation from drifts excavation : elastic and elastoplastic approach, Conférence de Geotechnique

> WILEVEAU Y.,PIGUET J.P.,ARMAND G.,MOREL J., Expérience acquise après le creusement dans les argilites du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne à Bure, AFTES,CFMR 7 décembre 2006

Les actes des colloques 2007

> ALTMANN S., Geochemical research: key building block for radwaste disposal safety cases in clayrocks, Goldschmidt 2007

> ANDRE L.,AZAROUAL M.,PAUWELS H.,ALBRECHT A.,ROMERO M.A., Reactivity of nitrates in the near field ot type-B nuclear waste cells, Goldschmidt 2007

> ANDRIEU-PONEL V.,BEAULIEU J.L.,BELMECHERI S., BJORCK S.,BRULHET J.,COSTE G.,GANDOUIN E.,GUITER F., KERAVIS d.,KUKLA G.J.,LALLIERS-VERGES E.,MACKAY A.L., MORLEY D.,NICOUD G.,PONEL P.,PREUSSER F., Multiproxy analysis of the new core of les echets (alt. : 267 m Ain France), Meeting European Pollen Databank (EDP) 7-12 mai 2007 Aix en Provence France

> ARMAND G.,WILEVEAU Y.,MOREL J.,CRUCHAUDET M.,REBOURS H., Caractérisation de la zone endommagée dans le laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, ISRM Lisbonne 2007

> ARMAND G.,WILEVEAU Y.,MOREL J.,CRUCHAUDET M., REBOURS H., Excavated damaged zone (EDZ) in the Meuse/Haute-Marne underground research laboratory, Comité français de mécanique des roches conférence internationale de Lisbonne, 2007

> BAUER C.,LEBON P.,LONDE L.,PLAS F., Geomechanical challenges within the framework of the French 2006 planning act on the sustainable management of radioactive waste, ISRM Lisbonne 2007

> BOULIN P., TALANDIER J., ANGULO-JARAMILLO Rafael, DAIAN J.F., Pore connectivity analysis and gas transfer in deep geological nucear barrier, Conférence Houston

> BRIGAUD B., DURLET C., DECONINCK J-F., VINCENT B., THIERRY J., TROUILLER A., Origine des faibles perméabilités des carbonates du Dogger à l'est du Bassin de Paris, ASF Caen oct 2007

> CAMPS G., TURATSINZE A., SELLIER A., ESCADEILLAS G., BOURBON X., Modelling of the chemo-mechanical coupling of fibre reinforced concrete for nuclear waste confinement, Geo-pro 2008 Lille France

> DESRUES J., LENOIR N., VIGGIANI G., BESUELLE P., BORNERT M., 3D volumetric dic of x-ray microtomographic images to study localized deformation in a stiff clayey rock, ADELAIDE

> ERN A., STEPHANSEN A., VOHRALIK M., A posteriori error estimates based on flux reconstruction for discontinuous Galerkin methods, ENUMATH07 Graz septembre 2007

> FIERZ T., PIEDEVACHE M., DELAY J., ARMAND G., MOREL J., Specialized instrumentation for hydromechanical measurements in deep argillaceous rock, conférence à Boston

> GAONA X., MONTOYA V., COLAS E., GRIVE M., DURO L., GIFFAUT E., The building-up exercise of a thermodynamic data set on ISA-actinide system, Goldschmidt 2007

> HAUTEVELLE Y., MICHELS R., MALARTRE F., TROUILLER A., The initiation and the resumption of the callovo-oxfordian crisis of carbonate productivity : relations with anoxic events and palaeoclimate, IMOG

> JORDAN Norbert, LOMENECH C., EHRHARDT J.J., GIFFAUT E., MARMIER N., Retention of selenium (IV) on Fe3O4 influence of dissolved silicates, Migration'07 Munich Germany 26-31 Août 2007

> JOUVE A., COJAN I., STAB O., BRULHET J., Apports de la modélisation à l'interprétation de la réponse des systèmes fluviatiles ayux cycles glaciaires interglaciaires, ASF Caen oct 2007

> LECLERC-CESSAC E., SMITH G., Cl-36 Behaviour in the soil-plant system: implications for long-term dose assessment, 9th ICOBTE 2007 Beijing

> LEFRANC M., Caracterisation geostatistique de la variabilité des argilites du Callovo-Oxfordien à partir de l'analyse géostatistique de diagraphies à haute résolution : FMI, JDD MINES

> LEFRANC M., BEAUDOIN B., CHILES J.P., GUILLEMOT D., RAVENNE C., TROUILLER A. Enregistrement sédimentaire des fluctuations de l'insolation et du climat dans les argilites du Callovo-Oxfordien (Bure Meuse France), ASF Caen oct 2007

> MAZUREK M., ALT-EPPING P., GIMMI T., WABER H.N., BATH A., BUSCHAERT S., GAUTSCHI A., Tracer profiles across argillaceous formations : A tool to constrain transport processes, Water Rock Interaction Kunming Chine 31 juillet au 5 Aout 2007

> MONTOYA V., GRIVE M., GAONA X., DURO L., GIFFAUT E., The effect of LMW organic ligands on Plutonium and Uranium solubility under hyperalkaline conditions, Goldschmidt 2007

> MOREL J.,BALLAND C.,ARMAND G., Measurement of the effect of reconfigning on rock properties around a slot, EGU Vienne Avril 2007

> RANC G., MOITRIER C., DE CONINCK P., BARY B., ROULET A., PINEAU F., Durability approach for reinforced concrete container design, Mechanics in Reactor Technology, 12-17 Aout 2007 Toronto Canada

> SAHEB M., NEFF D., DILLMANN P., Long-term corrosion behaviour of low carbon steel in desaerated soils, EUROCORR 2007 Septembre, Francfort

> SOULEY M., ARMAND G., SU K., WILEVEAU Y., Modelling of the hydromechanical response of a shaft sinking in a deep claystone, NUMOG X 25-27 avril 2007

> VINSOT A., In situ sampling and characterization of Callovo-Oxfordian pore water, Water Rock Interaction Kunming Chine 31 juillet au 5 Aout 2007

> WERSIN P., GIMMI T., SOLER J.M., DEWONCK S., SAVOYE S., VAN LOON L., EIKENBERG J., BAEYENS B., YANG Q.S., SAMPER J., Diffusion and retention of radionuclides in opalinus clay : result from a long-term migration in-situ test, Migration'07 Munich Germany 26-31 Août 2007

> WILEVEAU Y.,SU K.,GHOREYCHI M., A heating experiment in the argillites in the Meuse/Haute-Marne Underground research laboratory, ICEM'07 2-6 Septembre 2007 Bruges

> ZHANG C.L., ROTHFUCHS T., SU K., Laboratory experiments on the thermo-hydromechanical behaviour or clayey rocks, GEOPROC 2-6 juin 2008 Lille 2008

Les actes des colloques 2008

> ANDRIEU-PONEL V., AMPLEL L., BEAULIEU J.L., BELMECHERI S., BJORCK S., BREWER S., BRULHET J., COSTE G., GANDOUIN E., GUITER F., KERAVIS D., KUKLA G., SALTZMA, Response of the Westerne -European ecosystems to rapid climatic fluctuations (Hienrich and Dansggard-Oeschger) during glacial times (OIS 2) EUG,Vienne avril 2008

> ANDRIEU-PONEL V., AMPLEL L., BEAULIEU J.L., BELMECHERI S., BJORCK S., BREWER S., BRULHET J., COSTES J., GANDOUIN E., GUITER F., KERAVIS D., KUKLA, LALLIER-VERGES E., LEYDET M., Réponse des écosystèmes ouest-européens aux fluctuations rapides du climat pendant le glaciaire wurmien, COLLOQUE Q6 26 au 28,02,08 Montpellier

> ANDRIEU-PONEL V., MORTEZA D., PONEL P., BEAULIEU J.L., GANDOUIN E., GUITER F., LEYDET M., BRULHET J., The last 200 ka in France and in Iran. High resolution results and projects. The contribution of IMEP. ICDP-IODP Postdam 2008

> BRIGAUD B., DURLET C., VINCENT B., DECONINCK J-F., THIERRY J., TROUILLER A., Controle eustatique sur les faciès environnementaux et les profils de dépôt du Dogger et de l'Est Bassin de Paris, RST 2008

> BRIGAUD B., DURLET C., VINCENT B., DECONINCK J-F., TROUILLER A., Influence de la diagenèse sur les propriétés pétrophysiques des calcaires du Dogger de l'Est du bassin de Paris, RST 2008

> CAMPS G., TURATSINZE A., SELLIER A., ESCADEILLAS G., BOURBON X. Modeling of mechanical behaviour of fibre reinforced concrete in a chemical evolution context, GEOPROC 2-6 juin 2008 Lille

> CARPENTIER C., FERRY S., LATHUILIERE B., TROUILLER A., Impact climatique séquentiel et techtonique sur la croissance et le déclin d'une plate-forme carbonatée. Exemple de l'Oxfordien de l'est du Bassi de Paris, RST 2008

> CARPENTIER C., TROUILLER A., Etude de la diagenèse des horizons poreux oxfordiens dans l'est du Bassin de Paris, RST 2008

> CHILES J.P., WACKERNAGEL H., BEUCHER H., LANTUEJOUL C., ELION P. Estimating fracture density from a linear or areal survey, Congrès géostatique décembre 2008

> CLARET F., BURNOL A., DAUZERES A., LEBESCOP P., DEWONCK S., LINARD J.R., BOURBON X., GAUCHER E.C., Modelling of concrete, clay interaction: influence of non-saturated conditions, CEMENT 08

> CLARET F., LEROUGE C., BIZI M., GAUCHER E.C., CROUZET C., VINSOT A., LAURIOUX T., TOURNASSAT C., Natural iodine distribution within the Callovo-Oxfordian formation, RST 2008

> COTE P., MAGNIN O., MOREL J., Tomographies sismiques appliquees au suivi d'un pilier delimité par des galeries souterraines, Journées AGAP 21 et 22 octobre 2008 Aix en Provence

> DEWYNTER-MARTY V., FERDINAND P., DUBOIS JP., BENTO C., Mesure de gradient par fibre optique et effet Brillouin dans un puits du laboratoire souterrain. Colloque, CMOI 17-21 novembre 2008 Nantes

> DIMIER A., LETERRIER J., GAOMBALET J., Coupling geochemistry and transport in porous media, ESCO JUNE 8-13 CZECH REPUBLIC

> DONARD O.F.X., LECLERC E., TESSIER E., SEBY F., BUDZINSKI H., GARRIGUES P., The observatoire de recherche sur la qualité de l'environnement and the observatoire pérenne de l'environnement : new french initiatives in the field of specimen banking, 5TH SETAC WORLD CONGRESS AUGUST 2008 AUSTRALIA

> HOXHA D., BELAYACHI N., POUTREL A., Simplified modelling of swelling clays behavior for nuclear waste disposal buffers, Congrès de Biot 2008

> HURET E., HINNOV L., GALBRUN B., COLLIN P.Y., BOULILA S. High resolution cyclostratigraphic study of middle upper jurassic marly formations (Paris basin): astronomical calibration and implications for regional correlation, 33EME IGC Oslo aout 2008

> KAZMIERCZACK J.B., LAOUAFA F., ARMAND G., Intérêt d'une modélisation tridimensionnelle phrasée dans le cas d'un ouvrage souterrain complexe : exemple du laboratoire expérimental souterrain de l'Andra à Bure, TOS INERIS 2008

> LAOUAFA F., ARMAND G., KAZMIERCZAK J.B., MAISON T., Modélisation tridimensionnelle avec phasage de l'intégralité du laboratoire expérimental de l'Andra, JNGG 2008

> LORRILLIERE R., ROBERT A., BRULHET J., COUVET D., Réponse des communautés aux modifications climatiques - modélisation numérique de l'évolution des écosystèmes sur le très long terme, Séminaire Lyon III 04,2008

> MARTINE T., ZACKLAD M., BENEL A., Elements of methodology for designing participative document spaces, Congrès des sciences de l'information Vancouver juin 2008

> MARTY N., BURNOL A., CLARET F., MICHAU N., GAUCHER E.C., Modelling dual alteration of a bentonite plug by iron corrosion and concrete interaction, Workshop Fer, argile Japon novembre 2008

> MORLOK. A, LIBOUREL. G, Alteration of metal in CR2 chondrites: an analogue for long term corrosion processes, ANNUAL METEORITICAL AND PLANETARY SOCIETY CONFERENCE JAPON DU 28 juillet au 1aout 2008

> MORLOK. A, LIBOUREL. G, Cr2 chondrites as analogues for long term corrosion processes, Paneth-Kolloquium Allemagne 29 au 31 octobre 2008

> ROTENBERG B., DUFRECHE J.F., MARRY V., TURQ P., Coarse-graining the dynamics of nanoconfined solutes, SIMBIOMA avril 2008

> ROTENBERG B., PAGONABARRAGA I., FRENKEL D., Lattice methods for the study of electrokinetic phenomena in charged porous media, MODELING TRANSFER AND FLOW IN POROUS MEDIA Dubrovnik 13-16 octobre 2008

> SOULEY M., GHOREYCHI M., ARMAND G., SU K., A viscoplastic model including damage for deep argillaceous rocks, COMGEO 2008

> TELES V., MOUCHE E., GRENIER C., REGNIER D., BRULHET J., BENABDERRAHMANE H., Modeling permafrost evolution and impact on hydrogeology at the Meuse,Haute-Marne Sedimentary site (NE France) during the last 120 Ky, NICOP 2008 Fairbanks juin

> VINSOT A., GAUCHER E.C., Stontium distribution and origins in natural clayey barriers: a new sequential extraction procedure applied to the Callovo-Oxfordian clayey formation of Bure Eastern part of the Paris Basin, RST 2008

Les actes des colloques 2009

> ALBRECHT A., LEONE. L, Microbial activity in argillite waste storage cells for the deep geological disposal of French bituminous medium activity long lived nuclear waste: impact on redox reaction kinetics and potential, EGU Vienne 2009

> ALTMANN S., TOURNASSAT C., GOUTELARD F., PARNEIX J.C, GIMMI T., MAES N., Radionuclide migration in clayrock host formations for deep geological disposal of radioactive waste: advances in process understanding and up-scaling methods resulting from the EC integrated project «Funmig», EGU Vienne 2009

> ARMAND G., NUSSBAUM C., CRUCHAUDET M., REBOURS H., Characterisation of the excavation damaged zone in the Meuse Haute-Marne underground research laboratory, International conference on Rocks Arizona janvier 2009

> ARMAND G., SOULEY M., A vicoplastic model including damage for deep argillaceous rocks: blind prediction of drifts behavior, EURO TUN 2009 Ruhr university 9-11 septembre 2009

> BRUE. F, BURLION N., SKOCZYLAS F., BOURBON X., Effect of saturation degree and temperature on behaviours of three different concretes, NUCPERF

> BUFFO-LACARRIERE L., SELLIER A., EL GOGNOUNI M., BOURBON X., Chemical evolutions and mechanical behavior o f HPC nuclear waste structures, RILEM juin 2009

> CAMPS G., SELLIER A., TURATSINZE A., ESCADEILLAS G., BOURBON X., Modeling of leaching effects on fibre-reinforced concrete poperties, RILEM juin 2009

> CORNATON F., KERROU J., BENABDERRAHMANE A., An integrated multi-scale hydrogeological model for performance and safety assessment of French geological high level and long live radwaste disposal in clay formation, AGU 2009

> DELAY J., Andra's scientific research at Bure: new scientific investigations and developments, Unsat Waste 2009 Shanghai

> DELAY J., LEBON P., REBOURS H., The Meuse/Haute-Marne centre : next steps towards a deep disposal facility, Unsat Waste 2009 Shanghai

> DEVILLE E., MONTARNAL P., LOTH L., CHAVANT C., Alliances: simulation platform for nuclear waste storage and disposal, NUCLEAR 2009 Roumanie mai 2009

> DEWONCK S., BLIN V., DESCOSTES M., RADWAN J., NAVES A., SAMPER J., LANDESMAN C., Long term in situ tracer diffusion tests in the Callovo-Oxfordian clay: results and modeling, Migration' 09

> DUBOIS JP., DELEPINE-LESOILLE S., TRAN. V-H,, BUSCHAERT S., MAYER S., HENAULT J-M., SALIN. J, MOREAU M.G., Raman versus Brillouin optical fiber distributed temperature sensing: an outdoor comparison. SHMII Zurich juillet 2009

> GARITTE B., GENS A., VAUNAT J., ARMAND G., Hydraulic response to a shaft excavation in Callovo-Oxfordian clay, CIMME Barcelona 2009

> LAMOUR V., HAOUAS A., DUBOIS JP., POISSON R., Long term monitoring of large massive concrete structures: cumulative effects of thermal gradients, NDTCE Nantes 2009

> LAMOUR V., ZREIKI J., BENBOUDJEMA F., DUBOIS JP., Early age behavior of massive concrete structures: structural monitoring and macroscopic modeling, NDTCE Nantes 2009

> LEROUGE C., GAUCHER E.C., TOURNASSAT C., AGRINIER P., WIDORY D., GUERROT C., BUSCHAERT S., (S C O Sr) isotopic constraints on the diagenetic evolution of the COX clay formations at the Bure URL site Paris Basin, EGU Vienne 2009

> MARTINE T., Les défis de la gestion des connaissances : une étude de cas, ISKO Lyon juin 2009

> MOREL J., RENAUD V., ARMAND G.,Feasibility of excavation of disposal cells for nuclear waste in 500 m deep clay formation, Eurock 2009

> MORLOK. A,, LEROUX H., TROADEC D., LIBOUREL. G, Aqueous alteration of CR chondrites as analogue for corrosion processes: first FIB, TEM results, METSOC Nancy du 13 au 18 juillet 2009

> MORLOK. A, NEFF D., LIBOUREL. G, Alteration of metal in Cr2 chondrites as analogue for long term corrosion processes: raman studies of corrosion rims, 40th Lunar and Planetary Science Conference 23 au 29 mars 2009 Texas

> MUNIER I., COCHEPIN B., PLAS F., Space and time evolutions of cementitious in a context of a high level and long-lived radioactive waste disposal in a deep clay formation: from phenomenological analyses to performance assessment, NEA Workshop on cementitious materials

> NAVES A., DEWONCK S., SAMPER J.,In-situ diffusion experiments: effects of water sampling on tracer concentrations and estimated diffusion and sorption parameters, Migration' 09

> NEFF D., SAHEB M., MONNIER B., CHITTY W.J., PERRIN S., DESCOSTES M., L'HOSTIS V., CRUSSET D., DILLMANN P., The archaeological analogue approaches to predict the long term corrosion behaviour of carbon steel overpack in the French disposal systems, ECM 2009

> NEFF D., SAHEB M., MONNIER B., CHITTY W.J., REGUER S., PERRIN S., L'HOSTIS V., DESCOSTES M., BERGER P., CRUSSET D., DILLMANN P., The archaeological analogue approaches to predict the long term corrosion behaviour of carbon steel overpack and reinforced concrete structures in the French disposal systems, ICEM 2009 Liverpool 11-15 octobre 2009

> PERLOT C., CARCASSES M., BALLIVY G., BOURBON X., Experimental protocols set up for leaching simulation under static and dynamic conditions, RILEM juin 2009

> PIERRON P., MOSSER-RUCK R., CAUMON M-C., CATHELINEAU M., MICHAU N., Etude experimentale des interactions fer-argilite à 90 et 300°C: influence des rapports liquide, roche:argilite et de la température sur la stabilité des phases minérales, GFA avril 2009

> PISAPIA C., DESCHAMPS P., HAMELIN B., BUSCHAERT S., Chronological constraints on fluid circulationin Mesozoic formations of the Eastern part of the Paris Basin inferred from U- Pb dating of secondary infilling calcites, AGU 2009

> PONS-BRANCHU E., HAMELIN B., GENTY D., BRULHET J., Etude d'une stalagmite Holocene du sud de la France: corrélation entre les taux de croissance et la variabilité climatique régionale, Journées scientifique IDES 5 et 6 novembre 2009

> RIVARD. C, BARRES O., GUIREC. O, GALMICHE. M, PELLETIER M., VILLIERAS F., MICHAU N., Fe(0)- clays interactions at 90°c under anoxic conditions: a comparative study between clay fraction of Callovo-Oxfordian and other purified clays, ICC Juin 2009

> ROBINET J.C., SARDINI P., ALTMANN S., VAN LOON L., A multiscale evaluation of the effects of mineral porosity spatial variability on solute diffusion in clayrock geological formations considered for hosting repositories for radioactive wastes, Migration' 09

> SAVOYE S., PUENTE. C, COELHO D., A new experimental approach for studying tracer dffusion throuh unsaturated clayey rock: application to the Callovo-Oxfordian argillite, EGU Vienne 2009

> TALANDIER J., WENDLING J., New experimental data and model to describe gas and water flow in Callovo-Oxfordian argillite: Simulation of gas migration in radioactive waste underground repository, MAMER09 2009

> TREILLE E., WENDLING J., PLAS F., Simulation of gas migration at scale of a disposal cell in the context of a high level and long live radwaste disposal in a deep clay formation during operating phase, Tough Symposium 2009

> TROTIGNON L., THOUVENOT P., MUNIER I., COCHEPIN B., PIAULT E., TREILLE E., BOURBON X., MIMID S., Numerical simulation of atmospheric carbonation of concrete components of a deep geological radwaste disposal using ToughReact: a two-phase coupled reactive transport process in low permeability materials, Tough Symposium 2009

> ZHANG C.L., WIECZOREK K., ROTHFUCHS T., LEBON P., Responses of the Opalinus clay to heating during the H-ED experiment at Mont Terri, Thimodaz, Theresa conférence 29, 09-10 janvier 2009

Les thèses

Les thèses des doctorants avec un statut de l'Andra sont publiées régulièrement sous un format spécifique. Les résumés étendus (10 pages) de ces thèses sont regroupés en un recueil édité annuellement. La liste des thèses soutenues entre 2006 et 2009 est reportée ci-dessous ainsi que celles qui étaient en cours au 31 décembre 2009.

Les thèses publiées entre 2006 et 2009

• En 2006

> Julien BREVET : Mise en évidence de la réactivité de la matière organique du Callovo-Oxfordien et de son influence sur le transfert de radionucléides dans le contexte d'un stockage - Univ. Poitiers

> Lionel ESTEBAN : Anisotropie magnétique et de porosité des argilites du Callovo-Oxfordien du laboratoire souterrain de l'Andra (Meuse/Haute-Marne, Bassin de Paris) Univ. Paul Sabatier, Toulouse

> Emilia HURET : Analyse cyclostratigraphique des variations de la susceptibilité magnétique des argilites callovo-oxfordiennes de l'Est du Bassin de Paris : application à la recherche de hiatus sédimentaires - Univ. Pierre et Marie Curie, Paris

> Sabah Ben LAGHA : Corrosion atmosphérique de l'acier non allié : application aux conteneurs métalliques en conditions de stockage réversible - Univ. Pierre et Marie Curie, Paris

> Nathalie MACE : Influence de la température sur la rétention du sélénite par une pate de ciment altérée et par des phases pures constitutives - Univ. Paris XI

> Nicolas MARTY : Modélisation couplée (transport - réaction) des interactions fluides - argiles et de leurs effets en retour sur les propriétés physiques de barrières ouvragées en bentonite. Univ. Louis Pasteur, Strasbourg

> Sébastien POULAIN : Caractérisation microbiologique de l'argile à Opalinus du Mont Terri et de l'argilite du Callovo-Oxfordien de Meuse/Haute-Marne. – Univ. Bordeaux I

> Joël SAROUT : Propriétés physiques et anisotropie des roches argileuses : modélisation micromécanique et expériences triaxiales. Univ. Paris XI

• En 2007

> Ariane ABOU-CHAKRA –GUERY : Contributions à la modélisation micromécanique du comportement non linéaire de l'argilite du Callovo-Oxfordien. – Univ. Lille I

> Cristelle CAILTEAU : Métrologie des pressions partielles de gaz (CO2 et CH4) à l'équilibre avec les eaux de formation des marnes de Bure (Meuse/Haute-Marne, France) et du Mont Terri (Ste Ursanne, Suisse) : Interprétation des mécanismes de transfert de gaz après forage. - INPL, Vandoeuvre

> Maud CODINA : Les bétons bas pH - Formulation, caractérisation et étude à long terme. - INSA, UPS Toulouse

> Norbert JORDAN : Influence de l'acide silicique sur la rétention du sélénium (IV) sur les oxydes de fer. - Univ. Nice Sophia Antipolis

> Marie LEFRANC : Variations et variabilité spatio-temporelle des argilites callovo-oxfordiennes de Meuse/Haute-Marne - Valorisation géostatistique des données diagraphiques ENSM, Paris

> Estelle MARCHAND : Analyse de la sensibilité déterministe pour la simulation numérique du transfert de contaminants. Univ. Paris Dauphine

> Pauline ROUSSEAU-GUEUTIN : Les processus couplés dans les argilites du Callovo-Oxfordien sur le site de Bure : implications pour les mouvements de fluides et de solutés. Univ. Paris VI

• En 2008

> Pierre BOULIN : Expérimentation et modélisation du transport de l'hydrogène à travers des argilites de centre de stockage de déchets radioactifs. - INPG, Grenoble

> Guillaume CAMPS : Etude des interactions chemo-mécaniques pour la simulation du cycle de vie d'un élément de stockage en béton Univ. Paul Sabatier, Toulouse

> Caroline DE DIEULEVEULT : Un modèle numérique global et performant pour le couplage géochimie - transport. Univ. Rennes 1

> Anne DELOS : Transport des colloïdes et des radionucléides sous forme colloïdale dans les eaux souterraines. Univ. Polytechnique de Catalogne, Espagne

> Jean-Charles ROBINET : Minéralogie, porosité et diffusion des solutés dans l'argilite du Callovo-Oxfordien du Bure (Meuse/Haute-Marne, France) De l'échelle centimétrique à micrométrique. - Univ. Poitiers

> Benjamin ROTENBERG : Modélisation multi-échelles du comportement de l'eau et des ions dans les argiles. Univ. Pierre et Marie Curie, Paris

• En 2009

> Flore BRUE : Rôles de la température et de la composition sur le couplage thermo-hydro-mécanique des bétons Laboratoire de Mécanique, Univ. Lille.

> Benjamin BRIGAUD : Influence du contexte sédimentaire et de la diagenèse sur les propriétés pétrophysiques du Dogger calcaire de l'Est du Bassin de Paris. – Univ. Bourgogne, Dijon.

> Damien JOUGNOT : Etude géophysique des phénomènes de transfert dans les argilites du Callovo-Oxfordien partiellement saturées en eau : application à l'EDZ du site de Bure. Terre Univers Environnement, Univ. de Savoie, Grenoble.

> Thomas MIGLIORE : Estimation des paramètres de transport dans un milieu hydrogéologique et analyse d'incertitudes. Univ. Nice Sophia Antipolis.

> Mandana SAHEB-DJAHROMI : Les analogues archéologiques ferreux pour la compréhension des mécanismes de corrosion multiséculaire en milieu anoxique. CEA, Direction des Sciences de la matière/DRECAMP/LPS, Saclay

> Laurent TRUCHE : Transformations minéralogiques et géochimiques induites par la présence d'hydrogène dans un site de stockage de déchets radioactifs. - Univ. Paul Sabatier, Toulouse.

• À paraître

> Alexandre DIDOT : Corrosion sous contrainte des aciers non alliés dans les conditions du stockage géologique - CEA/LECA, soutenue à l'Université de Technologie de Compiègne en décembre 2008.

Les thèses en cours au 31 décembre 2009

NOM	PRÉNOM	SUJET	Service Andra de suivi	LABORATOIRE PARTENAIRE	Année de soutenance (prévue)
BODIN	Jonathan	Modélisation, analyse et simulation d'écoulements et transferts diphasiques multi-composants en milieux poreux	Evaluation Analyse de Performance	Institut Camille Jordan - UMR 5208 - Université C. Bernard Lyon1 - 69622 Villeurbanne cedex	2010
FREY	Jérémy	Modélisation multi-échelle de l'endommagement hydro-mécanique des roches argileuses	Mécanique Fluides et Solides	L3S - Université de Grenoble - 38041 Grenoble cedex 9	2010
BOURDOISEAU	Jacques-André	Biocorrosion des aciers : synergie entre la chimie du fer et le métabolisme des bactéries sulfurogènes	Colis Matériaux	LEMMA - Université de la Rochelle Bat Marie Curie - 17042 La Rochelle cedex 1	2010
ROGER	Gaëlle	Transport des nano-colloides chargés dans un milieu argileux : cas des substances humiques présentes dans les argilites du Callovo-Oxfordien des ouvrages de stockage des déchets radioactifs de haute activité et à vie longue	Transferts	Université P&M Curie - Laboratoire 42C, 4 place Jussieu - 75005 Paris	2010
SMITH	Thomas	Transfert vertical des gaz rares à l'échelle des différentes formations de la zone de transposition du site de Meuse/ Haute-Marne et à l'échelle des eaux porables de l'argilite du Callovo-Oxfordien	Transferts	CNAB - Domaine du Haut Vigneau BP 120 - 33175 Gradignan cedex	2010
WRZESNIAK	Aleksandra	Modélisation 3D de la rupture en chevrons autour des galeires souterraines par homogénéisation asymptotique et X-Fem	Milieu Géologique	Sols, solides, structures, risques BP 53 - 38041 Grenoble cedex 9	2010
GAULARD	Coralie	Influence de l'environnement sur l'altération de la matrice UO2 du combustible irradié en situation de stockage	Colis Matériaux	L3MR - CEA - 91191 Gyf sur Yvette	2011
GUILLON	Théophile	Comportement hydromécanique de l'argilite lors de cycles de désaturation resaturation	Mécanique Fluides et Solides	LAEGO - ENSG, rue du doyen Roubault BP 40 - 54501 Vandoeuvre les Nancy	2011
MAYEUX	Bruno	Caractérisation de la microflore et étude du métabolisme bactérien potentiellement actif in situ en formation géologique argileuse	Transferts	Labo. de microbiologie IRD Université de Provence - IFR BAIM ESIL 13280 Marseille - Cedex 09	2011
MIHAELA	Oana	Gestion des déchets nucléaires et calcul économique : la théorie des options réelles face aux approches alternatives	Direction Scientifique	BETA – UMR7522 - CNRS/ULP/Nancy Univ., 13 place Cournot - 54035 Nancy Cedex	2011
SABATER SILVESTRE	Coralina	Role of organic matter on the complexation and transportation of radionucleides around nuclear waste repositories: determination of formation constants of some radionucleide-organic complexes at 25°c	Transferts	CTM Centre Tecnologic Avda de les Bases de Manresa, 1 08242 Manresa Spain	2011
TOLU	Julie	Influence de paramètres abiotiques et biotiques sur la spéciation du sélénium présent dans les sols à l'état de trace et son transfert	Transferts	LCABIE – PREMHélioparc, 2 av. du président Angot - 64053 Pau cedex 9	2011
BLAISE	Thomas	Diagenèse et transferts dans les fluctuations de l'est de la France, approche comparative des données thermométriques (biomarqueurs, paleofluides), et sources des fluides à l'origine des ciments de la porosité matricielle et fissurale	Milieu Géologique	Université H. Poincaré - G2R UMR 7566 BP 239 - 54506 Vandoeuvre-lès-Nancy	2012
DEHOUX	Anita	Etude des propriétés mécaniques de couches de corrosion à l'interface métal/béton et métal/argile	Colis Matériaux	Labo Mécanique et Technologie, 61 avenue du Président Wilson - 94235 Cachan	2012
DIDIER	Mathilde	Transfert réactif de l'hydrogène au sein de l'argilite intacte	Transferts	Laboratoire Géophysique Interne et Technophysique - 38041 Grenoble cedex 9 & CEA LITEN/DTNM/LCSN 38054 Grenoble	2012
JOUBAUD	Rémi	Méthodes numériques pour la modélisation multi-échelles des argiles : du nano à l'échantillon	Evaluation Analyse de Performance	CERMICS, 6 et 8 avenue Blaise Pascal 77455 Marne la Vallée cedex 2	2012
LEQUY	Émeline	Influence des retombées atmosphériques particulaires (actuelles) sur les cycles biogéochimiques des écosystèmes forestiers du site Meuse/Haute-Marne	Observation Surveillance	Biogéochimie des écosystèmes forestiers UR 1138 - 54280 Champenoux	2012
PHERON	Xavier	Durabilité des capteurs à fibres optiques sous irradiation	Observation Surveillance	Laboratoire Hubert Curien, 18 rue Professeur UR 1138 - 54280 Champenoux	2012
ROLLAND	Alexandra	Rhéologie, localisation de la déformation et histoire des contraintes dans les calcaires du site de Bure	Mécanique Fluides et Solides	EOST (école et observatoire des sciences de la terre) 5 rue R. Descartes 67084 Strasbourg	2012

Témoignage d'un doctorant Andra

Benjamin BRIGAUD - Doctorant en géologie de 2006 à 2009

Sujet :
Influence du contexte sédimentaire et de la diagenèse sur les propriétés pétrophysiques du Dogger calcaire de l'Est du bassin de Paris.

Directeur et co-directeur :
Jean-François Deconinck et Christophe Durlet (Laboratoire de Biogéosciences UMR 5561 - Université de Bourgogne)

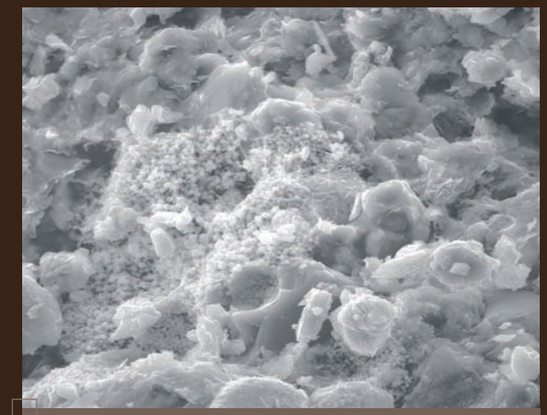
Tuteur Andra :
Alain Trouiller (direction scientifique - service milieu géologique)

Au cours de mon Master que j'effectuais à Dijon, mes futurs directeurs de thèse me proposèrent un sujet de thèse qu'ils voulaient déposer à l'Andra. Ce projet était détaillé en adéquation avec ma formation et les objectifs clairs et bien fixés. Mais c'est surtout l'intérêt scientifique et fondamental sur un objet d'application qui a retenu mon attention, avec un thème de recherche associant une étude sédimentologique, diagénétique et pétrophysique sur des formations géologiques carbonatées.

Après quelques mois d'attente, le sujet a été retenu par le comité scientifique de l'Andra et j'ai pu commencer ma thèse à la rentrée suivante dans un laboratoire CNRS de l'Université de Bourgogne.
D'un point de vue fonctionnement, j'avais le statut de salarié Andra. J'ai réalisé de nombreux et fructueux déplacements sur le terrain, à la carothèque du Laboratoire de Meuse/Haute-Marne, ou effectué de nombreuses analyses dans des laboratoires extérieurs.

En plus de développer une recherche fondamentale en lien fort avec le monde « industriel », j'ai pu facilement valoriser mes résultats dans des revues scientifiques internationales. L'Andra offre donc aux doctorants un objet d'étude particulièrement intéressant, en donnant un accès à de nombreux échantillons, et en mettant les doctorants dans les meilleures conditions pour effectuer une recherche innovante employant les derniers outils analytiques.

Au sein de l'Andra, je fus intégré dans le service géologique, sous la tutelle d'Alain Trouiller. Lors de mes différents déplacements à Châtenay ou à Bure, j'ai pu échanger des idées avec les géologues et hydrogéologues de l'Andra, qui m'ont permis de bien positionner ma recherche par rapport à leurs attentes appliquées. De plus, à l'occasion de réunions d'avancement de thèse programmées tous les 6 mois, je



MEB d'un calcaire poreux

présentais l'avancement de mes recherches devant mes encadrants universitaires et des ingénieurs Andra. Ces réunions offrant l'opportunité de synthétiser les données acquises en laboratoire sont particulièrement bénéfiques pour le doctorant, par exemple pour préciser certains objectifs. Contraignantes dans la préparation, car obligeant à mettre « au propre » mes résultats et mes idées, je dirais que ces réunions d'échanges m'ont été très bénéfiques pour l'avancement de ma thèse. Je suis à chaque fois sorti de ces réunions avec des idées plus claires sur ma thèse, et de nouvelles pistes à explorer.

Après ma soutenance de thèse, j'ai rapidement enchaîné avec un ATER dans une autre université (Université de Franche-Comté, Besançon). Entre les enseignements et la recherche, le temps est consacré à la constitution de dossier de candidature aux postes de maître de conférence et/ou post-doctorat. De plus, mon sujet de thèse, en lien étroit avec des problématiques développées par les pétroliers, offre des opportunités non négligeables avec le monde industriel.
Bref, l'Andra met ses doctorants dans de bonnes conditions pour mener à bien une recherche fondamentale sur un objet scientifique clairement identifié. Ensuite c'est à nous, doctorants, de faire nos preuves et de donner notre maximum... ■

Glossaire des termes
acronymes et sigles utilisés

AIEA/IAEA	Agence Internationale de l'Énergie Atomique / International Atomic Energy Agency
AEN/NEA	Agence pour l'Énergie Nucléaire, agence spécialisée de l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE) ; http://www.nea.fr
ALLIANCES	Atelier LogicieL d'Intégration, d'ANalyse et de Conception pour l'Entreposage et le Stockage
ArCorr	Argile Corrosion : expérience intégrale représentant un cylindre de verre au sein d'un bloc d'argilite
Argilite	Terme employé pour désigner la formation du Callovo-Oxfordien qui contient en moyenne 40 à 45 % de minéraux argileux, 25 à 30 % de carbonates, 20 à 25 % de quartz sous forme de silts et 5 % de minéraux accessoires (pyrite, feldspaths, matière organique,...) [en anglais "claystones"]
ASN	Autorité de Sûreté Nucléaire ; http://www.asn.gouv.fr
BIOCLIM	Modeling sequential BIOsphere systems under CLIMate change for radioactive waste disposal, projet européen ; http://www.andra.fr/bioclim
BIOPROTA	Groupement international d'échange dans le domaine des transferts de radionucléides dans la biosphère ; http://www.bioprota.com
BRGM	Bureau de Recherche Géologique et Minière ; http://www.brgm.fr
CEDRA/NAGRA	Coopérative d'Entreposage des Déchets Radioactifs – Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle ; http://www.nagra.ch
CEM I	Ciment Portland
CEM V	Ciment au laitier et aux cendres
CNE	Commission Nationale d'Évaluation, créée par la loi de 1991 pour évaluer l'avancement des recherches relatives à la gestion des déchets radioactifs
COESDIC	Comité d'Expertise et de Suivi de la Démarche d'Information et de Consultation
DAC	Dossier de demande d'Autorisation de Construction
DAIE	Demande d'Autorisation d'Installation et d'Exploitation du Laboratoire souterrain
EDTA	Acide éthylène diamine tetra acétique
EDZ	Excavation Damaged Zone (ou zone endommagée par l'excavation)
FA-VL	Déchets de Faible Activité à Vie Longue
FORGE	Fate Of Repository Gases ; http://www.bgs.ac.uk/forge/home.html
FUNMIG	FUNdamental processes of radionuclide MIGration, projet intégré du 6e Framework programme de la Commission européenne
IRSN	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire ; http://www.irsn.fr
ISA	Acide Isosaccharinique
Kd.	Coefficient de distribution d'un élément entre les phases solide et liquide
HA-MAVL	Déchets de Haute Activité et Moyenne Activité, à Vie Longue
LLNL	Laurence Livermore National Laboratory
LNE	Laboratoire National de la métrologie et des Essais
MoDeRn	Monitoring Developments for safe Repository operation and staged closure ; http://www.modern-fp7.eu
OCDE/OECD	Organisation de coopération et de développement économiques / Organisation for Economic Co-operation and Development
PACEN	Programme sur l'Aval du Cycle et la production d'Énergie Nucléaire
PRECCI	Projet de Recherches sur l'Évolution à long terme des Colis de Combustibles Irradiés
ReCoSy	Redox phenomena Controlling Systems, projet Euratome ; http://www.recosy.eu
SCK-CEN	Centre de l'Énergie Nucléaire belge
STXN	Service Technique miXte des chaufferies Nucléaires de la propulsion navale
TDB	Thermodynamic Data Base
TF	Coefficient de transfert entre compartiments (i.e. sol/plante, ingestion animale/produits agricoles,...)
UNGG	Uranium Naturel Graphite Gaz
VESTALE	Verre en Entreposage et en Stockage : Altération à Long tErme
ZIRA	Zone d'Intérêt pour une Recherche Approfondie, d'environ 30 km^2 : correspond à la surface dans laquelle devrait être implanté le stockage de déchets HA-MAVL
ZT	Zone de Transposition, d'environ 250 km^2 : pour le projet HA-MAVL, emprise au sein de laquelle les propriétés de la formation argileuse du Callovo-Oxfordien sont équivalentes à celles observées et mesurées dans le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne.

AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS
1-7, rue Jean-Monnet
92298 Châtenay-Malabry cedex
Tél. : 01 46 11 80 00
www.andra.fr

© Andra • 383 • Juin 2010 • 300 ex • DCOM/10-0081 • Conception graphique et réalisation : graffiti.fr • Crédits photographiques : Andra, M. Aubert/Espace Création, CEA, Consortium Mont Terri, P. Demail, Graphix Image, 4 Vents.
Impression certifiée Imprim'Vert avec des encres végétales sur un papier partiellement recyclé, certifié FSC • **Gratuit - Ne peut être vendu.**