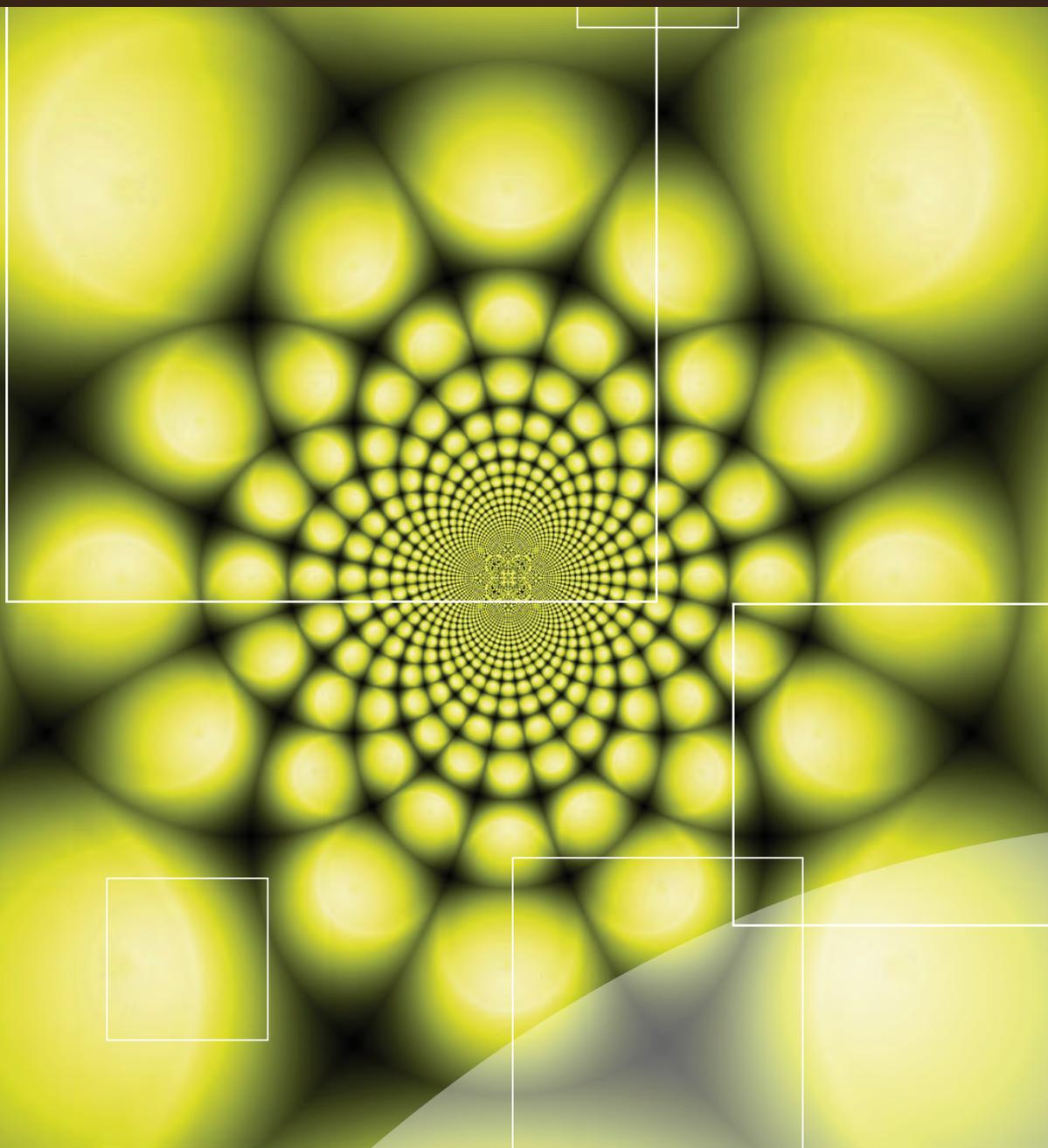


2010 - 2012

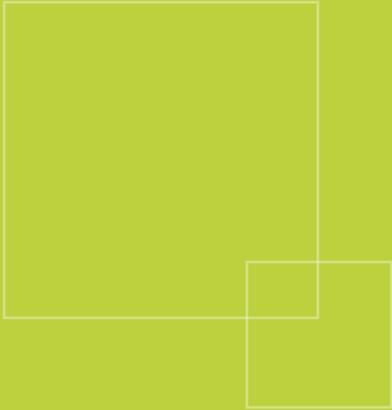
Recherche et développement à l'Andra pour les projets de stockage



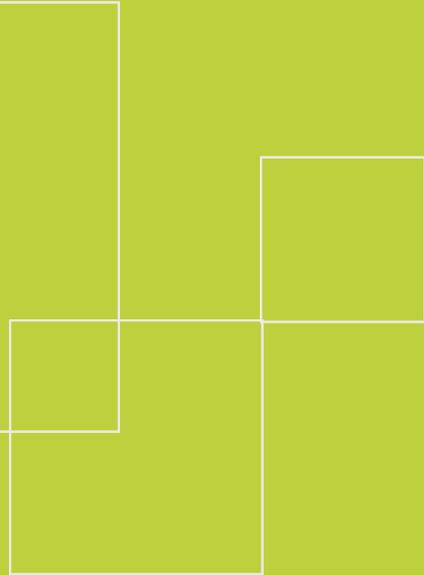
Sommaire

Avant-propos	5
1. La recherche à l'Andra	9
1.1 Grandes étapes et faits scientifiques marquants de 2010 à 2012	10
1.2 Conseil scientifique	11
1.3 Mobilisation de la communauté scientifique française et internationale	12
2. Déterminer le comportement des éléments constitutifs d'un stockage	17
2.1 La R&D sur les déchets de graphite.....	18
2.2 Les propriétés de rétention des argilites du Callovo-Oxfordien ...	19
2.3 Le comportement mécanique des argilites du Callovo-Oxfordien	21
2.4 Le comportement des ouvrages souterrains de structure.....	23
2.5 Le comportement des colis en situation de stockage profond ...	26
2.6 Les interactions entre les divers matériaux du stockage profond	28
2.7 La chimie des fluides et des solides en contexte de stockage profond	29
3. Préparer la construction du futur stockage profond dans son contexte géologique	33
3.1 La reconstitution détaillée de l'histoire géologique	34
3.2 Les études en vue de la localisation du stockage géologique profond	35
3.3 Le Laboratoire souterrain, outil de dimensionnement du stockage profond	39

4. Concevoir l'évolution d'un stockage dans son environnement	45
4.1 Les effets de la perturbation oxydante	46
4.2 Les phénomènes de transfert (RN, gaz) au sein du stockage	46
4.3 Les transferts de fluides à l'actuel dans le milieu géologique	47
4.4 Comportement chimique des radionucléides dans les sols.....	49
4.5 Les évolutions du milieu naturel sur de longues échelles de temps.....	51
5. Évaluer les performances d'un stockage	57
5.1 Les moyens pour évaluer les performances d'un stockage	58
5.2 Les conditions d'exploitation du futur stockage Cigéo	59
5.3 Les évolutions du stockage Cigéo post-fermeture	61
5.4 Evaluer les performances du stockage du Centre de l'Aube	63
6. La réversibilité du stockage géologique profond et ses implications temporelles	67
6.1 La réversibilité décisionnelle	68
6.2 L'observation - surveillance du stockage géologique profond	68
6.3 L'Observatoire Pérenne de l'Environnement (OPE) : un suivi séculaire	71
6.4 Comment garder la mémoire d'un stockage géologique profond	74
6.5 L'analyse des traces humaines passées selon différentes temporalités	75
7. La diffusion des résultats et la valorisation	77
7.1 Les congrès.....	78
7.2 Les publications 2010 à 2012 dans des revues à comité de lecture	78
7.3 Les thèses publiées en 2010, 2011 et 2012.....	85



Avant- propos



Les grandes orientations de l'Andra sont définies par le Plan National de Gestion des Matières et des Déchets Radioactifs (PNGMDR) réalisé sous l'égide de l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) et de la Direction Générale de l'Energie et du Climat (DGEC) et évalué par l'Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques (OPECST).

Avant-propos

Avec la loi de programme du 28 juin 2006 sur la gestion durable des matières et déchets radioactifs, l'Andra, Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs, créée par la loi du 30 décembre 1991, doit formuler des propositions dans le cadre des missions qui lui ont été confiées par l'État pour trouver, mettre en œuvre et garantir des solutions de gestion sûres, sur le long terme, pour tous les déchets radioactifs français.

Les grandes orientations de l'Andra sont définies par le Plan National de Gestion des Matières et des Déchets Radioactifs (PNGMDR) réalisé sous l'égide de l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) et de la Direction Générale de l'Énergie et du Climat (DGEC) et évalué par l'Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques (OPECST).

En support au PNGMDR, l'Andra met à jour et publie tous les trois ans un inventaire national de déchets radioactifs qui répond à deux objectifs : d'une part informer sur les stocks et flux futurs de déchets et leurs filières de gestion, d'autre part dimensionner, avec les marges suffisantes, les futures capacités d'accueil des stockages de l'Andra. Le dernier inventaire a été publié en 2012. L'Agence assure plusieurs fonctions, dont une mission de service public, pour la prise en charge des objets et sites pollués par les matières radioactives dont les responsables sont défaillants.

L'Andra a également une fonction d'exploitant industriel avec la gestion des centres de stockage existants pour les déchets de très faible à moyenne activité à vie courte, elle 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 a une fonction d'agence de programmation, notamment en matière de recherche pour les déchets n'ayant pas encore de solution de gestion, tels que les déchets de haute activité (HA), et ceux de moyenne ou faible activité à vie longue (MA-VL). Cette mission importante allie des recherches technologiques pour concevoir les stockages et les entreposages temporaires et des investigations scientifiques de haut niveau pour garantir que les solutions de stockage assureront la protection de l'homme et de l'environnement sur le très long terme.

Pour les déchets HA et les MA-VL, les résultats des quinze années de recherches menées dans le sud du département de la Meuse et le nord de la Haute-Marne dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991 ont été synthétisés dans le « Dossier 2005 Argile » remis par l'Andra au Gouvernement.

Ce dossier a fait l'objet d'évaluations par la Commission Nationale d'Évaluation (CNE), le Groupe Permanent « déchets » mis en place par l'ASN et le groupe de revue international mis en place sous l'égide de l'AEN/OCDE à la demande des tutelles de l'Andra. Ces évaluations ont conclu à la faisabilité d'un stockage réversible en milieu géologique profond, au sein d'une couche d'argile, le Callovo-Oxfordien, située à 500 mètres de profondeur.

Cette possibilité de créer un stockage sûr et réversible étant actée par la loi de 2006, l'Andra a proposé, en 2009, conformément à la loi, une localisation du stockage souterrain dans le sud de la Meuse.

Il s'agit maintenant de lever des incertitudes, mais les questions qui restent à résoudre ne remettent pas en cause le projet et la demande d'autorisation de construction (DAC) qui sera déposée en 2015. Aucune d'entre elles n'obère le stockage. Il s'agit d'affiner les connaissances (réduire les marges d'incertitudes de certains paramètres) et d'apporter les informations utiles pour préparer la phase d'ingénierie et pour optimiser les concepts, en termes de coûts et de simplification et d'amélioration de la sûreté en exploitation.

Depuis sa première édition en 2002, le programme scientifique (désormais « Programme de R&D ») n'a été consacré qu'aux études dédiées au projet de stockage en milieu géologique profond des déchets HA-MAVL (devenu Cigéo, Centre Industriel de Stockage Géologique), même si les orientations de certaines recherches à caractère générique étaient susceptibles d'être valorisées dans le cadre d'autres projets de l'Agence.

Plus récemment, les besoins exprimés, notamment dans le cadre du projet FA-VL, ont conduit à rédiger des programmes scientifiques dédiés mais leur vocation structurante était moins affirmée que dans le programme scientifique HA-VL.

Le développement de la phase industrielle du projet Cigéo et l'amélioration de la cohérence dans la gestion des résultats et dans l'élaboration des modèles vont dans le sens d'une nécessaire intégration des activités scientifiques et techniques dans un même cadre programmatique. Elles visent en outre à répondre à l'objectif fixé par le contrat quadriennal 2009-2012 qui indique : « à l'échéance du présent contrat, un nouveau programme scientifique concernant l'ensemble des activités de l'Agence sera établi en support à un pilotage et une prospective de l'ensemble des activités de R&D pour l'après 2015 ».

Avec la prise en compte de toutes les activités de R&D de l'Agence, le programme a désormais une structuration plus thématique, valorisant les potentielles synergies entre les diverses activités et visant à donner une unité d'ensemble aux approches. Le programme de R&D se partage entre une nécessaire augmentation de l'opérationnalité des recherches, une préservation des thématiques visant à l'accroissement des connaissances fondamentales et une ouverture prospective notamment pour l'optimisation de la gestion des déchets. Sa structuration, qui s'inscrit également dans la durée, est organisée autour de cinq thématiques qui permettent de s'adapter à l'évolution des projets et activités de l'Agence sur une période *a minima* d'ordre décennal :

- 1 Préserver la ressource rare des stockages
- 2 Adapter les exigences et les Spécifications Techniques de Besoin (STB) au progrès des connaissances
- 3 Accompagner les opérations de construction et d'exploitation des stockages
- 4 Définir et exploiter les techniques et les réseaux d'auscultation et d'information
- 5 Optimiser les matériaux des stockages

Au travers de ces thématiques apparaissent en filigrane des axes robustes d'organisation des recherches :

- **surfaces et interfaces continentales intégrant la géologie de la sub-surface et les thématiques environnementales** ; ceci recouvre notamment les enjeux liés à l'exploration de nouveaux sites (incluant les installations de surface) qui concernent avant tout les quelques premières dizaines de mètres de la géosphère et l'évaluation des effets environnementaux induits par les stockages ;
- **mesure, traitement de l'information et bases de données**, ensemble considéré comme une chaîne complète, intégrant des recherches très amont (capteurs innovants et aide à la décision par exemple) et affichant des objectifs opérationnels ;
- **matériaux et comportement des ouvrages**, associant formulation, connaissances, caractérisation/expérimentation pour le dimensionnement des ouvrages quel que soit le stockage considéré ; le couplage de ces approches doit, au travers de recherches fondamentales, offrir des pistes d'optimisation pour les différents composants des stockages ;
- **déchets en situation de stockage**, visant à réaffirmer le rôle de l'Andra dans la caractérisation des déchets (aspects radiologiques et chimiques), à construire une base de modèles et de données solides en amont des agréments et de compléter les connaissances concernant le comportement et le transfert des radionucléides et toxiques chimiques notamment en champ proche.

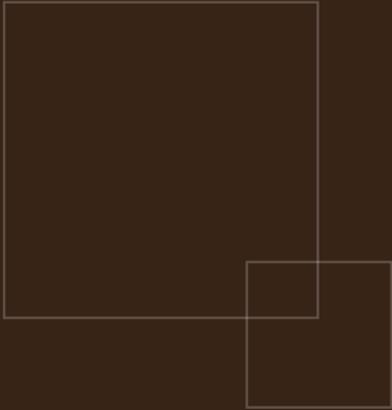


Remarque

Les principaux résultats faisant l'objet du présent bilan concernent la période qui débute en janvier 2010 et s'achève en fin d'année 2012, soit, pour le projet de stockage en milieu géologique profond, la phase de préparation des éléments scientifiques et techniques en support au dossier de demande d'autorisation de construction prévu en 2015, avec son échéance intermédiaire, le débat public de 2013.

Nota bene

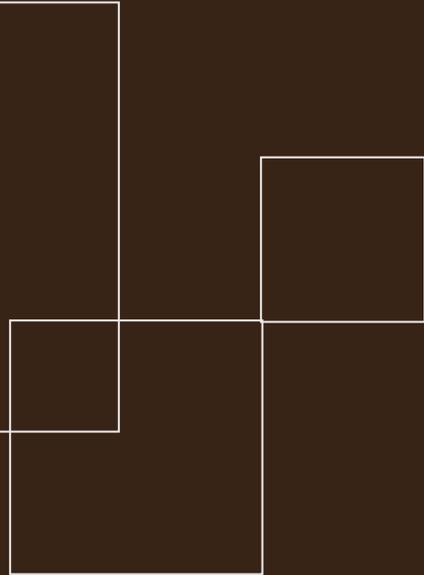
Les termes, acronymes et sigles utilisés dans le document sont définis en dernière page.
Les publications Andra sont citées en fin de volume, dans les rubriques « Les publications » et « Les thèses ». Les publications d'autres auteurs et les documents collectifs de l'Andra sont à la fin de chaque chapitre. ■



1. La recherche à l'Andra

Un stockage réversible en milieu géologique profond est un système complexe, constitué du milieu géologique hôte, des colis de déchets et des différents composants des infrastructures les accueillant, système qui évoluera progressivement sur des durées plurimillénaires.

De ce fait, les études couvrent un très large ensemble de disciplines intégrées et, pour répondre aux différentes questions à résoudre, l'Andra fait appel à de très nombreux laboratoires, organismes de recherche et prestataires de service.



1 | La recherche à l'Andra

1.1 Grandes étapes et faits scientifiques marquants de 2010 à 2012

1.1.1 Le projet HA/MA-VL de stockage en milieu géologique profond devient le projet Cigéo

Suite aux résultats obtenus par les recherches menées depuis 1991 dans l'Est de la France sur la faisabilité du stockage géologique profond de déchets radioactifs de haute activité (HA) et moyenne activité à vie longue (MA-VL) dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien, la loi-programme du 28 juin 2006 a demandé à l'Andra de proposer une localisation de stockage souterrain à l'intérieur du périmètre de la Zone de Transposition (Zt) située dans le sud du département de la Meuse et le nord de la Haute-Marne.

L'Andra a donc engagé une démarche géologique en y associant les parties prenantes locales afin de proposer une zone d'environ 30 kilomètres carrés, la « ZIRA » (Zone d'Intérêt pour une Recherche Approfondie) au sein de laquelle pourrait être implanté le stockage souterrain sur la base de différents critères, en particulier scientifiques comme une épaisseur de la couche du Callovo-Oxfordien d'au moins 140 mètres et une profondeur maximale du milieu géométrique de la formation de 600 mètres.

C'est ainsi que le projet « Cigéo » a vu le jour en mars 2011 quand l'Agence a été autorisée à mener des investigations géologiques approfondies sur la ZIRA, ce qui s'est traduit, sur le terrain, par l'acquisition d'une sismique réflexion haute résolution en trois dimensions sur la totalité de la surface de la ZIRA de la mi-mai à fin juillet 2010. À la suite de divers traitements de cette géophysique, les résultats d'interprétation ont été intégrés dans un modèle géométrique en trois dimensions qui, en 2012, a consolidé et précisé le modèle conceptuel de la formation du Callovo-Oxfordien établi en 2005. Ce modèle a été utilisé pour positionner trois solutions d'esquisses possibles du stockage et pour visualiser leur implantation en trois dimensions au sein de la formation. Ce résultat a contribué au choix de l'esquisse de Cigéo qui sera étudiée jusqu'à la demande d'autorisation de construction (DAC).

Simultanément, les recherches au cœur des argilites du Callovo-Oxfordien se sont poursuivies avec le Laboratoire souterrain ; la longueur cumulée de galeries, qui était de 1 000 mètres au début de 2011, dépassait les 1 270 mètres à la fin de l'année 2012 ; 23 expérimentations étaient en cours à cette époque, dont certaines sont engagées depuis plusieurs années telles que celles destinées à évaluer la diffusion d'éléments chimiques. Outre les tests et essais destinés à préciser les propriétés chimiques, thermiques, mécaniques, hydrauliques ainsi que les propriétés de transfert de la formation argileuse, de nouvelles expérimentations, à objectif plus méthodologique et/ou technologique, ont été engagées sur la période considérée. Par exemple, les premiers démonstrateurs d'alvéole HA ont été réalisés et, en décembre 2012, a débuté un test de transmission sans fil.

L'Observatoire Pérenne de l'Environnement (OPE) qui a été mis en place dès 2007, a des objectifs qui vont au-delà des seuls aspects réglementaires. Il est destiné à discriminer, sur la durée séculaire du stockage, les effets des activités industrielles des modifications qui vont intervenir normalement sur cette durée, à l'échelle locale avec les évolutions socio-économiques, ou plus globale avec l'impact des changements climatiques. Sur la période 2010-2012, l'OPE a vu son activité atteindre son plein niveau de développement.

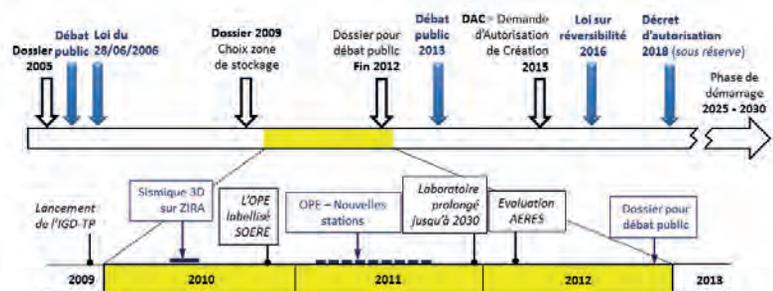
En novembre 2010, l'OPE a reçu le label « SOERE » (Systèmes d'Observation et d'Expérimentation au long terme pour la Recherche en Environnement) par le Conseil de l'alliance de recherche pour l'environnement AllEnvi. L'OPE constitue ainsi un outil de suivi, un moyen d'enregistrement et de fourniture des données sur les évolutions environnementales à très long terme. À cette fin, plusieurs stations ont été mises en place en périphérie de la ZIRA au cours de l'année 2011 avec, en particulier, en septembre, l'installation de la station atmosphérique d'Houdelaincourt qui servira de référence pour tout le quart nord-est de la France. À la fin de l'année 2012, une écothèque était en cours de construction. Elle est destinée à stocker à long terme des échantillons environnementaux sous différentes conditions avec différents protocoles (cryogénéation, surgélation ou séchage). Cette écothèque est incluse dans le réseau international Environmental Specimen Bank.

Parallèlement aux activités de caractérisation du milieu géologique et de l'environnement de surface du Centre de Meuse/Haute-Marne (CMHM), les recherches ont été poursuivies sur les déchets et les matériaux qui seront utilisés pour leur stockage et pour les ouvrages souterrains (bétons, aciers, argiles) pour en caractériser les propriétés et le comportement intrinsèque ainsi que sur les interactions chimiques et mécaniques entre ces différents constituants et avec les argilites du Callovo-Oxfordien en situation de stockage. Des progrès ont ainsi été obtenus sur la compréhension et la quantification des phénomènes de transferts dans les argiles remaniées et les bétons.

La maîtrise des différents processus liés aux stockages et le besoin de représentations de plus en plus fines du fonctionnement des installations souterraines en support à la conception, à l'analyse de sûreté et à la gestion et l'observation/surveillance ont conduit l'Agence à développer de nouveaux outils en propre afin de disposer de moyens de simulation toujours plus performants. Ses partenariats avec le CNRS et l'INRIA jouent, depuis 2010, un rôle particulièrement important en termes de développement et d'échanges et mises en commun de moyens de calculs (méthodes, codes, machines). En parallèle, l'Andra, partenaire de TER@TEC (pôle européen de compétence en simulation et calcul haute performance), s'est engagée dans l'utilisation des centres de calcul intensif Français GENCI (Grand Equipement National de Calcul Intensif). Enfin, dans cette dynamique générale, l'Agence a achevé, en début 2012, la mise en place d'une nouvelle plateforme de calcul, « Cassandra », plus simple et plus ciblée sur ses besoins par rapport à l'ancienne plateforme Alliances.

Dans le domaine des sciences humaines et sociales, l'Andra a engagé ou développé plusieurs actions sur des thématiques aussi diverses que la perception des grandes échelles de temps et la transmission intergénérationnelle de la mémoire, mais aussi sur la notion de réversibilité. Pour cette dernière thématique, l'Agence a soutenu le congrès de Reims en 2010 sur « Reversibility and Retrievability » organisé par l'AEN/OCDE (voir « les congrès » en fin de volume).

La plupart des avancées scientifiques significatives ont été présentées lors du congrès international de Montpellier qui s'est tenu en octobre 2012 (voir dernier chapitre).



Chronologie des principaux événements du projet Cigéo

De façon plus générale, il faut noter l'évaluation de l'Andra par l'AERES (Agence d'Évaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur) en mars 2012 ; cette agence a rendu son rapport sur l'Andra en septembre de la même année.

Quelques points relevés par l'AERES

« La contrainte technique imposée par la notion même de stockage géologique réversible oblige l'Andra à s'investir fortement dans des développements technologiques originaux.

La stratégie de recherche de l'Andra est singulière et originale, basée sur des partenariats forts qui se traduisent par la mise en place de groupements de laboratoires partenaires.

L'Andra est à un tournant de son histoire car la part de son activité consacrée à son rôle d'opérateur industriel va prendre une importance considérable avec la conception et la réalisation du projet Cigéo.

Le passage progressif à la phase industrielle et au projet Cigéo devrait s'accompagner d'un maintien de l'effort de recherche fondamentale afin d'assurer une maîtrise scientifique et technique sur les outils de mesure et de modélisation numérique. » ■

1.1.2 Les centres de surface

Le Centre de stockage de la Manche (CSM), sur lequel ont été stockés des déchets de faible et moyenne activité entre 1969 et 1994, est en phase de surveillance depuis 2003 pour une durée d'environ 300 ans.

Les Centres industriels de l'Andra dans l'Aube (CIZA) regroupant :

- le Centre de Stockage de l'Aube (CSA) où sont stockés depuis 1992 les déchets de faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC) et dont la durée d'activité prévue est de 60 ans ;
- le Cires (Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage) qui stocke depuis 2003 les déchets de très faible activité (TFA) et qui, depuis octobre 2012, regroupe et entrepose les colis de déchets non électronucléaires avant leur tri et leur stockage.

Les moyens industriels de l'exploitation de ces centres ne nécessitent plus de recherches approfondies relatives aux concepts. De ce fait, les études sont destinées à la définition et à l'évaluation de performance de toute évolution de concept et servent d'expertise scientifique pour les estimations d'impact radiologique éventuel et de comportement des composants du stockage, notamment en support à l'évolution de leur conception et de leurs spécifications au sens large. Elles doivent également réactualiser périodiquement les connaissances pour tenir compte des évolutions réglementaires, en particulier en ce qui concerne la sismicité et l'hydrogéologie, puisque les circulations d'eau sont le moteur potentiel des transferts des radionucléides.

Sur la période 2010-2012, il faut souligner tout particulièrement :

- 1 l'actualisation du modèle hydrogéologique, notamment sa révision pour les épisodes de plus hautes eaux ;
- 2 l'analyse multiparamétrique en hydraulique - transport des colis et des ouvrages en support à la révision de leurs spécifications, ;
- 3 l'analyse du fonctionnement non saturé des ouvrages et corrélativement du transfert des gaz en support à la révision des spécifications sur les dégazages en ³H des colis.

1.1.3 La R&D pour les déchets de graphite

La recherche de solutions de gestion des déchets de faible activité à vie longue (FA-VL) est inscrite dans la loi de 2006. Tout en préparant un programme d'investigation géologique pour évaluer la capacité de certains sites à accueillir un stockage, l'Andra a cherché les moyens d'optimiser la gestion de ces déchets en développant des programmes sur des technologies de traitements alternatifs et de caractérisation fine de leur contenu radiologique, plus particulièrement en ¹⁴C.

1.2 Conseil scientifique

Le Conseil scientifique de l'Andra a été créé par la loi du 30 décembre 1991. Les membres de l'actuel Conseil ont été nommés par l'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 en date du 18 février 2010¹ :

Christian FOUILLAC	Président Ancien directeur de la Recherche du BRGM Docteur d'État en géochimie
Bernard BOULLIS	Directeur du programme « Aval du cycle » et Professeur à l'INSTN École Centrale Arts & Manufactures
Michel CALLON	Ancien professeur de sociologie à l'école nationale supérieure des Mines de Paris
Hervé CHAMLEY	Ancien directeur scientifique du Département Sciences de la Terre, Univers & Environnement Docteur d'État en océanographie géologique
Marc DEMARCHE	Directeur du GIE EURIDICE Ingénieur civil des mines belges
Alexandre ERN	Directeur Adjoint du CERMICS Ingénieur en chef des Ponts & Chaussées
Anne FLÜRY-HERARD	Adjoint au directeur des sciences du vivant du CEA et conseiller scientifique auprès du Haut-Commissaire Docteur en médecine - CES hématologie
Laurent MICHOT	Directeur adjoint du LEM, UMR 7569 CNRS, à Nancy Ingénieur et docteur ENSG
Marc PANET	Ancien PDG de FC International SA et d'EEG SIMECSOL Ingénieur Civil des Mines ENSM-Paris
Karen SCRIVENER	Directrice du Laboratory of Construction Materials, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne PhD Imperial College, London
Pierre TOULHOAT	Directeur scientifique de l'INERIS et chef de projet (PAST) CNRS Docteur ès sciences, Université Paris VI
Michel VAUCLIN	Directeur de recherche, DRCE2 CNRS à Grenoble Docteur ès sciences physiques

Le Haut-Commissaire à l'Énergie atomique est membre de droit du conseil ; Yves Bréchet, professeur des universités, a remplacé Catherine Césarsky le 19 septembre 2012.

¹ Les fonctions sont celles des membres au moment de leur nomination.

1 | La recherche à l'Andra

Quelques réflexions du président du conseil scientifique sur le bilan scientifique 2010-2012

« Le Conseil Scientifique, renouvelé en Février 2010, est donc à mi-parcours de sa quatrième mandature depuis la loi qui l'a fondé le 30 décembre 1991. Il poursuit un dialogue structuré et approfondi avec l'Agence, pour contribuer à l'effort de déploiement industriel de la filière française du stockage géologique de déchets radioactifs.

En trois ans, des progrès scientifiques nombreux ont été notés et marquent la vitalité de la communauté scientifique mobilisée par cet enjeu.

Le Conseil Scientifique a particulièrement apprécié que l'Agence, tout en conservant sa capacité de réalisation d'études spécifiques et de synthèse, ait su maintenir une recherche de haut niveau, à travers les Groupements de Laboratoires et de nombreux accords cadre de partenariats dont les programmes ont connu des évolutions pertinentes.

Le Conseil Scientifique a particulièrement apprécié les résultats obtenus grâce au programme d'expérimentations du Laboratoire souterrain de Bure. Il fournit des données essentielles sur le comportement géomécanique et hydrogéochimique de la formation qui, couplées avec l'irremplaçable modélisation, crédibilisent la simulation de l'évolution du stockage à long terme.

La qualité des études géologiques et géophysiques menées sur la ZIRA a été remarquable. Ceci confirme et affine les résultats antérieurs sur le Callovo-Oxfordien. Le diagnostic favorable quant à son aptitude à accueillir un stockage géologique s'en trouve renforcé.

Aux plus grandes échelles spatiale et temporelle, le gain en résolution des modèles géologiques et hydrogéologiques, a permis de réduire les incertitudes sur le devenir à très long terme du stockage. Pour consolider ces avancées, fort utiles dans le débat public, il convient de maintenir un effort de recherche continu sur les outils de modélisations prédictives et d'exposer avec clarté la nature des incertitudes résiduelles.

Le fait majeur constitué par le démarrage du projet Cigéo marque l'entrée du stockage des déchets HA et MA-VL dans une phase de réalisation. Il accroît l'enjeu de recherche dont le Conseil Scientifique a souligné l'importance, et rend également cruciale l'instauration d'un dialogue avec le public qu'un travail de recherche en SHS (science humaine et sociale) ne pourra que faciliter.

En cohérence avec ces objectifs nationaux prioritaires, le Conseil a salué le rôle joué par l'Andra dans la recherche européenne notamment à travers l'IGD-TP et note que la richesse du savoir-faire accumulé par l'Agence commence à être valorisée dans le contexte international.

L'Andra est également encouragée à maintenir ses interactions avec d'autres communautés scientifiques pour valoriser pleinement l'investissement consenti dans l'OPE. Il apparaît également au Conseil que les connaissances acquises par l'Andra pourront bénéficier aux travaux sur le stockage et la migration de gaz dans le sous-sol profond.

A long terme, il apparaît que le stockage des déchets les plus radioactifs, pour assurer l'amélioration incrémentale de ses performances techniques et économiques, doit s'appuyer dans la durée sur une recherche scientifique pérenne. ■

Christian Fouillac, Président (2010-2014) du Conseil Scientifique

1.3 Mobilisation de la communauté scientifique française et internationale

Un stockage réversible en milieu géologique profond est un système complexe, constitué du milieu géologique hôte, des colis de déchets et des différents composants des infrastructures les accueillant, système qui évoluera progressivement sur des durées plurimillénaires. Il en résulte des phénomènes et des interactions variés et souvent couplés sur des échelles d'espace et avec des constantes de temps multiples, chaque élément du stockage évoluant en fonction de son état antérieur et de l'état des éléments qui lui sont adjacents.

De ce fait, les études couvrent un très large ensemble de disciplines intégrées et, pour répondre aux différentes questions à résoudre, l'Andra fait appel à de très nombreux laboratoires, organismes de recherche et prestataires de service.

Alors que l'objectif des premières phases de recherche était de savoir si le milieu géologique profond peut accueillir un stockage de déchets radioactifs, il a fallu progressivement envisager la façon dont il serait possible de construire un stockage, tant du point de vue des matériaux qui le constitueront que du point de vue de la technologie de construction souterraine. Parallèlement, étaient menées des modélisations et simulations pour évaluer la sûreté du « système stockage » (depuis le colis jusqu'à la biosphère, via les infrastructures du stockage et le milieu géologique).

La période 2010-2012 s'inscrit dans cette évolution avec des recherches qui s'orientent vers la compréhension fine des interactions entre matériaux du stockage et comportement de ce dernier dans son ensemble, en exploitation et après fermeture, tout en affinant les résultats sur les propriétés du milieu géologique.

1.3.1 Les partenariats avec des organismes français

La Direction Recherche et Développement (DRD) de l'Andra a poursuivi sa politique de partenariats, initiée dès le début des années 2000, avec les organismes de recherche et les institutions d'enseignement supérieur français.

Ces partenariats, établis sur un souhait partagé de mettre en commun des moyens et des hommes sur des actions dont les résultats bénéficient à chacun d'eux, sont au nombre de onze :

Le BRGM, dont le partenariat a été renouvelé en décembre 2010, avec quatre thèmes de recherche :

- la compréhension des processus de spéciation et transfert de solutés et de gaz dans les formations argileuses ;
- la compréhension et la modélisation numérique des processus chimie-transfert ;
- le développement d'outils de calcul de haute performance et massivement parallélisés ;
- le développement d'outils de surveillance des milieux naturels et anthropisés.

Carnot-Mines au travers des domaines :

- des géosciences ;
- du comportement des colis et des radionucléides ;
- de l'environnement ;
- de l'ingénierie ;
- des sciences humaines et sociales.

Le CEA, avec cinq thématiques :

- le comportement à long terme des colis en conditions de stockage ;
- la modélisation et la simulation (stockage et entreposage) ;

- le stockage géologique profond et le stockage des graphites et radifères ;
- l'entreposage des colis de déchets à vie longue ;
- l'évaluation des options de stockage des déchets des nouvelles générations de réacteurs.

Le CNRS, via son programme NEEDS (« Nucléaire : Énergie, Environnement, Déchets, Société ») lancé en 2012 qui vise à fédérer l'effort interdisciplinaire de recherche sur le nucléaire, afin d'envisager tous les aspects de la relation entre la société, la nature et la technologie nucléaire, alors que les trois groupements nationaux de recherches, FORPRO, PARIS et MOMAS étaient arrivés à échéance.

L'IFSTAR (Institut français des sciences et technologies des transports et de l'aménagement des réseaux), partenariat signé en septembre 2011, avec quatre sujets d'étude :

- la caractérisation et la modélisation du comportement des ouvrages souterrains et du milieu géologique en champ proche ;
- l'observation surveillance des installations ;
- le devenir des ouvrages souterrains béton ;
- la performance des couvertures en argile remaniée.

L'INERIS (Institut national de l'environnement industriel et des risques) avec des recherches sur cinq thèmes, suite au renouvellement de l'accord en 2010 :

- comportement Thermo-Hydro-Mécanique des ouvrages souterrains, du milieu géologique et des barrières ouvragées ;
- comportement des argiles et utilisation aux fins de confinement ;
- observation et surveillance des installations de stockage géologique ;
- écotoxicologie, devenir et effet des toxiques chimiques et des polluants ;
- outils et processus pour l'analyse des risques.

Inra, nouveau partenariat depuis avril 2010, qui a pour objectifs de :

- comprendre le fonctionnement des écosystèmes terrestres et aquatiques et leur évolution dans le temps ;
- identifier des indicateurs rendant possible la détection de changements d'origine anthropique ;
- conceptualiser ces phénomènes par construction de modèles mathématiques.

Inria avec des recherches scientifiques et technologiques du numérique telles que :

- la simulation des processus physiques ;
- les méthodes de résolution numérique ;
- les méthodes d'analyse pour gérer les incertitudes des valeurs des paramètres et en évaluer l'impact sur les résultats.

Le LNE (Laboratoire national de métrologie et d'essais), depuis avril 2011, avec :

- la métrologie ;
- la conservation à long terme d'échantillons ;
- la qualification d'instruments et de chaînes de mesure complètes ;
- la mise en place d'étalons, normes et assurance-qualité.

L'Université de Lorraine, dont le partenariat renouvelé en juin 2012 couvre le large domaine des sciences et techniques, de la santé et des sciences humaines et sociales.

L'Université de Technologie de Troyes, dont le partenariat renouvelé en avril 2012 est destiné à approfondir trois thèmes de recherche :

- les capteurs (performance, fiabilité, transmission) et le traitement de l'information ;
- le comportement des structures et des matériaux mis en œuvre dans le système de stockage ;
- l'organisation, le pilotage et la traçabilité des données.

En plus de ces recherches menées au travers de partenariats, l'Andra collabore à de grandes thématiques de recherches nationales (projets ANR...) et participe à deux Alliances : Ancre et AllEnvi. Par ailleurs, l'Agence va mener, avec des acteurs du nucléaire français, des recherches sur le développement de procédés de traitement des déchets dans le cadre du programme des Investissements d'Avenir. Enfin, l'Andra valorise ses programmes de recherches en les ouvrant à la communauté scientifique, comme dans le cas du forage profond au Trias (voir encadré ci-dessous).

Un programme de recherche multidisciplinaire autour du forage profond au Trias

Le forage scientifique de 2 000 mètres de profondeur, dit EST433, que l'Andra a réalisé en mars et avril 2008 dans le sud du département de la Meuse avait pour but une meilleure compréhension du système hydrogéologique profond et des échanges verticaux entre formations, via l'acquisition de paramètres physiques complémentaires et d'un profil de distribution de traceurs chimiques des eaux du Trias à l'Oxfordien. Cet objectif a été complété par l'acquisition de données géothermiques sur les aquifères du Trias.

Or, depuis le programme « géologie profonde de la France » dans les années 80, aucun ouvrage de ce type n'avait été réalisé. L'Andra et le CNRS ont donc considéré qu'un projet multidisciplinaire (dénommé « Transferts Actuels et Passés dans un Système Sédimentaire aquifère / aquitard ») (TAPSS) dans une région du bassin de Paris mal connue méritait d'être développé dans le domaine de la géologie sédimentaire, de l'hydrogéologie actuelle et passée et de la géochimie.

L'Andra a donc mis à disposition les enregistrements diagraphiques et les carottes de forage, dont certaines ont été réalisées spécialement pour le projet, le financement des recherches ayant été assuré par le GNR FORPRO et plusieurs organismes tels que le BRGM, l'IRSN ou l'IFP.

Les résultats de ce programme ont été présentés lors d'une session spéciale du congrès de l'Association des Sédimentologues Français d'octobre 2011 à Dijon. D'ores et déjà, ils ont donné lieu à six publications de rang A et plusieurs articles sont sous presse ou en préparation, dont un numéro spécial de la revue internationale « *Marine and Petroleum Geology* » regroupant huit articles, prévu en 2013. Ce forage a également été utilisé par sept étudiants en doctorat, tous ayant soutenu leur thèse récemment. ■



Vue aérienne de la plate-forme du forage EST433

1 | La recherche à l'Andra

1.3.2 Les Groupements de Laboratoires

Pour répondre à des questions scientifiques majeures nécessitant soit une forte interdisciplinarité, soit des moyens techniques et scientifiques complémentaires, sur des durées de plusieurs années, l'Andra a mis en place des Groupements de Laboratoires (GL) reposant sur des compétences pluridisciplinaires et pluri-organismes et disposant d'une autonomie significative en matière de prospective et programmation.

Ces GL, qui associent organismes, établissements universitaires et industriels, français et étrangers, travaillent sur des thématiques transverses peu, ou pas, abordées antérieurement (par exemple, les interactions entre verre, fer et argile). Ils sont au nombre de huit, autour d'autant de grandes thématiques :

- ThermoChimie,
- Transfert des radionucléides,
- Verre-fer-argile,
- Transfert des gaz,
- Géomécanique,
- Évolution des structures cimentaires,
- R&D moyens et stratégies d'auscultation,
- Sciences humaines et sociales.

1.3.4 L'Andra et les projets européens

La DRD de l'Andra participe activement à six projets européens développés dans le cadre de l'actuel 7^e PCRD (tableau ci-dessous). Parmi ceux-ci, elle coordonne le projet MoDeRn (voir encadré). L'Andra est également « External user » dans les projets « ReCoSy » et « Skin ». Par ailleurs, l'Agence a intégré l'infrastructure ICOS.

Projet	Sujet	Période	Leader	Principale implication Andra
CARBO-WASTE	Traitement et stockage du graphite irradié et des autres déchets carbonés	7 ^{ème} PCRD 2008-2012	FZH (D)	Implication sur 3 thématiques : • approche intégrée de la gestion des déchets ; • caractérisation et modélisation ; • stockage.
MODERN	Développement et mise en œuvre des techniques de contrôle et de surveillance des stockages	7 ^{ème} PCRD 2009-2013	Andra	Coordination de l'ensemble du projet
FORGE	Évaluation de l'impact des gaz dans les stockages de déchets radioactifs	7 ^{ème} PCRD 2009-2013	NERC (UK)	Coordination de la modélisation, et contribution, <i>via</i> les expériences <i>in situ</i> , aux WP techniques, réalisation des analyses de performance et de simulations du transitoire hydraulique-gaz aux échelles pertinentes du stockage
CATCLAY	Étude des processus de migration des cations dans les roches argileuses	7 ^{ème} PCRD 2010-2014	CEA (F)	Responsable du module sur le développement des modèles et l'intégration des résultats
LUCOEX	Tester à l'échelle 1 la faisabilité de différents concepts d'alvéoles	7 ^{ème} PCRD 2011-2014	SKB (Suède)	Responsable du Wp3 : construction d'une alvéole HA et impact thermique
DOPAS	Étude, à pleine échelle, des solutions technologiques de fermeture des stockages géologiques profonds	7 ^{ème} PCRD 2012-2016	POSIVA (Finlande)	Responsable de l'essai FSS de construction à pleine échelle d'un scellement en galerie horizontale ; réalisation d'analyse de performance des scellements <i>vs</i> les résultats des WP technologiques et de comportement hydro-mécanique des scellements
ICOS	Compréhension des flux et bilans de gaz à effet de serre de la zone Europe et des régions adjacentes	Infrastructure internationale de recherche		

1.3.3 Les thèses et post-doctorats

L'Andra a poursuivi sa politique de thèses mise en place dès 1998, qui permet à des doctorants, sous statut de salariés Andra pendant trois ans, d'avoir un contact avec la recherche en étant détachés dans un laboratoire. Pour l'Agence, cette approche est destinée à répondre à des questions de fond nécessitant des études sur plusieurs années. Chaque étudiant est suivi, outre son encadrant académique, par un spécialiste de l'Agence dont le rôle est de s'assurer du bon déroulement des recherches et de mettre à disposition du jeune chercheur les données Andra utiles à son travail.

Sur la période, le nombre de thèses attribuées a fortement varié (3 thèses en 2010 et 2012, 10 en 2011). Les sujets restent très diversifiés avec un accent particulier sur l'étude des phénomènes chimiques, biochimiques et géomécaniques, soit *via* l'observation – expérimentation, soit *via* la modélisation, ces deux approches étant souvent couplées. Les recherches sur la métrologie prennent également de l'importance ainsi que les sciences humaines et sociales.

Pour les recherches plus approfondies et de plus courtes durées, l'Andra fait appel à des post-doctorants dont le contrat est, en moyenne, de 18 mois dont au moins la moitié est réalisée dans un laboratoire étranger.

La DRD a été un des membres actifs dans la création de l'IGD-TP. L'Implementing geological disposal of radioactive waste Technological Platform a été créée en 2009 à la demande de l'Union européenne qui considère que les premiers stockages géologiques de déchets débiteront en 2025.

Cette plateforme regroupe 12 agences nationales de gestion de déchets radioactifs et une soixantaine d'organismes. L'Andra en a assuré la présidence de septembre 2010 à janvier 2012. Durant cette période, ont été produits un agenda stratégique des recherches et un plan de déploiement qui ont permis à la Commission européenne de fixer les grands objectifs du programme-cadre pour la recherche et l'innovation de l'Union européenne.

Le projet MoDeRn (www.modern-fp7.eu)

Dans l'actuel 7^{ème} PCRD, l'Andra coordonne le projet MoDeRn (Monitoring Developments for safe Repository operation and staged closure) dont l'objectif est le développement et la mise en œuvre d'activités de surveillance pendant les principales étapes du processus de stockage de déchets radioactifs.



Il implique 17 partenaires présents en Europe, Etats-Unis et Japon, parmi lesquels des organisations nationales chargées de la recherche et de la gestion des déchets radioactifs, des experts en observation et surveillance, des universités, et des experts en sciences sociales.

Ce projet est subdivisé en six thématiques de travail :

- 1 analyse des objectifs et stratégies ;
- 2 état de l'art et développement de recherches et technologies de monitoring ;
- 3 expérimentations de démonstration *in situ* ;
- 4 étude de cas de surveillance à tous les stades du processus de stockage ;
- 5 diffusion de la connaissance ;
- 6 synthèse et intégration des résultats.

Un *Workshop*, coordonné par l'Andra, sur l'état de l'art des technologies d'auscultation s'est tenu les 7 et 8 juin 2010 à l'Université Technologique de Troyes.

Les participants, parmi lesquels les partenaires du projet, mais aussi des intervenants extérieurs d'instituts de recherche et d'industries, ont présenté et échangé sur l'instrumentation pour le suivi géotechnique et hydrogéologique, et pour l'auscultation des structures en béton. Ils ont également abordé des sujets tels que les réseaux à capteurs sans fil, les capteurs à fibres optiques, les méthodes sismiques, la transmission sans fil et la mesure depuis les satellites.

Le *Workshop* final du projet a été programmé du 19 au 21 mars 2013 au Luxembourg. ■

De façon plus générale, la DRD participe à des forums internationaux d'échanges tels que le « Clay-Club », créé en 1990 pour partager les acquis des études destinées à évaluer les possibilités de stockage en milieu argileux profond.

De même, l'Andra a été à l'initiative de la création, en 2002, du groupe de travail « BIOPROTA » qui s'intéresse à la caractérisation de la biosphère pour déterminer les processus et paramètres spécifiques de transferts des radionucléides prioritaires pour les évaluations de sûreté.

1.3.5 Les autres collaborations internationales

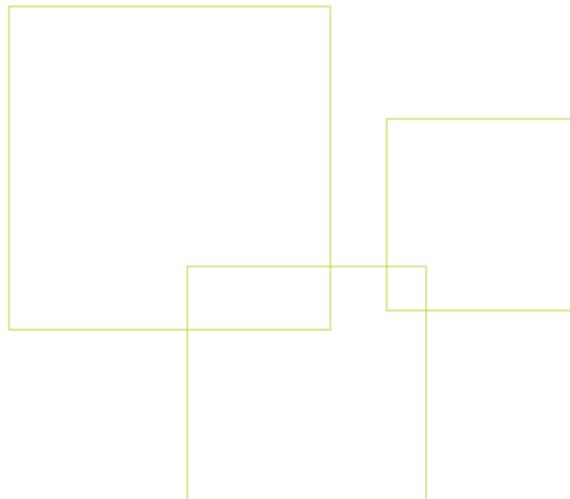
L'Andra contribue au développement du projet AEN-OCDE Thermodynamic Data Base (TDB), visant à fournir, sous format de livres, une sélection rigoureuse de grandeurs thermodynamiques associées à des éléments d'intérêt dans le contexte des déchets radioactifs. La phase IV du projet TDB (2008-2012) s'est appliquée à la sélection de données pour le fer, l'étain et le molybdène, ainsi qu'à la mise à jour des sélections effectuées antérieurement. La phase V est en cours de définition. Cet ensemble de données constitue un socle de connaissances utilisé par l'Andra pour le développement de sa propre base de données thermodynamiques « ThermoChimie ».

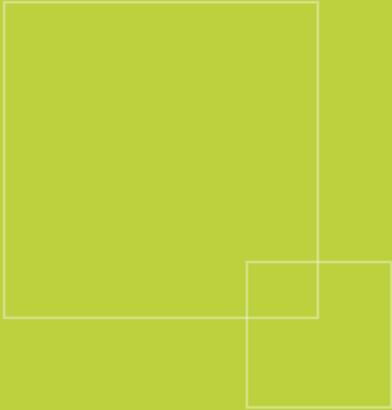
L'Andra coopère étroitement, depuis plus de vingt ans, avec des agences homologues européennes avec qui elle partage de nombreux objectifs. La collaboration est plus particulièrement développée avec trois agences européennes qui ont, chacune, leur propre laboratoire souterrain ; elle permet d'enrichir un retour d'expérience et d'améliorer la compréhension phénoménologique en comparant des environnements légèrement différents :

- la Nagra (Suisse), dont le laboratoire traverse une formation argileuse datée de l'Aalénien ;
- l'Ondraf (Belgique), dont le laboratoire est creusé dans l'argile tertiaire de Boom ;
- SKB (Suède), dont le laboratoire est développé en milieu granitique.

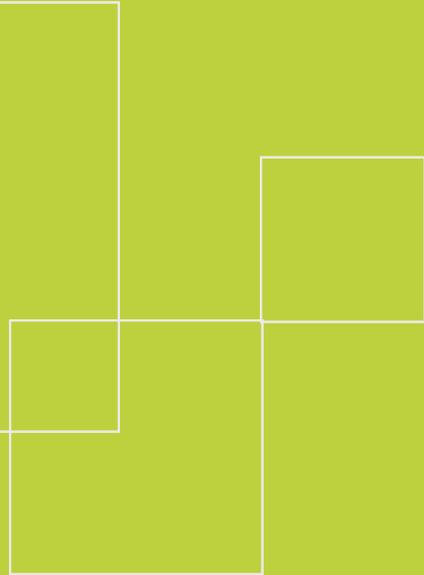
Avec les deux premières agences, l'Andra mène des expérimentations de caractérisation des propriétés du milieu géologique et des essais technologiques qui sont préparés, financés et suivis en commun. Avec la Suède, la collaboration porte sur les matériaux de scellement des ouvrages et les démonstrateurs technologiques de creusement.

Par ailleurs, l'Andra a signé deux accords de partenariats de recherche avec des organismes de recherches étrangers ; l'un avec SANDIA National Laboratories pour échanger des informations et mener des recherches dans le domaine de la surveillance, des mesures et de la recherche stratégique en géosciences ; l'autre avec le BGS (Grande-Bretagne) pour une coopération scientifique et technique dans le domaine des sciences de la Terre.





2. Déterminer le comportement des éléments constitutifs d'un stockage



La détermination du comportement d'un stockage dans la durée repose, en premier lieu, sur la caractérisation de chacun de ses éléments constitutifs, colis de déchets, infrastructures, milieu naturel hôte. Pour les déchets de graphite, de nombreuses études sont menées sur le comportement chimique des constituants, alors que, pour le projet Cigéo de stockage en milieu géologique profond, les recherches portent sur les trois composantes du stockage.

2 | Déterminer le comportement des éléments constitutifs d'un stockage

La détermination du comportement d'un stockage dans la durée repose, en premier lieu, sur la caractérisation de chacun de ses éléments constitutifs, colis de déchets, infrastructures, milieu naturel hôte.

Ainsi, pour la gestion des déchets de graphite, bien qu'aucune zone de stockage ne soit aujourd'hui définie, de nombreuses études sont menées sur le comportement chimique des constituants de ce type de déchets.

Quant au projet de stockage en milieu géologique profond Cigéo, il représente l'essentiel des recherches phénoménologiques menées sur la période considérée, en raison de la durée de certaines acquisitions et, parfois, de la complexité des méthodologies et techniques à mettre en œuvre pour obtenir des résultats fiables et représentatifs. Les recherches portent sur les trois composantes du stockage : le milieu géologique, les infrastructures souterraines et les colis de déchets.

2.1 La R&D sur les déchets de graphite

Le graphite a été et est encore utilisé comme modérateur et réflecteur de neutrons dans plus d'une centaine de réacteurs nucléaires dans le monde. En France, les déchets de graphite sont principalement issus de l'exploitation entre 1956 et 1994 de la première génération de réacteurs nucléaires dite UNGG (Uranium Naturel Graphite Gaz) et de quelques réacteurs expérimentaux à eau lourde. Tous ces réacteurs sont aujourd'hui à l'arrêt.

Les objectifs et les enjeux de la R&D sur les déchets de graphite sont multiples, il s'agit en particulier de préciser les mécanismes de relâchement des radionucléides en stockage, notamment le chlore 36 (^{36}Cl), le carbone 14 (^{14}C) et le tritium (T).

2.1.1 Le comportement du chlore 36

Les nombreuses expériences de lixiviation du chlore 36 sur des graphites irradiés mettent en évidence une grande variabilité des taux de relâchement avec une cinétique variable alors qu'il ne semble pas y avoir d'effet notable de la chimie de la solution lixivante (eau distillée, eau de chaux, eau de nappe...) ni de la température entre 25 et 40°C.

De l'analyse des essais de lixiviation du chlore, il ressort deux phases de relâchement (figure 1) : une première pendant laquelle le ^{36}Cl est libéré avec une cinétique élevée, indépendamment des conditions de lixiviation (nature de la solution, pH, condition d'exploitation des réacteurs, origine du graphite), puis une seconde pendant laquelle la cinétique est très lente.

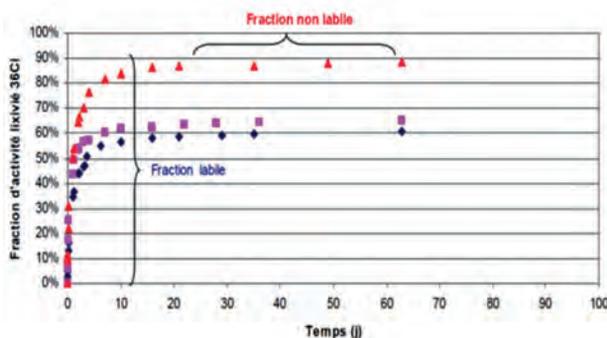


Figure 1 - Fraction d'activité labile en chlore 36 du graphite de G2

Plusieurs processus sont susceptibles de piloter le relâchement du ^{36}Cl :

- la cinétique d'imprégnation de l'eau : même si le graphite présente un caractère hydrophobe, il existe une imprégnation rapide et importante du graphite irradié, selon des essais réalisés ;

- la diffusion du chlore à travers la porosité du graphite : d'après les essais réalisés sur des graphites vierges, il n'existe pas de retard au sein du graphite. Selon de récentes expériences de lixiviation du ^{36}Cl , les valeurs de relâchement sont d'environ $3.10^{-11}\text{m}^2/\text{s}$ pour le modérateur, ce qui correspond à un coefficient de diffusion effectif d'environ $6.10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$;
- l'existence de plusieurs formes chimiques ou de plusieurs localisations du chlore dans le graphite : les essais de lixiviation réalisés sur les graphites de plusieurs réacteurs mettent en évidence une corrélation entre la fraction labile lixiviée et la position de l'échantillon de graphite en réacteur qui peut, elle-même, être corrélée à la température de l'échantillon en réacteur.

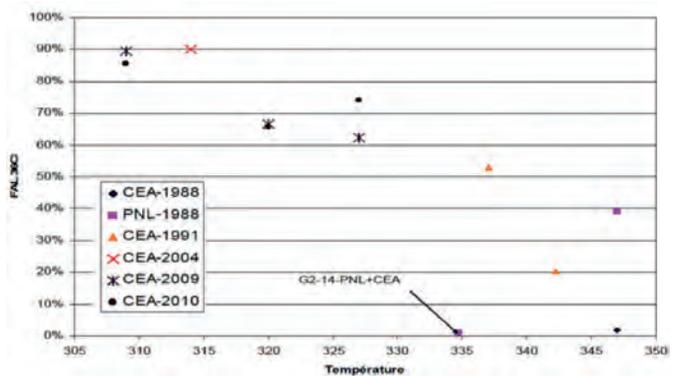


Figure 2 - Fraction d'activité labile en ^{36}Cl d'un graphite en fonction de la température en réacteur

Ainsi, plus l'échantillon provient d'une zone « chaude » du réacteur, plus la fraction labile en ^{36}Cl est élevée, et inversement. Cela pourrait s'expliquer à la fois par la mobilité du chlore en réacteur, le relâchement ayant été plus important dans les zones chaudes, et par l'effet de recuit ayant restructuré le graphite.

L'évaluation de la cinétique de relâchement du ^{36}Cl non labile reposait auparavant sur l'analyse des temps longs des expériences de lixiviation sur bloc de graphite. Pour améliorer l'évaluation du relâchement du ^{36}Cl non labile, des échantillons de graphite préalablement altérés sous eau sur des durées comprises entre un et deux ans ont été broyés puis lixiviés dans plusieurs milieux : en eau pure, en milieu NaOH, en milieu H_2O_2 .

Ces nouveaux essais mettent en évidence de faibles relâchements sous eau et des vitesses de relâchement légèrement plus importantes en milieu NaOH (pH 13) et en milieu H_2O_2 particulièrement les 30 premiers jours. Pour des graphites provenant d'autres réacteurs, toutes les vitesses mesurées sont inférieures à la limite de détection.

2.1.2 Le comportement du carbone 14 et du tritium

Les relâchements du carbone 14 lors d'essais de lixiviation de plusieurs graphites sont très faibles, souvent du niveau, voire au-dessous de la limite de quantification. D'une manière générale, les fractions de ^{14}C relâchées en solution sont comprises entre 5.10^{-5}an^{-1} et 5.10^{-3}an^{-1} avec des vitesses au long terme de l'ordre de 10^{-4}an^{-1} . Le fait de broyer les échantillons en poudre, et donc d'augmenter fortement les surfaces accessibles, ne semble pas modifier le relâchement du ^{14}C en solution.

Avec les résultats disponibles, il n'est pas possible de mettre en évidence de corrélation entre les relâchements en ^{14}C et la position en réacteur ou la nature du graphite. De même, la nature de la solution lixivante ne semble avoir qu'un faible effet sur les relâchements à l'exception des milieux alcalins pour lesquels les relâchements semblent augmentés et ce, uniquement pour les poudres (effet transitoire ?).

Le tritium : les premiers résultats de lixiviation sur échantillons donnent des fractions relâchées de 0,302 et 0,241 % respectivement à 21 et 95 jours pour deux échantillons. Les vitesses de relâchement en phase gazeuse sont très faibles avec une stabilisation à partir de 60 jours (environ 2.10^{-5} % / jour entre 60 et 132 jours), le relâchement de tritium se faisant majoritairement sous forme HT/TOL¹ (environ 30 fois plus important que le relâchement sous forme HTO). Dans un autre cas, les essais à 60 jours aboutissent à un relâchement majoritairement sous forme HTO, avec une phase stationnaire qui n'est pas encore atteinte. Cette différence de spéciation entre deux types de graphite n'est pas expliquée à ce jour. Néanmoins, quel que soit le graphite, le taux de relâchement du tritium reste très limité.

2.2 Les propriétés de rétention des argilites du Callovo-Oxfordien

Le Callovo-Oxfordien est étudié depuis 1994 pour en déterminer les propriétés (thermique, chimique, hydraulique et mécanique). En ce qui concerne la sûreté du stockage, les capacités de confinement et de rétention ont démontré que la formation argileuse est apte à accueillir un stockage. Si certaines études utilisant des méthodes nouvelles ou complémentaires ont été poursuivies pour confirmer les résultats déjà acquis, les recherches ont surtout été orientées vers la compréhension de ces résultats.

2.2.1 Les valeurs de perméabilité sont confirmées

De nombreuses valeurs de perméabilité du Callovo-Oxfordien ont été obtenues avec des tests dans les forages réalisés sur le secteur dès 1994. Les résultats étaient déduits de l'interprétation de variations de pression sur des périodes de quelques heures à plusieurs années. La conductivité hydraulique ainsi calculée est très faible, comprise entre 10^{-14} et 10^{-12} m/s.

Avec la création du Laboratoire souterrain, il a été possible de mettre en place des tests *in situ* de pompage par circulation de gaz et d'eau à deux profondeurs différentes dans la formation argileuse. Les valeurs enregistrées sur ces essais de longue durée (1 600 jours) ont été comparées à des calculs d'écoulement transitoires obtenus par simulations avec Porflow®.

À partir de 2005, deux forages du Laboratoire souterrain, dédiés à l'étude de la géochimie de l'eau porale, ont fourni l'occasion d'utiliser aussi des mesures de débits pour déterminer la perméabilité de la roche. L'originalité de ces mesures réside dans la gamme de débits mesurés entre 0,5 et 50 ml/jour et sur la durée des suivis de plusieurs années (Vinsot *et al.* 2011).

Les valeurs de perméabilité obtenues à partir de ces mesures sont voisines de 10^{-13} m/s et sont en accord avec celles obtenues avec les autres méthodes.

De plus, les conditions de ces tests ont permis de confirmer l'applicabilité de la loi de Darcy dans le Callovo-Oxfordien pour des gradients hydrauliques compris entre 120 et 1 500 m/m.

2.2.2 Vers une compréhension intime du transfert des radionucléides aux différentes échelles

La démonstration de la sûreté à long terme du projet de stockage Cigéo dépend en grande partie de la capacité des argilites du Callovo-Oxfordien à fixer la majorité des radionucléides tels que les actinides et à limiter la diffusion vers la biosphère des radionucléides non retenus tels que les anions ³⁶Cl et ¹²⁹I. Il s'agit donc d'établir les relations qui existent entre microstructure, minéralogie et propriétés de transfert des solutés.

Afin d'approfondir la compréhension des mécanismes responsables des propriétés de rétention des roches argileuses, l'Andra a initié la création du groupement de laboratoires « Transfert des radionucléides ». Elle a également participé au projet FunMig de la Communauté Européenne sur la période 2005-2008 (voir bilan précédent « 2006-2009 – 4 ans de recherches scientifiques à l'Andra pour les projets de stockage »). Les résultats de ce projet se sont traduits par une amélioration de la capacité à modéliser, à l'échelle moléculaire, la diffusion des radionucléides les plus mobiles (anions, cations alcalins et alcalino-terreux) et leurs interactions avec les surfaces des particules d'argile présentes dans la roche. À une échelle supérieure, les études menées sur la complexité de l'espace poral et de l'agencement minéralogique de la roche ont permis de comprendre comment ces caractéristiques influent sur les propriétés de diffusion (coefficient de diffusion effectif, tortuosité, anisotropie) des radionucléides anioniques (³⁶Cl, ¹²⁹I). Le passage des connaissances acquises de la petite échelle à l'échelle de la formation géologique montre qu'il n'est pas nécessaire de tenir compte, de manière fine, de la variabilité naturelle de la composition minéralogique du Callovo-Oxfordien (observée et expliquée par le modèle géologique) lors des modélisations prédictives de transfert de radionucléides.

Sur ces acquis, deux projets complémentaires, « Simisol » (projet ANR de 2010 à 2012) et « Catclay » (projet européen sur la période 2010-2014) ont été développés à plus petites échelles (schéma, figure 3) afin de mieux comprendre le comportement diffusif de cations fortement interagissant (Sr²⁺, Zn²⁺ et Eu³⁺) dans les matériaux argileux compactés.

La méthodologie de caractérisation de ces matériaux a été développée en utilisant l'illite du Puy compactée, considérée comme analogue de la matrice argileuse et microporeuse de l'argilite du Callovo-Oxfordien. Il s'agissait, à ce stade, de mettre au point une technique sur un corps simple (un seul constituant argileux) plutôt que d'engager les recherches sur l'argilite polyphasée.

Les études menées concernent trois principaux aspects : ① la diffusion des trois cations cités dans l'illite compactée, ② leur rétention par sorption en système dispersé et ③ la caractérisation texturale haute résolution de l'illite du Puy compactée. Le défi pour décrire ces systèmes tient aux nombreuses échelles de temps et d'espace auxquelles interviennent des phénomènes physiques couplés. Les interactions électrostatiques à longue portée sont responsables de la distribution des différentes espèces en fonction de leur charge, tandis que les interactions à l'échelle moléculaire conduisent à des effets spécifiques, dépendant de leur nature chimique.

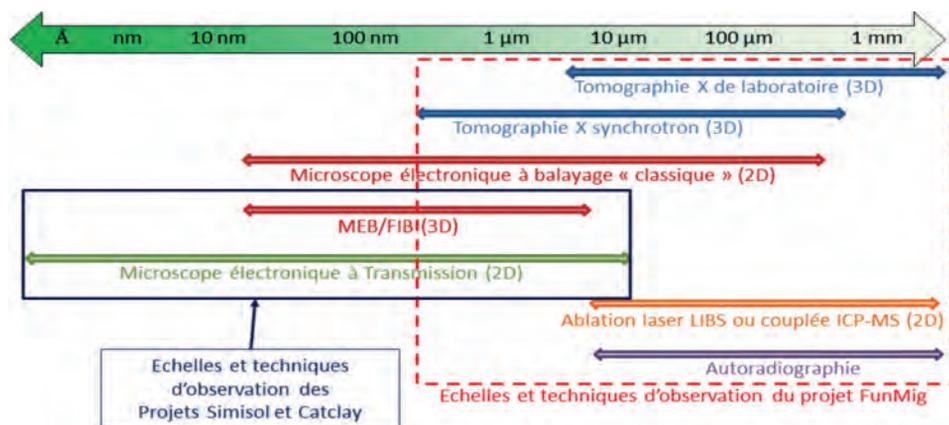


Figure 3 - Echelles et techniques d'imagerie scientifique dans les projets Simisol (ANR 2010-2012), Catclay (Europe, 2010-2014) et FunMig (Europe, 2005-2008)

¹ TOL = tritium organiquement lié.

2 | Déterminer le comportement des éléments constitutifs d'un stockage

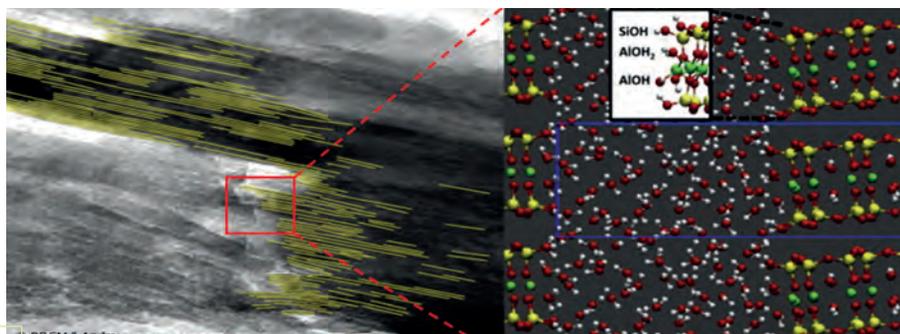


Figure 4 - Résultats illustrant le projet Simisol. À gauche, image MET haute résolution d'une particule d'illite du Puy pour un champ de vue de 180x180 nm² avec identification des feuillets TOT (en jaune) – À droite, résultats d'une simulation de dynamique moléculaire à l'échelle d'une bordure de particule argileuse (d'après Tazi et al. 2012)

Le projet Simisol a visé une description conceptuelle (mathématique et numérique) multi-échelle de la sorption et du transport des cations (Sr^{2+} , Zn^{2+} et Eu^{3+}) dans les minéraux argileux chargés, en tenant compte de la spécificité chimique de leur interaction avec l'argile (figure 4). La texture de l'illite du Puy compacte a notamment pu être imagée pour des échelles allant de la dizaine de μm jusqu'à quelques angströms. A partir de ces images, il a été possible de déterminer l'organisation spatiale des particules d'illites en relation avec la distribution des pores et la morphologie et la géométrie des particules argileuses ainsi que leurs surfaces.

L'approche générale de modélisation retenue a été le changement d'échelle par *coarse-graining* (dans laquelle chaque niveau de description est calibré sur un niveau plus fondamental). Les résultats principaux (Tazi et al. 2012a, b et Levesque et al. 2012) incluent **1** le développement d'une description réaliste des ions au voisinage d'une surface d'argile aux échelles atomiques et mésoscopiques ; **2** l'évaluation de l'acidité de différents sites de surface de l'argile, qui ne peut pas être mesurée directement ; **3** la construction d'un modèle microscopique des interactions entre les ions, l'eau et l'argile ; et **4** la création d'outils pour simuler la structure et le transport aux échelles mésoscopiques, peu étudiées mais essentielles pour passer de l'échelle moléculaire à celle du matériau.

Le projet Catclay est toujours en cours et met en œuvre des approches expérimentales sur l'acquisition de données à haute résolution spatiale sur la migration des mêmes cations (Sr^{2+} , Zn^{2+} et Eu^{3+}) dans l'illite compactée sous des conditions chimiques différentes et ayant pour but de développer et qualifier des modèles couplant sorption et diffu-

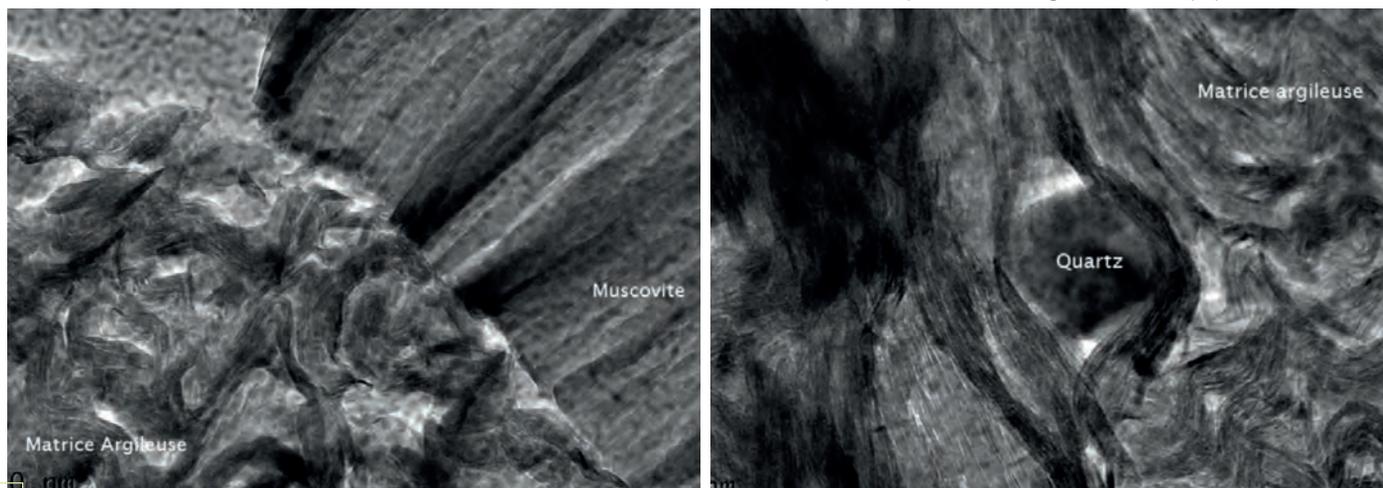


Figure 5 - Argillites du Callovo-Oxfordien – Images MET des contacts entre différentes phases minérales

sion. Ce projet étudie également le transfert de ces mêmes ions dans les argillites du Callovo-Oxfordien et l'argile de Boom (Belgique). Les images à haute résolution obtenues sur des argillites permettent notamment de préciser les interfaces entre les différentes phases argileuses (figure 5).

En complément aux projets précédents, les relations entre propriétés de transfert des solutés et minéralogie sont également étudiées à différentes échelles dans les argillites du Callovo-Oxfordien.

À l'échelle mésoscopique (μm - mm), les principales phases minérales du Callovo-Oxfordien (matrice argileuse, carbonates, tectosilicates et minéraux lourds) ont été cartographiées en 2D et 3D à partir des techniques de Microscopie Électronique à Balayage et micro-tomographie de rayons X sur synchrotron. Les mesures statistiques d'orientation et d'élongation des grains de carbonates et de tectosilicates ont mis en évidence une anisotropie planaire de la mésostructure des argillites en accord avec son histoire géologique. A partir des volumes 3D de minéraux, des simulations de diffusion ont permis de modéliser les propriétés de diffusion (facteur géométrique, tortuosité, anisotropie...) liées à l'échelle mésoscopique (figure 6). Les résultats issus des simulations numériques montrent que l'échelle mésoscopique explique en partie les observations macroscopiques expérimentales telles que l'anisotropie de diffusion (Robinet et al. 2012).

À l'échelle macroscopique, les relations entre propriétés de transfert des solutés et minéralogie ont été étudiées expérimentalement à partir d'essais de diffusion de HTO, Cl et Cs sur des échantillons d'argillites de minéralogie contrastée (échantillons de la partie supérieure du Callovo-Oxfordien) couplés à des analyses microstructurales. L'ensemble des résultats met en évidence un maintien des propriétés de diffusion, notamment l'exclusion anionique jusqu'à des niveaux d'argilosité très faibles. Ce comportement s'explique par le rôle prédominant de la matrice argileuse sur les propriétés de transferts (Jacquier et al., soumis).

2.2.3 La diffusion des radionucléides en conditions partiellement saturées en eau

Un moyen de vérifier le modèle de diffusion des ions dans les argillites est d'étudier le phénomène en conditions partiellement saturées en eau, pour lesquelles la distribution spatiale des anions et des cations au sein de la porosité peut être distinguée macroscopiquement.

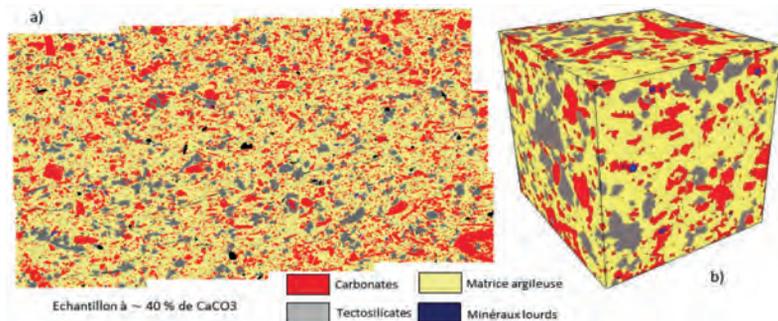


Figure 6 - Distribution spatiale des phases minérales dans le Callovo-Oxfordien
 a) à gauche, en 2D - Image MEB en mode BSE ($0,3 \mu\text{m} / \text{pixel}$) ;
 b) à droite, en 3D - micro-tomographie X sur synchrotron ($0,7 \mu\text{m} / \text{voxel}$)

Des expériences de diffusion ont donc été réalisées sur des échantillons d'argilite du Callovo-Oxfordien dans ces conditions en mettant en œuvre un procédé original de succion par osmose, l'échantillon étant séparé de la solution (forte concentration en macromolécules) par une membrane PEG microporeuse. L'effet de la saturation a été mis en évidence sur la diffusion, non seulement des anions (Savoye *et al.* 2010), mais aussi d'un cation fortement sorbé tel que le césium (Savoye *et al.* 2012).

Ces traceurs présentent une loi de comportement avec un indice de saturation (en-deçà duquel aucune diffusion n'est *a priori* possible) de 64 % pour le traceur de l'eau (HTO) et 77 % pour un anion (Iode). Des expériences de diffusion traversante ont ensuite été menées avec un cation fortement hydraté, présentant une interaction essentiellement électrostatique (faible K_d). Ces expériences ont été réalisées avec HTO (pour vérifier l'analogie de comportement avec les mesures précédentes) et $^{22}\text{Na}^+$. Il en résulte que le sodium a un comportement intermédiaire entre celui de HTO et celui du césium, ce qui ne permet pas d'expliquer l'écart de comportement entre traceur de l'eau et traceurs cationiques. On observe cependant une diminution de l'ampleur de la sorption d'un facteur 2, le coefficient de distribution passant de $0,56 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ à $0,27 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ entre l'échantillon saturé à 100 % et celui à 81 % de saturation. Ce résultat contribue à expliquer des interactions eau-ions-surfaces qui déterminent le comportement spécifique des propriétés de transport dans les argiles.

2.3 Le comportement mécanique des argilites du Callovo-Oxfordien

Comprendre et quantifier la réponse mécanique des argilites au creusement est un des enjeux des études menées sur le stockage en milieu géologique profond pour deux raisons étroitement interconnectées, l'ingénierie du creusement (quel soutènement prévoir ?) et la sûreté (dans quelle mesure la fissuration de l'argilite facilite-t-elle les circulations de fluides ?). Cette question est abordée de façon complémentaire ① par des expérimentations en Laboratoire souterrain et ② par l'étude aux très petites échelles (du nanomètre au millimètre) des mécanismes et phénomènes susceptibles d'expliquer le comportement hydromécanique des argilites.

2.3.1 Caractérisation de la zone fracturée induite par le creusement des ouvrages du Laboratoire souterrain

Le suivi géologique des fronts de creusement dès le début de la création des galeries et l'analyse systématique de la fracturation dans les carottes de forages sont à l'origine d'un très grand nombre de données sur l'orientation des plans de fracturation induite par le creusement des ouvrages (figure 7a). Il a ainsi été possible de reconstituer la géométrie en trois dimensions des plans des différentes fractures (figure 7b).

L'endommagement localisé² de la roche est caractérisé par l'apparition de fractures en cisaillement dès le front de taille, et de fractures en extension après le passage du front. Le réseau ainsi formé a une forme ellipsoïdale et peut être décrit de la manière suivante depuis la paroi :

- une zone de fractures plus ou moins bien connectées entre elles et avec la galerie où coexistent plusieurs familles de cassures, en cisaillement et en extension, mais aussi des fractures mixtes ; ces fractures dont l'ouverture géométrique est très variée, jusqu'à atteindre plusieurs millimètres, induisent des « perméabilités équivalentes locales » calculées à partir des tests hydrauliques à l'eau, qui varient entre 10^{-5} m/s et 10^{-10} m/s (ces valeurs sont représentatives de la transmissivité des cassures interceptées par le test et de leur état de saturation au moment du test) ;
- une zone avec une fissuration « discrète » qui s'étend au-delà de la zone fracturée connectée et où ne subsistent que les extrémités de certaines des fractures en cisaillement ; celles-ci ne sont pas physiquement connectées entre elles et présentent des ouvertures infra-millimétriques ; cette zone perturbée, égale au rayon de la galerie au-delà de l'EDZ (Excavation Damaged Zone, ou zone endommagée par l'excavation) a une perméabilité supérieure ou égale à 10^{-12} m/s qui décroît avec la distance à la paroi.

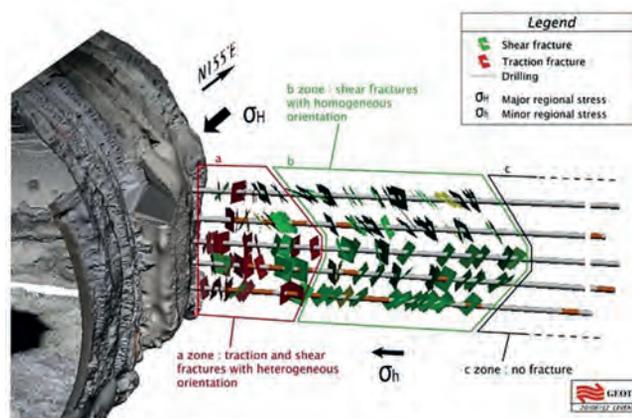


Figure 7a - Caractérisation de la fracturation induite autour des ouvrages orientés suivant la contrainte horizontale majeure

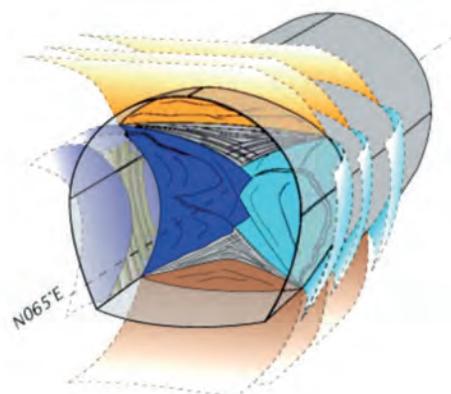


Figure 7b - Reconstitution 3D de la fracturation dans une galerie orientée selon la contrainte horizontale mineure

² On entend par endommagement localisé des argilites, un endommagement se manifestant par des fractures/fissures d'extension *a minima* pluri-décimétrique (jusqu'à pluri-métrique). L'endommagement diffus des argilites correspond à une microfissuration (infra-millimétrique) répartie dans la masse des argilites et de manière globalement homogène.

2 | Déterminer le comportement des éléments constitutifs d'un stockage

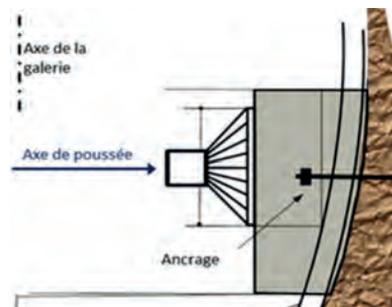


Figure 8 - Expérimentation CDZ - Dispositifs des installations dans la galerie (à gauche) et schéma de principe de l'installation (à droite)

En définissant, par convention, l'EDZ comme une zone ayant une perméabilité strictement supérieure à 10^{-10} m/s, on observe que la zone fracturée connectée est enveloppe pour l'EDZ ; aussi, la zone fracturée connectée est assimilée conventionnellement à l'EDZ.

Depuis 2010, la vision et la compréhension de l'organisation de cette zone fracturée autour des ouvrages orientés suivant la contrainte horizontale majeure ont bien été améliorées, en particulier grâce à l'expérimentation dédiée dénommée « CDZ ». Celle-ci vise à appréhender, dans la conception des scellements qui sont prévus pour la fermeture des galeries et des alvéoles, la réalité de la compression de l'EDZ et, par voie de conséquence, de la cicatrization de la fissuration. *In fine*, il s'agit d'évaluer les conséquences de ce confinement mécanique du massif sur l'évolution de la perméabilité de la zone fracturée.

Dans un deuxième temps, cette expérimentation a pour objectif d'étudier l'effet d'un déconfinement soudain de la paroi qui se produirait lors du retrait du revêtement des galeries et d'évaluer ses conséquences sur la perméabilité du massif.

Le confinement mécanique du noyau de scellement est reproduit à l'aide d'un vérin hydraulique exerçant une compression sur une surface circulaire de 1 m^2 (figure 8).

En phase de resaturation, l'évolution de la zone fracturée a confirmé l'effet d'auto-colmatage *in situ* à l'échelle d'un ouvrage, ce qui signifie une réduction drastique de la transmissivité des fractures. Ce phénomène, lié au gonflement des minéraux argileux, avait déjà été observé à petite échelle sur échantillons.

2.3.2 Les études à petites échelles : le groupement de laboratoires en géomécanique

L'observation aux différentes échelles, du nanomètre au millimètre, du matériau argileux (intact, déformé et après rupture) constitue un élément essentiel de la démarche pour mettre en évidence les mécanismes et les phénomènes de base responsables de la réponse des argilites à une sollicitation, telle que le dé-confinement dû au creusement, et pour en quantifier les effets.

Dans le cadre du groupement de laboratoires géomécaniques, d'importants moyens ont été mis en œuvre pour étudier le comportement des

argilites sous sollicitations hydriques - mécaniques combinées, par mesures multi-échelles. Deux systèmes indépendants ont été développés : ① le système optique macro et micro qui permet de réaliser un essai sous sollicitation hydrique-mécanique combinée avec mesure multi-échelle (de μm à cm), et ② le système installé dans la chambre du microscope électronique à balayage (figure 9) qui permet de réaliser un essai mécanique de chargement uni-axial avec contrôle de la teneur en eau de l'échantillon par refroidissement de celui-ci et contrôle de la pression de vapeur d'eau dans la chambre.

La mesure multi-échelle basée sur la méthode de corrélation d'images numériques (DIC : *Digital Image Correlation*) a été utilisée pour mesurer des déformations faibles avant la rupture. Le principe de la DIC est de comparer des images de la surface d'une éprouvette à différents états (mécanique, hydrique,...) et de calculer la déformation de l'échantillon par l'utilisation d'algorithmes de corrélation. En pratique, les mesures de champs sont réalisées à deux échelles différentes (macro/micro DIC).

Du fait du développement des moyens d'analyse optique, d'acquisition et de traitement des données, cette méthode est très efficace pour étudier le comportement micromécanique des matériaux. Avec les premiers résultats obtenus (Valès, 2008) grâce à l'utilisation de caméras à haut pouvoir de résolution et à l'amélioration des algorithmes de traitement d'images, il est possible de considérer la méthode comme complètement opérationnelle.

Plus récemment, des démarches supplémentaires ont été proposées pour améliorer la résolution de la mesure et corriger des erreurs géométriques induites par la variation de grandissement.

Les essais de validation ont confirmé que le système mis au point permet d'obtenir une résolution en déformation par mesure Macro DIC meilleure que 10^{-5} en global ($24 \times 36 \text{ mm}^2$) et 10^{-4} en local ($1,78 \times 1,78 \text{ mm}^2$), et par mesure Micro DIC meilleure que 5×10^{-5} en global ($1,5 \times 1,5 \text{ mm}^2$) et 5×10^{-4} en local ($0,155 \times 0,155 \text{ mm}^2$). D'autres améliorations importantes ont été également apportées au système d'observation microscopique (Micro DIC) :

- automatisation de la mise au point de la caméra à l'aide de platines (X, Y, Z) motorisées, eu égard à la faible profondeur de champ, et aux déplacements de la surface observée liés aux déformations de l'échantillon ;

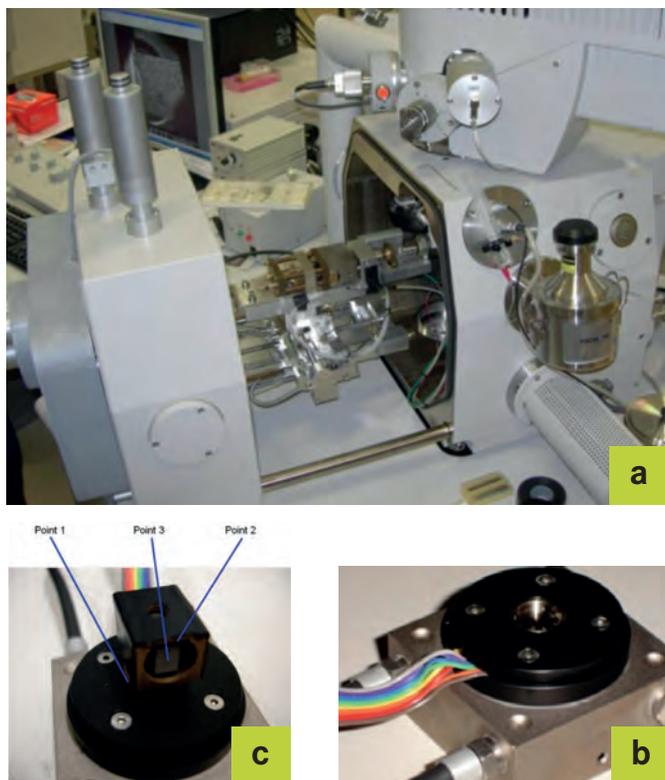


Figure 9 - Vue de la chambre de MEB **a** de la platine Peltier **b** de la platine Peltier avec la boîte spécifique **c** et photo du système de la machine d'essai T-H-M in situ **d**

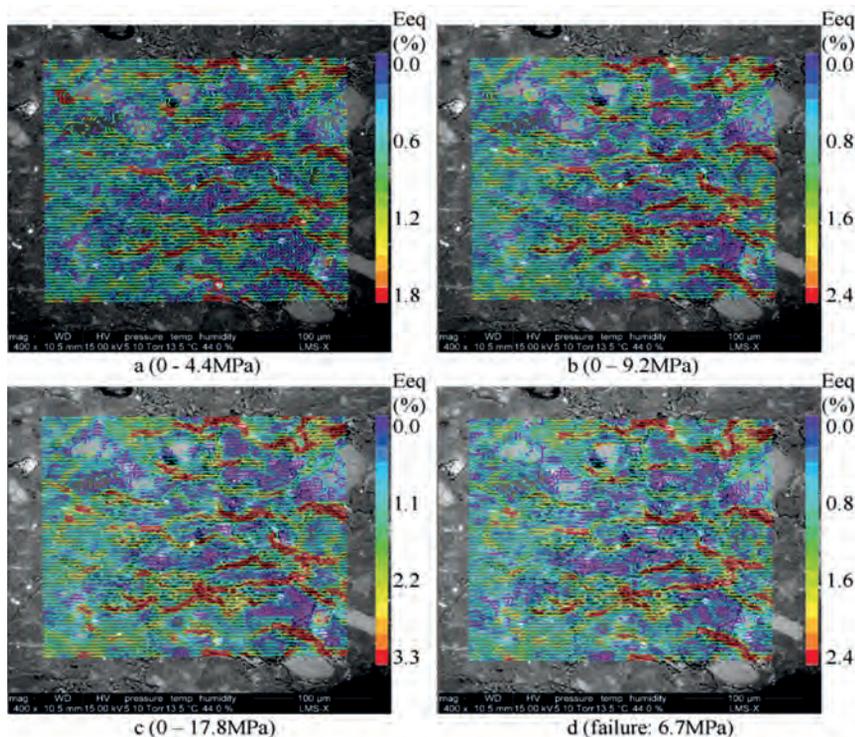


Figure 10 - Cartographie de la déformation équivalente d'une zone d'observation

- élargissement du champ d'observation : par un nouveau système de contrôle du déplacement de la caméra selon un quadrillage permettant d'obtenir une série d'images qui, juxtaposées, recouvrent la quasi-totalité de l'échantillon.

Ces méthodes ont été utilisées dans l'étude de l'impact de la désaturation sur les argilites et ont permis de voir les déformations (figure 10) et l'évolution des fissures en phase de désaturation et de resaturation.

2.4 Le comportement des ouvrages souterrains de structure

Les matériaux cimentaires sont employés de longue date en génie civil. Progressivement, les applications ont nécessité le développement de matériaux de plus en plus spécifiques possédant des propriétés de plus en plus élevées en termes de comportement mécanique et chimique. La création d'ouvrages de stockage qui sortent du cadre du génie civil classique car requérant une durabilité dépassant les quelques dizaines d'années et induisant des interactions avec des matériaux divers (colis en acier, argilites...), a conduit l'Andra à développer des recherches selon trois axes principaux sur ces matériaux : **1** leur comportement chimique au contact des argilites, **2** leur évolution physique sur des durées pluriséculaires, et **3** leurs propriétés de transfert. Cette thématique de l'évolution des structures cimentaires a été orientée, en 2012, sur des essais de longue durée.

2 | Déterminer le comportement des éléments constitutifs d'un stockage

2.4.1 Les réactions chimiques des matériaux cimentaires au contact des argiles

Deux types d'essai ont été menés pour évaluer la réaction des matériaux cimentaires au contact d'argiles. D'une part, des pâtes de ciment CEM I et ciment bas pH ont été placées dans trois conditions aqueuses : eau à l'équilibre avec de la calcite (dite « eau de calcite », dans la suite du texte) à deux températures (25 et 50°C) et une eau du Callovo-Oxfordien reconstituée (dite « eau de site ») car le chimisme de l'eau porale des argilites a été restitué.

Dans le second type d'essai, les matériaux cimentaires (ciment CEM I et liant bas pH) ont été mis en contact direct avec de l'argilite à des températures de 20 et 50°C, l'ensemble étant saturé avec une eau de composition chimique type « eau de site ».

Les ciments en conditions aqueuses

Dans le cas des pâtes de ciment CEM I en eau de calcite, plusieurs mécanismes chimiques simultanés se combinent : décalcification, dissolution de l'ettringite (sur une moindre épaisseur que la décalcification) et précipitation de calcite en surface. Le même phénomène se produit dans le cas de l'eau de site, à l'exception de la néoformation d'ettringite dans la zone dégradée liée à une pénétration de sulfates externes.

La croûte de calcite qui se forme en surface ralentit significativement les échanges entre le matériau et la solution. L'augmentation de température semble induire essentiellement une accentuation de l'épaisseur dégradée ; l'effet d'inhibition de la dégradation au cours du temps n'est pas avéré à 50°C sur la durée des essais menés.

Quant aux liants bas pH en eau de calcite et en eau de site, ils subissent une forte décalcification et carbonatation dans les deux cas. Avec de l'eau de site, ils sont, de plus, affectés par une dégradation d'origine magnésienne. Ces mécanismes conduisent à la formation d'un réseau capillaire connecté et à la destruction de sa couche de surface. Aucun effet marqué de la température ne peut être déduit de l'altération des liants bas pH en eau de calcite à 50°C.

La comparaison des réactions de pâtes de ciment CEM I et de liants bas pH, plongés en eau de calcite et en eau de site, montre clairement que ces derniers se dégradent plus rapidement que les pâtes de ciment CEM I. Par ailleurs, la précipitation, en surface, d'une fine couche de calcite « colmatante » dans le cas des pâtes de ciment CEM I n'est pas mise en évidence pour les liants bas pH, où la précipitation de carbonates de calcium s'effectue dans la profondeur de la zone dégradée. Ce phénomène suggère que les mécanismes associés aux carbonates sont probablement à l'origine de la différence de comportement des deux types de ciment.

Les ciments en contact avec l'argilite

Les essais impliquant le contact direct argiles/bétons ont pour objectif de caractériser les transformations minéralogiques et les évolutions

microstructurales de part et d'autre de l'interface matériau cimentaire/matériau argileux. Un dispositif expérimental a été spécifiquement conçu pour la réalisation de ces essais, en préservant la cohésion du matériau argileux saturé.

L'interface ciment CEM I/argilite présente une évolution marquée (figure 11), identique à 20°C et 50°C avec :

- décalcification du matériau cimentaire, c'est-à-dire dissolution de la portlandite et décalcification des C-S-H (Calcium Silicate Hydrate) et lixiviation du calcium de la solution porale ;
- précipitation d'ettringite dans le matériau cimentaire, contrôlée par la diffusion des ions sulfates et limitée par la concentration en aluminium dans la pâte de ciment ;
- carbonatation du matériau cimentaire peu intense pilotée par la diffusion des ions carbonates, provoquant la précipitation de calcite ;
- illitisation des interstratifiés I/S, contrôlée par la diffusion du KOH, générant un relargage de silicium à l'interface.

Ces mécanismes créent l'ouverture d'un réseau poreux connecté, mis en évidence par la micro-tomographie X. La perturbation semble progresser linéairement avec le temps pour atteindre une épaisseur de 800 µm après 1 an à 20°C et d'environ 1 mm sur la même période à 50°C.

L'interface ciment bas-pH/argilite présente des modifications (schéma, figure 12) proches à 20°C et 50°C, contrôlées par une :

- décalcification du matériau cimentaire, avec lessivage du calcium vers l'argilite ;
- stabilité de l'ettringite à 20°C et sa dissolution à 50°C ;
- absence de carbonatation du matériau cimentaire ;
- substitution du calcium par du magnésium dans les C-S-H, contrôlée par la diffusion du magnésium depuis l'argilite qui provoque la précipitation d'un gel M-S-H (Magnesium Silicate Hydrate) des deux côtés de l'interface ;
- absence d'illitisation de l'argilite, due à la faible concentration en KOH (hydroxyde de potassium) dans la solution porale.

2.4.2 Le comportement mécanique des bétons de structures

Dans le cadre du projet de stockage profond, les ouvrages de soutènement en béton, souvent de grande dimension, devront assurer une durabilité de plusieurs dizaines d'années, voire de plus d'un siècle pour les premiers qui seront construits. De plus, certains ouvrages bétonnés seront soumis à des élévations de température en raison de leur proximité avec des déchets exothermiques.

Par ailleurs, la durabilité des propriétés physiques et la tenue de structures peuvent être modifiées par les évolutions du couplage entre les déformations différées et l'endommagement. Ce point n'avait jamais été abordé sous l'angle d'une description à toutes les étapes de la vie d'un ouvrage en béton (de la mise en place jusqu'à plusieurs centaines d'années).

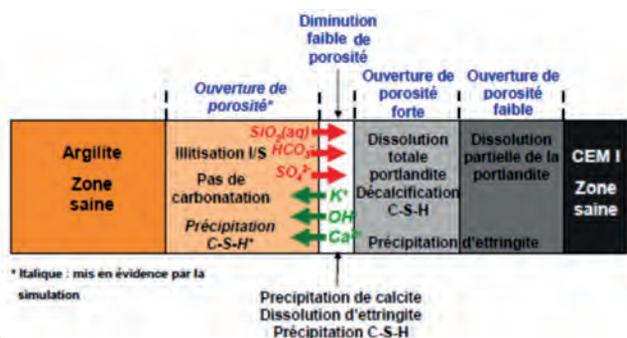


Figure 11 - Évolution minéralogique à l'interface CEM I/argilite

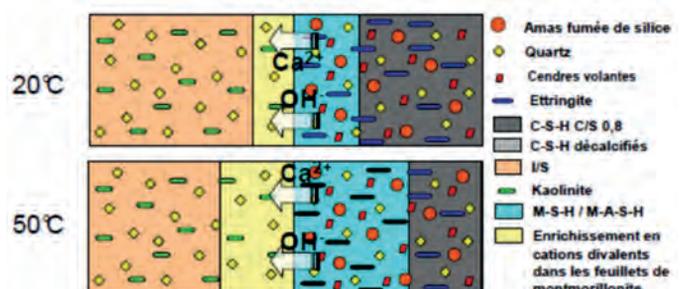


Figure 12 - Évolution minéralogique à l'interface ciment bas pH/argilite

Le fluage étant un processus lent et difficile à mesurer, la première étape a consisté à en étudier la phénoménologie et les conséquences dans différents cas de chargement et de température. Le fluage de plusieurs types de bétons à hautes performances (BHP), dont certains étaient fibrés, a été mesuré sur plusieurs mois à des températures de 20°C et 50°C, en milieu saturé et non saturé (Ladaoui *et al.* 2010 ; Ladaoui *et al.* 2011).

Les résultats montrent une influence de la composition du béton (type de ciment utilisé), de la présence des fibres et du mode de conservation (en particulier sur la présence d'eau), sur le fluage ainsi que son amplification avec l'augmentation de la température (figure 13).

Ces campagnes expérimentales ont alimenté un modèle de comportement physique développé en parallèle prenant en compte les hétérogénéités dans les matériaux et leur fissuration (ouverture et fermeture de fissure en fonction du chargement – importance et orientation).

Cette modélisation a permis, notamment, de quantifier l'énergie d'activation du fluage et de proposer des explications aux divers phénomènes sous-jacents mis en évidence lors des essais, en particulier le couplage entre le fluage et le retrait aux diverses températures ainsi que l'endommagement qui en résulte.

En appui avec les essais issus du Projet National CEOS.fr (www.ceosfr.org) dont l'Andra est partenaire, ce modèle a été validé sur des structures d'échelles pluri-métriques autorisant aujourd'hui la simulation du comportement mécanique d'un ouvrage, intégrant les déformations différées et l'évolution de la fissuration associée (Sellier *et al.* 2012 a et b).

Les données d'entrée acquises permettent aujourd'hui de rendre compte du comportement THM des matériaux cimentaires, notamment des bétons bas pH, afin de préciser l'évolution des zones de scellement.

2.4.3 Les propriétés de diffusion des matériaux cimentaires non saturés

Parmi les paramètres associés à la durabilité des matériaux cimentaires, les propriétés de transfert, perméabilité et diffusion, de ces matériaux doivent être connues car elles en pilotent et contrôlent l'évolution hydrique et l'accessibilité aux agents agressifs. Ces propriétés sont intimement liées à la microstructure des matériaux cimentaires qui dépend à la fois des caractéristiques du matériau lui-même mais aussi de son vécu et des conditions d'environnement.

En conditions de fonctionnement, que ce soit pour les stockages de surface, pour les entrepôts associés au stockage en formation géologique ou les structures de stockage profond lors des phases d'exploitation et

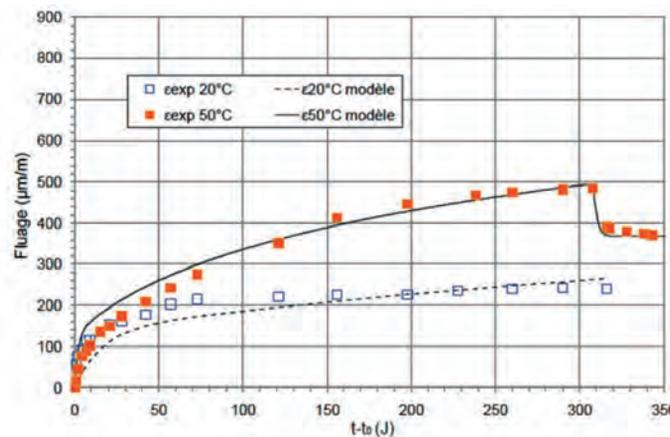


Figure 13 - Fluage propre d'un béton (CEM V) à 20°C et 50°C – Résultats expérimentaux et modélisation

de post-fermeture, le matériau cimentaire n'est que très rarement dans un état de saturation complète. Or, il existe un manque de données expérimentales sur la diffusion aqueuse en milieu insaturé.

Il s'agissait donc de se donner les moyens de quantifier l'évolution des propriétés de transferts, en particulier la diffusion. Devant l'impossibilité d'utiliser les techniques expérimentales conventionnelles, une méthode de mesure de la diffusion d'espèces aqueuses en milieux non saturés a été développée.

Sur la base d'essais comparatifs entre des techniques validées/éprouvées et les développements techniques et théoriques basés sur la spectroscopie d'impédance, un protocole de mesure a été validé sur des céramiques (Mercado *et al.* 2010 ; Mercado *et al.* 2011 et 2012) (figure 14).

Ce protocole a été transposé tout d'abord en milieu saturé sur des bétons avant de fournir une évolution du coefficient de diffusion en phase aqueuse sur un domaine de variation de saturation très étendu.

Il est ainsi possible aujourd'hui, de proposer une mesure directe du coefficient de diffusion en phase aqueuse pour des bétons saturés ou non (Mercado *et al.* 2011 ; Mercado *et al.* 2013).

L'analyse du facteur de forme des différents matériaux testés, première phase de l'étude, a mis en lumière, d'un côté, la pertinence du protocole expérimental employé car produisant des résultats précis avec des degrés de dispersion satisfaisants et, d'un autre côté, la possibilité effective d'évaluer les propriétés électriques du matériau grâce à l'approche d'analyse des mesures.

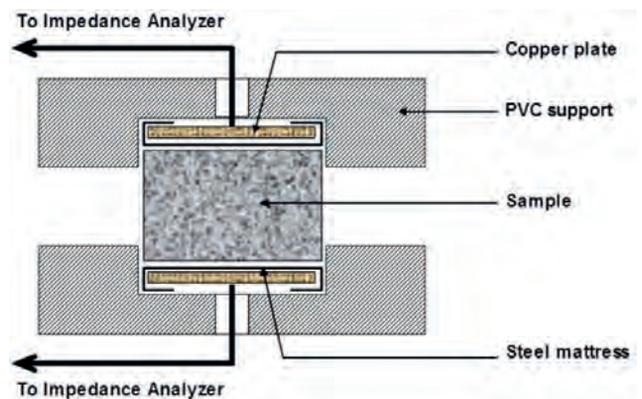


Figure 14 - Schéma de la cellule mise au point pour les mesures d'impédance

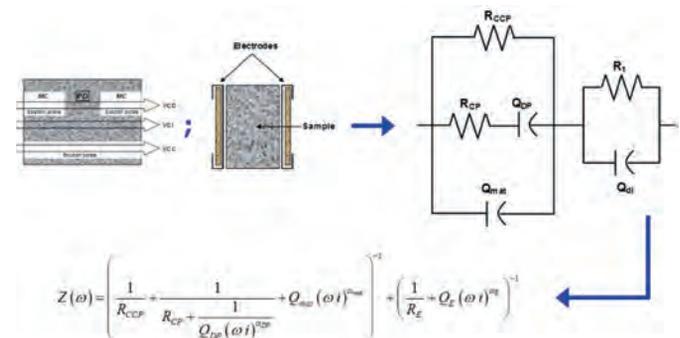


Figure 15 - Schéma théorique d'exploitation des mesures

2 | Déterminer le comportement des éléments constitutifs d'un stockage

L'évolution du facteur de forme en fonction de l'état hydrique des matériaux (figure 16) a permis de mettre en évidence la modification effective des voies préférentielles de transfert par diffusion occasionnée par la modification de saturation du réseau poreux. En d'autres termes, le facteur de forme – paramètre à caractère géométrique – est influencé aussi par le degré de saturation du matériau.

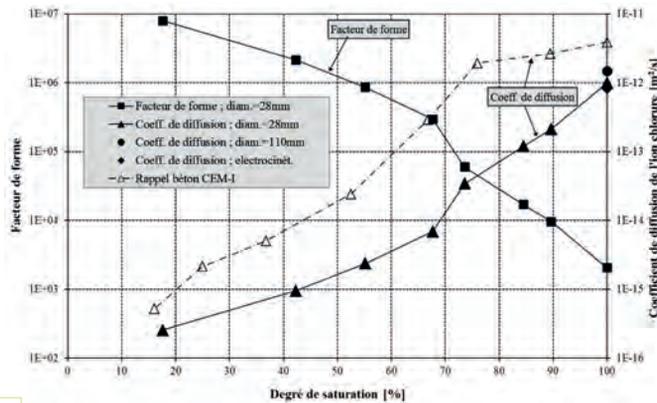


Figure 16 - Evolution du facteur de forme et du coefficient de diffusion avec le degré de saturation du béton de référence CEM V

2.5 Le comportement des colis en situation de stockage profond

L'ensemble des travaux menés sur le comportement des colis de déchets en situation de stockage se fait en collaboration avec les producteurs de déchets. Ils concernent l'évolution de la matrice des colis eux-mêmes, en particulier le verre³ dans lequel sont incorporés les radionucléides de haute activité, ainsi que les différentes interactions que ces colis auront à long terme avec les autres composants du stockage (matériaux, milieu argileux, etc.).

2.5.1 Altération du verre nucléaire SON68 par la vapeur d'eau

L'altération du verre par la vapeur d'eau pourra se produire en stockage, de manière transitoire, après rupture du sur-conteneur et du conteneur, tant que la production d'hydrogène liée à la corrosion des matériaux métalliques sera suffisante pour empêcher une resaturation totale de l'alvéole, c'est à dire de l'ordre du millier d'années après fermeture du stockage.

En première approximation, l'altération du verre par la vapeur d'eau se traduit par une lixiviation de ce matériau avec un rapport S/V (solide/vapeur) extrêmement élevé, la présence d'une couche d'eau de très faible épaisseur et l'absence d'échange avec le milieu extérieur entraîneraient une augmentation des concentrations au sein de cette couche d'eau, conduisant ainsi à une augmentation du pH et à la précipitation de nombreuses phases minérales secondaires (figure 17) : smectites, zéolithes (analcime), CSH (tobermorite, gyrolite), calcite, powellite... On note également la présence d'une couche amorphe riche en silice et en aluminium.

D'après les premiers résultats, ces précipités ainsi que les pH basiques entraînent une augmentation des vitesses d'altération du verre, et ce d'autant plus que la température et l'humidité relatives sont élevées (figure 18). L'énergie d'activation est de l'ordre de 43 à 47 kJ/mol, du même ordre que celle mesurée en vitesse résiduelle en eau pure, et reste applicable de 90 à 200 °C. La lixiviation d'un verre préalablement hydraté par la vapeur d'eau engendre un relâchement plus important que celui mesuré pour un même verre qui n'aurait pas subi une hydratation préalable.

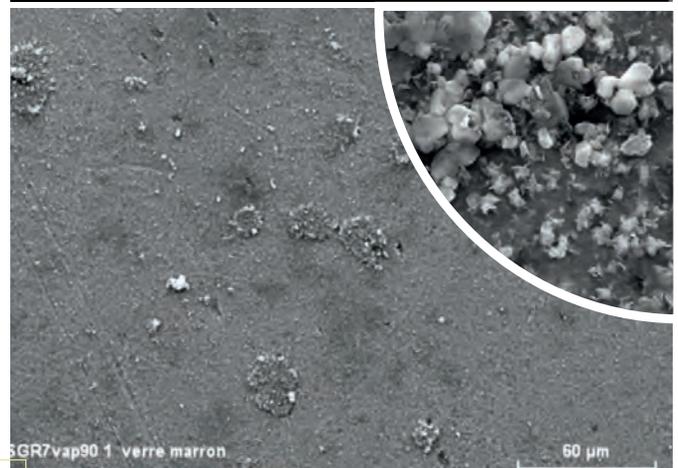
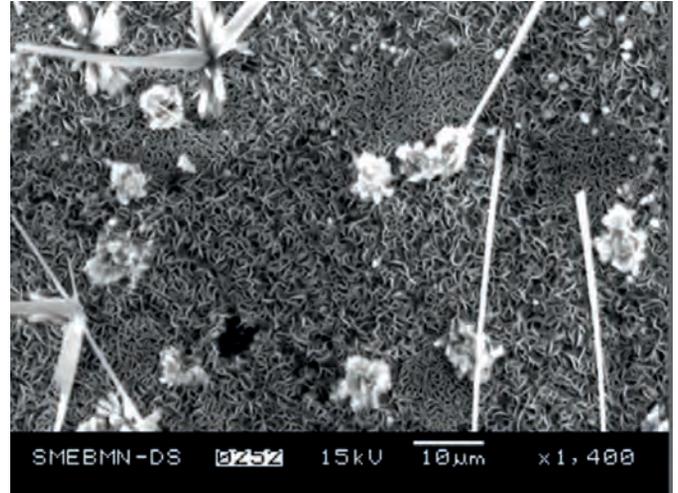


Figure 17 - Phases secondaires à la surface d'un verre SON68 altéré par la vapeur pendant 99 jours à 175 °C (en haut) et pendant 512 jours à 90 °C (en bas)

Il convient de déterminer les mécanismes exacts responsables des vitesses mesurées et de leur durée, d'évaluer l'effet de l'irradiation en conditions anoxiques dans le cas des verres SON68 et de préciser les phénomènes d'altération au sein des fissures. Il n'est donc pas réaliste, aujourd'hui, d'extrapoler ces résultats sur le long terme. Les études se poursuivent pour améliorer la compréhension des phénomènes et en affiner les quantifications.

Quelles que soient les vitesses de dissolution, celles-ci restent faibles au regard de la masse de verre qui sera progressivement altérée.

2.5.2 Vitesse de dissolution du verre nucléaire SON68 en contact avec l'eau de la formation argileuse

Les vitesses initiales de dissolution V_0 du verre SON68 mesurées entre 30 °C et 90 °C avec une eau de composition de celle de la formation argileuse se révèlent supérieures à celles mesurées en eau pure. Néanmoins, comme pour l'eau pure, l'évolution de la vitesse initiale en fonction de la température ($V_0 = f(T)$) suit une loi d'Arrhenius avec une énergie d'activation E_a de $77,0 \pm 3,2$ kJ.mol⁻¹, identique à celle déterminée en eau pure (76 kJ.mol⁻¹). Ainsi, la vitesse V_0 en eau du Callovo-Oxfordien semble contrôlée par le même mécanisme qu'en eau pure (hydrolyse des liaisons Si - O), mais ce dernier pourrait être activé par la composition chimique de l'eau porale de l'argilite.

³ Le verre dans lequel sont incorporés les radionucléides (dit « R777 ») ne pouvant être utilisé pour les essais et expériences, le CEA a mis au point un verre aux propriétés équivalentes, dit verre SON36. C'est sur ce dernier que sont obtenus les résultats cités ici.

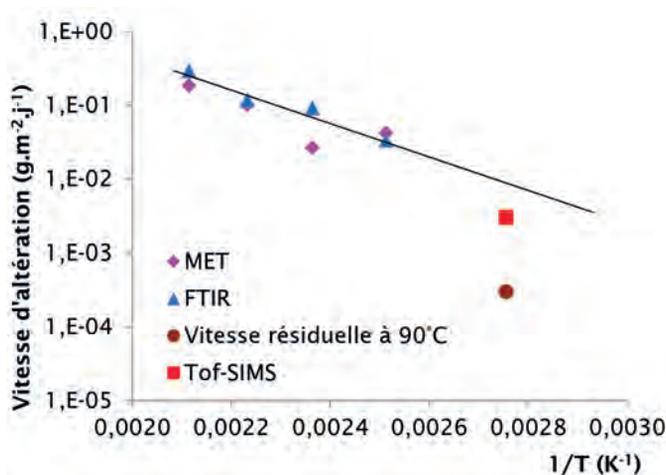


Figure 18 - Effet de la température sur l'hydratation du verre SON68 pour une humidité relative de 92 %

Un écart de pH ne permet pas d'expliquer l'influence de l'eau porale du Callovo-Oxfordien. En effet, les pH mesurés lors de la détermination de V_0 en eau dé-ionisée (pH ~ 7) et en eau de formation argileuse (pH compris entre 6,48 et 7,70 selon la température) sont proches, même s'il existe une imprécision sur les valeurs de pH de cette dernière compte tenu d'un dégazage de CO_2 lors de la mesure.

L'influence de l'eau du Callovo-Oxfordien sur la vitesse initiale d'altération est vraisemblablement due à sa composition, via l'effet spécifique d'un ou plusieurs ions, ou plus généralement à sa force ionique qui varie de 0,091 à 0,101 mol.L⁻¹ lorsque la température passe de 90°C à 25°C.

Jollivet *et al.* (2012) ont étudié l'influence de différents alcalins et alcalino-terreux sur la vitesse initiale d'altération du verre SON68. Ils concluent que les tétraèdres de silice apparaissent plus sensibles à l'eau de la formation argileuse que les tétraèdres d'alumine ou les octaèdres de zircon. Par ailleurs, l'influence différente des cations, alcalins ou alcalino-terreux, sur la vitesse initiale de dissolution du verre SON68 est corrélée à la formation de sites spécifiques ($\text{SiOM}^{(n-1)+}$,

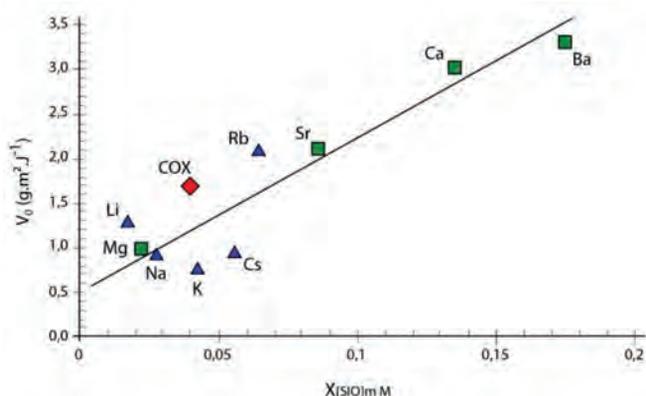


Figure 19 - Évolution de la vitesse initiale de dissolution V_0 du verre SON68 à 20 °C en présence de différents cations à une force ionique de 0,1 M et en eau du Callovo-Oxfordien, en fonction de la fraction de sites métalliques de surface des alcalins et alcalino-terreux (d'après Jollivet *et al.* 2012)

M= alcalin (n=1) ou alcalino-terreux (n=2)) de surface engendrés par ces éléments. Sur la figure 19, le point correspondant à la spéciation des sites de surface $\text{SiOM}^{(n-1)+}$ au contact de l'eau porale du Callovo-Oxfordien et à la vitesse initiale mesurée à 90°C (1,7 g.m⁻².j⁻¹) suit la tendance déduite de l'étude des différents alcalino-terreux. Ces résultats mettent en évidence le rôle prépondérant du calcium présent dans l'eau du Callovo-Oxfordien. Le rôle du magnésium dans l'altération du verre par la formation de phases secondaires a également été confirmé.

Comme pour l'altération du verre en phase vapeur, les études sont poursuivies sur cette thématique afin de mieux comprendre les phénomènes et de préciser les vitesses de dissolution.

2.5.3 Les interactions entre verre, fer et argiles en conditions de stockage

Pour s'approcher au mieux des réactions du verre en condition de stockage, des expérimentations sont réalisées dans le Laboratoire souterrain : c'est le cas de l'essai long terme MVE dont la mise en place est présentée dans le bilan précédent « 2006-2009 - 4 ans de recherches scientifiques à l'Andra pour les projets de stockage ».

Les premiers résultats, issus de prélèvements réguliers du fluide, portent sur l'analyse de la chimie de la solution dans laquelle se retrouvent les éléments du verre les plus mobiles passés en solution. Les concentrations en éléments mobiles (bore, lithium) servent à évaluer l'avancée de la réaction de dissolution du verre (figure 20) en termes de quantité de matière altérée et de cinétique.

Par ailleurs, des prélèvements du mélange Verre-Fer au moyen de cannes sont analysés pour connaître l'état de surface du verre : profondeur altérée, caractéristiques du gel d'altération (chimie, nature des phases précipitées, caractéristiques texturales, porosité).

À la vue de ces résultats, la vitesse d'altération, en considérant une évolution linéaire est en baisse au cours du temps, ce qui était attendu :

- entre 7 et 28 jours : $B \rightarrow 0,011 \text{ g.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$
- entre 148 et 309 jours : $B \rightarrow 0,003 \text{ g.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$

Lorsque l'expérimentation sera terminée, il est prévu de réaliser un bilan chimique, avec analyse du verre sain, du gel d'altération, des éléments en solution et des éléments diffusés dans le massif pour évaluer la cinétique de relargage des éléments du verre vers la roche et l'eau porale.

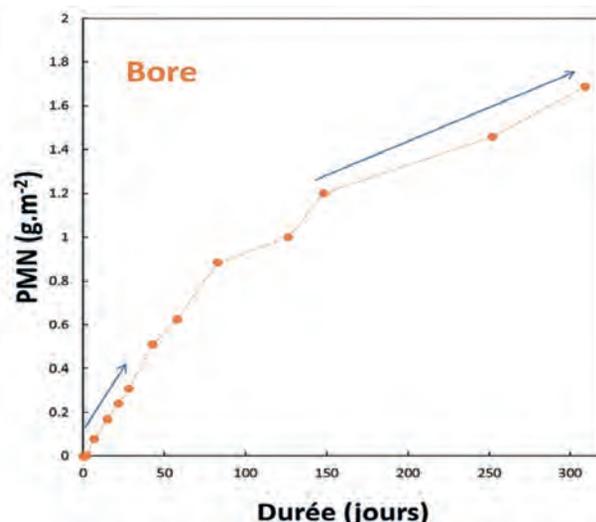


Figure 20 - Pertes de masse normalisées au cours du temps d'après les analyses des concentrations en B dans la solution du forage MVE1201

2 | Déterminer le comportement des éléments constitutifs d'un stockage

2.6 Les interactions entre les divers matériaux du stockage profond

Outre le béton des infrastructures souterraines et le verre des matrices de déchets, d'autres matériaux, en particulier le fer et l'argilite, seront mis en contact, donc en interaction, les uns avec les autres sur le long terme. Plusieurs approches complémentaires sont mises en jeu pour appréhender ces phénomènes complexes et les quantifier :

- des expériences et analyses sur échantillons où divers matériaux sont mis en contact ;
- des modélisations des différents phénomènes ;
- des études et analyses sur des objets archéologiques.

2.6.1 Les interactions entre matériaux ferreux et argilite

Les matériaux ferreux et les aciers s'oxydent avec le temps, mais les produits de corrosion qui en résultent forment des couches périphériques qui ont un rôle essentiel dans les processus de « passivation » des aciers. La caractérisation de ces produits de corrosion provenant d'expérimentation en milieu argileux contribue donc à l'identification de ces processus. Ce travail est effectué sur les échantillons des diverses expériences, dont certaines en Laboratoire souterrain. Le choix et l'analyse d'analogues, tels que des objets archéologiques en fer prélevés dans des environnements anoxiques, contribue également à mieux comprendre le rôle et l'évolution de ces produits dans le temps.

Les expériences et analyses sur échantillons

Les essais d'interactions entre le fer et les argiles sont conduits depuis 2007. Les expériences consistent à mettre en contact du fer métal sous forme de poudre et des argiles purifiées dans une solution chlorurée-salée, sous atmosphère anoxique. Ces mélanges sont maintenus à 90°C pour des durées variables. En complément, et afin d'évaluer le rôle des minéraux non argileux de l'argilite du Callovo-Oxfordien, des expériences d'ajouts dosés sont également réalisées avec addition de quartz, calcite et/ou pyrite à la phase argileuse.

Les produits de réactions, phases liquides et phases solides sont ensuite caractérisés de façon systématique par des méthodes classiques (analyses chimiques, microscopies électroniques, diffraction des rayons X,

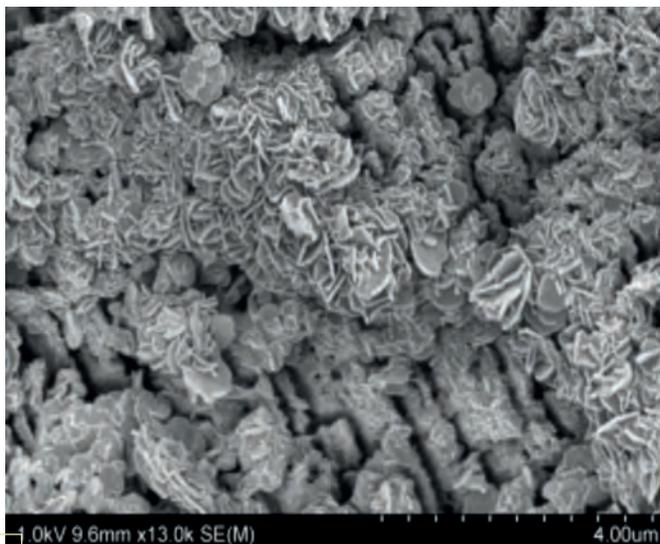


Figure 21 - Image MEB d'argilite du Callovo-Oxfordien avec formations de nouvelles phases minérales provoquées par le FeO, après 1 mois à 90°C

spectroscopie infrarouge) et, dans certains cas, avec des techniques donnant accès au statut et à la localisation du fer dans les produits de réaction (spectroscopie Mössbauer et d'absorption X ou microscopie à balayage par transmission des rayons X).

L'interaction entre les différentes argiles (kaolinite, smectites, illite, fraction argileuse du Callovo-Oxfordien) et le fer métal conduit à la formation de phases de type serpentine (berthiérine) au détriment des phases argileuses initiales et du quartz résiduel (figure 21). Le pH final de la solution est proche de 10, quel que soit le pH initial. Le fer ne se trouve ni en position échangeable dans les argiles ni en solution (selon les limites de détection).

Ces essais mettent en évidence les différences de réactivité des diverses argiles vis-à-vis du fer selon leur origine, la taille des particules et les phases accessoires (dolomite, quartz) étant les paramètres les plus sensibles.

L'ensemble des résultats des différentes expériences a montré que chacun des paramètres comme la température, le rapport Fer/argiles (F/A), le rapport liquide/argilite (L/A), la présence ou non de verre dans le système expérimental, joue un rôle sur la disparition ou l'apparition des phases minérales. La température semble être le paramètre contrôlant au premier ordre l'apparition des nouvelles phases argileuses avec une transition réactionnelle située entre 150 °C et 200 °C. De même, le rapport liquide sur solide a une forte influence : les réactions sont très ténues pour un rapport L/S de 0,1 (ce qui est proche des conditions dans le Callovo-Oxfordien) ; elles sont importantes pour L/S ≥ 1.

Bien que les conditions d'essais soient éloignées, et plus défavorables que celles d'un stockage (température < 100 °C), elles fournissent de précieuses indications sur les phénomènes susceptibles de se produire sur le long terme.

Les études et analyses sur des objets archéologiques

L'utilisation des analogues archéologiques de matériaux ferreux est étudiée afin d'avoir un bouclage entre les modélisations et les expérimentations. Ils sont généralement utilisés de deux manières. D'une part, une caractérisation directe de la couche de rouille permet d'avoir une bonne représentation de sa morphologie et de sa structure résultant de périodes d'altération relativement longues. D'autre part, ces couches de rouille subissent différents types de traitement (vieillessement accéléré, réduction électrochimique, etc.) afin d'en tester le comportement dynamique.

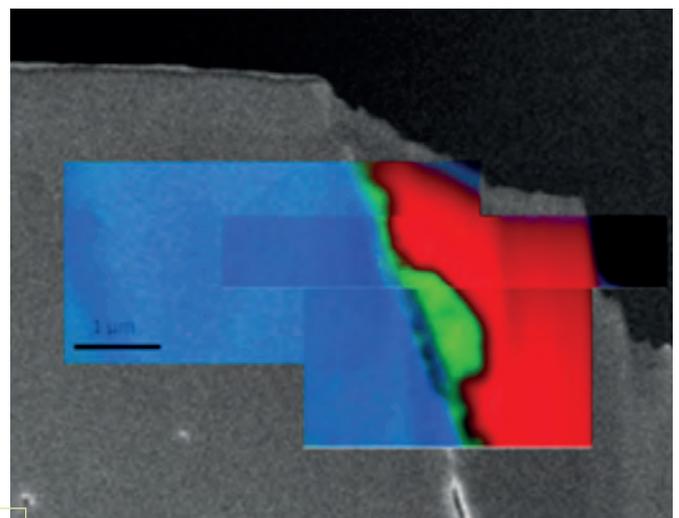


Figure 22 - Produits de corrosion d'un clou en fer datant de 450 ans : observation de l'interface métal/oxyde à l'échelle nanométrique par STXM (Rouge : fer métal, Vert : maghémite, Bleu : sidérite)

Des lames d'échantillons de produits de corrosion provenant d'objets archéologiques ont été placées sous rayonnement synchrotron. Un des facteurs à l'origine de la passivation des aciers a ainsi été mis en évidence, il s'agit de films nanométriques d'oxydes de fer, la maghémite, au contact du métal (figure 22).

Cette phase avait déjà été identifiée par mesures électrochimiques lors d'expérimentations dans des laboratoires de surface.

Certains objets archéologiques ont également été ré-immersés dans une eau enrichie en deutérium afin d'identifier la localisation de la réduction de l'eau. Ces essais sont toujours en cours.

2.6.2 La modélisation pour comprendre les mécanismes de corrosion en milieu argileux

Une prévision fiable du comportement des matériaux ferreux en situation de stockage passe nécessairement par la modélisation de la corrosion. Une démarche mécaniste a donc été engagée depuis plusieurs années et a conduit au développement d'un code de corrosion généralisée (CALIPSO).

Ce code prend notamment en considération les réactions d'interface entre le métal et le milieu, qui ont été observées et mesurées avec les diverses expériences, mais également le rôle d'une couche de produit de corrosion à cette interface, telle que l'ont montré les études menées sur les analogues archéologiques, couche qui joue un rôle important dans la passivation du métal.

Une démarche de couplage entre ce code de corrosion et un code de géochimie/transport (codes de calcul Calipso - Kirmat (corrosion-géochimie)) a également été mise en place. Il s'agit, pour le code de « corrosion », d'intégrer les variations de composition de la solution (pH, [Fe], Eh...), de calculer en retour la vitesse de corrosion du fer et de fournir au code « de géochimie » les flux de fer, d'électrons, de protons et d'eau permettant de recalculer un bilan minéralogique. Les avancées permises par couplage ont confirmé que l'environnement influe la stabilité de la couche passivante des aciers.

Par ailleurs, la modélisation de la corrosion a également progressé sur la corrosion localisée. Il est désormais possible de reproduire l'ouverture des piqûres et donc l'arrêt de leur propagation sur le long terme dans les aciers non alliés. Différentes simulations de ce processus peuvent être proposées à partir de l'analyse de l'ensemble des mécanismes de corrosion et de l'utilisation d'outils numériques.

Les résultats de simulation de l'évolution d'une piqûre hémisphérique mettent clairement en évidence que les conditions dans lesquelles une piqûre sur acier croît en profondeur sont très limitées, puisque seule une loi d'oxydation fonction du pH, et dans une gamme de potentiel restreinte, peut conduire à ce type de situation.

La différence majeure avec les aciers inoxydables, pour lesquels cette situation est fréquemment rencontrée, réside dans les constantes d'hydrolyse, qui sont beaucoup plus élevées pour les éléments d'alliage (principalement le chrome) que pour le fer.

2.7 La chimie des fluides et des solides en contexte de stockage profond

2.7.1 La composition de l'eau du Callovo-Oxfordien à température élevée

Dans son état actuel, l'eau interstitielle du Callovo-Oxfordien est en équilibre chimique avec la matrice solide. La mise en place de déchets exothermiques sera à l'origine d'une augmentation locale de la température sur une durée relativement courte. Cette perturbation dans le champ proche du stockage est susceptible de modifier la composition

chimique de l'eau contenue dans les argilites. Des expériences et des modélisations ont été engagées depuis plusieurs années (voir bilan précédent « 2006-2009 – 4 ans de recherches scientifiques à l'Andra pour les projets de stockage ») pour vérifier cette hypothèse et en évaluer les éventuelles conséquences.

Les recherches sur cette thématique ont été poursuivies sur la période considérée via des modélisations géochimiques prédictives et des expériences en laboratoire à 80°C (Beaucaire *et al.* 2012, Gailhanou *et al.* en préparation).

Ces dernières ont consisté à mettre en contact argilites et eau interstitielle en proportions variables dans des autoclaves chauffés à 80°C sur des durées de 6, 12 et 20 mois. Les objectifs étaient ① d'affiner les caractéristiques physico-chimiques de l'eau porale de l'argilite sous influence de la température, et particulièrement la pCO₂ d'équilibre, ② de mettre en évidence les principaux équilibres réalisés entre l'eau porale et des phases minérales secondaires et enfin ③ de consolider et améliorer le modèle de régulation des eaux porales construit à 25°C et à 80°C. Ces expériences viennent en appui pour vérifier ou améliorer la modélisation des différents phénomènes en température.

Les premiers résultats expérimentaux mettent en évidence que certains équilibres de phases entre les solutions et les solides apparaissent au bout de 20 mois, notamment en ce qui concerne la calcite, la dolomite ordonnée, la kaolinite et le quartz (Beaucaire *et al.* 2012). Quant à la caractérisation des phases solides, les analyses minéralogiques ne font pas apparaître d'évolutions notables, seules quelques néoformations de goethite (figure 23) et de dolomite sont observables (Gailhanou *et al.* 2012).

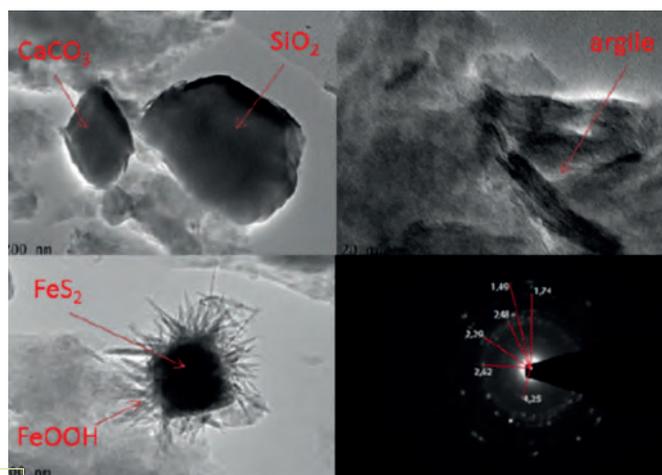


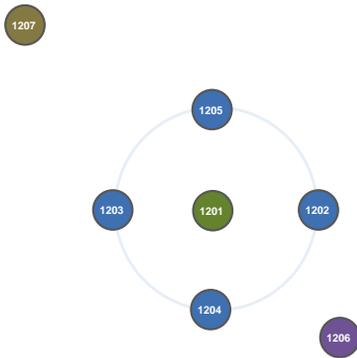
Figure 23 - Photographie des différentes phases minérales observées en microscopie MET sur l'échantillon de Callovo-Oxfordien à 20 mois (BRGM 2012). Sur la photographie en bas à gauche, aiguilles riches en fer, l'analyse du cliché de diffraction électronique montre des paramètres en bon accord avec ceux de la goethite

La comparaison de ces résultats expérimentaux avec ceux obtenus par la modélisation a été effectuée sur la composition chimique des solutions aqueuses et de la phase gazeuse, à 6, 12 et 20 mois. Le modèle a été appliqué aux conditions expérimentales initiales (rapport liquide/solide, composition de la solution initiale), il fournit une bonne concordance avec les résultats expérimentaux. Pour la composition chimique de l'eau interstitielle en température, seuls le pH, le Carbone Inorganique Total (TIC en anglais) et les concentrations en silicium et fer évoluent de façon significative. Le système « gaz-argilites-solution » à 80°C s'équilibre rapidement avec les carbonates, la célestine et le quartz. En revanche, l'équilibre avec les minéraux aluminosilicatés est beaucoup plus lent. Les constantes d'échange Ca/Mg obtenues à 80°C sont peu différentes de celles à 25°C.

2 | Déterminer le comportement des éléments constitutifs d'un stockage

En complément des expériences précédentes (d'une durée maximale de 20 mois), de nouvelles expériences en laboratoire sur du très long terme (10 ans) ont été mises en place (Gailhanou *et al.* 2012). En parallèle des modélisations et des tests en laboratoires, l'expérimentation « EPT⁴ » a été mise en place en février 2012 dans le Laboratoire souterrain de Bure. Elle vise à obtenir des informations sur la composition chimique des phases aqueuse et gazeuse en contact avec un volume d'argilite du Callovo-Oxfordien porté à une température de 85°C.

Au cours de l'année 2012, quatre forages chauffants verticaux ascendants ont été disposés autour d'un forage comprenant l'intervalle de test destiné au suivi de la composition de l'eau et du gaz au cours du temps. En complément, deux forages supplémentaires ont été placés à l'extérieur de la zone délimitée par les forages chauffants selon le schéma ci-contre : l'un est dédié au suivi du champ thermique tandis que l'autre est destiné au suivi du champ de pression hydraulique.



L'expérimentation était toujours en cours en fin d'année 2012.

2.7.2 Les évolutions chimiques à long terme des colis de déchets MA-VL et leurs effets sur le comportement des radionucléides

Les colis en situation de stockage vont progressivement évoluer sur le long terme, de nouvelles espèces chimiques vont apparaître qui pourront interagir avec les radionucléides et, dans certains cas, en modifier le comportement, soit en augmentant leur solubilité soit, au contraire, en les retardant par sorption. Bien que ces mécanismes soient particulièrement lents, ils doivent être précisés et quantifiés pour les évaluations de sûreté.

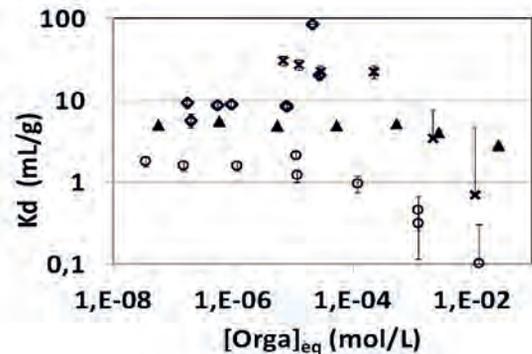
À partir de la phase de resaturation en eau des alvéoles, et sous l'effet de l'irradiation, certains colis de déchets MA-VL seront susceptibles de relâcher des espèces chimiques, en particulier des sels solubles parmi lesquels de la matière organique (acides organiques, phénols...) et des nitrates.

L'effet des produits de dégradation organiques hydrosolubles

La dégradation des constituants d'une fraction des colis de déchets MA-VL va libérer des produits hydrosolubles (PDH) tels que les acides phtaliques, acétique, oxalique etc. Afin de répondre à la question de l'incidence potentielle de cette matière organique sur la mobilité des radionucléides, un groupement de laboratoires spécialisés a, dans un premier temps, étudié les propriétés intrinsèques des molécules organiques « seules » dans l'argilite, à partir de deux échantillons de Callovo-Oxfordien provenant du forage EST207. Il s'agissait de mieux comprendre les interactions entre acides organiques et minéraux et, surtout, d'obtenir des données d'entrée pour la modélisation du transport des organiques dans l'argilite.

Le travail (Dagnélie *et al.* Soumis) a consisté à déterminer un modèle diffusif des oxalates, acétates, phtalates, isosaccharinates et de l'EDTA⁵ au travers des argilites saines.

Les résultats (figure 24) montrent un comportement diffusif de ces ions intermédiaires entre anions et cations inorganiques. Leur sorption est le plus souvent faible mais significative, et s'avère partiellement irréversible. Ces résultats aident à la compréhension des interactions entre acides organiques et minéraux, et fournissent surtout des données d'entrée pour la modélisation du transport des organiques dans l'argile.



▲ : EDTA, 60 jours; x : ISA, 8 mois;
o : phtalate, 43 jours; ◇ : oxalate, 41 jours

Figure 24 - Données expérimentales de sorption d'acides organiques dans le Callovo-Oxfordien : Ratio de distribution en fonction de la concentration totale en ligand à l'équilibre

Dans un deuxième temps, l'euprotium est utilisé comme analogue des actinides trivalents. Les systèmes ternaires Europium/Organiques/Callovo-Oxfordien sont étudiés par mesure de sorption puis de diffusion. La diffusion de l'euprotium suit le comportement de l'espèce complexante, tout au moins pour des concentrations en produits organiques suffisantes pour atteindre un taux de complexation élevé en solution. Si l'espèce complexée majoritaire est cationique, la sorption de l'euprotium reste élevée, aussi élevée qu'en absence de complexants organiques ; inversement, la sorption des complexes anioniques diminue fortement. Les mécanismes de fixation des molécules et complexes organiques restent à caractériser, afin notamment de fournir un modèle de sorption intégrant les interactions ternaires entre radionucléide, molécule organique et sites de surface des argilites.

Réduction des nitrates par catalyse surfacique ou biotique et influence sur le potentiel redox

La présence des nitrates dans l'environnement des colis peut initier des conditions oxydantes transitoires propices à la mobilité de certains radionucléides. En condition biotique et en présence de matière organique et/ou de H_2 comme donneurs d'électrons, les nitrates peuvent être dénitrifiés ou réduits (formation de N_2 ou de NH_4), ce qui aboutit à des conditions réductrices induisant la faible solubilité et la forte sorption d'un grand nombre de radionucléides (Se, U, Tc, Pu, Np,...). Les nitrates ont donc une influence sur leur mobilité, qui s'étend du champ proche cimentaire des alvéoles de déchets MA-VL (Albrecht *et al.* 2012) jusqu'à la roche hôte argileuse.

Les études menées sur le sujet se sont d'abord intéressées aux interactions matière organique - matrice cimentaire - nitrates en conditions abiotiques. Puis le rôle de l'activité microbienne sur le devenir des nitrates en systèmes fermés, c'est-à-dire dans des milieux simulant la dynamique de relargage du bitume et/ou du ciment, a été étudié avec quatre souches bactériennes différentes (*Pseudomonas stutzeri*, *Bacillus azotoformans*, *Virgibacillus halodenitrificans* et *Halomonas desiderata*). L'objectif était ① de quantifier les cinétiques microbiennes de réduction des nitrates et ② d'évaluer l'influence de paramètres environnementaux sur ces cinétiques. C'est ainsi que les influences de la concentration en nitrates (figure 25), en calcium, du pH ou de l'oxydation du milieu ont été évaluées sur le développement des bactéries. Dans l'étape suivante, les mécanismes mis en jeu dans la réaction de dénitrification ont été déterminés pour les différentes souches bactériennes, en présence d'acétate et d'un léger excès de nitrate.

De l'ensemble de ces expériences, il apparaît qu'à température ambiante, la réactivité des sulfates (Wersin, *et al.* 2011) et des carbonates

⁴ Eau Porale en Température.

⁵ EDTA : acide éthylène diamine tétraacétique.

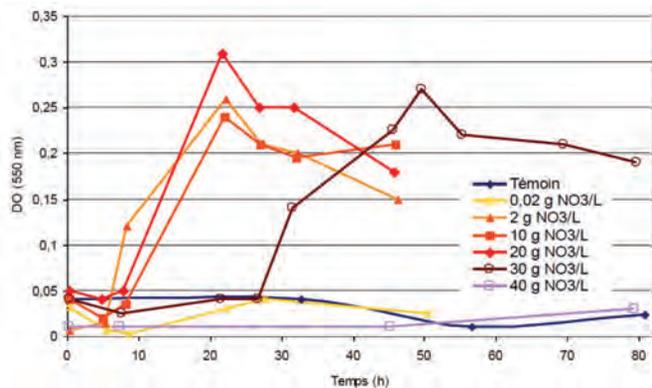


Figure 25 - Suivi de la croissance de *Pseudomonas stutzeri* en présence d'acide acétique pour des concentrations en nitrate variant de 0 à 40 g/L

demande une catalyse microbienne en condition *in situ*, absente dans les roches argileuses compactées comme l'argilite du Callovo-Oxfordien ou l'argilite à Opalin étudiées par la NAGRA. Cette catalyse est cependant attendue au sein d'une EDZ correspondant à la mise à disposition d'eau libre et d'espace.

Pour les nitrates, la catalyse peut être microbienne ou surfacique. En conditions acido-basiques neutres, les bactéries neutrophiles réduisent les nitrates essentiellement en gaz N_2 (dénitrification), diminuant ainsi le potentiel redox et contribuant à limiter la mobilité des radionucléides étudiés. En milieux alcalins, la réactivité est réduite et nécessite la présence de bactérie alcalophile ; les nitrites peuvent apparaître comme produit de réactivité intermédiaire (Bertron *et al.* 2012). Le retour vers un potentiel redox réducteur est donc plus lent.

Les surfaces des aciers inox et noirs, essentiellement présentes en champs proches, peuvent également catalyser la réduction des nitrates, formant de l'ammonium comme produit final. Cette catalyse, efficace en présence d'acier en copeaux et en poudre, semble se limiter à la réactivité des aciers noirs (Truche *et al.* 2012) en milieu neutre et aux aciers inox en milieu alcalin.

Les recherches sur cette thématique se poursuivent avec l'étude des interactions entre micro-organismes – matrices cimentaires – et bitume dans des configurations qui se rapprochent de la réalité du stockage. Des premiers résultats ont d'ores et déjà été obtenus (figure 26).

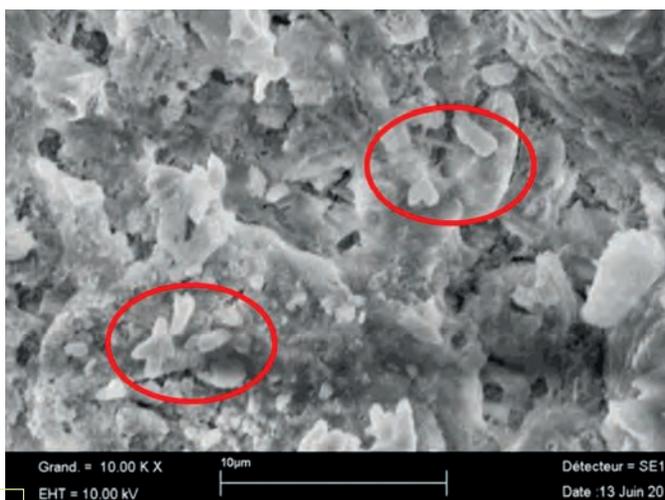


Figure 26 - Observation des dépôts bactériens de *H. desiderata* en surface de matrices cimentaires après une semaine d'exposition

Références bibliographiques

CHAINAIS-HILLAIRET C. & VIOLET I. Existence of solutions for a steady state corrosion of steel model. To appear in Applied Math. Letters, 2011.

JACQUIER P., HAINOS D., ROBINET J.C., HERBETTE M., GRENUT B., LACOUR J.L., BOUCHET A., FERRY C. The influence of mineral variability of Callovo-Oxfordian claystones on radionuclide transfer properties, soumis à Applied Clay Science.

LEVESQUE M., BÉNICHOU O., VOITURIEZ R., ROTENBERG B. (2012) Taylor Dispersion with Adsorption and Desorption. Physical Review E 86, 036316.

LEVEAU F., BOUCHET A., VINSOT A., ARNOULD A. (2012) Observation and analysis of oxidised figures in the drift walls in the Andra's Underground Research Laboratory in the Callovo-Oxfordian argillaceous rock. Clays in Natural and Engineered Barriers for radioactive Waste Confinement, 22-25 Octobre 2012, Montpellier, France. Abstracts p 300-301 et papier soumis.

MERCADO H., LORENTE S. & BOURBON X. (2010) Two ways to measure the diffusion coefficient of chloride. Proceedings of the Int. Conf. MEDHACS'10. La Rochelle, France.

MERCADO H., LORENTE S. & BOURBON X. (2011) On the determination of the diffusion coefficient of ionic species through porous materials. Proceedings of NUWCEM Int. Symp. on cement-based materials for nuclear wastes. Avignon, France.

MERCADO H., LORENTE S. & BOURBON X. (2012b). DC and AC measurements of the chloride diffusion coefficient through concrete. Proceedings of the Int. Conf. on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting. ICCRRR'2012, Cape Town, South Africa.

NEEWAY J. (2010) The alteration of the SON68 reference waste glass in silica saturated conditions and in presence of water vapor. Thèse de l'Université de Nantes soutenue le 7 avril 2011.

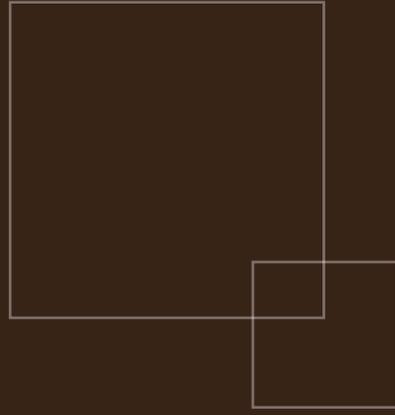
SAHEB, M., NEFF, D., BERGER, P., RAIMBAULT, L., DILLMANN, P., (2012) Investigation of iron long-term corrosion mechanisms in anoxic media using deuterium tracing, Journal of Nuclear Materials, 423, 61-66.

TAZI S., MOLINA J., SALANNE M., ROTENBERG B., VUILLEUMIER R., TURQ P. (2012a) A transferable ab-initio based force field for ions in solution. Journal of Chemical Physics 136, 114507.

TAZI S., ROTENBERG B., SALANNE M., SPRIK M., SULPIZI M. (2012b) Absolute acidity of clay edge sites from ab-initio simulations. Geochimica et Cosmochimica Acta 94, 1.

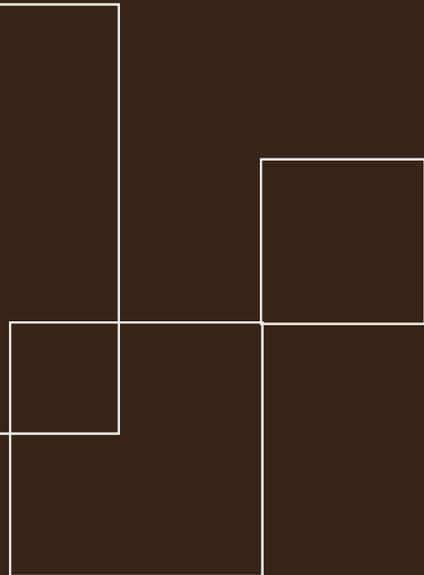
TRICOIT S. Modélisation et simulation numérique de la propagation de la corrosion par piqûres du fer en milieu chloruré : Contribution à l'évaluation de la durabilité des aciers au carbone en conditions de stockage géologique, Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, 2012 - À paraître.

VINSOT A., CLARET F., LUNDY M., WECHNER S. (2012). In situ measurement of the rate of oxygen consumption by the Callovo-Oxfordian argillaceous rock. Clays in Natural and Engineered Barriers for radioactive Waste Confinement, 22-25 Octobre 2012, Montpellier, France. Abstracts p302-303.



3. Préparer la construction du futur stockage profond dans son contexte géologique

Un des objectifs initiaux du Laboratoire souterrain de recherche était d'obtenir les valeurs et caractéristiques les plus représentatives possibles des propriétés du Callovo-Oxfordien. Avec l'évolution des connaissances et le développement du projet Cigéo, le Laboratoire souterrain devient également un outil de dimensionnement du futur stockage en milieu géologique profond.



3 | Préparer la construction du futur stockage profond dans son contexte géologique

3.1 La reconstitution détaillée de l'histoire géologique

La reconstitution détaillée de l'histoire géologique de l'est du bassin de Paris a pour objectifs d'expliquer les différentes propriétés du Callovo-Oxfordien et de ses encaissants, via la reconstitution des étapes de la mise en place des dépôts et de leur diagenèse, et de donner des clés pour la transposition des connaissances acquises aux problématiques du stockage.

3.1.1 Histoire thermique et diagenèse des formations du sud Meuse/nord Haute-Marne

Si, depuis de nombreuses années, il est acquis que la minéralogie de la formation du Callovo-Oxfordien est fortement influencée par la paléogéographie de l'époque des dépôts et peu affectée par la diagenèse, il était nécessaire d'obtenir certaines informations complémentaires sur l'histoire thermique régionale, en particulier sur les formations profondes, pour préciser les processus de diagenèse et de transferts actuels et passés.

Plusieurs des thématiques de recherche ont été menées dans cet objectif dans le cadre du programme TAPSS mis en place avec le forage profond au Trias (Est433) (voir encadré du chapitre « La recherche à l'Andra »). C'est ainsi que de multiples méthodes ont été mises en jeu et couplées entre elles, parmi lesquelles la cathodoluminescence, le MEB, la géochimie isotopique ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$), la géochimie organique, la datation K/Ar sur minéraux argileux, etc. Une modélisation thermique est venue compléter ces méthodes analytiques.

L'ensemble est à l'origine de plusieurs publications et de la soutenance de deux thèses : Ploquin F. en 2011 et Blaise T. en 2012.

Si toute la colonne des terrains traversés par le forage Est433 a été étudiée, une attention particulière a été portée au sel du Keuper et aux grès et conglomérats du Trias inférieur (faciès silicoclastiques du Buntsandstein) actuellement à 1 850 – 2 000 mètres de profondeur ce afin de contraindre les températures d'enfouissement et les épisodes de circulation de fluides au sein de la pile sédimentaire.

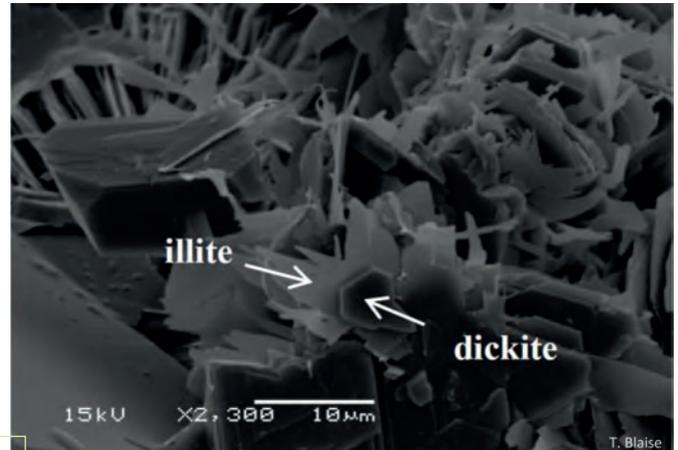


Figure 1 - Néoformation d'illite sur un minéral de dickite – Microphotographie SEM (Blaise T. 2012)

Les séries silicoclastiques sont affectées par les processus d'interactions fluides-roches, dont les témoins sont les surcroissances de quartz et de feldspath potassique (adulaire), et la cristallisation d'illite au sein de l'espace poral.

Les datations K-Ar des différentes fractions d'illite authigène (figure 1) mettent en évidence deux périodes de cristallisation, l'une $180 \pm 5 \text{ Ma}^1$ (Lias), l'autre à $150 \pm 3 \text{ Ma}$, (limite Jurassique/Crétacé). Ces deux périodes correspondent à des épisodes de minéralisations connues à l'échelle de l'Europe de l'Ouest en liaison avec des phases du rifting de l'Atlantique.

L'évolution des géothermomètres organiques, tels que la réflectance de la vitrinite et l'état des bio-marqueurs moléculaires a pu être retracée tout au long des 2 000 mètres traversés par le forage Est433, ce qui a été la base de l'élaboration de modèles thermiques 1D et 2D (figure 2). Au niveau de la Zone de Transposition (ZT), la maturité de la matière organique sédimentaire n'est atteinte que vers 1 400 mètres de profondeur, soit au niveau du Keuper. Les températures maximales d'enfouis-

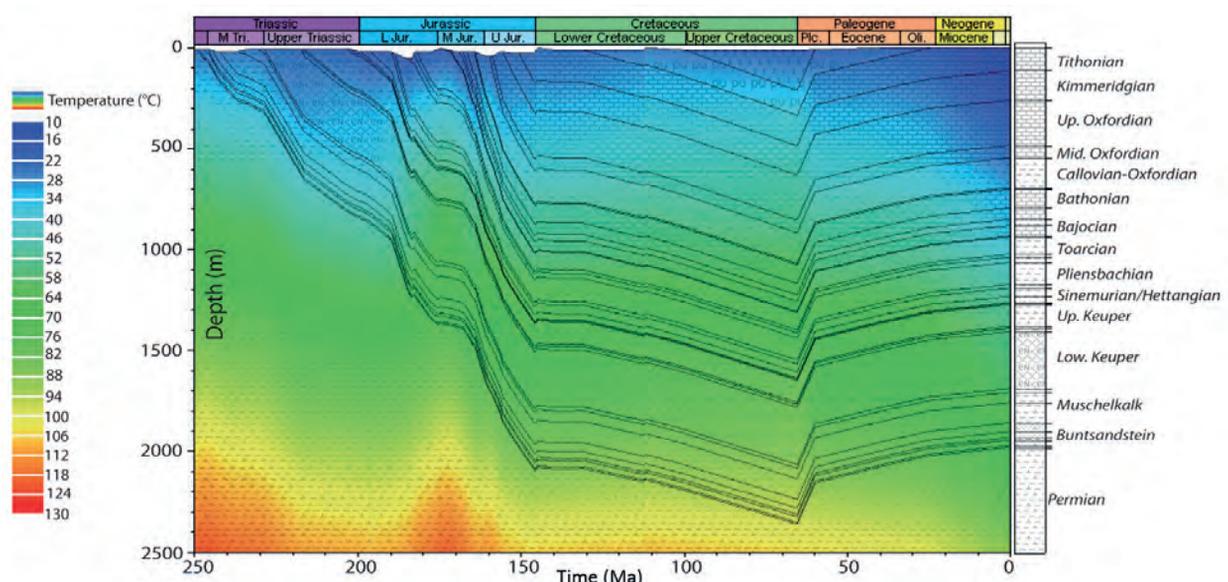


Figure 2 - Diagramme d'évolution de l'enfouissement, avec échelle de couleurs des températures – (T. Blaise 2012)

¹ Ma : millions d'années

sement atteintes au cours de l'histoire géologique sont de $50 \pm 5^\circ\text{C}$ dans les argilites du Callovo-Oxfordien et de $92 \pm 5^\circ\text{C}$ dans les grès du Trias. Le Toarcien, roche mère à huile potentielle, est immature.

Ces valeurs attestent d'un sur-approfondissement de l'ordre de 300 ± 100 m par rapport à l'actuel. Cette différence est due aux dépôts du Crétacé qui ont recouvert la série jurassique, avant d'être érodés.

3.1.2 Origine de la cimentation des carbonates du Dogger et l'Oxfordien

La diagenèse qui affecte les formations calcaires du Dogger et de l'Oxfordien moyen à supérieur s'est produite en plusieurs phases, en liaison avec les événements tectoniques régionaux à l'origine d'entrées d'eaux météoriques qui sont responsables, selon la localisation et la granulométrie d'origine, de dissolutions partielles ou, au contraire, de cristallisation de calcite de blocage dans les pores.

Ces résultats ont été présentés dans le bilan scientifique précédent (« 2006-2009 – 4 ans de recherches scientifiques à l'Andra pour les projets de stockage »). Afin de conforter et préciser ces conclusions, notamment en termes de propriétés physico-chimiques des paléo-fluides ayant circulé dans ces deux aquifères carbonatés, des études complémentaires ont été menées entre 2010 et 2012 par caractérisation pétrographique (figure 3) et analyses chimiques (Blaise T. 2012 ; Cros A. 2012 ; Carpentier C. *et al.* en préparation). La base de données sur les terres rares et les valeurs isotopiques des différentes phases de cimentation en a ainsi été enrichie.

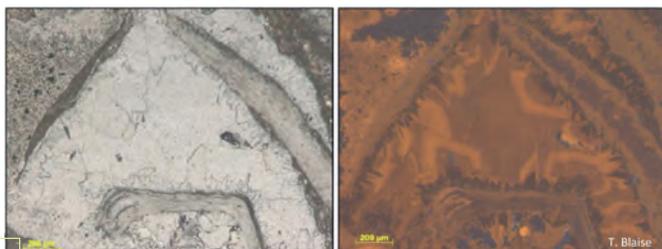


Figure 3 - Exemple de caractérisation pétrographique en lumière transmise (gauche) et en cathodoluminescence (droite) des phases de cimentation observées dans les grainstones oolitiques du Dogger calcaire (EST433) (T. Blaise)

Les signatures en $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des calcites en remplissage de géodes et fractures confirment que les eaux responsables des cristallisations d'âge Cénozoïque sont principalement d'origine météorique. Le déséquilibre isotopique en strontium entre les paléo-fluides et les carbonates marins percolés est en relation avec les ratios fluides/roches élevés et le dynamisme des circulations durant l'ouverture d'un réseau de fractures au Tertiaire.

Les températures de cristallisation déduites des couples $\delta\text{D} - \delta^{18}\text{O}$ sont comprises entre 25 et 35°C dans l'Oxfordien et entre 30 et 55°C dans le Dogger. Il est démontré que les saumures d'origine dans le Dogger ou le toit du Callovo-Oxfordien ont été progressivement remplacées par les eaux météoriques durant le Crétacé.

Par ailleurs, Pisapia *et al.* (2011) ont publié les résultats de datation par la méthode U/Pb de calcites de blocage des formations du Dogger et de calcite de géodes de l'Oxfordien. Une phase de cimentation s'est produite autour de la limite Jurassique/Crétacé ($149,2 \pm 5,8$ Ma) et une autre est proche de la limite Crétacé inférieur/Crétacé supérieur ($99,1 \pm 1,9$ Ma) pour les roches du Dogger. Une dernière phase de cimentation est clairement reliée à la phase d'extension fini-Éocène/Oligocène ($33,2 \pm 5,5$ Ma) pour les géodes des formations oxfordiennes, alors que le Dogger ne semble pas en être affecté.

Tous ces résultats sont en parfaite concordance avec ceux obtenus antérieurement, tout en les précisant. Les modèles géologiques, avec

la chronologie des phases de tectonique et de cimentation au sein des formations carbonatées, et hydrogéologique, avec l'origine des eaux, sont ainsi confortés. Ils démontrent que le système actuel, d'un point de vue de la géodynamique interne, est stable depuis plus de 30 millions d'années.

3.2 Les études en vue de la localisation du stockage géologique profond

3.2.1 Apporter des éléments complémentaires pour le modèle géologique conceptuel

La Zone d'Intérêt pour une Recherche Approfondie (ZIRA), de 30 km^2 , où devrait être implanté le futur stockage géologique profond, a été positionnée au sein de la Zone de Transposition (ZT), qui couvre une superficie de 250 km^2 (voir bilan précédent « 2006-2009 – 4 ans de recherches scientifiques à l'Andra pour les projets de stockage »). Pour aboutir à cette localisation, la démarche géologique avait pour objectif de s'assurer de la grande extension des qualités de la formation du Callovo-Oxfordien. Afin de renforcer les conclusions de 2009, quelques études supplémentaires ont été menées à l'échelle de la ZT, en complément de la campagne de sismique réflexion 3D acquise sur la ZIRA en 2010.

Établir un modèle de dépôt nécessite des approches multidisciplinaires avec, en particulier, une bio-stratigraphie pour les dater. En 2008-2010, la détermination des faunes d'ammonites trouvées dans les carottes des nouveaux forages de la ZT, fournit aujourd'hui une résolution fine du cadre chrono-stratigraphique de la formation (Thierry *et al.*, 2010), depuis le Callovien inférieur jusqu'à l'Oxfordien moyen puisque les sous-zones, voire les bio-horizons ont pu être identifiés.

Ces datations, en lien avec le cadre séquentiel, ont servi à une amélioration de l'interprétation et de la position de la surface d'inondation maximale de deuxième ordre connue à la base de l'Oxfordien inférieur.

Elles soulignent, par ailleurs, l'influence des régions nordiques sur l'est du bassin de Paris avec, par exemple, la découverte de spécimens caractéristiques des zones plus froides dans le Callovien inférieur, tels que *Kosmoceratidae* (*Kepplerites*) (figure 4).



Figure 4 - *Kepplerites* (*gowericeras*) *Ss-zone Michalskii*

D'autre part, la poursuite des études de cyclostratigraphie haute-résolution de la formation du Callovo-Oxfordien, a confirmé le contrôle astro-climatique sur la sédimentation : tous les cycles de Milankovitch ont été mis en évidence, les cycles d'excentricité à 100 et 400 ka dominant sur l'ensemble de la série (Huret *et al.* 2011). Grâce à cette méthode, il a été possible d'améliorer les datations relatives des épisodes sédimentaires et d'affiner la chronologie des événements de cette période. Les durées qui en ont été déduites ont été prises en compte dans la révision de la Geologic Time Scale 2012 : le Callovien dure $2,6 \pm 1,2$ Ma et l'Oxfordien $6,2 \pm 1,1$ Ma.

3 | Préparer la construction du futur stockage profond dans son contexte géologique

Si le climat du Jurassique a longtemps été considéré comme chaud et constant, régi par le CO₂ atmosphérique, des publications, à partir des années 2000, relaient des modifications climatiques importantes, avec même, pour certains auteurs, un épisode glaciaire à la transition Callovien – Oxfordien (Dromart *et al.* 2003). Ces interprétations étant discutées, des études portant sur l'évolution du cycle du carbone ont été menées sur les carottes de deux forages (n=23) et de coquilles de bivalves (n=45). Les organismes calcifiés ont tous fait l'objet de vérification par cathodoluminescence pour éliminer les effets de recristallisations tardives (Tramoy *et al.* 2012). Les valeurs en $\delta^{18}\text{O}$ et en $\delta^{13}\text{C}$ sont caractéristiques des carbonates marins au Jurassique, aucune corrélation n'est observée entre les deux signaux isotopiques ou avec la teneur en carbonate.

Ces recherches sont basées sur l'acquisition de données de géochimie isotopique à haute résolution. Les mesures ont été réalisées sur la roche totale pour le $\delta^{18}\text{O}$ et le $\delta^{13}\text{C}$ (n=224) ainsi que sur la phase calcique à partir de rostrés de bélemnites (n=23) et de coquilles de bivalves (n=45). Les organismes calcifiés ont tous fait l'objet de vérification par cathodoluminescence pour éliminer les effets de recristallisations tardives (Tramoy *et al.* 2012). Les valeurs en $\delta^{18}\text{O}$ et en $\delta^{13}\text{C}$ sont caractéristiques des carbonates marins au Jurassique, aucune corrélation n'est observée entre les deux signaux isotopiques ou avec la teneur en carbonate.

Globalement, les résultats obtenus sont en accord avec les études attestant de perturbations climatiques au cours de cette période, avec un optimum climatique au Callovien moyen et une diminution nette des températures de l'eau de mer à partir de la zone à *Athleta* jusqu'à la base de l'Oxfordien inférieur. Les données étant plus denses que celles des travaux antérieurs, il est possible de proposer un calendrier précis des événements climatiques au passage Jurassique moyen à Jurassique supérieur.

La limite supérieure du Callovo-Oxfordien avait été définie, dès les résultats de 1995-1996, par une surface dite de « non-conformité » marquant un changement de contexte sédimentaire (arrivée d'environnements péri-récifaux). Les marnes sus-jacentes au Callovo-Oxfordien n'étaient donc pas prises en compte dans les évaluations de sûreté bien que leur partie inférieure, sur une épaisseur variant de 7 à 16 mètres, ait des propriétés de confinement, notamment la perméabilité, analogues à celles des argilites. L'épaisseur de ce faciès sédimentaire est de plusieurs mètres à l'ouest de la ZT, elle diminue jusqu'à être nulle vers l'est, conformément au contexte paléogéographique de cette période.

Sur la ZIRA, l'analyse des impédances sismiques (voir ci-dessous) des 50 mètres situés au-dessus du toit du Callovo-Oxfordien confirme l'existence et la continuité en 3 dimensions de ce niveau, avec une épaisseur estimée de dix à douze mètres et des propriétés en impédances comparables à celles du Callovo-Oxfordien. Ces résultats apportent une meilleure représentation du modèle géologique conceptuel et, en conséquence, des réponses pour la préparation des analyses de performance et de sûreté à long terme du stockage.

3.2.2 Une sismique réflexion haute résolution pour préparer le stockage profond

Sur les 30 km² de la ZIRA, la sismique réflexion haute résolution en trois dimensions a été enregistrée de la mi-mai à fin juillet 2010. Son objectif était double : ① géométrique, affiner le modèle structural de la zone et, en particulier, vérifier qu'elle est exempte de failles susceptibles de remettre en cause la localisation du stockage ; ② pétro-physique, mettre en évidence les variations de propriétés du Callovo-Oxfordien et de ses encaissants.

L'ensemble des traitements de la sismique 3D sur la ZIRA a été réalisé à la suite de l'acquisition, avec, dans un premier temps, les phases habituelles aboutissant à l'édition de surfaces en temps et en profondeur, puis, dans un second temps, des traitements en inversion fournissant une image des impédances² acoustiques des formations.

Les interprétations structurales de cette campagne sismique 3D ont confirmé la régularité de la géométrie de la couche du Callovo-Oxfordien et l'absence de failles d'un rejet vertical supérieur ou égal à 2 mètres (figure 5). Le pendage de la formation est faible (1,1°) et régulier vers le nord-ouest avec des variations limitées, conforme à la structuration générale des formations géologiques dans la région.

Cette géophysique a également montré que les anomalies et structures observées dans les formations encaissantes (Trias, Dogger et Oxfordien calcaire) sont d'origine sédimentaire. C'est ainsi qu'à grande profondeur, des phénomènes de dissolution de couches salifères au niveau du Keuper (Trias supérieur) sont à l'origine de la création d'une cuvette d'environ 20 à 30 mètres de profondeur, 1 km de large et 2 km de long. Cette dissolution s'étant produite juste après le dépôt du sel, la formation sédimentaire du Lias aplanit cette dépression en la comblant.

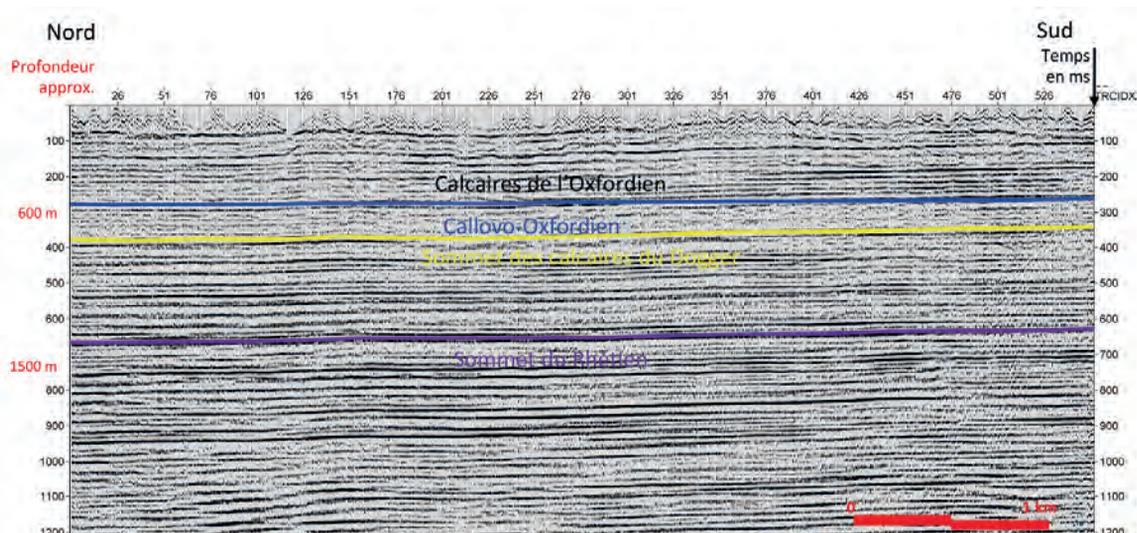


Figure 5 - Extrait de la sismique 3D sur la ZIRA

²L'impédance acoustique est le produit de la vitesse des ondes sismiques par la densité de la roche traversée.

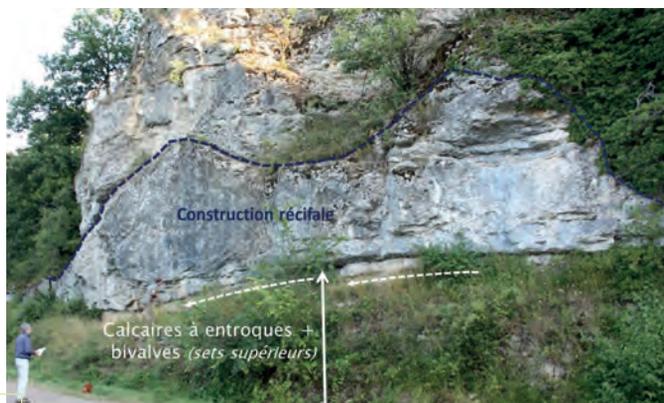


Figure 6 - Formation récifale de Circourt (Vosges)

De même, la présence de récifs décimétriques a été mise en évidence à la base du Bajocien, ces constructions sont connues à l'affleurement plus au sud-est du secteur (figure 6).

Une construction récifale identique a été détectée dans les calcaires de l'Oxfordien, au-dessus de la formation argileuse, elle forme une structure allongée de plus de 2 kilomètres de long selon une direction nord-est.

Tous ces résultats, et les interprétations qui en résultent, s'intègrent et sont cohérents avec le cadre géologique reconnu régionalement.

3.2.3 Modéliser en 3 dimensions la formation du Callovo-Oxfordien

Les données complémentaires acquises sur la ZT, en particulier les résultats provenant du forage profond au Trias, et ceux de la sismique 3D sur la ZIRA, ont été utilisées pour améliorer la représentation de la géométrie du Callovo-Oxfordien, avec un focus sur l'emprise prévue pour le stockage en milieu géologique profond, à une échelle compatible avec les dimensions des ouvrages souterrains.

À l'échelle de la ZT, les modélisations de paramètres pétro-physiques dans le Callovo-Oxfordien réalisées en 2010 ont confirmé les évolutions verticales et latérales très progressives des propriétés en cohérence avec celles observées et mesurées en forages.

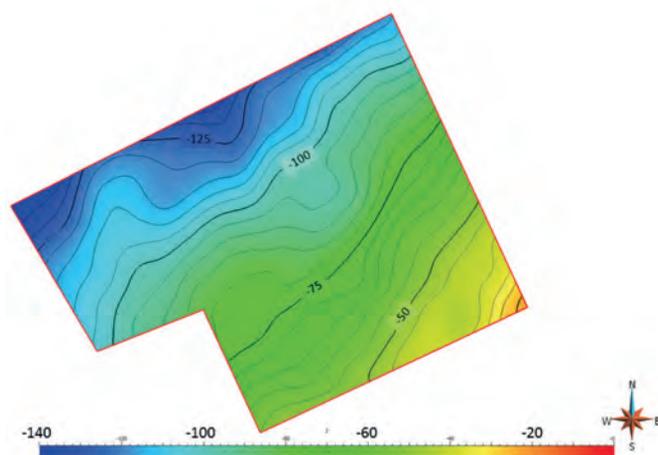


Figure 7a - Carte des isohypses du toit du Callovo-Oxfordien sur la ZIRA - Équidistance des courbes : 5 mètres

Sur la ZIRA, les surfaces des limites des formations géologiques et de leurs unités sédimentaires internes ont été numérisées et représentées en trois dimensions pour obtenir leurs altitudes en tout point de la zone (figure 7a), leur pendage et leurs épaisseurs avec les incertitudes associées. L'épaisseur du Callovo-Oxfordien est confirmée et précisée, elle croît d'ouest en est de 142 à 162 mètres (figure 7b). Les valeurs sont obtenues à quelques mètres près, seuls des forages complémentaires sur la ZIRA permettront d'en réduire les incertitudes.

Ce modèle géométrique 3D a servi à positionner et visualiser différentes esquisses d'implantation du stockage dans la formation du Callovo-Oxfordien en fonction de plusieurs critères géométriques. Ce travail, en support aux études de conception du projet Cigéo, a été utilisé pour faire des évaluations comparées des solutions d'esquisse sur le plan de la phénoménologie et de l'analyse de sûreté après-fermeture.

De nouvelles méthodes de traitement du signal sismique (Garcia H. *et al.* 2011 ; Mari J.L. & Yven B. 2012) ont été développées. Plusieurs paramètres pétro-physiques, dont la porosité, le coefficient de diffusion et la perméabilité du Callovo-Oxfordien ont été estimés sur la base des données d'impédances acoustiques issues du bloc sismique 3D afin de caractériser leurs variations au sein de la ZIRA.

Cette analyse multi-paramètres et multi-échelles a été la base d'une représentation conceptuelle du Callovo-Oxfordien en unités géologiques homogènes caractérisées par des propriétés minéralogiques et pétro-physiques qui la distinguent des autres unités. Cette représentation, pour le Callovo-Oxfordien, constitue à ce jour le cadre le plus approprié pour l'analyse de la variabilité spatiale de tout paramètre lié aux différents processus impliqués dans le stockage.

La variabilité des paramètres (porosité totale, densité, propriétés thermiques et hydro-dispersives, paramètres mécaniques élastiques) sur la ZIRA est quantitativement limitée. Elle obéit aux mêmes tendances qu'à l'échelle de la ZT, le modèle géologique conceptuel en est ainsi renforcé. Il résulte de cette modélisation une visualisation de la position et de l'épaisseur de la zone plus argileuse au milieu de la formation du Callovo-Oxfordien par rapport aux unités plus silteuses et/ou carbonatées. Au sein de l'unité médiane, la plus argileuse, il n'existe aucune différenciation verticale nette.

Ces résultats vont alimenter les modèles et données pour l'analyse de sûreté à réaliser en vue de la DAC. La prochaine étape d'amélioration du modèle géologique de la ZIRA prendra en compte les informations recueillies avec les expérimentations en cours dans le Laboratoire souterrain et les résultats des forages complémentaires prévus avant la création du stockage.

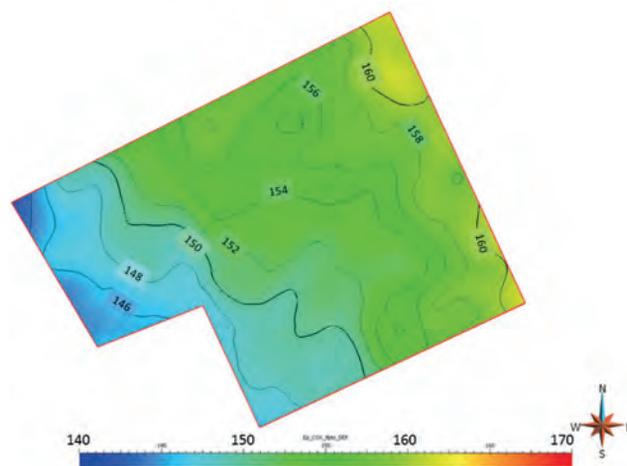


Figure 7b - Carte des isopaques du Callovo-Oxfordien sur la ZIRA - Équidistance des courbes : 2 mètres

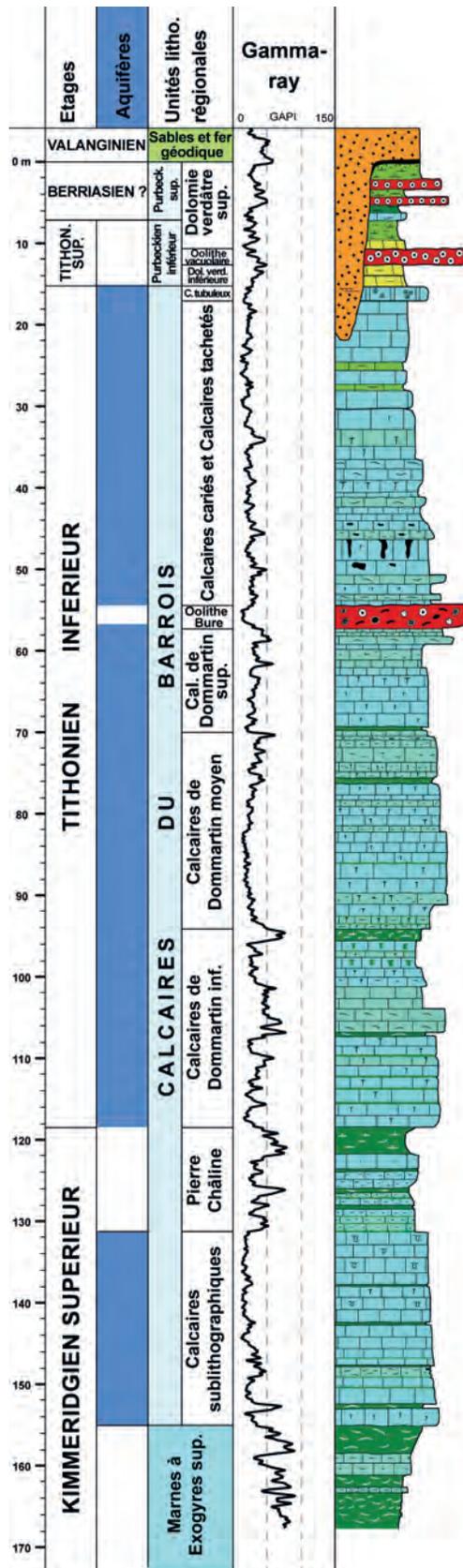


Figure 8 - Log géologique simplifié

3.2.4 Les calcaires du Barrois et l'hydrogéologie de surface

Sur l'essentiel de la Zone de Transpositionaffleure la formation des calcaires du Barrois datée du Tithonien, dont le sommet est une surface d'érosion continentale polygénique karstifiée infra-Crétacé. Dans la partie sud-est de la ZT apparaissent les marnes du Kimméridgien, qui jouent un rôle de limite étanche quand elles passent sous l'aquifère superficiel des Calcaires du Barrois. En extrémité nord de la ZT, les calcaires du Barrois, qui atteignent plus de 130 mètres d'épaisseur quand la série est complète, sont recouverts localement de placages de sables et argiles du Crétacé inférieur.

Dès le début des recherches en 1994, l'Andra a engagé des études sur l'hydrogéologie de cette formation. Il s'est agi, dans un premier temps, de rassembler les acquis disponibles dans les bases existantes (banque de données du sous-sol, ou relevés de traçage, par exemple), puis d'y ajouter les observations géologiques sur le terrain et les résultats obtenus dans les forages au fur et à mesure des investigations de l'Andra : campagnes de 1994 à 2004 sur un secteur élargi, et de 2007 et 2008 sur le secteur plus restreint des 250 km² de la ZT.

Des équipements spécifiques, tels que des piézomètres-thermomètres installés dans des forages courts de 1996 et 2000, ou une station limnimétrique mise en place en 2002 sur un des cours d'eau locaux pour en mesurer le débit, la température et la conductivité électrique, complètent le dispositif d'acquisition de données.

Les résultats recueillis avaient permis d'établir un modèle géologique et de connaître globalement les caractéristiques du fonctionnement hydrogéologique de la formation.

En 2009, avec le positionnement géographique de la ZIRA, préfigurant l'emplacement du stockage géologique profond, et des zones possibles pour les installations de surface, il devenait nécessaire de préciser le fonctionnement hydrogéologique karstique de ces calcaires du Barrois.

Les 19 forages courts réalisés en 2010 dans le cadre de la campagne de sismique 3D sur la ZIRA ont fait l'objet de mesures sismiques et d'enregistrements diagaphiques (GR, diamètreur, résistivité). Trois d'entre eux ont été partiellement carottés et la concaténation des résultats recueillis a permis d'établir un log détaillé de la formation connue jusqu'alors essentiellement par des observations ponctuelles et discontinues faites lors de la cartographie géologique du secteur.

Par ailleurs, ces ouvrages ont été équipés pour un suivi de température, conductivité électrique et niveau de l'eau. Parallèlement, a été réalisée une étude de la variation spatiale des débits des cours d'eau sur l'interfluve Marne - Meuse.

L'analyse de ces données complémentaires et la synthèse des acquis fournissent une vision d'ensemble de la formation des Calcaires du Barrois sur la ZT et un modèle conceptuel géologique plus précis sur la ZIRA. Celui-ci est renforcé par la création d'un modèle géométrique numérique établi à l'aide des corrélations entre les nombreux forages courts, modèle qui est à la base des réflexions sur le fonctionnement hydrogéologique de cette formation.

Ces résultats seront utiles au projet Cigéo pour positionner les installations de surface hors des zones inondables et implanter les liaisons jour - fond à l'écart des arrivées d'eau d'origine karstique. Ils sont également une source d'informations pour l'OPE pour tout ce qui concerne les aspects hydrauliques de surface.

La structure géologique de la formation a pour conséquences de créer 3 niveaux aquifères (calcaires sub-lithographiques à la base, calcaires de Dommartin, calcaires cariés, au sommet) séparés par des niveaux imperméables ou semi-perméables (la Pierre Châline, qui est un niveau marneux continu de 12 m d'épaisseur, et l'Oolithe de Bure, niveau calcaire d'épaisseur variant entre 0 et 2 m) (figure 8).

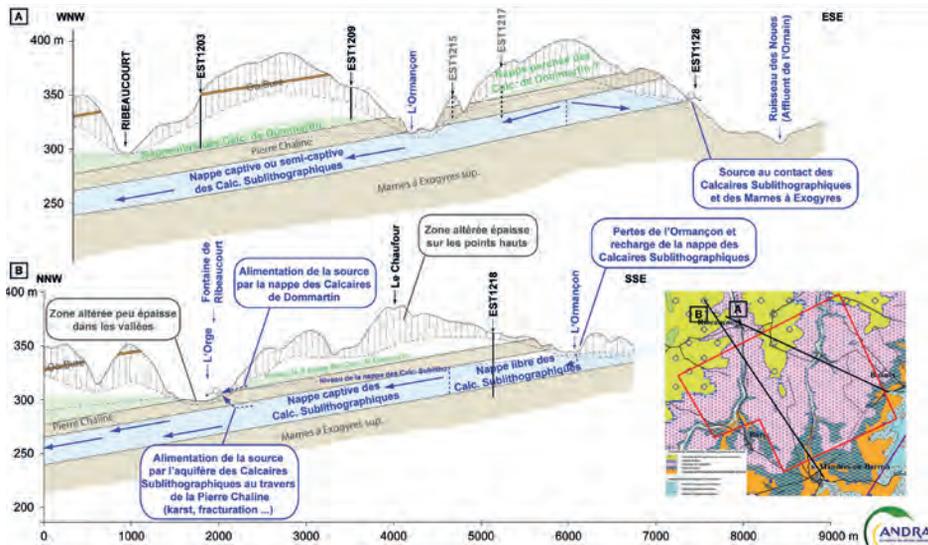


Figure 9 - Modèle hydrogéologique des calcaires du Barrois sur la ZIRA

Les Calcaires du Barrois sont le siège d'une karstification généralisée et localement intense. Celle-ci a deux origines : ① la fracturation héritée des périodes glaciaires qui peut avoir pénétré les calcaires sur une trentaine de mètres d'épaisseur environ ② la présence d'une couverture Crétacé au nord et nord-ouest où le karst est clairement développé en particulier dans les calcaires cariés et les calcaires de Dommartin, la Pierre Châline constituant une barrière au développement vertical du karst.

La formation est très peu perméable à sa base lorsqu'elle n'est pas affectée d'altérations météoriques alors que dans les zones plus carbonatées, la perméabilité peut être plus importante voire élevée lorsque les calcaires sont fracturés. Ils sont alors le siège de circulations rapides de la surface vers la zone saturée.

Les calcaires sub-lithographiques sont parfois captifs sous la Pierre Châline alors que les calcaires cariés peuvent constituer un aquifère perché par rapport à l'aquifère des calcaires de Dommartin, en raison de la présence de l'Oolithe de Bure. L'écoulement général de la nappe est dirigé vers le nord au centre de la zone, puis vers le nord-ouest au nord, il est

contraint par la direction d'écoulement des vallées en surface. Le régime hydrologique des cours d'eau est très lié au niveau de la surface piézométrique créant des zones de pertes et des zones de gain et de ruissellement lorsque l'aquifère est affleurant au niveau des fonds de vallées. Il est possible que les sens d'écoulement varient dans le temps en fonction du niveau de la nappe, et ces circulations karstiques pourraient créer des transferts entre bassins versants topographiques.

Au droit de la ZIRA, seuls les aquifères des calcaires sub-lithographiques et des calcaires de Dommartin inférieur et moyen sont présents, les formations sus-jacentes constituent des zones désaturées sur les points hauts (figure 9).

D'un point de vue paléogéographie, ce travail a été complété par deux études sur la transition Jurassique/Crétacé représentée par les calcaires du Barrois et les formations purbeckiennes. L'une s'est intéressée à la sédimentologie et la diagenèse (Brigaud B. *et al.* 2011), l'autre au contexte paléo-climatique de cette époque (Gigoux M. *et al.* 2011). Les teneurs en $\delta^{18}O$ de calcite de coquilles de bivalves et des cortèges argileux suggèrent une chute des températures entre le Kimméridgien supérieur et le Tithonien inférieur et une aridification du climat de plus en plus marquée durant le Tithonien supérieur.

3.3 Le Laboratoire souterrain, outil de dimensionnement du stockage profond

Un des objectifs initiaux du Laboratoire souterrain de recherche (voir bilan précédent « 2006-2009 - 4 ans de recherches scientifiques à l'Andra pour les projets de stockage ») était d'obtenir les valeurs et caractéristiques les plus représentatives possibles des propriétés du Callovo-Oxfordien (Zone « caractérisation des propriétés » sur figure 10). Avec l'évolution des connaissances et le développement du projet Cigéo, le Laboratoire souterrain devient également un outil de dimensionnement du futur stockage en milieu géologique profond.

C'est ainsi que plusieurs expériences technologiques sont en cours dans le Laboratoire souterrain, chacune d'elles ayant une zone dédiée (figure 10).

Des simulations numériques sont couplées à la quasi-totalité de ces expérimentations afin de préparer l'essai au mieux (par exemple, quelle doit être sa durée prévisionnelle vu les propriétés connues de la roche ?).

A *contrario*, cette association permet de caler les lois de comportement en comparant les données recueillies aux résultats de la modélisation. Le modèle ainsi obtenu est utilisé pour les calculs de sûreté et la conception des ouvrages souterrains.

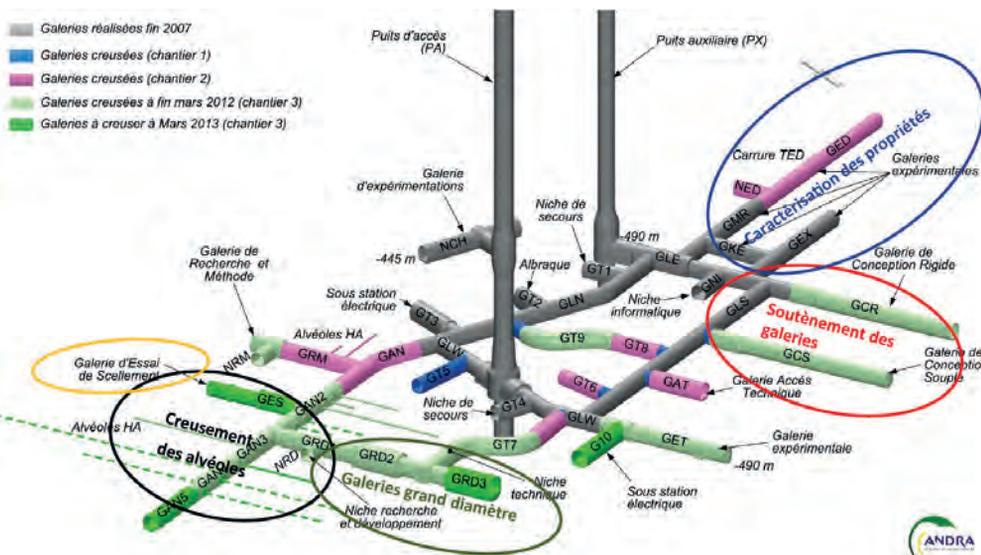


Figure 10 - Plan du Laboratoire souterrain à fin 2012, avec localisation des zones dédiées aux recherches

3 | Préparer la construction du futur stockage profond dans son contexte géologique

3.3.1 Les essais de creusement-soutènement

Parmi les nombreux essais de dimensionnement, les premiers concernent le « soutènement des galeries ». Deux techniques ont été comparées, l'une souple, l'autre rigide. Toutes deux sont instrumentées pour suivre les déformations et les évolutions de la pression de pore dans le terrain, ainsi que les contraintes et déformations dans le soutènement.

Dans la suite de ces deux essais, a été engagé un test de soutènement pas béton projeté épais dans la zone de « galeries en grand diamètre » (GRD2). Il s'agissait d'évaluer le comportement hydromécanique d'une galerie de 6,3 m de diamètre excavé et recouverte d'un revêtement de 45 cm d'épaisseur de béton projeté rapidement dès l'excavation. Un scan en 3 dimensions était réalisé à chaque travée d'un mètre.

D'un point de vue technologique, il faut retenir que ce revêtement posé à l'avancement réagit rapidement, avec une évolution des contraintes et déformations lors de la phase de creusement. À la fin de l'année 2012, l'évolution du système (roche plus béton) était toujours en cours, l'analyse des différentes mesures se poursuit donc, ainsi que les modélisations destinées à représenter le comportement du béton projeté, lorsqu'il est jeune puis lors de sa maturation.

Dans la même zone, une autre galerie grand-diamètre (GRD3) a été réalisée pour préparer le creusement des argilites au moyen d'un tunnelier afin d'évaluer la faisabilité de la mise en place du soutènement à l'avancement derrière ce type d'engin. Cette galerie étant terminée à la fin de l'année 2012, le montage du tunnelier était en cours début 2013.

Enfin, la « galerie d'essai de scellement » (GES) est destinée à accueillir un essai de scellement de galerie (figure 11). Il est prévu, actuellement, que la fermeture des galeries du stockage, lorsque la décision sera prise, se ferait à l'aide d'un bouchon de bentonite.

Cette argile a, en effet, la propriété de gonfler par absorption d'eau, elle appuierait donc sur les parois d'argilite et en refermerait les fissures. L'essai consiste à construire une épaisse cloison en briques de bentonite sèche en comblant les vides avec de la poudre et des pellets de même matériau.

Dans la réalité, l'eau du Callovo-Oxfordien n'imbibera la bentonite qu'après une très longue période. Pour accélérer le phénomène, il est prévu, dans cette expérimentation, de faire arriver l'eau par des forages de faible diamètre et des sections d'hydratation spécialement aménagées entre les murs de bentonite, l'ensemble étant suivi par une série de capteurs (pression, etc.).

3.3.2 Compréhension du comportement des alvéoles HA

Les essais de creusement et d'insertion du chemisage d'une alvéole de stockage des déchets HA à l'échelle 1 ont été entrepris au Laboratoire depuis 2009. Ces expérimentations ont un caractère technologique, non seulement pour démontrer la faisabilité des creusements et de la mise en place du chemisage, mais aussi pour développer et optimiser les outils. L'instrumentation qui leur est associée, mise en place dans la roche et sur les chemisages, est également un apport fondamental pour améliorer la compréhension du comportement Thermo-Hydro-Mécanique (THM) de ces alvéoles.

Une des questions importantes concerne, en effet, le chargement subi par le chemisage afin d'en dimensionner l'épaisseur et d'en choisir le matériau métallique le mieux adapté. Les essais *in situ* ont été accompagnés par des essais à échelle réduite sur des tubages mis en place dans des forages horizontaux de diamètre 148 mm et de 10 m de long. Ces tests permettent de réduire le vide annulaire initial et donc d'observer plus rapidement le chargement des tubages.

Le concept de référence des alvéoles HA prévoit de les orienter suivant la contrainte horizontale majeure (σ_H), alors que la contrainte horizontale mineure et la contrainte verticale sont égales. Les essais ont donc été réalisés préférentiellement dans la direction de σ_H . Des mesures de déformation par jauge et des mesures de convergence ont été mises en place dans les tubages.

Des déformations apparaissent rapidement dans le tubage avec une convergence dans la direction horizontale qui engendre son ovalisation dans la direction verticale car le tubage n'est pas en contact avec la paroi en voûte. Ce résultat est dû, non pas au champ de contraintes, mais à l'anisotropie du comportement mécanique des argilites, celles-ci ayant une résistance à la traction légèrement inférieure selon la verticale par rapport à l'horizontale.

Ces déformations sont cohérentes avec celles observées dans les galeries où les vitesses de convergence sont plus importantes horizontalement que verticalement pour les ouvrages orientés selon σ_H .

À partir des déformations mesurées, il est possible de calculer l'état de contrainte appliquée au chemisage, mais la non-unicité de la solution mathématique du problème ne permet pas de déduire facilement les pressions appliquées.

Pour cette raison, un essai de mesure directe de la pression à l'extrados du chemisage est développé actuellement avec un tapis sensitif collé à la surface du tubage.

Deux phénomènes se produisent à l'extrados du chemisage, ① la convergence du terrain liée à son comportement différé et ② l'arrivée d'eau porale, liée au gradient hydraulique autour de l'alvéole. Tous deux peuvent avoir un impact sur la pression appliquée sur le tubage.

Au vu des résultats obtenus à ce jour et dans la gamme des vides annulaires testée, la convergence du terrain est l'élément majeur qui explique le chargement à court terme du chemisage.

L'essai de chauffe d'une alvéole mis en place fin 2012 (voir encadré ci-contre) est la suite logique du programme pour évaluer l'impact de la thermique sur le comportement de l'alvéole que ce soit dans la roche, à l'annulaire chemisage/roche et dans le chemisage.

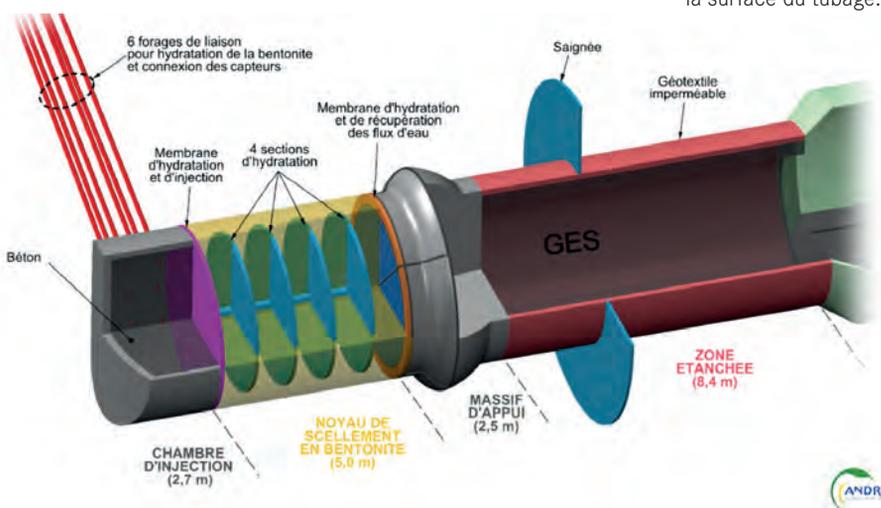


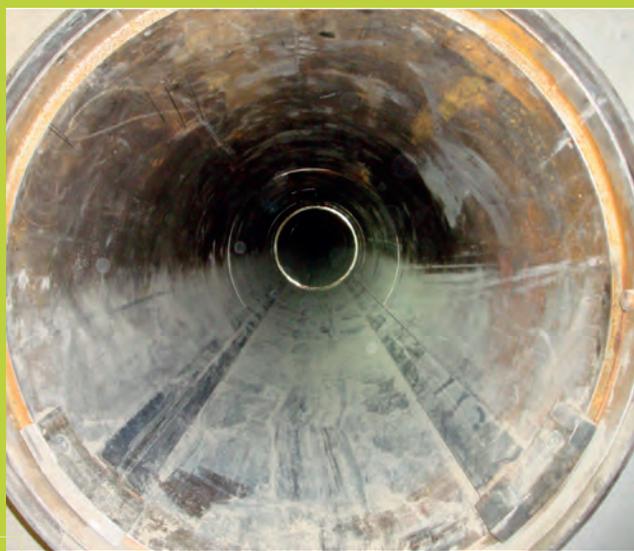
Figure 11 - Schéma de principe de l'essai de scellement

Exemple d'une expérimentation récemment installée

Reproduction à l'échelle 1 d'une future alvéole de stockage de déchets HA

L'Andra a déjà réalisé deux expérimentations de chauffe dans le Laboratoire souterrain : la première, lancée fin 2005 et terminée en 2010, avait pour objectif d'étudier les propriétés thermiques et le comportement des argilites, par l'intermédiaire d'un corps chauffant installé dans un forage. La seconde, débutée fin 2009 et toujours en cours, a pour but de confirmer les observations réalisées précédemment et d'étudier l'effet de la superposition de champs thermiques créée par 3 sondes chauffantes placées dans 3 forages parallèles, reproduisant à échelle réduite le dégagement de chaleur généré par les déchets HA.

Dans le cadre de la nouvelle expérimentation, l'alvéole creusée fin 2012 est destinée à étudier le comportement d'une alvéole de stockage de déchets HA sous sollicitation thermique à échelle réelle.



Alvéole à la fin du creusement



Plaque de fond installée

Cet essai répond à des objectifs à la fois de démonstration de la réalisation et du fonctionnement d'une alvéole HA, mais aussi de compréhension du comportement THM de la roche avoisinante et du rôle du vide annulaire initial, notamment en termes d'élévation de la pression induite par la phase de chauffe. Le suivi de l'évolution des contraintes mécanique et thermique dans le chemisage est un autre des objectifs majeurs de l'expérimentation qui fournira des données d'entrée importantes pour le dimensionnement de l'épaisseur des chemisages.

En outre, les données acquises pourront être comparées aux résultats obtenus avec les simulations numériques basées sur les modèles THM définis dans les expérimentations précédentes réalisées à plus petite échelle. Cet essai de chauffe en alvéole contribuera ainsi à vérifier la capacité de ces modèles à représenter le comportement des argilites en champ « lointain », en lien avec le comportement de l'interface roche/chemisage.

Pour répondre à ces objectifs, une alvéole de 775 mm de diamètre a été forée à l'horizontale sur une longueur de 25 mètres en octobre 2012, avec les 6 mètres de la tête d'alvéole destinés à tester le fonctionnement de l'insert métallique, et les 19 mètres restants réservés à la partie utile, dont 15 mètres proprement dits pour le système de chauffe. L'insert métallique de 35 mm d'épaisseur avec un diamètre intérieur utile de 705 mm a été introduit à l'avancement.

Cet « essai de démonstration » de la mise en place et du fonctionnement d'une alvéole fait partie du projet LUCOEX (Large Underground COnccept EXperiment) établi dans le cadre du Vile PCRD.

Les étapes qui ont suivi ont été :

- un scanner 3D de l'alvéole ;
- la pose d'une plaque de fond et des liaisons de chemises pour assurer la rigidité du chemisage en vue de l'étude de son comportement thermomécanique ;
- la réalisation et l'équipement de forages périphériques pour mesures de température, pression interstitielle et perméabilité ;
- le démarrage de l'instrumentation de l'alvéole. ■



Mise en place de l'élément chauffant dans l'alvéole à l'aide de rails de guidage

3 | Préparer la construction du futur stockage profond dans son contexte géologique

3.3.3 Caractérisation et suivi du Callovo-Oxfordien à l'échelle du laboratoire

Le futur stockage en milieu géologique profond s'étendra sur une très grande surface, avec des galeries de plusieurs kilomètres de long. Au-delà d'une localisation topographique, il sera nécessaire de pouvoir se repérer stratigraphiquement au sein de la formation argileuse de façon à se positionner par rapport à son toit et son mur. De même, il sera indispensable de détecter toute structure tectonique éventuelle recoupée par un ouvrage souterrain et de vérifier la conformité des modèles d'EDZ avec la fissuration induite par les creusements observée à l'avancement. Les relevés géologiques effectués depuis de nombreuses années au sein du Laboratoire souterrain peuvent préparer à ces objectifs.

D'un point de vue sédimentaire, plusieurs niveaux bioturbés et carbonatés sont très précisément suivis dans les différentes galeries, dont notamment le niveau repère à bioturbation médian. Son toit, objet de relevés topographiques systématiques, permet ainsi de confirmer le faible pendage de la formation, inférieure à 1° vers le NW (figure 12).

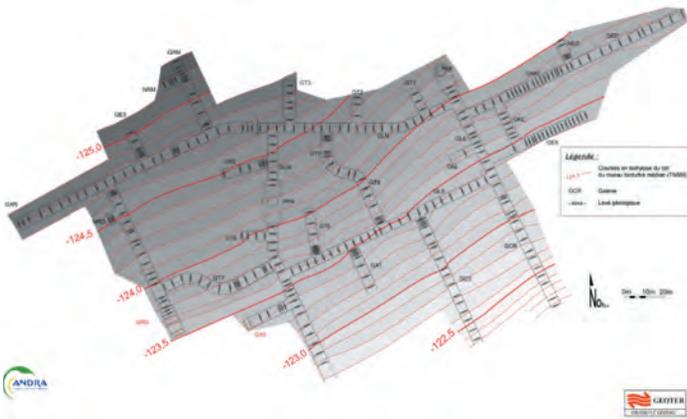


Figure 12 - Topographie du niveau repère médian dans le Laboratoire souterrain

Du point de vue structural, les levés géologiques par scanner-laser des fronts de taille et surtout le suivi des forages réalisés dans la carrière d'une galerie ont permis pour la première fois de connecter les structures observées en galerie à celles observées en forage. La grande densité des forages et l'utilisation systématique des diagraphies par caméra optique ont fourni des données fiables sur les fissures affectant le massif argileux.

Il en résulte une bonne vision en trois dimensions et un modèle cohérent du développement de la fracturation induite par le creusement des galeries orientées N155°E.

De plus, le levé des fronts de la galerie où a été réalisée une des alvéoles de stockage a été utilisé pour appréhender l'extension de la fracturation induite autour des ouvrages. L'extension latérale mesurée de la fracturation se situe à environ 1,10 à 1,20 diamètre d'alvéole.

Références bibliographiques

BLAISE T. (2012) Histoire thermique et interactions fluides-roches dans l'Est du Bassin de Paris Thèse université de Lorraine – Nancy, soutenue le 03 décembre 2012, à paraître.

CARPENTIER *et al.* - Diagenesis of carbonates aquifers on both sides of a thick clay formation: Example of the Jurassic of the eastern Paris Basin (North-East France) – prévu pour Marine and Petroleum Geology.

CROS A. (2012) Influence des propriétés cristalochimiques de la calcite sur la diffusion de l'hélium et essai de datation UTh-Sm) / He de calcite filonienne et de remplissage de brèche. Thèse Université Paris Sud, 148 p.

HURET E. & TROUILLER A. (2012) Élaboration d'un modèle géologique conceptuel – Exemple du Callovo-Oxfordien de l'Est du Bassin de Paris. Géochronique, n° 122, 39-42.

MARI J.L., and YVEN B. Detection of permeable bodies: from laboratory measurements to seismic measurements in "Hydraulic Conductivity", Publisher: Intech, to be published in 2012.

MARI J.L., YVEN B. (2012) Depth geological model building: application to the 3D high resolution "Andra" seismic block, Clays in Natural and Engineered Barriers for radioactive Waste Confinement, 22-25 Octobre 2012, Montpellier, France.

PISAPIA C., DESCHAMPS P., HAMELIN B., BATTANI A. & BUSCHAERT S. (2011) – New insights on U/Pb dating of secondary geodic calcites : Implications on the paleohydrogeology of the Eastern Part of the Paris Basin. Mineralogical Magazine (75(3)), 1647. (V.M. Goldschmidt'11).

PLOQUIN F. (2011) Argiles, traceurs de paléoconditions diagenétiques et hydrothermales. Recherche des évidences minéralogiques et géochimiques de l'hydrothermalisme dans les formations diagenétiques argileuses, gréseuses et carbonatées du Trias du Bassin parisien. Thèse université de Poitiers, soutenue le 9 décembre 2011.

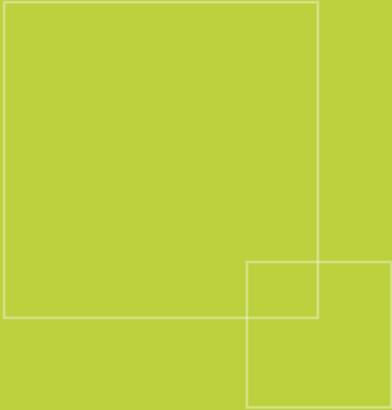
THIERRY J., FORTWENGLER D., MARCHAND D., BONNOT A., GUILLEMOT D., HURET E. & YVEN B. (2010) Détermination des ammonites et calibrages bio-chronostratigraphique des argilites du Callovién-Oxfordien dans les forages carottés Andra. Secteur de Meuse-Haute-Marne, Est du Bassin de Paris. Réunion des Sciences de la Terre ; 25-29 octobre 2010, Bordeaux, France.

TRAMOY R, PELLENARD P., PUCEAT E., HURET E., MARTINEZ M., BRUNEAU L, THIERRY J. (2012) L'évolution du cycle du carbone et des paléotempératures à la transition Jurassique moyen-supérieur. Présentation Journée thématique du Groupe Français du Jurassique, novembre 2012.

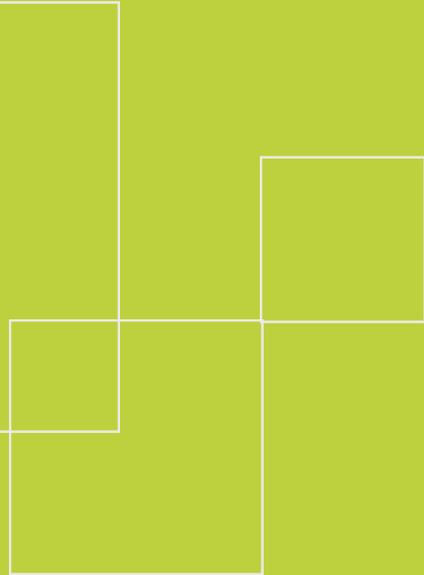
YVEN B., CHANVIN LAAOUISSI A. (2010) Modélisation 3D des formations du Jurassique sur le Secteur de Meuse / Haute-Marne (Est du bassin de Paris) : Objectifs, Démarche et Résultats. Réunion des Sciences de la Terre ; 25-29 octobre 2010, Bordeaux, France.



Vue arrière du tunnelier dans le Laboratoire souterrain



4. Concevoir l'évolution d'un stockage dans son environnement



Le stockage en milieu géologique profond a pour but d'isoler les déchets HA et MA-VL de la biosphère sur de très longues périodes de temps, suffisantes pour que la radioactivité ait diminué jusqu'à des niveaux équivalents, voire inférieurs, à celui de la radioactivité naturelle. Il n'en demeure pas moins qu'il est nécessaire de répondre, pour les analyses de sûreté, à la question : « *Quelle sera l'évolution prévisible du stockage sur le long terme ?* ».

4 | Concevoir l'évolution d'un stockage dans son environnement

Le stockage en milieu géologique profond a pour but d'isoler les déchets HA et MA-VL de la biosphère sur de très longues périodes de temps, suffisantes pour que la radioactivité ait diminué jusqu'à des niveaux équivalents, voire inférieurs, à celle de la radioactivité naturelle. Il n'en demeure pas moins qu'il est nécessaire de répondre, pour les analyses de sûreté, à la question : « *Quelle sera l'évolution prévisible du stockage sur le long terme ?* ». Cette interrogation amène à considérer d'une part les phénomènes qui seront engendrés au sein du stockage et du milieu géologique et, d'autre part, ceux qui se produiront en surface (sols et biosphère).

4.1 Les effets de la perturbation oxydante

La création de galeries et d'alvéoles dans la formation du Callovo-Oxfordien va introduire de l'oxygène dans l'argilite. Pour déterminer les réactions chimiques induites par cet apport, une expérimentation, dite « POX¹ », est en cours depuis plusieurs années dans le Laboratoire souterrain afin d'évaluer les quantités d'oxygène consommées par la roche en fonction du temps. Par voie de conséquence, il s'agit d'estimer les effets de cette consommation sur la composition de l'eau contenue dans les pores de l'argilite (Vinsot *et al.* 2012).

Le concept expérimental consiste à faire circuler, au contact de la formation d'argilite, un mélange de gaz contenant de l'oxygène à partir d'un forage vertical montant dans une galerie du Laboratoire. Ce dispositif permet de recueillir, dans le forage, l'eau porale produite par la roche.

Dans un premier temps, des injections ponctuelles d'oxygène ont été réalisées pour atteindre une teneur voisine de celle de l'air dans le gaz circulant dans le forage. L'oxygène avait totalement disparu quelques jours après le début de l'expérimentation, il avait réagi avec la roche et été entièrement consommé.

Puis, pendant plus de 6 mois, l'oxygène a été introduit en continu dans le forage à un débit contrôlé pour maintenir une concentration en oxygène voisine de celle de l'air dans le gaz circulant.

L'injection d'oxygène a été interrompue le 14 décembre 2012 ; à cette date, un total d'environ 3 moles d'oxygène avait été injecté dans le forage (figure 1). Peu de temps après l'arrêt, la pression partielle d'O₂ dans le gaz a diminué, le temps de disparition de l'oxygène a été d'environ 30 jours (figure 2), soit équivalent à ce qui avait été observé lors d'un précédent arrêt 6 mois plus tôt (injection 1), mais sur une durée dix fois plus longue.

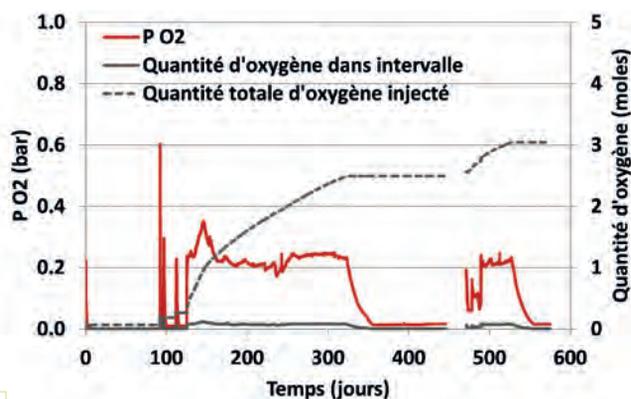


Figure 1 - Évolution de la pression partielle et de la quantité d'oxygène (en moles) dans le gaz circulant dans le forage POX1201 ; quantité cumulée d'oxygène injectée dans le forage depuis le début de l'injection d'oxygène

Après l'injection d'environ 1 mole d'oxygène dans le forage, la salinité et la force ionique de l'eau produite par le forage sont environ deux fois plus élevées que celles de l'eau porale naturelle. Les mesures isotopiques réalisées sur cette eau démontrent que les pyrites mais aussi la matière organique naturelle de la roche ont été oxydées au cours de cette expérimentation, et que des micro-organismes contribuent très probablement à ces réactions.

Par ailleurs, des figures d'oxydation ont été systématiquement recherchées sur les carottes des nouveaux forages réalisés dans le Laboratoire souterrain ; ces traces proviennent généralement de fossiles de terriers, bien visibles à l'œil nu. Il résulte de ces observations que les effets de l'oxydation sont associés aux fractures de la zone endommagée autour des ouvrages dans tous les cas observés (Leveau *et al.* 2012).

D'ores et déjà, les résultats de cette expérimentation ont permis d'évaluer les vitesses initiales de consommation de l'oxygène par la roche et leur évolution sur plus d'un an, et ont démontré que cette consommation entraîne une augmentation de la salinité de l'eau issue de la roche oxydée. Cet essai se poursuit et va donner lieu à des modélisations géochimiques pour confirmer chacun des processus en jeu.

4.2 Les phénomènes de transfert (RN, gaz) au sein du stockage

Les colis de déchets et les matériaux introduits dans les ouvrages de stockage seront à l'origine d'une production de gaz, principalement de l'hydrogène, par corrosion des matériaux métalliques et radiolyse des matières organiques et de l'eau (voir la partie traitant du comportement des éléments constitutifs d'un stockage). Dans le contexte du stockage, la cinétique de production est très lente, et la génération de gaz pourrait perdurer pour certains composants sur une période supérieure à 100 000 ans.

L'évaluation de l'impact de ces gaz sur les ouvrages nécessite une bonne compréhension des mécanismes de leur transfert dans tous les matériaux et plus particulièrement dans les argilites du Callovo-Oxfordien. En effet, l'accessibilité du gaz au volume offert par le milieu géologique aura pour conséquence directe de réduire les quantités accumulées dans les ouvrages et ainsi de maintenir les pressions de gaz dans une gamme de valeurs acceptable.

La propagation du gaz dans les formations argileuses dépend à la fois des conditions thermodynamiques, de l'état de contrainte naturel, de la microstructure du matériau et de la dynamique de production des gaz. Cette thématique est étudiée depuis plusieurs années (voir bilan précédent « 2006-2009 - 4 ans de recherches scientifiques à l'Andra pour les projets de stockage ») selon deux approches complémentaires :

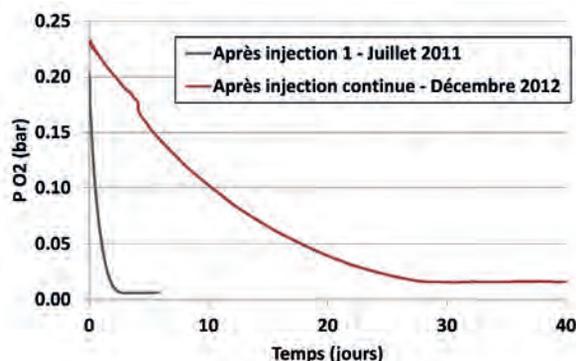


Figure 2 - Évolution de la pression partielle en oxygène du gaz circulant dans le forage POX1201 après des arrêts d'injection d'oxygène en juillet 2011 (injection 1) et en décembre 2012

¹ POX : Perturbation Oxydante

un programme de recherches sur échantillons mené par le groupement de laboratoires « Transfert de Gaz » et des expérimentations *in situ* en Laboratoire souterrain. Le projet européen FORGE (voir le chapitre « La recherche à l'Andra ») aborde également cette question.

Dans le cadre des études menées par le GL « Transfert de Gaz », l'acquisition des propriétés nécessaires à la représentation des écoulements diphasiques au sein des argilites (telles que ❶ la perméabilité au gaz et à l'eau en fonction de la saturation en eau et ❷ la relation entre la pression capillaire et la teneur en eau) a nécessité le développement d'une métrologie particulière adaptée à leur faible perméabilité et à la structure fine de la porosité.

De nombreux essais ont été réalisés sur des échantillons de géométries variées (y compris des échantillons épais pour s'approcher le plus possible de la situation *in situ*) notamment pour évaluer la pression d'entrée de gaz dans l'argilite. Il apparaît que la pression doit atteindre un seuil minimal pour que les écoulements débutent à travers le matériau argiliteux. Une analyse des processus associés à la migration du gaz en milieu saturé a mis en évidence la nécessité de prendre en compte, dans les modèles, le couplage avec l'évolution mécanique du matériau. Cependant, une des questions est de savoir si les chemins de circulation de gaz ont été créés par la pression d'injection du gaz, ou s'ils pré-existaient par endommagement lors de la fabrication de l'échantillon.

Les mesures de la pression d'entrée de gaz dans le matériau sain et endommagé réalisées sur échantillons sont couplées à des expérimentations menées dans le Laboratoire souterrain. La plus importante d'entre elles a consisté à réaliser trois forages, deux d'entre eux pour l'installation de capteurs destinés à des mesures de pressions interstitielles et de déformation, l'autre pour l'injection du gaz. Cette expérimentation a pour but d'observer la pénétration du gaz dans l'argilite saine et dans la zone endommagée par le creusement, et de donner des estimations sur les pressions d'entrée (figure 3) ; elle apporte, en outre, des informations sur les mécanismes de transfert de gaz dans l'argilite initialement saturée en eau.

Les résultats des tests hydrauliques réalisés avant et après les injections de gaz ont montré que les paramètres de la formation (conductivité hydraulique, coefficient d'emmagasinement spécifique) sont inchangés. Ainsi, malgré la durée de l'injection de gaz (14 mois), les propriétés de la roche sont conservées.

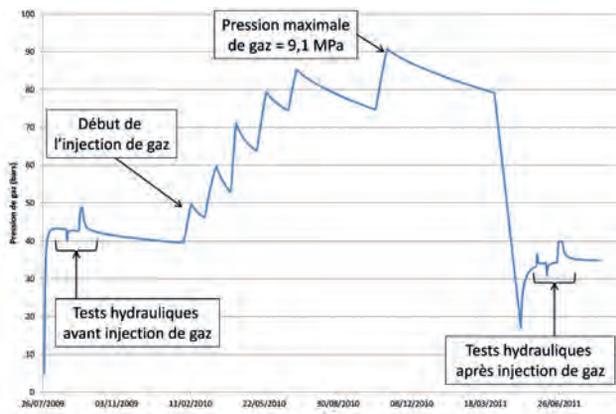


Figure 3 - Pénétration du gaz dans les argilites : Chronique de la première phase de test et évolution de la pression de l'expérimentation en Laboratoire souterrain

Tous ces résultats et observations (dépendance de la pression d'entrée de gaz vis-à-vis du confinement, de la taille des échantillons et des gaz injectés ; réponse hydromécanique du matériau lors de l'invasion du gaz) couplés à une analyse microstructurale de l'argilite et des modèles de réseaux de pores permettent d'améliorer la compréhension des processus physiques associés à la pénétration du gaz dans l'argilite.

4.3 Les transferts de fluides à l'actuel dans le milieu géologique

Les transferts de fluide en milieu géologique profond dépendent, d'une part, de la distribution spatiale des charges hydrauliques et des gradients horizontaux dans les aquifères et verticaux à travers les niveaux très peu perméables (ou « semi-perméables ») et, d'autre part, des propriétés pétro-physiques des formations géologiques qui constituent des systèmes aquifères multicouches.

4.3.1 Les variations de pression dans les forages

Depuis 1995, l'Andra a enregistré les valeurs de pression en forages dans les aquifères du Dogger, de l'Oxfordien et du Tithonien ainsi que dans les formations à dominante argileuse du Kimméridgien et du Callovo-Oxfordien, et en a interprété les réponses pour en déterminer les différentes origines possibles (pression de formation, pression atmosphérique, marées terrestres, etc.). C'est ainsi qu'il a été montré que des variations périodiques de pression, de très faible amplitude, sont liées à des phénomènes de marées terrestres.

Plus récemment, en juin 2012, l'Andra a analysé les données de pression enregistrées dans le forage EST207 situé sur le site du Laboratoire souterrain. Cet ouvrage est équipé d'une complétion multi-obturateurs à 11 chambres positionnées au droit de l'Oxfordien calcaire (1 chambre), du Callovo-Oxfordien (8) et du Dogger (2). La résolution des équipements est telle qu'il est possible de détecter, d'une part, des mouvements de pression dus à des phénomènes de charge et de décharge saisonnières du massif et à des variations non périodiques de la pression atmosphérique et, d'autre part, des fluctuations périodiques de très faibles amplitudes (inférieures à 0,1 kPa).

Ces enregistrements ont mis en évidence que les variations de pression répondent non seulement aux variations atmosphériques, mais aussi aux forces des marées terrestres (figure 4). Celles-ci sont dues à des déformations de l'écorce terrestre sous l'effet des phénomènes gravitaires planétaires et principalement luni-solaires.

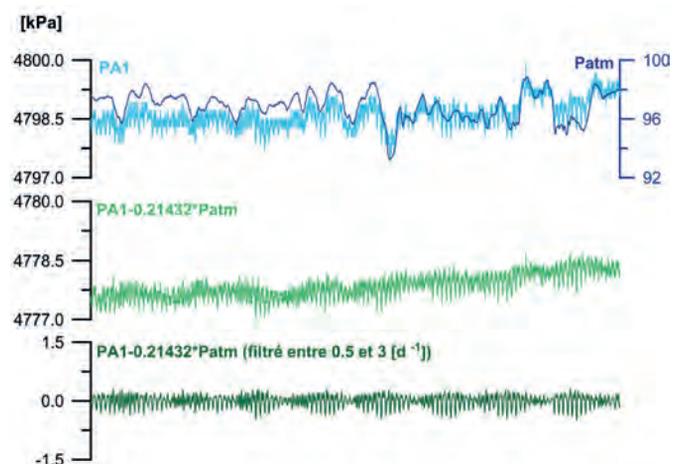


Figure 4 - Exemples de mise en évidence du signal de marées terrestres dans une des chambres

Les analyses de signal ont été effectuées sur les données de pressions avant et après la correction de l'effet des variations de la pression atmosphérique. Ainsi, plusieurs ondes ont été identifiées et caractérisées par leur amplitude et leur phase.

Ces études vont se poursuivre afin de traiter les données supplémentaires acquises sur tous les forages équipés de complétions multi-obturateurs.

4 | Concevoir l'évolution d'un stockage dans son environnement

Il s'agit de continuer ce type d'analyse et de traitement de tous les enregistrements dans les formations calcaires et le Callovo-Oxfordien afin d'estimer la transmissivité et l'emmagasinement des différentes formations. Par cette méthode, d'éventuelles modifications des propriétés hydrogéologiques des formations au cours du temps pourraient être mises en évidence et utilisées pour évaluer les influences hydrauliques du projet de stockage Cigéo.

4.3.2 Les propriétés pétro-physiques des encaissants en 3D, base de la modélisation hydrogéologique

À la suite de la campagne de forages et d'investigation sismique 2D sur la ZT, une réinterprétation conjointe des données lithologiques, des mesures et tests en forages et des profils sismiques 2D a servi à préciser le modèle géologique conceptuel des encaissants calcaires du Callovo-Oxfordien, c'est-à-dire l'Oxfordien et le Dogger du secteur Meuse/Haute-Marne.

Sur la base de cette réactualisation, la géométrie des séquences sédimentaires et de leurs limites internes a été représentée en trois dimensions. À l'intérieur de ce cadre, les variations de faciès sédimentaires et les évolutions verticale et latérale des propriétés pétro-physiques qui leur sont associées, notamment porosité et perméabilité, ont été estimées à l'échelle du secteur.

Pour les calcaires de l'Oxfordien, il s'agissait d'isoler puis d'extraire les données géométriques et pétro-physiques des passées marneuses de l'Oxfordien supérieur et des horizons poreux de l'Oxfordien moyen afin d'affiner la représentation de ces niveaux clés dans l'organisation des écoulements de l'Oxfordien calcaire au nord et à l'est du secteur de Meuse/Haute-Marne.

À titre d'exemple, la « série grise », niveau marneux qui joue un rôle hydrogéologique important, puisqu'il sépare l'aquifère oxfordien en deux unités hydrogéologiques distinctes, a été individualisée et ses caractéristiques ont été mieux définies (figure 5).

De la même façon, les horizons poreux répartis inégalement dans tout l'Oxfordien ont été représentés sur le domaine modélisé. Leurs extensions spatiales et les propriétés pétro-physiques (porosité, perméabilité)

associées résultent d'une modélisation qui intègre l'ensemble des données lithologiques et hydrogéologiques issues des mesures et tests réalisés sur échantillons prélevés sur les affleurements et sur fragments de carottes de forages.

Le même type de démarche a été réalisé pour la formation calcaire du Dogger.

Un travail d'analyse et d'exploitation du modèle numérique de l'Oxfordien carbonaté a été mené avec le modèleur gOcad® sur ce bloc 3D à géométrie complexe afin d'isoler puis d'extraire les données géométriques et pétro-physiques des niveaux marneux de l'Oxfordien supérieur et des horizons poreux de l'Oxfordien calcaire qui ont pu, ensuite, être intégrées directement au modèle hydrogéologique.

À l'échelle de la ZIRA, les nouvelles données sismiques 3D ont apporté les contrastes de propriétés suffisants pour repérer le toit du principal ensemble poreux et pour estimer la porosité des calcaires de l'Oxfordien et du Dogger ainsi que son incertitude associée.

4.3.3 Le modèle hydrogéologique intégré région/secteur à l'actuel réactualisé

La modélisation hydrogéologique est un moyen essentiel pour reproduire les écoulements observés ou supposés dans les aquifères qui sont le moteur des transferts de radionucléides au-delà du Callovo-Oxfordien. Cette modélisation doit être régulièrement mise à jour (voir l'encadré sur ce sujet dans le bilan précédent « 2006-2009 – 4 ans de recherches scientifiques à l'Andra pour les projets de stockage ») avec les nouvelles données.

Sur la période considérée, une étude a repris les modèles conceptuel et numérique de la phase antérieure en y intégrant les résultats des études géologiques, géophysiques et hydrogéologiques acquises par le programme de reconnaissance depuis la surface sur la période 2008-2010. L'objectif était de développer et d'améliorer la compréhension de la structure du système aquifère multicouche du bassin de Paris et du comportement tridimensionnel des écoulements d'eau souterraine aux échelles de la région et du secteur de Meuse/Haute-Marne. Il s'agit donc d'un modèle intégré région/secteur avec un raffinement conceptuel et numérique (resserrage graduel du maillage) dans l'est du bassin.

Le modèle précédent, de 2009, était constitué de 27 couches du Trias au Cénozoïque à l'échelle du bassin de Paris et de 28 couches du Trias au Néocomien/Berriasien à l'échelle du secteur. Dans le nouveau modèle, les surfaces modifiées sont au nombre de 16, parmi lesquelles 8 ont été totalement reconstruites à partir des données de forages. Ces surfaces ont été construites avec une résolution de 250 mètres à l'échelle régionale et 50 mètres à l'échelle du secteur.

À l'échelle du secteur, l'amélioration majeure concerne l'aquifère de l'Oxfordien grâce aux nouveaux enregistrements piézométriques et à l'amélioration du modèle géologique conceptuel. Ainsi, cette formation est désormais scindée en deux aquifères séparés au nord et au sud-est par une série de couches de marne grise qui se comporte comme un semi-perméable.

Ces deux aquifères se confondent en un seul sur la zone de transposition, là où la série marneuse s'atténue voire disparaît, ainsi que plus à l'ouest et au sud.

Sur le secteur, l'assemblage étendu des surfaces corrigées fournit un modèle surfacique complet et le calcul des épaisseurs des unités géologiques aboutit au modèle multicouche du système aquifère du bassin parisien et du secteur étendu de Meuse/Haute-Marne (figure 6).

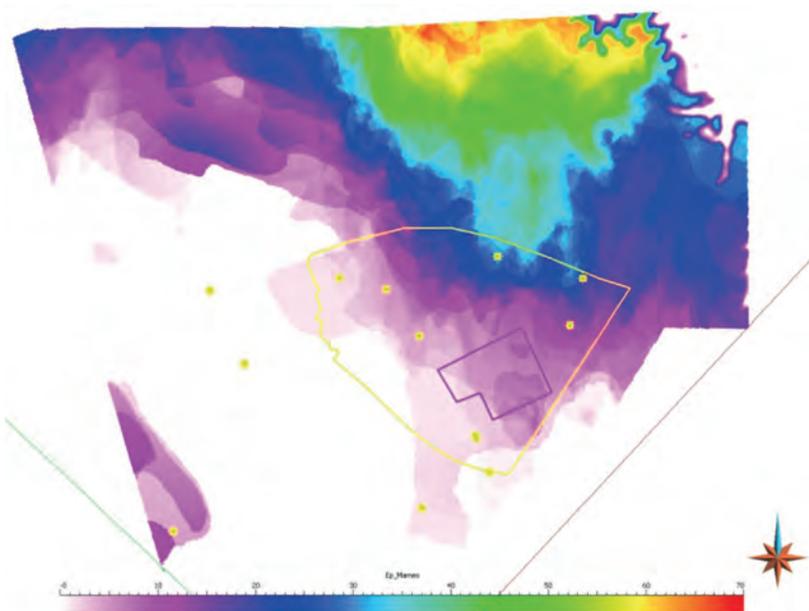


Figure 5 - Extension et épaisseur cumulée de la série grise modélisée sur le secteur de Meuse/Haute-Marne

Le modèle multicouche a été utilisé comme base pour construire un maillage en éléments finis en vue de simuler les écoulements et le transport de masse dans le système aquifère du bassin de Paris. Sur le secteur, le maillage a été particulièrement affiné à proximité des cours d'eau, autour des failles et sur la verticale des niveaux les moins perméables.

La paramétrisation du système multicouche à l'échelle régionale découle de la lithologie des formations et des données disponibles (y compris des tests hydrauliques *in situ* ou de mesures sur carottes). Sur le secteur, les paramètres proviennent directement des différents tests, tels que des pompages avec diagraphies de conductivité électrique, et des mesures sur échantillons, les modèles géologiques conceptuels étant utilisés pour définir l'extension latérale et verticale de ces valeurs (figure 7).

Plus de 700 mesures de charge hydraulique de surface ont été utilisées pour la calibration du modèle, et plusieurs itérations de calibration des conductivités hydrauliques et de l'infiltration ont permis de reproduire les charges observées.

Le calage du modèle régional aboutit à un écart maximum entre les charges hydrauliques simulées et celles mesurées inférieur à 20 mètres. Les directions d'écoulement dans les aquifères de l'Albien du Néocène et du Trias sont également reproduites ; pour l'Oxfordien et le

Dogger au niveau du secteur, les deux aquifères encadrant le Callovo-Oxfordien, ces écarts sont inférieurs à 5 mètres et les directions sont bien reproduites.

Les travaux de modélisation et de simulation numérique ont ainsi permis de consolider et d'améliorer le modèle à l'actuel grâce à une meilleure intégration des données géologiques (notamment pour l'Oxfordien Carbonaté et le Dogger) acquises avec la campagne de reconnaissance complémentaire (forages à l'échelle de la zone de transposition (ZT) et sismique 3D à l'échelle de la ZIRA).

4.4 Comportement chimique des radionucléides dans les sols

Trois éléments chimiques, le chlore, le sélénium et l'iode ont un isotope radioactif (^{36}Cl , ^{79}Se et ^{129}I) contenu dans les déchets radioactifs qui seront stockés en profondeur.

Bien que leur transfert jusqu'à la surface ne soit possible qu'au-delà de plusieurs centaines de milliers d'années, il est important d'en connaître le comportement dans les sols et la biosphère, en raison de leur réaction avec le milieu biologique et de leur activité.

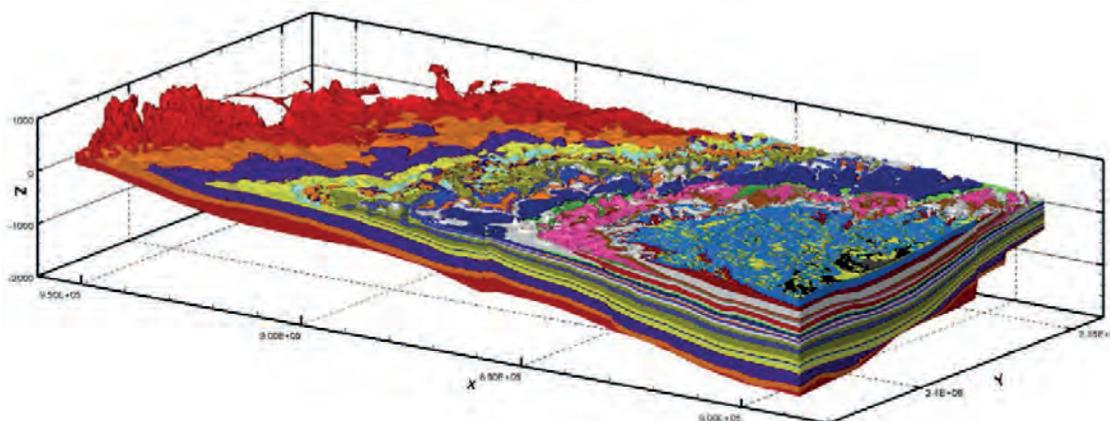


Figure 6 - Vue 3D du modèle volumique à l'échelle du secteur étendu, du Buntsandstein au Tithonien (aquifère dit du Portlandien)

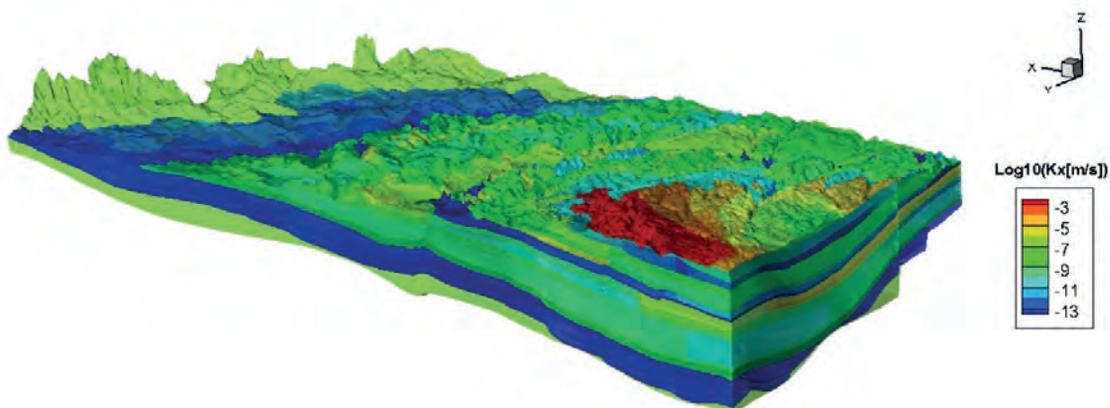


Figure 7 - Vue 3D montrant la distribution des conductivités hydrauliques sur le secteur

4 | Concevoir l'évolution d'un stockage dans son environnement

4.4.1 Les études menées sur la chimie des matrices environnementales

La dynamique du cycle du chlore dans les environnements terrestres

La détermination de la teneur en chlore dans les différentes matrices solides environnementales (sol et végétation) a été abordée à deux échelles, l'une nationale, l'autre locale avec l'OPE.

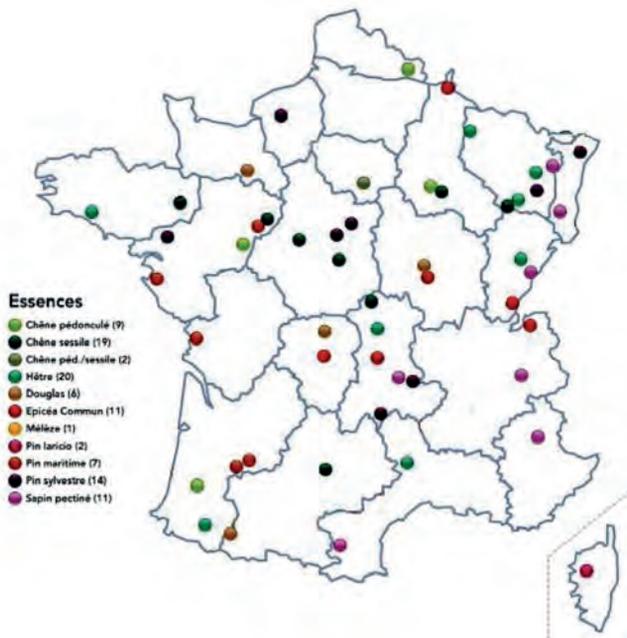


Figure 8 - Carte des sites du RENECOFOR étudiés (carte ONF modifiée)

Au niveau national, l'étude s'est appuyée sur le réseau RENECOFOR (Réseau National de suivi à long terme des ECOSystèmes FORestiers) créé par l'ONF en 1992. 51 placettes (carte de la figure 8) sur les 102 implantées sur l'ensemble du territoire français ont été échantillonnées pour refléter l'effet de l'essence végétale, du type d'humus et de la localisation géographique sur les teneurs et pools de Cl dans les substrats (litière, humus et sols).

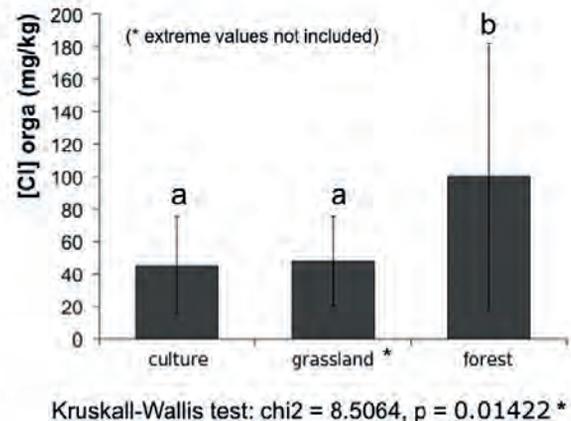
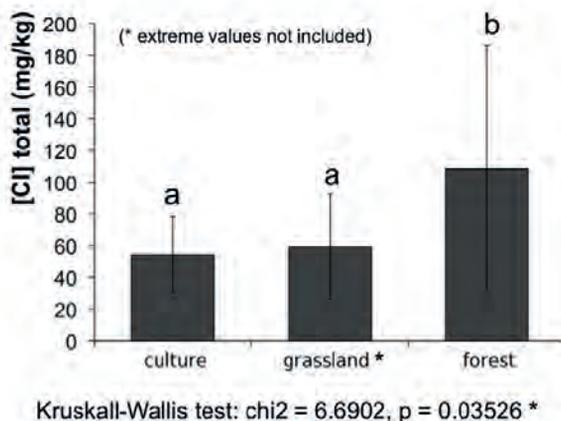


Figure 9 - Concentrations moyennes en chlore total (à gauche) et en chlore organique (à droite) dans les sols minéraux (0-30 cm) de culture, de prairie et de forêt du réseau RMQS

Pour les différents types de sols (sols bruns, sols humo-calciques, etc.) trois tranches de profondeur ont été échantillonnées, de 0 à 10 cm, de 10 à 20 cm et de 20 à 40 cm. Pour la végétation, ce sont neuf types d'essences qui ont été étudiés (chênes, épicéa, hêtres, etc.).

Pour mieux cerner l'influence de l'occupation des sols (cultures, prairies ou forêts), une collection complémentaire de 51 sols de surface (profondeur de 0 à 30 cm) a été élaborée à partir des 2 200 sites du réseau RMQS (Réseau de Mesure de la Qualité des Sols, géré par l'INRA) couvrant l'entièreté du territoire métropolitain.

La série « OPE » consiste en 89 échantillons de végétaux (blé, orge, fruits, etc.) de sols et humus, voire de poisson. Le chlore total a été analysé dans l'ensemble des échantillons, les sols ont fait l'objet, en plus, d'une quantification des teneurs en chlore organique. Ces analyses ont impliqué l'utilisation d'une technique analytique adéquate (AOH² ou INAA³).

De ces différents travaux, il ressort que, quel que soit le type d'écosystème terrestre, il se forme un pool de chlore organique dans les sols correspondant à une fraction moyenne du Cl total du sol de l'ordre de 80 % (Redon *et al.* 2012) (figure 9). Les sols de forêts contiennent en moyenne deux fois plus de chlore total et organique que les sols de culture et de prairie. En général, le temps de résidence du chlore dans les sols forestiers est augmenté d'un facteur 5 si on tient compte explicitement du chlore organique en plus du chlore inorganique (Redon *et al.* 2011). Dans les sols acides les plus riches en matière organique, la concentration en chlore organique est plus élevée, elle est la source de teneurs plus élevées en chlore inorganique ; suite au processus de dé-halogénéation (Gustavsson *et al.* 2012). En comparaison, les sols de l'OPE, souvent alcalins et pauvres en matière organique, accumulent relativement peu le chlore.

A l'échelle d'un système sol- plante, il a été montré que le prélèvement racinaire et les taux de transformation du chlore (inorganique vs. organique) dans la colonne de sols contrôlent la persistance de cet élément dans le système et sont donc essentiels pour calibrer un modèle dynamique du cycle du chlore. Les transferts sol- plante mobilisent de grandes quantités de chlore inorganique ; ces équilibres sont rapides et peu impactés par la production de chlore organique en surface du sol, qui influence principalement la quantité et le temps de résidence du chlore dans le compartiment sol (Van den Hoof & Thiry, 2012).

La spéciation du sélénium dans les sols

Le sélénium est un oligo-élément essentiel pour les êtres vivants (mais toxique à forte dose). Les études menées sur cet élément avaient pour objectif d'améliorer la compréhension des processus et facteurs impliqués dans la rétention et l'accumulation de Se dans les sols de surface, ainsi que ceux affectant sa remobilisation et son transfert vers les autres compartiments de la biosphère (eaux de surface et souterraines,

² AOH : Absorbable Organic Halogen.
³ INAA : Instrumental Neutron Activation Analysis.

végétaux), sachant que cet élément est retenu par la matière organique et sur certaines phases minérales.

Pour évaluer les processus et facteurs affectant la rétention/remobilisation du Se dans les sols lorsqu'il est présent à l'état de traces ($\mu\text{g kg}^{-1}$), il a été nécessaire de développer une méthodologie basée sur l'extraction des espèces de Se naturel et leur identification/quantification directe, à partir d'étalons disponibles, par Chromatographie Liquide à Haute Performance couplée à la Spectrométrie de Masse à Plasma Induit (HPLC-ICP-MS). En effet, les techniques existantes avaient des limites de détection trop élevées, de l'ordre de la dizaine de mg kg^{-1} . Les limites de détection obtenues sont comprises entre 3 et 29 ng(Se) L^{-1} et entre 0,1 et 10 $\mu\text{g(Se) kg}^{-1}$. Il a ainsi été possible de déterminer la distribution solide/liquide, préciser les phases de rétention de cet élément et identifier ses espèces chimiques.

Des résultats obtenus, il apparaît que la persistance du sélénium sous forme séléniée (SeVI) dans les sols est très peu probable compte tenu des très faibles concentrations mesurées *in situ* sous cette forme pour le Se lithogénique. À long terme, la forme sélénite (SeIV) prédomine dans l'eau du sol, sur le complexe d'échange (extrait phosphate) ainsi qu'en association avec des composés organiques du sol (extrait NaOH). En fonction du sol, une fraction variable mais significative (20-50 %) de Se dans les extraits à l'eau et au NaOH correspondrait à des formes non identifiées organiques ou organo-minérales colloïdales (Tolu *et al.* 2010).

Ces études ont indiqué la pertinence du Se naturel pour représenter le comportement à long terme du ^{79}Se dans les sols. Elles ont notamment montré l'influence de la matière organique sur ❶ la rétention de Se, en le stabilisant dans la phase solide via la formation d'associations organo-minérales, ainsi que ❷ sur la nature des espèces séléniées susceptibles d'être lessivées, entraînant la formation de composés organiques et colloïdaux.

Le transfert du chlore, de l'iode et du sélénium au sein des végétaux

La translocation⁴ foliaire est un processus qui peut influencer le transfert des radioéléments dans la chaîne alimentaire suite à des dépôts à la surface du feuillage des plantes. La translocation de l'iode, du sélénium et du chlore vers les organes comestibles de plusieurs plantes modèles a été quantifiée pour la première fois en conditions réelles de culture en utilisant les isotopes de ces trois éléments chimiques.

Le taux de translocation varie de 0,02 % à 1,1 % pour l'iode, de 0,1 % à 16,5 % pour le sélénium, et de 1 % à 14,9 % pour le chlore en fonction du scénario étudié. Ces données inédites sont recommandées pour calibrer les modèles de transfert associés, par exemple, à une irrigation utilisant une eau contenant ces éléments (Hurtevent *et al.* 2012).

4.4.2 Modélisation des transferts en biosphère

Dans une démarche de sûreté, il est utile de connaître le comportement chimique des radionucléides dans la biosphère, même si leurs concentrations y seront nulles, au plus négligeables, même sur de très longues périodes de temps.

Pour modéliser les transferts dans la biosphère, il est nécessaire d'utiliser des valeurs de paramètres dont la variabilité, selon le milieu considéré (type de plante, sol, etc.) est importante. Les approches stochastiques, en particulier les calculs d'incertitudes et de sensibilité, sont bien adaptées pour répondre à cette problématique d'autant plus que celles-ci doivent intégrer l'évolution de la biosphère sur de très longues périodes dans le cas d'un stockage en milieu géologique profond.

Il s'agit, dans un premier temps, de définir quels sont les paramètres qui ont une influence prépondérante dans les transferts et ceux qui sont de moindre importance. A titre d'exemple, les calculs de sensibilité démontrent que la teneur en eau du sol, sa porosité ou son épaisseur sont négligeables, alors que le paramètre d'échange entre les particules du sol et l'eau en solution a un rôle important sur l'état stationnaire du système.

⁴ Translocation : processus de transfert de substances solubles dans les différents organes de la plante.

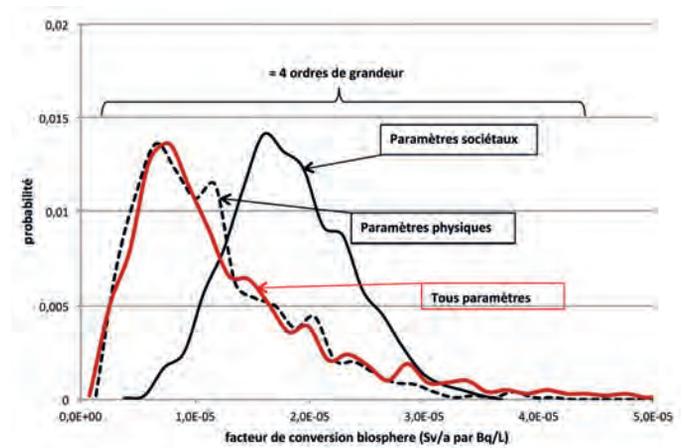


Figure 10 - Comparaison des résultats de trois calculs d'incertitude ($N = 10\ 000$, pour une situation de contamination constante sur 10 000 ans par irrigation avec une eau à 1 Bq/L de Cs-135) basés sur les incertitudes des paramètres physiques (courbe hachée), sociétaux (courbe continue) et l'ensemble (courbe rouge)

Une étude prenant en considération les incertitudes liées au paramétrage du comportement humain a été achevée en 2010 (Albrecht et Miquel, 2010 ; Miquel et Beauzamy, 2007). Trois calculs d'incertitude de type Monte Carlo ont été réalisés avec 10 000 tirages pour chaque cas en variant ❶ uniquement les paramètres physiques (transfert, climat, hydraulique), ❷ uniquement les paramètres sociétaux (consommation, budget temps, habitude agricole) ainsi que ❸ un calcul considérant les incertitudes de tous les paramètres (figure 10). La variabilité sur les valeurs de paramètres sociétaux impacte peu l'incertitude sur la dose pour les valeurs faibles (partie gauche de la courbe rouge). En revanche, la probabilité d'une influence des paramètres sociétaux est un peu plus marquée pour des valeurs très légèrement plus élevées ($> 3\text{E}-5$ Sv/an pour 1 Bq/L), tout en restant très faible.

Par ailleurs, l'Andra dispose depuis début 2002 d'un modèle spécifique pour la modélisation des transferts pour ^{36}Cl en sus du modèle basé sur des facteurs de transfert. Les deux modèles ont participé à une inter-comparaison (Bytwerk *et al.* 2010) qui indiquait une bonne cohérence entre les modèles au niveau international, soulignant l'importance des valeurs de paramètres (concentrations en chlore stable ou les facteurs de transfert) plutôt que le choix du modèle.

4.5 Les évolutions du milieu naturel sur de longues échelles de temps

Bien que les évolutions du milieu géologique soient particulièrement lentes, il est important de les connaître et de les évaluer en raison des longues échelles de temps considérées pour le stockage. Ces modifications pourraient, en particulier, avoir une influence sur le système hydrogéologique tel qu'il fonctionne actuellement (voir ci-dessus).

4.5.1 L'évolution passée et future de la croûte terrestre

Dans l'est du bassin de Paris, vu le contexte tectonique, la croûte terrestre peut se déformer sur des périodes de quelques millions d'années selon deux processus : ❶ des déplacements le long de failles existantes, ❷ des mouvements verticaux souples de la croûte terrestre.

4 | Concevoir l'évolution d'un stockage dans son environnement

Dans le premier cas, le secteur d'étude étant une des régions les moins sismiques de France, il a été montré que les effets d'éventuels séismes n'auraient pas de conséquences sur la stabilité d'un stockage en milieu géologique profond (voir bilan précédent « 2006-2009 – 4 ans de recherches scientifiques à l'Andra pour les projets de stockage »).

Pour quantifier les mouvements verticaux continus, deux approches ont été utilisées pour le secteur de Meuse/Haute-Marne : d'une part, la datation des paléo-surfaces du massif ancien des Vosges qui en constitue la bordure orientale, ceci afin d'en déterminer les périodes de surrection et d'érosion de sa couverture sédimentaire et, d'autre part, l'étude de l'incision des vallées sur le secteur même et son aval, les cours d'eau tendant vers un profil d'équilibre.

Datation des paléo-altérations du socle cristallin des Vosges

Il est généralement admis que le massif des Vosges a été couvert par les formations du Trias et du Jurassique, mais aucun dépôt du Jurassique supérieur ni du Crétacé n'est connu sur le pourtour du massif. Pour évaluer le taux de surrection et d'érosion de cette marge orientale du bassin de Paris, il est nécessaire de déterminer à quelle période s'est produite la dénudation du massif. Celle-ci a été « traquée » par la recherche d'altérations ferrugineuses imprimées dans le socle cristallin (figure 11), altérations dont l'âge a été déterminé par le paléomagnétisme.

Deux phases d'altérations ferrugineuses successives ont pu être reconnues dans les formations cristallines des Vosges : la première a été datée à 240 Ma, ce qui correspond au Trias moyen, la seconde est une paléo-altération du Crétacé inférieur, autour de 120 Ma.

La mise en relief du massif des Vosges et l'érosion totale de sa couverture sédimentaire ont donc dû se produire dès le Crétacé inférieur, comme sur les Ardennes, ce qui implique un soulèvement général progressif depuis cette époque et un taux d'érosion au cours du Néogène (de 23 Ma à 2,6 Ma, environ) beaucoup plus faible qu'imaginé initialement. Dans toute la partie sud-est du bassin de Paris, l'érosion cénozoïque n'a fait qu'évacuer les dépôts du Crétacé et remodeler la surface continentale infra-crétacée, notamment avec l'incision des vallées au cours du Pléistocène (Quaternaire ancien).

Par ailleurs, la présence de terrains triasiques et jurassiques sous les formations de l'Oligocène du fossé d'Alsace, implique que la genèse de ce graben a été amorcée dès le Crétacé inférieur, même si la période principale de sa formation est fin paléogène.

Ces résultats modifient profondément les conceptions sur la dynamique de l'évolution géologique post-paléozoïque de la bordure sud-est du bassin de Paris puisque la surrection du massif des Vosges et l'érosion de sa couverture sédimentaire étaient considérées comme datant de l'Oligocène (environ 30 Ma).

Datations des terrasses étagées des vallées du bassin de Paris et dynamique d'érosion

Pour préciser les phases d'érosion ayant affecté le secteur, la datation de terrasses alluviales étagées des vallées du bassin de Paris a été poursuivie en utilisant la technique ESR⁵. Les résultats obtenus, combinés à la simulation de l'évolution géomorphologique, ont précisé la dynamique de l'évolution des fonds de vallées au cours des cycles climatiques des derniers 500 000 ans. Il en ressort que :

- l'incision du substratum (création des terrasses étagées) intervient lors des entrées en glaciation (figure 12) ;
- les dépôts alluviaux grossiers se produisent au cours des périodes glaciaires ;
- les plaines alluviales, avec leurs dépôts limoneux, se mettent en place en phases post-glaciaires.

Au niveau régional, les âges et les modalités des captures de l'Aire et de la paléo Saulx-Ormain par l'Aisne ont été précisés et il est désormais possible de comparer l'étagement des nappes alluviales d'une partie du réseau de la Seine avec celles de la Somme.

Sur les derniers millions d'années, trois périodes de rupture dans les taux d'incision des vallées ont été mises en évidence. ❶ Jusqu'à l'installation des cycles climatiques de 100 000 ans, les taux d'incision sont restés faibles et partout du même ordre (20 à 30 m/Ma pour les vallées majeures). ❷ Une deuxième période, allant de 0,8 à 0,4 Ma avant le présent, se caractérise par des taux d'incisions élevés, variant entre 100 m/Ma (Seine, Yonne, Aube) et 60 m/Ma (Somme) du fait des érosions accélérées en début de chaque période glaciaire. ❸ La troisième période se caractérise par la variation des taux d'incision selon les bassins fluviaux : ils diminuent pour les vallées du bassin de la Seine alors qu'ils augmentent pour la Somme en raison de sa capture par le fleuve « Manche » issu du Rhin en période de bas niveau marin.

Pour effectuer la transcription de ces taux d'incision en taux de surrection, il faut prendre en compte l'ensemble des paramètres qui influent sur l'érosion car le profil des cours d'eau est sensible à d'autres paramètres que la seule surrection tectonique : variation du niveau marin entre périodes tempérées et périodes glaciaires, charge sédimentaire, modification du tracé par capture, climat ; ce dernier facteur étant particulièrement important.

Depuis l'Oligocène, le régime climatique chaud qui prévalait avant le Quaternaire a maintenu une ablation générale du relief, avec des taux moyens inférieurs à la surrection pour les plateaux calcaires. À l'inverse, l'apparition des cycles glaciaires a favorisé l'érosion dans les vallées, avec des taux d'incision dans les plateaux calcaires nettement supérieurs aux taux de surrection. Ce changement de régime a conduit à

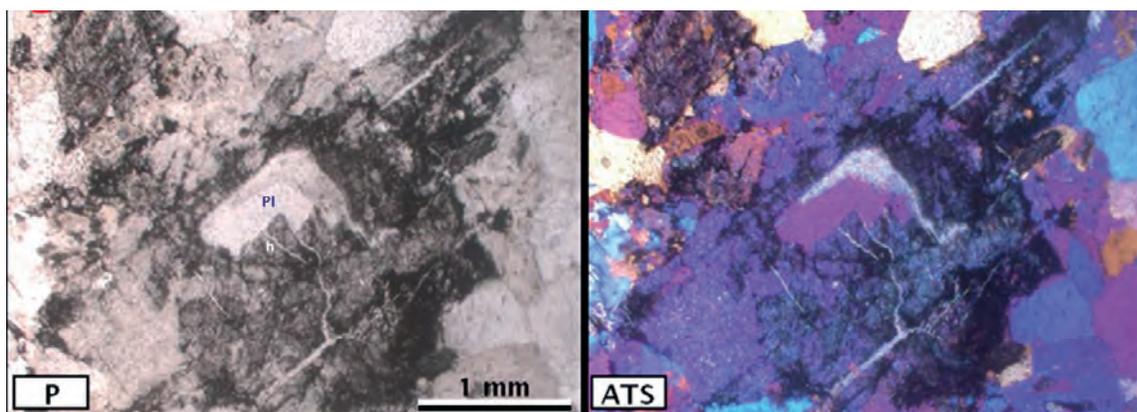


Figure 11 - Exemple d'hématite (oxyde de fer) (h) imprégnant un minéral plagioclase (Pl) (P = lumière polarisée ; ATS = lumière analysée + lame teinte sensible)

⁵ ESR : Electron Spin Resonance = résonance de spin électronique.

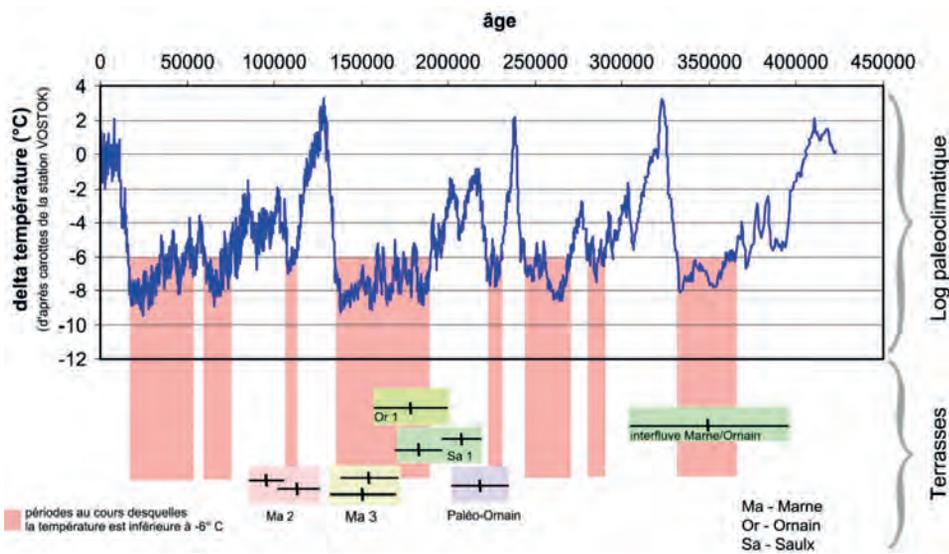


Figure 12 - Corrélation entre la dynamique d'évolution des vallées et les fluctuations climatiques

un rééquilibrage des profils d'incision des vallées au cours des derniers millions d'années.

Les résultats obtenus ont été intégrés dans un traitement géostatistique pour établir des cartes de vitesse de mouvements verticaux régionaux. Pour le dernier million d'années, la prise en compte de l'influence du climat a permis de proposer des taux de surrection de l'ordre de 40 à 60 m/Ma sur le secteur de Meuse/Haute-Marne alors qu'il est de 80 m/Ma au niveau d'une zone plus active orientée sud-ouest - nord-est selon un axe approximatif Montargis - Sainte Menehould.

En final, les vitesses relatives de surrection estimées sur le dernier million d'années sont plus fortes (d'un ordre de grandeur environ) que celles estimées sur la durée totale des derniers 20 Ma ; mais il subsiste une pérennité de la répartition spatiale des zones à taux de surrection plus ou moins forts, donc du schéma général de la lente déformation tectonique attribuable à un flambage lithosphérique.

D'un aspect dynamique, il est probable que le mouvement de surrection générale, à l'échelle du bassin de Paris, se serait accéléré au cours du dernier million d'années. Toutefois, à l'échelle de la zone de transposition, l'amplitude des déformations du bâti géologique reste négligeable compte tenu des distances en jeu (variations verticales en dizaines de mètres réparties sur des centaines de kilomètres).

4.5.2 Le modèle hydrogéologique intégré région/secteur sur le prochain million d'années

Vu les faibles vitesses de déplacement des eaux dans les aquifères profonds du bassin de Paris, et plus particulièrement sur le secteur de Meuse/Haute-Marne, les échelles de temps des écoulements hydrogéologiques couvrent toute la période passée du Plio-Quaternaire.

Le refroidissement global du climat sur cette période avec l'apparition d'une alternance de pé-

riodes froides et de périodes tempérées (voir ci-dessus) doit être pris en compte pour entrevoir le fonctionnement hydrogéologique sur le prochain million d'années.

En effet, ce changement de régime climatique crée des variations dans l'alimentation des nappes souterraines (les sols gelés empêchant l'eau de pénétrer en profondeur) et provoque des phases d'érosion plus active, avec modifications de la topographie et des zones d'alimentation/résurgence des aquifères profonds.

Pour affiner le modèle hydrogéologique, une première étape a donc consisté à simuler l'évolution géomorphologique passée, au pas de 1 000 ans, en intégrant ① l'alternance glaciaire - interglaciaire sur un cycle de 100 000 ans et ② la variabilité spatiale de la surrection tectonique. Il en ressort que la géographie régionale a largement évolué, depuis la surface initiale à vallées peu profondes il y a cinq millions d'années, jusqu'à la topographie actuelle avec ses vallées très marquées.

Dans un deuxième temps, la simulation numérique hydrogéologique en trois dimensions sur le secteur a intégré ces facteurs (évolution morphologique, formation et retrait d'un pergélisol (Grenier Ch. *et al.* 2012)) et la variation des propriétés hydrodynamiques des formations superficielles (perméabilité, porosité...) qui découle des processus de gel et dégel. L'objectif était d'estimer les modifications maximales possibles dans les écoulements, en particulier d'analyser l'éventualité d'une apparition de nouveaux affleurements de calcaires de l'Oxfordien en tête de la vallée de la Saulx et au nord du secteur, dans la vallée de l'Ornain (figure 13), où l'aquifère est actuellement captif sous couverture de marnes du Kimméridgien. Il apparaît que l'Oxfordien calcaire est à très faible profondeur sous le lit de l'Ornain, mais qu'il n'affleure pas, même d'ici un million d'années.

L'étape suivante a été de préciser les modifications possibles en termes de trajectoires et de vitesses en fonction de ces change-

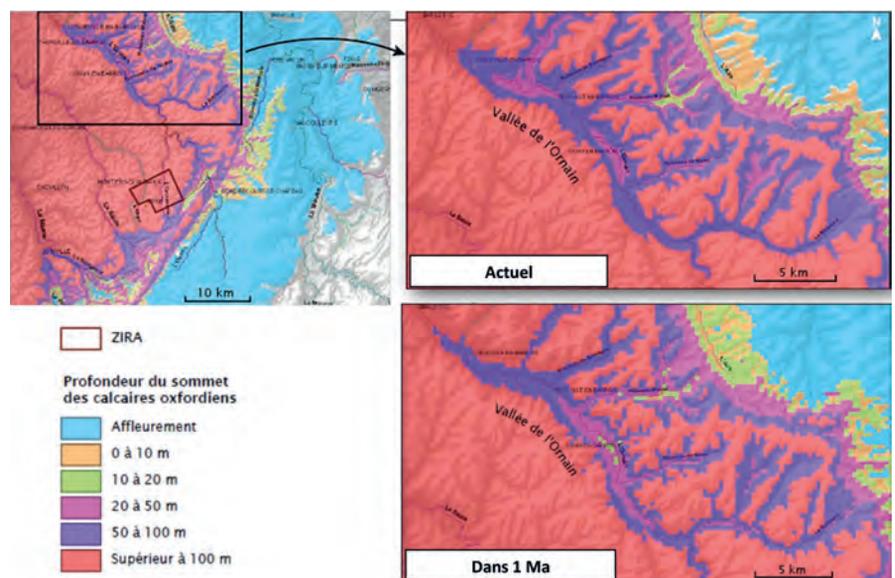


Figure 13 - Simulation de la profondeur de l'Oxfordien calcaire à l'actuel et dans un million d'années dans la vallée de l'Ornain au nord de la ZIRA

4 | Concevoir l'évolution d'un stockage dans son environnement

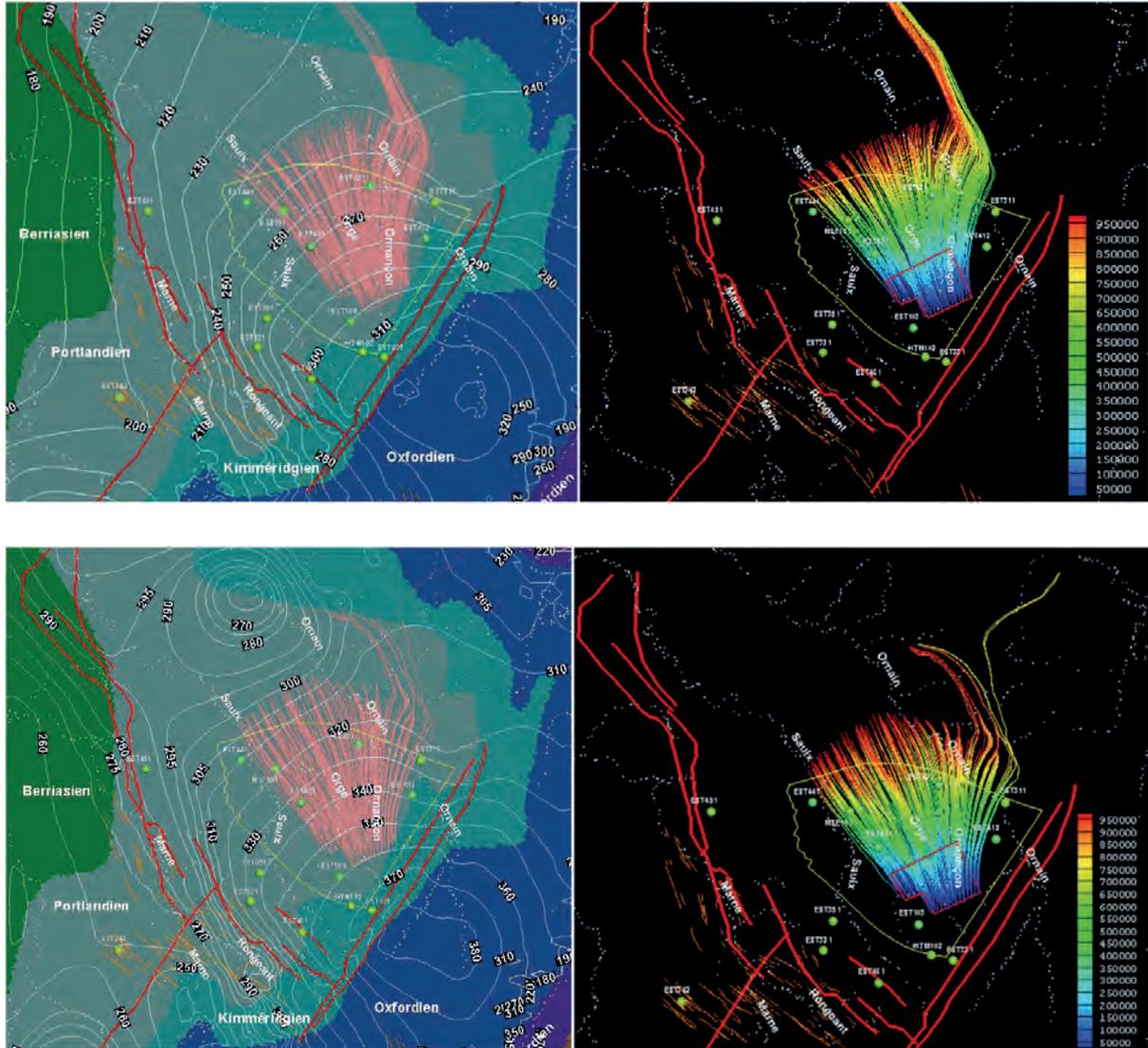


Figure 14 - Champ d'écoulement de l'Oxfordien (à gauche), trajectoires de particules et temps de transit associés (à droite), à l'Actuel (en haut) et dans un million d'années (en bas)

ments possibles (morphologie, avec nouvel exutoire, et périodes de pergélisol). La modélisation a été réalisée en régime transitoire en considérant une évolution naturelle du climat, c'est-à-dire avec des phases glaciaires à l'origine de fortes incisions des vallées. D'après les résultats des simulations, il n'existera que de faibles modifications locales des écoulements à l'échéance du prochain million d'années par rapport à l'Actuel. Ces évolutions restent d'ampleur très limitée et ne concernent pas les écoulements se faisant depuis la ZIRA (figure 14).

4.5.3 L'évolution des écosystèmes

Avec les données acquises sur la cyclicité du climat passé, la question n'est pas de savoir si le climat futur va évoluer mais comment il va le faire sur le prochain million d'années et quelles en seront les conséquences sur les écosystèmes.

Deux cas de figure sont donc à considérer :

- celui d'une évolution naturelle avec la poursuite des cycles glaciaire -

interglaciaire tels qu'ils s'expriment depuis près d'un million d'années ; il est possible de considérer que des situations proches de celles qui ont existé au cours du passé se reproduiront dans le futur ;

- celui d'une évolution fortement modifiée par les rejets de gaz à effet de serre résultant des activités anthropiques ; il est alors nécessaire de caractériser l'état de la biosphère (végétation et faune, avec d'éventuelles disparitions d'espèces) qui pourrait exister en périodes de climat chaud au cours des premières centaines de milliers d'années.

Les analyses sur l'évolution des écosystèmes se concentrent sur les éléments qui importent pour la modélisation des transferts de radionucléides, c'est-à-dire, d'une part, les sols qui assurent l'interface active entre géosphère, biosphère et atmosphère et, d'autre part, la flore et la faune, en fonction de leur participation à la chaîne alimentaire humaine.

L'évolution des écosystèmes est traitée avec une approche qui combine le recours aux analogues naturels avec le développement d'un outil numérique permettant de simuler leur évolution aux grandes échelles de temps et d'espace.

Les analogues naturels

L'approche par analogues naturels consiste à identifier des écosystèmes qui peuvent être considérés comme représentatifs de ceux qui vont se succéder dans la région de Meuse/Haute-Marne. Ces analogues sont recherchés dans d'autres régions du monde, à l'actuel, et dans le passé local.

Les sols évoluent naturellement sous l'effet des conditions climatiques et de la végétation par processus chimiques (altération, telle la dissolution des carbonates en terrains calcaires) et mécaniques (érosion – sédimentation). La composition des sols est bien connue en période tempérée puisqu'elle correspond à l'actuelle. En phase de climat froid, les références sont prises dans les régions de hautes latitudes pour déterminer quels sont les processus dominants.

Pour les possibles périodes de climats chauds, les exemples sont recherchés dans différentes régions du globe dont le climat est comparable à ce qu'il pourrait être dans le futur sur le plan de la température et des précipitations, et avec différents types de soubassement rocheux. A titre d'exemple, la figure 15 présente un plateau calcaire avec effondrement karstique en climat subtropical.

Ce cas de figure peut être pris comme analogue avec les calcaires du Barrois (Tithonien) qui couvrent une large surface du secteur.



Figure 15 - Effondrement du plateau calcaire dans la province de Pinard el Rio (Cuba) comblé par des sols de type Terra Rossa riches et épais (et utilisés pour la culture du tabac)

Simulation de l'évolution des écosystèmes

Un premier exercice de modélisation statique du couvert végétal en fonction de l'évolution du climat avait été réalisé en 2003, dans le cadre du projet européen BIOCLIM. Ce travail a été poursuivi et, en fin 2009, des modèles mécanistes permettaient une simplification des différents processus climatiques et écologiques (voir bilan précédent « 2006-2009 – 4 ans de recherches scientifiques à l'Andra pour les projets de stockage »).

Dans la suite de ces recherches, un modèle numérique dynamique a été développé pour simuler l'évolution des écosystèmes aux grandes échelles de temps et d'espace, et non simplement leur état à un temps « t ». L'importance des phases transitoires et de la dynamique du climat sur l'évolution des écosystèmes contraint à utiliser des modèles emboîtés.

Composé de modèles mécanistes basés sur les notions de réseaux trophiques et de compétition au sein des groupes fonctionnels, ce modèle est capable de traduire les multiples interactions pouvant intervenir à l'échelle des populations en fonction des contraintes climatiques et

anthropiques. Appliqué pour analyser des exemples du passé, il permet de mieux estimer les causes et modalités des évolutions de populations animales et végétales enregistrées dans les archives sédimentaires, notamment sur la période Holocène, en fonction des modifications des habitats liés au développement de l'agriculture et de l'exploitation forestière surimposées aux fluctuations naturelles du climat.

Appliqué pour le futur, ce modèle permettra de poser un regard éclairé sur les scénarios d'évolutions sur les longues durées en jeu dans les projets de stockage, établis à partir d'analogues.

Les modèles mécanistes de base et les connaissances théoriques développés dans cette action de recherche et développement sont désormais utilisés pour un nouveau projet qui vise à estimer les incidences possibles des politiques publiques d'aide à l'agriculture dans le contexte d'un réchauffement climatique, à l'échelle du prochain siècle.

Références bibliographiques

BENAÏCHOUCHE A., STAB O., COJAN I., BRULHET J., TIJANI M., TESSIER B. (2012) Stream-piracy impact on the long-term evolution of the Meuse basin. Physical approach modeling with GOLEM. Geophysical Research Abstracts Vol. 14, EGU2012-6100-2, 2012 EGU General Assembly 2012.

COJAN I., VOINCHET P., BAHAIN J.-J., BEUCHER HELENE1, BRULHET J., MEHL C., STAB O., TESSIER B. (2011) Influence des niveaux de base dans l'étagement des nappes alluviales. Exemple du réseau de la Seine au Pléistocène. 13ème congrès français de sédimentologie, Publ. ASF Paris, n° 68.

COJAN I., VOINCHET P., BAHAIN J., BEUCHER H., BRULHET J., MEHL C., STAB O., TESSIER B. (2012) Zone d'influence de l'eustatisme le long du cours de la Seine au Pléistocène. Quaternaire, Colloque AFEQ Q8, p.85.

LORRILLIERE R. (2011) Effets des variations temporelles et spatiales des contraintes sur les systèmes écologiques. Implication pour les scénarios de biodiversité. Thèse Université Pierre & Marie Curie, Paris.

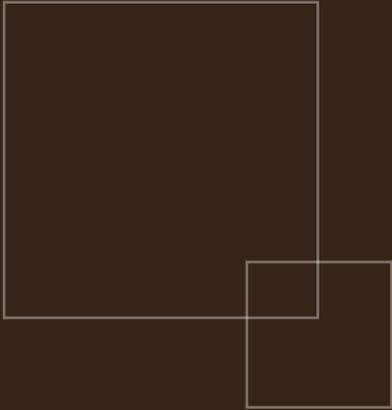
ORTET S, VIDAL O, FOURNIER F., GUILLEMOT D., HAYET M., YVEN B (2012) Estimation of uncertainties associated to porosity prediction from inversion. SEG, 2012, Las Vegas, USA.

THIRY M., FRANKE C. VERCRUYSSSE C., KISSEL C., EDEL J.-B., BRULHET (2011) Datation des paléaltérations du socle cristallin des Vosges. Implications pour l'évolution géodynamique du massif. 13ème congrès français de sédimentologie, Publ. ASF Paris, n° 68, p.318.

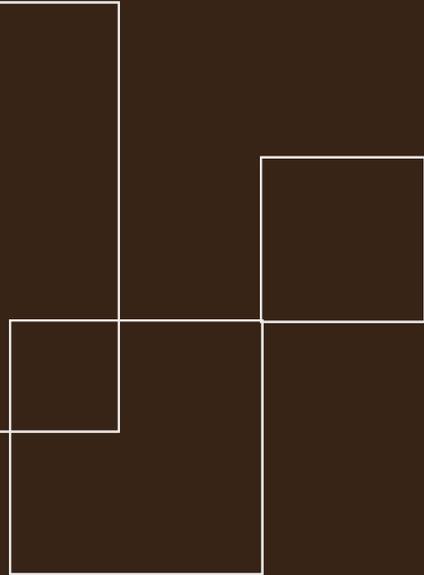
THIRY M., FRANKE C., RICORDEL-PROGNON, THEVENIAUT H. (2012) Formations superficielles anciennes. GEOCHRONIQUE n° 121, 2012.

THIRY M., RICORDEL-PROGNON C., FRANKE C., BRULHET J. (2012) Modernité des paléosurfaces : leur apport à la géodynamique. In Expression de l'innovation en géosciences, Collection Sciences de la Terre et de l'environnement, Presses des Mines, Paris, p.113-125.

VINCENT B., PICKARD N., KETTLE S., YVEN B., VIGNERON G. (2011) Modélisation de l'Oxfordien carbonaté dans l'Est du Bassin. ASF, 2011, Dijon.



5. Évaluer les performances d'un stockage



L'évaluation de la performance d'un stockage sous l'angle des différents processus physico-chimiques régissant son évolution contribue, d'une part aux études de conception et, d'autre part à la quantification de la sûreté, ces deux aspects étant étroitement complémentaires. Cette évaluation fait largement appel aux modélisations et simulations numériques pour pouvoir prendre en compte les différents phénomènes, leurs couplages et interactions, sur de grandes échelles de temps. Les simulations numériques s'appuient donc sur l'ensemble des acquis phénoménologiques qui peuvent se produire au sein d'un stockage.

5 | Évaluer les performances d'un stockage

L'évaluation de la performance d'un stockage sous l'angle des différents processus physico-chimiques régissant son évolution contribue, d'une part aux études de conception et, d'autre part, à la quantification de la sûreté, ces deux aspects étant étroitement complémentaires. Cette évaluation fait largement appel aux modélisations et simulations numériques pour pouvoir prendre en compte les différents phénomènes, leurs couplages et interactions, sur de grandes échelles de temps. Les simulations numériques s'appuient donc sur l'ensemble des acquis phénoménologiques présentés dans les chapitres précédents.

Nota

Outre cet objectif essentiel, la simulation est utilisée pour préparer des expérimentations en Laboratoire souterrain : durée à prévoir, intensité de la pression ou de la température à appliquer, prévision de la réaction du milieu testé, etc. À titre d'exemple, dans le cas de l'essai de scellement réalisé dans la galerie GES (voir précédemment), plusieurs simulations avec différentes valeurs de perméabilité de l'EDZ et du béton ont été réalisées pour évaluer le comportement hydraulique de l'ensemble. La simulation est également un support à l'interprétation des résultats obtenus, soit dans le cas d'interactions multiples, soit pour des phénomènes se produisant à de très petites échelles, tel que le comportement de feuillets d'argile au niveau moléculaire. ■

5.1 Les moyens pour évaluer les performances d'un stockage

5.1.1 La gestion des données pour l'optimisation de leur utilisation

Avant de réaliser les évaluations de performance, via la simulation et les calculs numériques, il est nécessaire de gérer, de façon sûre et fiable, un très grand nombre de résultats provenant de disciplines scientifiques et de moyens d'acquisitions très divers (observations, mesures, expérimentations...). Cette gestion est notamment importante pour le Laboratoire souterrain, à l'origine d'un grand nombre d'enregistrements de mesures en continu. Aussi, dès sa conception, l'Andra a mis en place deux outils, le « Système d'Acquisition et de Gestion des Données » (SAGD) et la base Géosciences (GEO) (voir encadré du bilan précédent « 2006-2009 – 4 ans de recherches scientifiques à l'Andra pour les projets de stockage »).

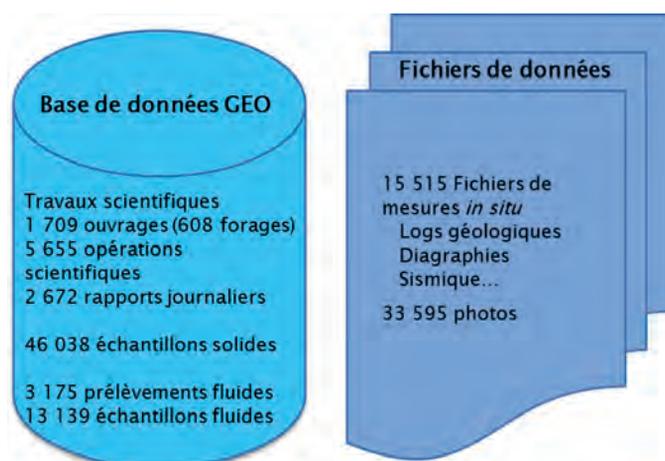


Figure 1 - De très nombreuses données à gérer (situation au 30 septembre 2012)

Cependant, il est nécessaire d'améliorer la lisibilité de la cohérence entre les applications phénoménologiques, la conception et la sûreté, à partir de données très nombreuses (figure 1), acquises avec des méthodes et des échelles d'espace très différentes.

Toutes les acquisitions doivent donc être validées et triées pour les calculs de performance, de dimensionnement et pour les évaluations de sûreté, que ce soit pour les stockages de surface existants ou pour le projet de stockage en profondeur.

L'Andra a donc créé une base spécifique, dite « DIAM'S », qui capitalise l'ensemble des connaissances indispensables aux évaluations et études de sûreté ainsi qu'aux études de conception et dimensionnement d'un stockage. Cette base est composée d'une série de fiches contenant les paramètres de référence qui, après analyse statistique et traitements éventuels, sont replacés à l'échelle de l'objet qu'elles caractérisent (par exemple à l'échelle d'une formation géologique). Elles sont interprétées en termes d'incertitudes et de représentativité de variabilité dans l'espace et le temps. Les données ayant fait l'objet de cette analyse critique sont utilisées pour un besoin appliqué : calcul de sûreté, calcul de dimensionnement, etc.

5.1.2 Outils et environnement de simulation

Les expérimentations en Laboratoire souterrain et les tests et mesures en laboratoires de surface fournissent des informations précieuses sur les différents processus physiques et chimiques qui peuvent se développer dans un stockage et les valeurs des différents paramètres qui leur sont associés. Mais ces essais sont nécessairement réalisés sur des échelles de temps réduites, au maximum de l'ordre de quelques années. Les études sur les analogues naturels et anthropiques, quant à elles, permettent d'accéder à des échelles de temps comparables à celles des stockages mais n'offrent qu'une représentation partielle des processus.

La simulation numérique donne la possibilité de prendre en compte les interactions complexes entre constituants et le développement de phénomènes sur de très longues échelles de temps. Au regard des besoins, les simulations couvrent des domaines d'espace et de temps variables, d'une alvéole pluri-métrique au milieu géologique plurikilométrique, de l'année jusqu'au million d'années, et des couplages divers, de manière explicite ou implicite, au travers de lois de variation des paramètres. De ce fait, il s'agit d'un outil privilégié qui répond aux multiples besoins des différents projets de stockage (voir le bilan précédent « 2006-2009 – 4 ans de recherches scientifiques à l'Andra pour les projets de stockage »).

Bien que l'essentiel des outils de simulation dont dispose l'Andra depuis plusieurs années ait une maturité de développement et d'utilisation permettant de traiter des problèmes complexes avec des niveaux élevés de représentation, en des temps de calcul raisonnables, un effort important d'amélioration des performances de résolution des solveurs a été entrepris sur la période considérée. Il s'agit de disposer de moyens matériels et logiciels de simulation encore plus performants, afin de répondre aux besoins ① de représentation de plus en plus fine du fonctionnement phénoménologique du stockage à la fois en termes de composants et de processus mis en jeu et ② de définition, de quantification et de justification des simplifications des processus et des composants pour les évaluations de sûreté.

Trois types d'actions interdépendantes ont permis de se doter d'un « bouquet » d'outils de simulation performants et maîtrisés capables de répondre aux différents besoins :

- mise en place d'une plateforme simplifiée (Cassandra) (figure 2), centrée sur les besoins de l'Andra, avec une portabilité et une ergonomie optimale, et sans dépendances logicielles inutiles ;
- développement/enrichissement d'outils selon plusieurs axes : ① ajout de nouvelles fonctionnalités phénoménologiques pour mieux prendre en compte les couplages entre processus physico-chimiques, ② mise en œuvre du calcul parallèle pour traiter des systèmes de grande taille (gros maillages, grand nombre d'inconnues...) et des

couplages forts, ③ ajout de nouvelles méthodes d'analyse (incertitudes et sensibilité), ④ acquisition de machines de calcul plus performantes (type multiprocesseurs) en lien avec la mise en œuvre du parallélisme (acquisition d'un cluster de calcul, accès aux centres de calcul intensif) ;

- exploitation d'un logiciel intégrateur dédié permettant une porte d'accès unique et ergonomique aux différents composants d'une chaîne de simulation, et une automatisation de la chaîne de simulation, garantissant une minimisation des erreurs et donc *in fine* une bonne assurance qualité.

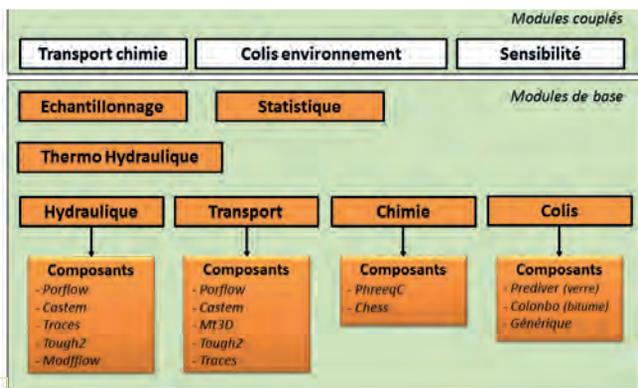


Figure 2 - Architecture de la plate-forme Cassandra

5.2 Les conditions d'exploitation du futur stockage Cigéo

Le stockage géologique profond sera une structure industrielle particulière (voir encadré) puisqu'il sera, à la fois, une installation nucléaire de base (INB), et à ce titre son exploitation devra respecter des règles strictes de sécurité, et qu'en même temps une partie importante de ses infrastructures sera souterraine, avec les règles particulières d'exploitation qu'impose ce milieu (aération, luminosité, volume restreint, etc.).

De ce fait, l'Andra travaille depuis de nombreuses années à la préparation des conditions d'exploitation de ce futur stockage et à l'évaluation de son évolution post-fermeture. Sont ainsi étudiés plusieurs processus tels que la thermique et l'hygrométrie, et leur couplage avec la ventilation en phase d'exploitation, la décharge hydraulique ou encore le devenir de l'hydrogène.

5.2.1 L'environnement thermique du stockage en phase d'exploitation

Le dégagement de chaleur des déchets HA sera à l'origine d'une augmentation de la température dans les galeries du stockage en phase d'exploitation, avec des conséquences sur l'hygrométrie de l'air (voir le bilan précédent « 2006-2009 - 4 ans de recherches scientifiques à l'Andra pour les projets de stockage »). Les modélisations ont été poursuivies en ce sens pour obtenir une vision quantifiée plus précise des conditions d'environnement régnant dans les ouvrages.

L'état thermique actuel du milieu géologique

Avant de dresser un panorama de la charge thermique du stockage en grand, un état de

contexte thermique du milieu géologique a été établi en intégrant les mesures faites dans différents forages, en particulier de EST433 réalisé en 2008 jusqu'à la base du Trias. Il en ressort que le flux géothermique naturel sur le site de Meuse/Haute-Marne ne présente pas d'anomalie, il est de l'ordre de 60 mW/m² ce qui correspond à la valeur moyenne sur les continents.

Par ailleurs, l'analyse de l'histoire climatique passée indique l'absence d'effet significatif de ce passé sur les températures géothermales à l'actuel, notamment à la profondeur du Callovo-Oxfordien : celles-ci sont donc déterminées par le flux naturel et les conductivités thermiques des formations géologiques. Ceci conduit, sur la ZIRA, à estimer une température de l'ordre de 11 à 15°C pour le Kimméridgien, de 15 à 22°C pour l'Oxfordien calcaire, de 22 à 27°C pour le Callovo-Oxfordien et de 27 à 19°C pour le toit du Dogger.

Les propriétés thermiques (conductivité thermique et capacité calorifique) du Callovo-Oxfordien sont déduites des profils de températures, des mesures sur échantillons et des résultats des essais menés en Laboratoire souterrain (figure 3).

À l'échelle de la ZIRA, le faible pendage du Callovo-Oxfordien, les domaines de variation de son épaisseur (20 mètres au maximum) et de sa profondeur et la gamme de variabilité des conductivités thermiques sont équivalents à des variations de quelques degrés Celsius du champ géothermal vertical naturel.

Il en va de même pour le stockage en considérant sa localisation au milieu géométrique du Callovo-Oxfordien : la variation latérale de la garde d'argilites du stockage par rapport au toit et au mur de la formation (inférieure à 10 mètres sur la ZIRA) correspond à une variation relative de température de quelques dixièmes de degré Celsius.

L'évolution thermique transitoire du stockage en grand

Les variations verticales du champ géothermal par rapport au positionnement du stockage sont donc limitées à quelques degrés Celsius. Il est possible de raisonner de manière similaire pour le champ thermique transitoire généré par le stockage, notamment la zone HA. En effet, le stockage en grand est un objet 3D de petite épaisseur, dix mètres au maximum (moins d'un mètre pour les alvéoles HA) comparée à sa longueur et sa largeur, de plusieurs centaines de mètres à plusieurs kilomètres.

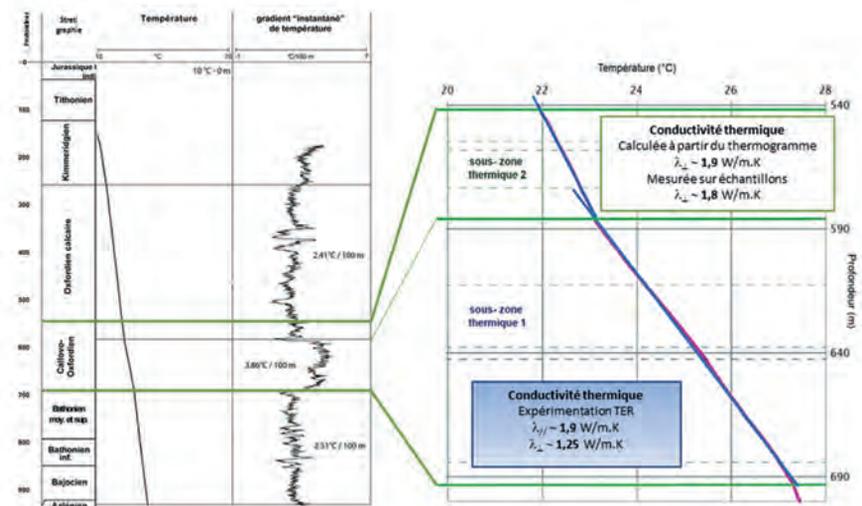
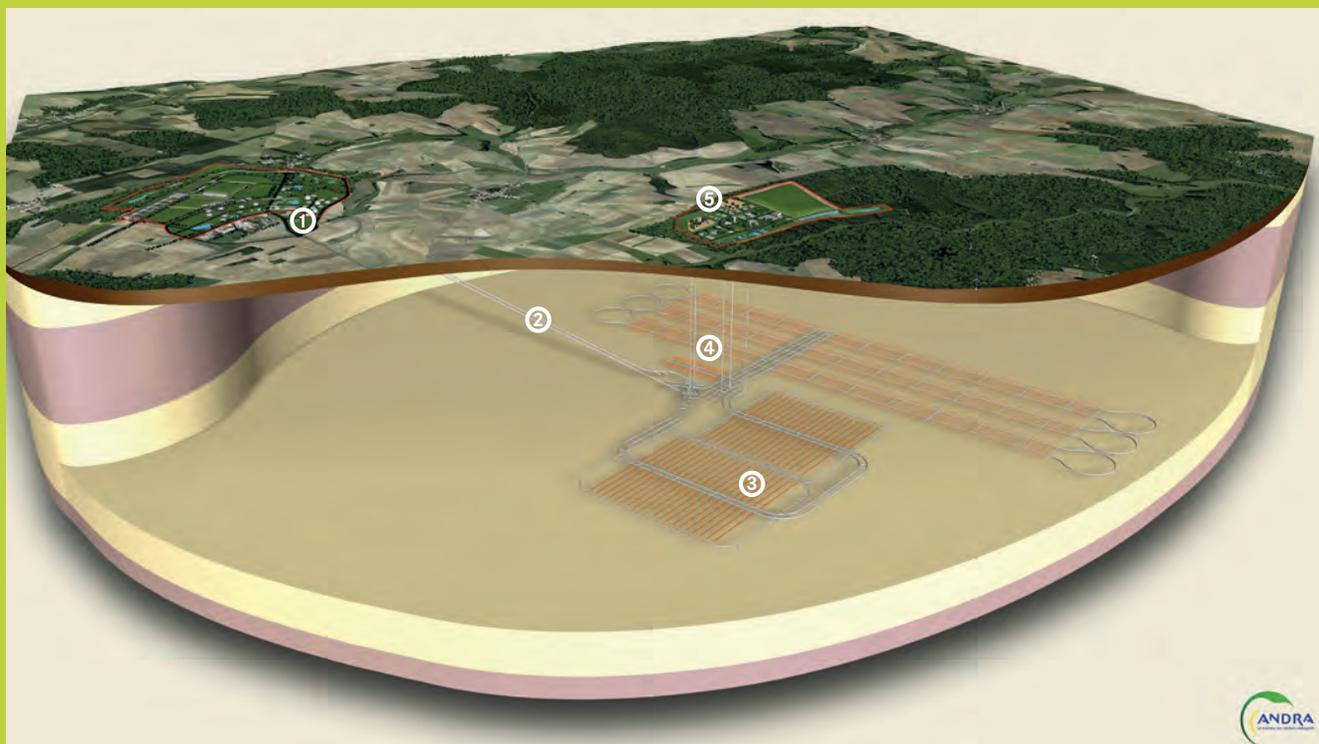


Figure 3 - Propriétés thermiques du Callovo-Oxfordien et de ses encaissants

5 | Évaluer les performances d'un stockage



Vue générale des installations de Cigéo schéma de principe

- 1 **Zone de réception et de préparation des colis** : réception des colis de déchets, contrôle et préparation avant leur transfert vers l'installation souterraine
- 2 **Descenderies** : une pour descente des colis, l'autre en accès technique

- 3 **Installation souterraine** : développement progressif des différentes zones
- 4 **5 puits** : transfert du personnel, des matériels et des engins, remontée des déblais et ventilation des ouvrages souterrains
- 5 **Zone support aux travaux souterrains**, creusement et construction des ouvrages souterrains.

Projet Cigéo

Le projet de stockage en milieu géologique profond, dénommé Cigéo, sera une installation nucléaire de base composée d'installations de surface, réparties sur deux sites, de puits et de descenderies et d'une installation souterraine.

Le projet Cigéo est entré dans une phase de conception industrielle, qui s'appuie sur les résultats de la R&D menée depuis vingt ans et son évaluation régulière. En 2012, plusieurs options techniques ont été étudiées.

L'avant projet intégrera d'éventuelles modifications résultant d'une revue d'experts, des évaluations par l'Autorité de sûreté nucléaire et par la Commission nationale d'évaluation et des commentaires provenant du débat public de 2013.

La description technique ci-dessus se fonde sur les options techniques privilégiées par l'Andra à ce stade des études.

Située à environ 500 mètres de profondeur, l'installation souterraine de Cigéo se développera au fur et à mesure de l'exploitation. Elle se composera de zones de stockage pour les déchets HA et de zones de stockage pour les déchets MA-VL, de galeries de liaison et d'installations techniques. Au terme de la centaine d'années d'exploitation, cette installation représentera une surface d'environ 15 km².

Les déchets seront stockés, au moyen de dispositifs robotisés, dans des tunnels horizontaux appelés alvéoles, creusés au cœur de la couche d'argile. Les déchets HA seront stockés dans des alvéoles d'une centaine de mètres de longueur et d'environ 70 cm de diamètre revêtues d'un chemisage métallique. Les déchets MA-VL seront stockés dans des alvéoles de stockage horizontales de quelques centaines de mètres de longueur et d'une dizaine de mètres de diamètre.

Les premiers ouvrages à réaliser seront les installations de surface nécessaires aux travaux souterrains et au démarrage de l'exploitation. Les zones de stockage souterraines seront conçues de façon modulaire pour permettre la construction progressive des tunnels dans lesquels seront stockés les déchets. Les zones en construction seront physiquement séparées des zones en exploitation. Cette séparation sera également réalisée pour les circuits de ventilation. Pour assurer le confinement des déchets sur de très longues périodes de temps sans nécessiter d'actions humaines, les ouvrages de Cigéo devront ensuite être refermés. Cette fermeture se fera par étapes. Dans le cadre de la réversibilité (voir ci-dessous) demandée par le parlement, des dispositions techniques ont été prises qui, sans remettre en cause la sûreté du stockage, permettront aux générations suivantes de récupérer les déchets si elles le jugent nécessaire. ■

Par ailleurs, vu la diffusivité thermique des argilites relativement élevée, les temps d'influence thermique sont de l'ordre de quelques années à une distance de 10 mètres, qui est l'ordre de grandeur des distances entre alvéoles HA. Ces temps d'influence sont de l'ordre de quelques dizaines d'années (un temps comparable à celui du chargement thermique progressif du stockage) à 65 mètres qui correspond à la garde d'argilites de part et d'autre du stockage (distance jusqu'au toit et au mur du Callovo-Oxfordien).

Il en résulte que les effets thermiques se font sentir dans les formations géologiques à l'aplomb du stockage, alors qu'ils sont limités à quelques dizaines de mètres au maximum latéralement. L'exploitation du stockage devra intégrer un chargement thermique progressif des modules et de la zone, de quelques années à quelques dizaines d'années.

5.2.2 L'évolution thermique en grand, de la phase d'exploitation à la post-fermeture

Une série de simulations de l'évolution thermique en 3 dimensions ont été mises en œuvre depuis l'échelle des alvéoles jusqu'à celles du stockage en grand et de ses encaissants ; elles ont intégré les différents types de déchets et l'exploitation progressive du stockage. Elles offrent ainsi une vision continue et détaillée de l'évolution thermique à toutes les échelles de temps et d'espace.

Pour le stockage en grand, les simulations ont été menées en thermique pure (transfert de chaleur par conduction) alors qu'à l'échelle d'une alvéole ou d'un module HA, elles ont été réalisées en prenant en compte des effets radiatifs, le couplage thermo-hydraulique non saturé ou les échanges de chaleur et de masse d'eau possibles entre les argilites et l'air de ventilation des galeries. Les résultats montrent que ces processus locaux n'ont pas d'effet significatif sur l'évolution thermique en grand du stockage et de son milieu géologique environnant.

Il en ressort que la durée du transitoire thermique (i.e. le temps caractéristique de retour à la température géothermale à 5 °C près) est de l'ordre de la centaine d'années pour la zone MA-VL et de 3 000 à 10 000 ans au sein de la zone HA, selon le regroupement des différentes catégories de déchets. Au toit et au mur du Callovo-Oxfordien, l'élévation maximale de température et son temps d'atteinte sont respectivement de l'ordre de 2 °C et 1 000 ans au droit de la sous-zone MA-VL et de 20 °C et 1 000 ans au droit de la zone HA la plus thermique. Cet ensemble de simulations permet d'illustrer l'évolution thermique du stockage dans le temps, en phase d'exploitation puis après fermeture (figure 4). Il sert, en particulier, à déterminer les conséquences de la thermique sur les autres propriétés du milieu géologique et des infrastructures après fermeture.

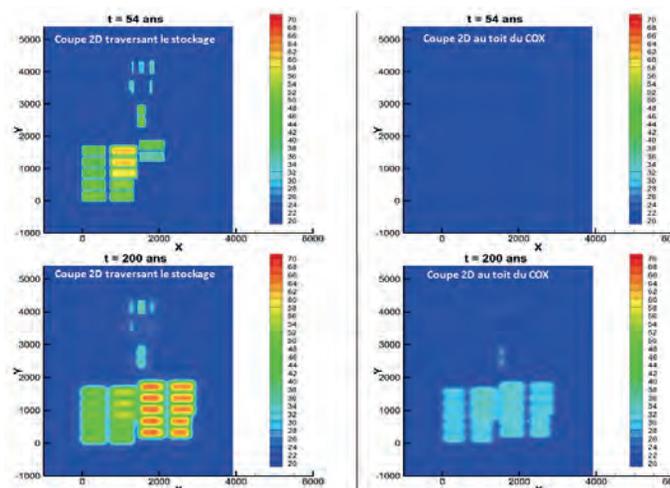


Figure 4 - L'évolution thermique en grand pour un scénario d'architecture du stockage

¹ Phase transitoire, après fermeture du stockage, de resaturation en eau, avec production et migration de gaz.

5.3 Les évolutions du stockage Cigéo post-fermeture

Outre les phénomènes thermiques et leur influence sur le milieu géologique, les déchets seront à l'origine d'autres phénomènes, notamment après fermeture du stockage. Deux exemples de simulations sont décrits ci-dessous, la production de gaz et le comportement chimique des alvéoles.

5.3.1 Le transitoire hydraulique-gaz¹ du stockage de déchets HA et MA-VL

Dans la suite des études menées antérieurement (voir bilan précédent « 2006-2009 - 4 ans de recherches scientifiques à l'Andra pour les projets de stockage »), un important programme d'acquisition de R&D a été mené avec deux groupements de laboratoires (« Transfert des gaz » et « Evolution des structures cimentaires ») et le projet Européen FORGE pour affiner les données sur les mécanismes de production et de transfert des gaz dans les différents composants du stockage (argilites saines ou perturbées, bentonites, bétons, interfaces). En lien avec les progrès de connaissances dans ce domaine, des simulations ont été engagées afin de consolider, de préciser et de compléter la description du transitoire hydraulique - gaz du stockage et du milieu géologique environnant, en profitant de l'accroissement des capacités de calcul.

Les évaluations ont été réalisées à l'échelle ❶ de l'ensemble du stockage afin de disposer d'une vision intégrée de la production et de la migration des gaz, et du transfert de l'iode¹²⁹ et du carbone¹⁴ sous formes gazeuse et dissoute, et ❷ de certains ouvrages (alvéoles HA et MA-VL, scellement de puits, etc.). En combinant l'ensemble des résultats de ces différentes simulations, l'Andra dispose d'une représentation très détaillée du transitoire hydraulique - gaz.

L'hydrogène est la source de gaz la plus importante. Sa production résulte de la radiolyse de certains déchets MA-VL et de la corrosion anoxique des composants métalliques du stockage. Cette dernière est fonction des différents facteurs (porosité, milieu ouvert ou non...) et, en particulier, de la présence d'eau sous forme liquide et/ou condensée.

La resaturation progressive du stockage

Pendant la phase d'exploitation, les constituants du stockage et une frange d'argilite du Callovo-Oxfordien seront désaturés en raison de la ventilation. Après fermeture, l'eau remplira progressivement l'ensemble du stockage. La production d'hydrogène résultant de la présence d'eau, un important travail de simulation a donc été entrepris pour évaluer les temps de la resaturation du stockage.

Pour le stockage dans sa globalité, le temps de retour à la saturation complète est de l'ordre de 100 000 à 150 000 ans après fermeture. En revanche, l'organisation de la saturation est plus complexe quand on examine séparément les différentes zones de stockage, d'où une série de simulations détaillées des flux d'eau et de gaz à cette échelle.

Après fermeture du stockage, l'eau du Callovo-Oxfordien saturé transitera progressivement vers l'argilite désaturée puis vers les matériaux du stockage, y compris les scellements. Ces flux d'eau, de l'ordre de quelques dizaines de m³/an pour la totalité de la zone HA, et de quelques m³/an pour la zone MA-VL, seront essentiellement radiaux centripètes et ne participeront que marginalement à des transferts longitudinaux dans les galeries.

Dans le détail, il apparaît que :

- dans la zone de déchets HA, la saturation complète homogène est atteinte vers 10 000 ans à 30 000 ans après la fermeture selon les caractéristiques des différents déchets stockés ; il faut noter que les jeux de mise en place (espace annulaire entre tubage et colis, par exemple) sont très fortement désaturés pendant plusieurs milliers d'années, le niveau d'eau étant, au plus, de quelques centimètres en fond d'alvéole tant que ces jeux existent ;

5 | Évaluer les performances d'un stockage

- dans les alvéoles MA-VL, la saturation en eau commence par diminuer d'une dizaine de pourcent après fermeture avant de croître continûment pour aboutir à une saturation complète et homogène vers 100 000 ans à 150 000 ans après fermeture ; elles apparaissent comme les dernières cavités à être saturées ;
- dans les autres infrastructures du stockage (galeries, puits, descenteries), la saturation totale intervient au bout d'environ 10 000 à 20 000 ans après fermeture.

Au fur et à mesure de la resaturation du stockage, des échanges d'eau se produiront entre les différentes zones de stockage, mais ils ne dépasseront pas 0,1 m³/an.

Les flux d'hydrogène

Au cours des 5 000 premières années suivant la fermeture du stockage, l'hydrogène généré dans la zone HA migre préférentiellement sous forme gazeuse par convection vers les galeries d'accès, très peu d'hydrogène pénètre dans les argilites saines du fait de leur faible désaturation et des potentiels capillaires très élevés. En sortie de zone HA, ce flux d'hydrogène transitant vers la zone centrale est de quelques centaines de Kg/an au maximum de production.

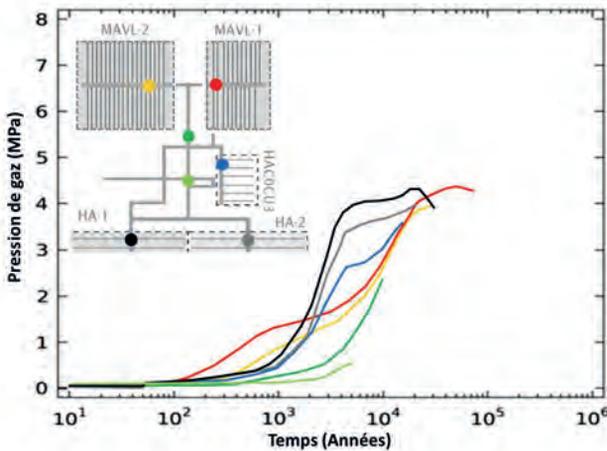
Par la suite, la dissolution – diffusion de l'hydrogène dans le Callovo-Oxfordien devient le phénomène dominant. Pour les alvéoles MA-VL, le phénomène est semblable et les flux et durées sont globalement les mêmes.

Quelle que soit la zone de stockage considérée, la pression de gaz qui en résulte (figure 5) n'induit pas de pression d'eau supérieure à celle du Callovo-Oxfordien qui est de 5 MPa (méga-pascal).

Le comportement des autres gaz

D'autres gaz éventuels, provenant de la dégradation des déchets (CO₂, CH₄ ...) seront à l'état de trace, ils suivront l'expansion de l'hydrogène généré au sein du stockage. Ils migrent ainsi principalement par convection gazeuse, la diffusion en phase gaz étant un mécanisme totalement secondaire.

Une partie du carbone des gaz issus de la dégradation des déchets est du carbone 14. Les masses initiales de ce ¹⁴C sont réparties de façon assez hétérogène dans les différents types d'alvéoles MA-VL. Ce radio-nucléide, dans les molécules gazeuses, est à des concentrations de quelques dixièmes de moles à quelques moles dans les alvéoles, dont plus de la moitié se dissout dans les eaux du Callovo-Oxfordien.



Pour chaque point, le temps à partir duquel la phase gaz disparaît correspond à la resaturation

Figure 5 - Evolution temporelle des pressions de gaz dans les galeries principales des différentes zones du stockage

La part restante migre principalement dans le réseau de galeries en suivant l'expansion de l'hydrogène gazeux dans les ouvrages et se dissout partiellement le long du trajet. Le temps de transfert étant d'un millier à plusieurs milliers d'années, la décroissance radioactive joue également un rôle dans la diminution des flux (figure 6).

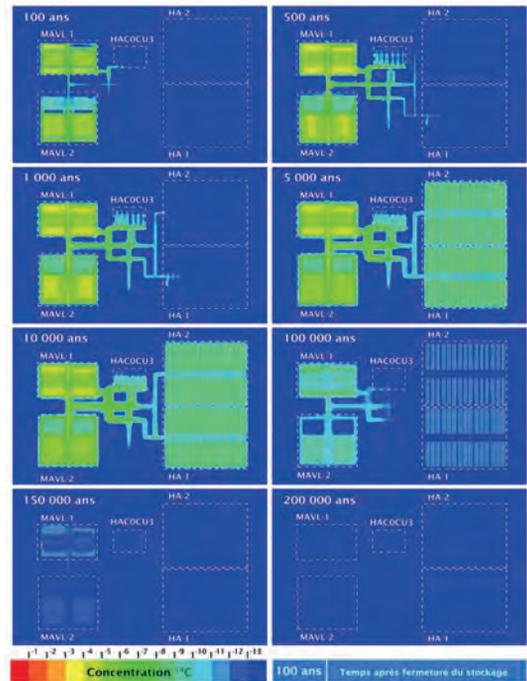


Figure 6 - Evolution dans le temps de la concentration en carbone 14 dans les galeries du stockage

Ces calculs ont été réalisés avec une architecture souterraine du stockage. Lorsque celle-ci sera définitivement choisie, ces évaluations seront mises à jour. La nature des évolutions de conception (linéaire et taille des galeries, dimension et espacement entre alvéoles, ...) ne devrait pas conduire à des modifications sur le comportement des gaz au sein des composants ouvrages, les volumes des galeries et leur surface d'échange avec le milieu géologique étant suffisants pour dissoudre la majeure partie de l'hydrogène et ne pas monter en pression au sein des ouvrages.

5.3.2 L'évolution chimique des ouvrages de stockage

Après la phase de désaturation et d'oxydation des divers constituants du stockage en phase d'exploitation, l'arrivée progressive de l'eau va modifier le contexte chimique en grand du stockage. La nature de ces évolutions est décrite en début de document. Au-delà de la description et quantification de ces phénomènes considérés individuellement, il est nécessaire d'en évaluer les conséquences sur le fonctionnement du stockage après fermeture.

Les simulations, en lien avec une meilleure représentation des processus phénoménologiques, ont abouti à des avancées significatives dans plusieurs domaines de chimie – transport, tels que les interactions fer – argiles, les interactions béton – argilites, la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires ou encore, l'évolution des alvéoles MA-VL.

Déterminer l'évolution chimique des alvéoles MA-VL fait appel à la plupart de ces phénomènes et de leurs interactions puisqu'il faut prendre en compte l'argillite, les matériaux cimentaires, les diverses matrices des déchets. Le programme de simulations sur l'évolution chimique des

ouvrages cimentaires et des composants argileux situés au contact a passé en revue différentes hypothèses (représentation des matériaux, schéma réactionnel...) retenues pour les évaluations numériques de type chimie-transport réalisées dans les années antérieures afin d'en analyser les conséquences sur les résultats obtenus (interactions entre milieu cimentaire et milieu argileux).

La démarche générale a été la réalisation d'une succession de simulations numériques prenant en compte progressivement une représentation de plus en plus complexe des processus physico-chimiques mis en jeu de ce type de perturbation. Les résultats mettent en évidence une dépendance limitée des extensions des perturbations évaluées au

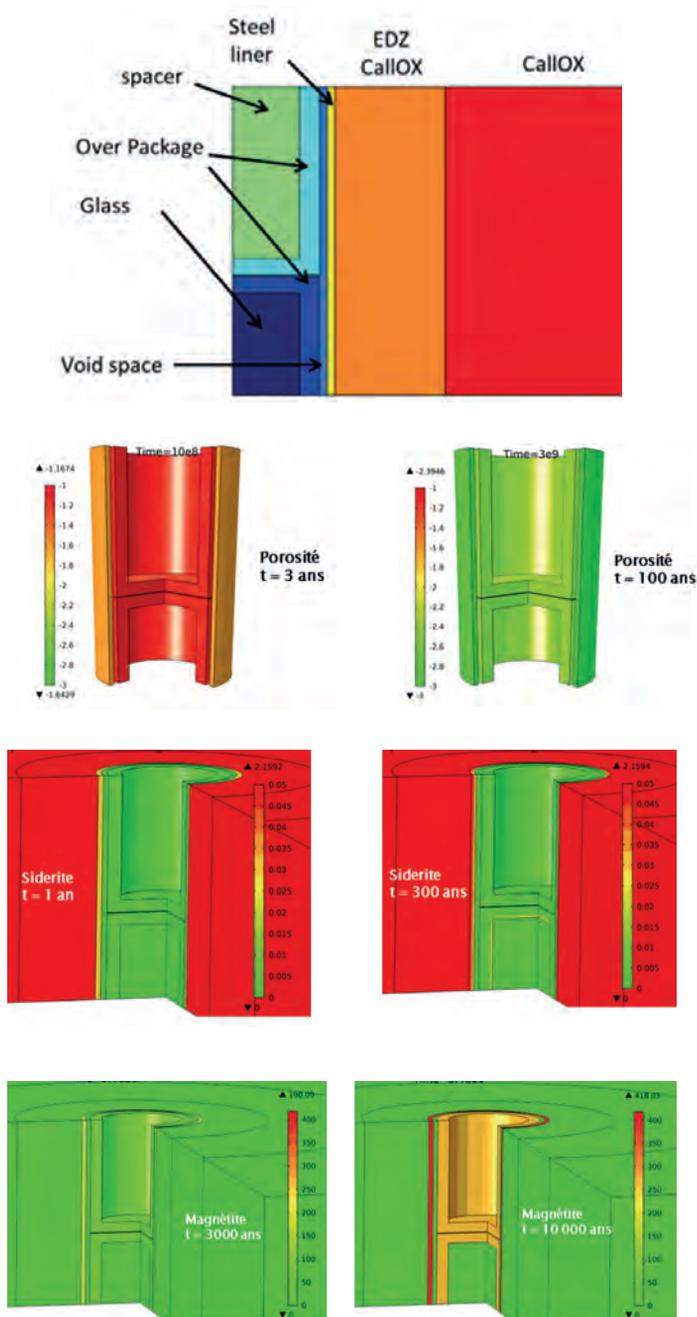


Figure 7 - Illustration de l'évolution chimique de l'environnement d'un colis de stockage au sein d'une alvéole HA

travers des indicateurs de dégradation classique (pH, dissolution de la portlandite², dissolution de la smectite) aux différentes hypothèses de simulations. En particulier, l'extension de la zone des argilites fortement perturbée minéralogiquement reste infra-métrique après 100 000 ans.

Le même type d'analyse d'évolution chimique a débuté en janvier 2012 pour les alvéoles HA.

Avant d'évaluer le transfert de radionucléides provenant de ce type d'alvéole, la première étape a consisté à représenter la formation de produits de corrosion (siderite et magnétite) aux interfaces avec l'acier (figure 7).

Cette simulation montre une formation majoritaire de magnétite et minoritaire de siderite, ce qui ne correspond pas aux résultats expérimentaux. Des analyses de sensibilité sont donc en cours pour lever les incertitudes qui conduisent à cette différence.

5.4 Évaluer les performances du stockage du Centre de l'Aube

Le CSA, qui stocke les déchets FMA-VC, est en phase d'exploitation industrielle depuis 1992. Les recherches qui y sont menées sont donc principalement destinées à réactualiser les données support, pour, d'une part, perfectionner les composants du stockage et, d'autre part, tenir compte des évolutions réglementaires et affiner les estimations d'impact radiologique éventuel.

Sur la période considérée, les recherches destinées aux évaluations de performance se sont surtout focalisées sur la révision du modèle hydrogéologique et sur les propriétés de confinement auxquelles doivent répondre les colis.

5.4.1 L'actualisation du modèle hydrogéologique

Le CSA est construit sur une butte témoin constituée de sables de l'Aptien supérieur au sommet qui reposent sur une couche d'argile de l'Aptien inférieur. Ces deux formations étant à l'affleurement, il est possible de récolter toutes les eaux météoriques en pied de côte et d'en suivre le chimisme.

Ce concept implique de suivre précisément l'évolution de la nappe libre des sables aptiens.

En 2011, l'Andra a procédé à une réévaluation du modèle numérique hydrogéologique, en mettant à profit l'ensemble des résultats acquis depuis les années 2000, données géologiques, hydrogéologiques (figure 8) et climatiques, tout en intégrant les phases de construction, avec les emplacements et l'extension des ouvrages.

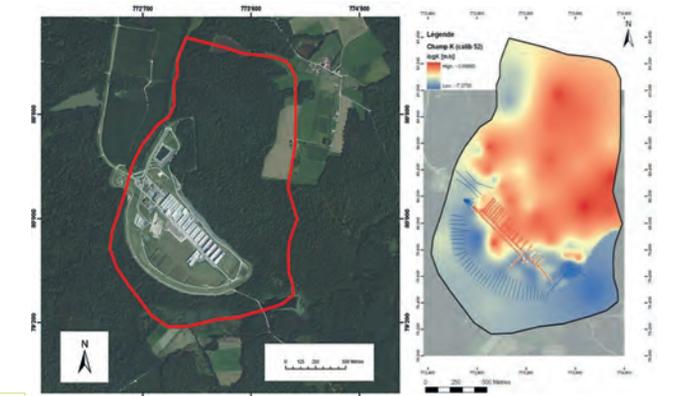


Figure 8 - Extension latérale du modèle hydrogéologique et champ de perméabilité retenu

² Portlandite : dans les ciments, hydroxyde de calcium Ca(OH)₂ provenant de l'hydratation de la chaux libre.

5 | Évaluer les performances d'un stockage

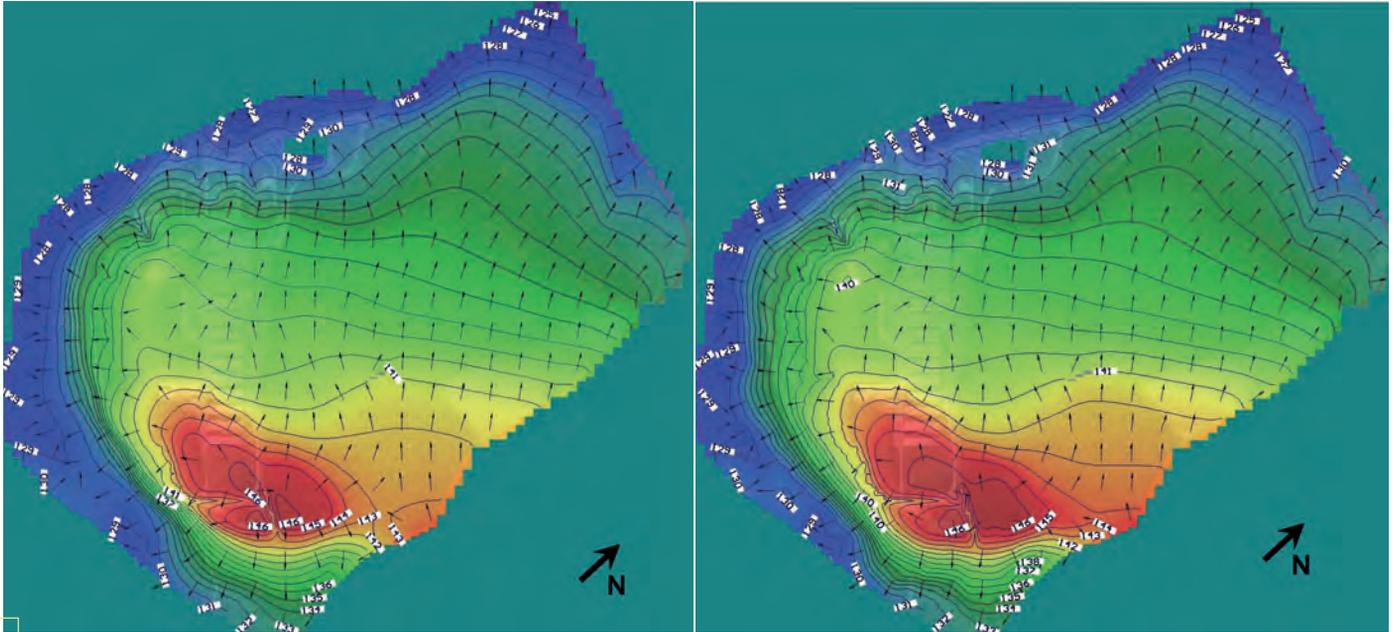


Figure 9 - Champ de potentiel et de directions d'écoulement en période de basses eaux, à gauche, et de hautes eaux, à droite

Le modèle intègre ainsi les points de mesure des nouveaux piézomètres et le suivi des charges des anciens équipements sur une dizaine d'années. De plus, le nouveau modèle a bénéficié du retour d'expérience d'une période de très hautes eaux.

Le modèle est en géométrie 3D et considère un écoulement transitoire avec des « stress period » de 15 jours, définies par la recharge, et des pas de temps de 0,5 à 1,5 jour. La recharge a été calée par itérations successives de sorte que les conductivités hydrauliques ajustées soient bien corrélées avec les observations. Le calage, pour chaque piézomètre, est effectué à deux périodes, l'une de hautes eaux, fixée au 15 mars, l'autre de basses eaux au 15 septembre.

Une analyse statistique a été effectuée sur les écarts types entre les gradients hydrauliques simulés et les observés, moyennés sur les périodes de hautes ou basses eaux.

Les écarts relatifs sont de l'ordre de 10 à 20 %, et 77 % des événements de hautes et basses eaux présentent des écarts moyens inférieurs à 20 %.

Le nouveau modèle hydrogéologique permet ainsi de calculer les écoulements (figure 9) et le transport de solutés sur le site du CSA, avec deux grands objectifs :

- le calcul du Niveau des Plus Hautes Eaux (NPHE) dans la nappe des sables de l'Aptien supérieur, de manière à vérifier que les radiers des ouvrages de stockage à construire seront implantés avec une marge suffisante pour rester hors d'eau, même en cas de remontée exceptionnelle des niveaux piézométriques ;
- les calculs de transport de solutés sur la période actuelle et sur le long terme (après fermeture du Centre) afin de quantifier les impacts radiologiques et toxiques.

Ce modèle est également capable de gérer les écoulements et le transport dans des milieux poreux saturés en eau et prend en compte l'évolution temporelle des conditions aux limites, aussi bien d'origine naturelle (pluviométrie/recharge, débit imposé, charge imposée...) que d'origine anthropique (modification de la topographie par des déblais/remblais, fondations d'ouvrages (bâtiments, ouvrages de stockage, galeries...), modification de la recharge (bâtiments, voiries...), prise en compte de drains pendant une certaine période, couverture du Centre en fin d'exploitation).

5.4.2 Analyse réactualisée des spécifications d'acceptation des colis

Pour tenir compte de l'actualisation des connaissances sur le comportement des matériaux et des éléments chimiques, l'Andra a entrepris une série de simulations pour mettre à jour les spécifications d'acceptation des colis destinés au CSA et pour évaluer le transfert du tritium dans un ouvrage bétonné de stockage.

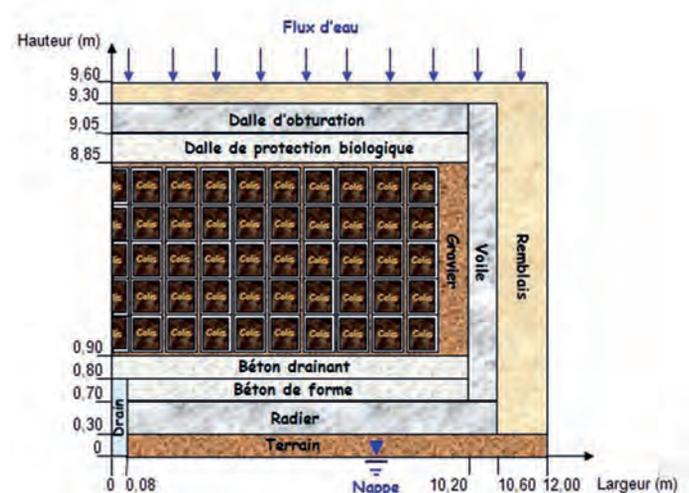


Figure 10 - Domaine, composants et géométrie d'un ouvrage gravillonné retenus pour l'évaluation de performance en deux dimensions

L'analyse multiparamétrique en hydraulique-transport des colis et des ouvrages

Une étude multiparamétrique portant sur les paramètres hydro-dispersifs des différents types de colis a été menée sur la période concernée, elle avait pour but de contribuer à préciser les exigences techniques applicables pour l'acceptation *in situ* de ces colis.

Cette analyse s'est appuyée sur des distributions de probabilités de ces paramètres hydro-dispersifs des différents composants des colis (bloc déchet, conteneur durable et pour, certains types de colis, le sur-enrobage) en conjuguant des incertitudes de type épistémique (erreur de mesure, taille de l'échantillon *versus* taille de l'ouvrage) et stochastique (variabilité naturelle et industrielle). Elle visait aussi à encadrer les domaines de fonctionnement des colis par le choix des valeurs bornes haute et basse des paramètres.

La performance des ouvrages a été étudiée uniquement pour les phases d'exploitation et de surveillance, soit sur 350 ans, et en considérant des conditions de saturation dès l'instant initial. La phase de post surveillance n'a pas été traitée.

Le modèle géométrique des ouvrages de stockage est bidimensionnel (figure 10). Cette simplification résulte de la forme parallélépipédique des ouvrages ainsi que de la forme symétrique des conteneurs de déchets. L'hypothèse a été faite que les ouvrages étaient saturés en eau pendant les 350 ans du stockage.

Parmi les différentes études de sensibilité, la position du colis au sein du stockage a été examinée pour s'assurer que celle-ci n'a pas d'une influence sur la sortie éventuelle des RN. Des cinq localisations de colis essayées et couvrant de manière homogène l'alvéole, il ressort qu'il n'existe pas d'effet de bord (position haute, basse ou latérale). De même, l'influence de la variabilité des composants en béton de l'ouvrage a été testée. Pour le cas particulier d'un ouvrage gravillonné, il apparaît ainsi que la variabilité des paramètres hydro-dispersifs de l'ouvrage n'a pas d'effet, le gravier agissant comme un « tampon » et masquant ainsi l'influence des autres composants en béton sur les relâchements par le colis.

De la même façon, les différents types de colis (taille, sur-enrobage...) ont été analysés. Dans la plupart des cas, le coefficient de diffusion effectif du béton de conteneur apparaît comme le paramètre le plus influent, alors que les propriétés du déchet lui-même (porosité et coefficient de diffusion effectif) jouent un rôle moindre. La faible quantité d'eau entrant dans l'ouvrage conduit à maintenir des conditions de diffusion dominante, ce qui implique un rôle négligeable des perméabilités des composants. Ce résultat apporte une contribution à la définition des spécifications d'acceptation des colis qui, avec cette logique multiparamétrique, restent similaires aux critères précédents.

Étude du transfert de tritium provenant des colis

Sur la période considérée, des simulations numériques ont été menées pour évaluer plus précisément le transfert du tritium gazeux et dissous (représenté symboliquement par T ou ^3H) dans un ouvrage bétonné de stockage du CSA. Le modèle de transfert du tritium dans les différents composants considérés (eau ou hydrogène gazeux) est le modèle diphasique (eau/air) multi-composants avec (HT liquide, HT gaz, HTO liquide, HTO vapeur).

Le modèle conceptuel général est basé sur la géométrie d'un ouvrage stockant des colis de plaques tritiées. L'étude repose sur une approche phénoménologique, avec une représentation géométrique qui prend en compte l'ensemble des composants d'un tel ouvrage (voile, radier, membranes imperméables...) et les séquences d'exploitation du centre de stockage.

Une analyse préliminaire a montré que les ouvrages se comportent comme des systèmes hydrauliquement fermés, qu'ils sont non saturés et que leur taux d'humidité est quasi-constant dans le temps, ce qui n'est pas le cas du terrain et du remblai, dont le comportement hydraulique est fonction de leur perméabilité.

Les différentes voies de transfert du tritium au sein des ouvrages et jusqu'à la nappe ont été analysées au regard de sa mobilité (HT ayant tendance à migrer sous forme gazeuse alors que HTO migre préférentiellement sous forme liquide) et des degrés de saturation de l'ouvrage (figure 11).

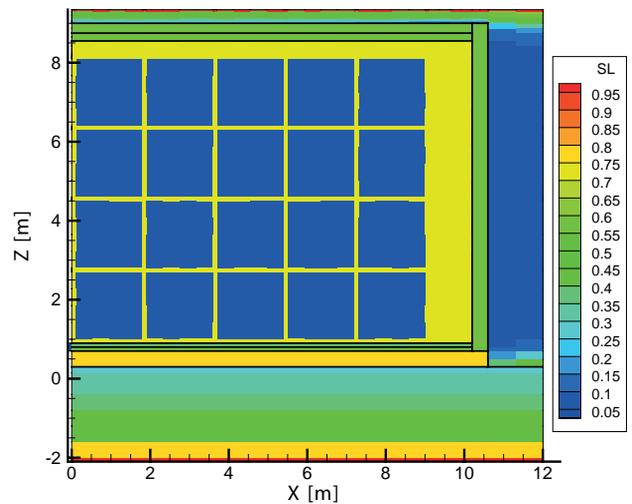
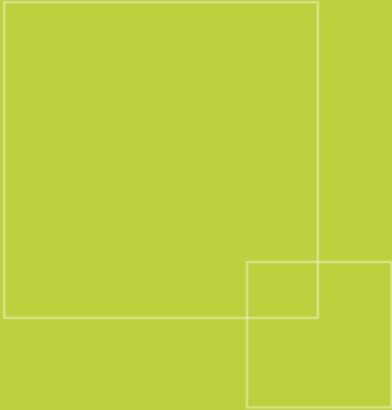


Figure 11 - Cartographie 2D du degré de saturation d'un ouvrage bétonné à 50 ans

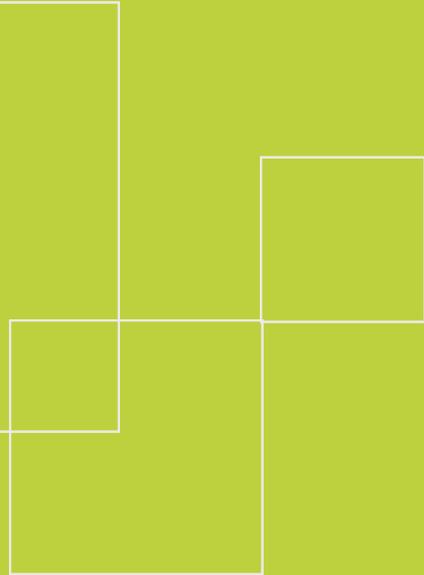
De manière globale, à titre illustratif, le bilan de l'inventaire en Tritium (HT+HTO) à 100 ans indique qu'environ 98 % de l'activité initialement stockée dans l'ouvrage a disparu par décroissance radioactive ; sur les 2 % restants, l'essentiel est encore dans l'ouvrage ou le terrain, seuls 0,2 % sont partis dans l'atmosphère et 0,01 % sont arrivés dans la nappe.

Références bibliographiques

- BENET L.V., TULITA C., CALSYN L., WENDLING J. (2012) Evolution of temperature and humidity in an underground repository over the exploitation period. *Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*. Abstracts p 643-644.
- BENET L.V., BOUILLE C., WENDLING J. (2012) Analysis of the long-term hydraulic-gas transient in the central zone of a deep clay repository. *Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*. Abstracts p 702-703.
- ENSSLE C.P., BROMMUNDT J., KAEMPFER TH. U., MAYER G., WENDLING J. (2012) Full scale 3D modeling of a repository in the Callovo-Oxfordian clay. *Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*. Abstracts p 98-99.
- NARDI A., MANUEL DE VRIES L., TRINCHERO P., IDIART A., MOLINERO J. (2012) Comsol-phreeqC: A tool for high performance numerical simulation of reactive transport phenomena. *Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*. Abstracts p 470-471.
- TREILLE E. & WENDLING J. (2012) Hydraulic and gas transfer numerical simulations at cell and module scale of a clay host rock repository in the FORGE project framework. *Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*. Abstracts p 92-93.
- TREILLE E., WENDLING J., TRENTY L., LOTH L., PEPIN G., PLAS F. (2012) : Probabilistic Analysis Based on Simulations of the Long-Term Gas Migration at Repository-Scale in a Geological Repository for High and Intermediate Level Radioactive Waste Disposal in a Deep Clay Formation. *Proceedings TROUGH Symposium 2012*, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, September 17-19, 2012.



6. La réversibilité du stockage géologique profond et ses implications temporelles



La demande de réversibilité du stockage géologique profond inscrite dans la loi de 2006 sous-tend deux problématiques, la capacité technique à récupérer matériellement les colis et la possibilité laissée aux générations futures de « revenir sur les décisions antérieures et de choisir une autre voie ». La possibilité de « revenir en arrière » impose des adaptations techniques telles qu'une gestion progressive du stockage et la mise en place d'un système d'observation – surveillance. *A contrario*, l'existence même du stockage suppose que les sociétés humaines en gardent la mémoire sur des durées pluriséculaires.

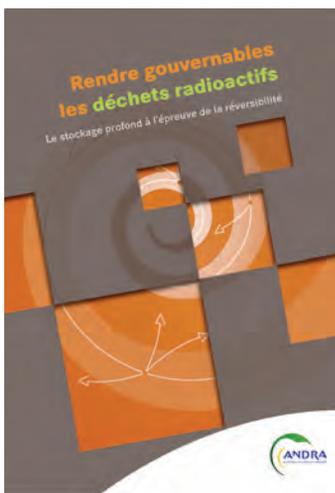
6 | La réversibilité du stockage géologique profond et ses implications temporelles

La demande de réversibilité du stockage géologique profond inscrite dans la loi de 2006 sous-tend deux problématiques qui, à première vue, peuvent paraître indépendantes : 1) la capacité technique à récupérer matériellement les colis, c'est la « récupérabilité », 2) la possibilité laissée aux générations futures de « revenir sur les décisions antérieures et de choisir une autre voie ». De fait, ces deux facettes sont étroitement liées, comme l'a démontré le congrès de Nancy organisé par l'Andra en 2009 (voir bilan précédent « 2006-2009 – 4 ans de recherches scientifiques à l'Andra pour les projets de stockage »).

En effet, laisser aux générations futures la possibilité de « revenir en arrière » impose des adaptations techniques telles qu'une gestion progressive du stockage et la mise en place d'un système d'observation – surveillance des éléments constitutifs du stockage. L'exploitation d'ordre séculaire d'une telle installation nécessite également un suivi de l'environnement adapté aux enjeux et à l'ampleur du projet.

A *contrario*, l'existence même du stockage suppose que les sociétés humaines en conservent la mémoire, ce qui amène à se poser la question de la perception de la temporalité. Sur quelle durée, en effet, les générations futures doivent-elles garder toutes les informations nécessaires pour avoir la possibilité de ressortir les colis de déchets ? Progressivement, la « récupérabilité » deviendra de plus en plus difficile. Comment garder en mémoire l'existence du stockage ? Enfin, au-delà des échelles de temps qui dépassent la vie des sociétés humaines, il importe de réfléchir aux traces que le stockage laissera, indices d'une ancienne activité de l'homme.

6.1 La réversibilité décisionnelle



La réversibilité liée au processus décisionnel, telle qu'initiée par l'Andra, a franchi une étape de consolidation importante en 2010 avec la publication en français et en anglais de l'ouvrage « Rendre gouvernables les déchets radioactifs. Le stockage profond à l'épreuve de la réversibilité » (référence bibliographique en fin de chapitre) et la tenue du congrès de Reims sur « Reversibility and Retrievability » organisé par l'AEN/OCDE avec le soutien de l'Andra.

Le premier a permis de présenter l'approche adoptée par l'Agence à ce stade, fruit des collaborations avec des chercheurs en sciences humaines et sociales et des rencontres scientifiques interdisciplinaires au cours des années précédentes, et sa mise en perspective au regard d'autres approches. Le second a servi à confronter les travaux de l'Andra au niveau international et à construire une vision commune respectueuse des spécificités des projets de stockage dans les différents pays.

Le principe de réversibilité renvoie notamment à la nécessité de préserver une certaine capacité d'adaptation pendant au moins cent ans et, donc, à l'obligation de prises de décisions par étapes. Dans ce but, Oana Ionescu-Riffaud a effectué une thèse en économie, financée par l'Andra de 2008 à 2011, où elle analyse différents aspects de la prise de décisions relative au projet de stockage. Les choix sont intégrés dans l'évaluation courante sous forme d'options. Trois types d'options y sont comparés.

1 L'option d'échange se concentre sur les différents niveaux de récupérabilité en fonction notamment des incertitudes concernant la « valeur » des colis de déchets et les avancées technologiques.

Elle souligne que les options pour changer de niveau (vers plus ou moins de facilité de récupération) s'affectent entre elles et qu'elles doivent, par conséquent, être évaluées simultanément. D'après le modèle, testé numériquement, la possibilité de récupérer les colis de déchets ajoute une plus-value au projet.

2 L'option d'extension (figure 1) met l'accent sur la construction et l'exploitation progressive du centre de stockage géologique en raison notamment de l'incertitude sur la « demande ». La construction du stockage en une seule fois, qui permettrait de bénéficier d'économies d'échelle, est comparée au cas où le stockage est construit par modules, en fonction de l'arrivée d'informations technologiques et économiques, et en fonction des besoins. Le modèle, validé par une application numérique, montre que la stratégie modulaire est plus avantageuse aussi bien pour maximiser la valeur du projet que pour minimiser le coût d'exploitation.

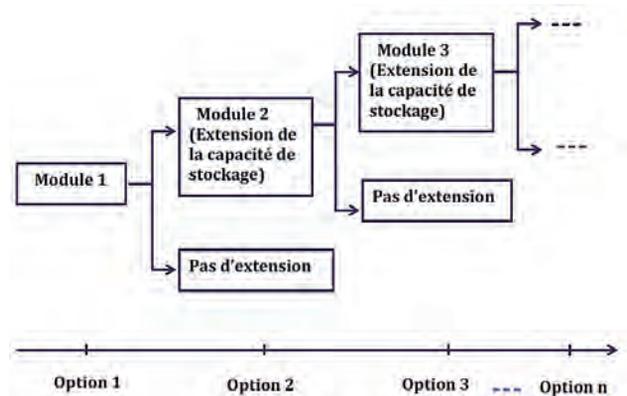


Figure 1 - Représentation d'une option d'extension de la capacité installée

3 L'option d'apprentissage, plus conceptuelle, constitue un essai d'ouverture de nouvelles voies de recherche. La valeur de l'option est analysée en intégrant deux sources d'apprentissage endogène : le retour d'expérience et les investissements en R&D. Avec l'application numérique qui en est proposée, la prise en compte des sources d'apprentissage endogène crée une quasi-option liée à la possibilité de réduction des coûts du stockage.

6.2 L'observation - surveillance du stockage géologique profond

L'Andra a mis en place un système d'observations – surveillance sur les centres de stockage de surface pour recueillir les informations nécessaires aux simulations qui viennent en support aux évaluations de sûreté (voir chapitre précédent).

Pour le stockage géologique profond, en plus d'une surveillance de l'environnement (voir l'OPE ci-dessous), s'ajoute la nécessité de veiller à la réversibilité et au bon fonctionnement du stockage. L'observation et la surveillance du comportement physico-chimique de l'argilite et de l'évolution des infrastructures souterraines et des colis doivent répondre, non seulement, aux besoins de connaissances nécessaires à la gestion et à la sécurité opérationnelle de l'installation, mais aussi à la nécessité de détecter d'éventuelles anomalies de comportement d'éléments constitutifs du stockage.

L'exploitation étant *a minima* séculaire, le système mis en place doit aussi permettre d'acquérir un retour d'expérience qui sera exploité pour la conception des ouvrages et des tranches suivantes de l'installation et pour les révisions de sûreté périodiques en exploitation et après fermeture.

6.2.1 La stratégie d'observation - surveillance des ouvrages de Cigéo

L'Andra a prévu un volet d'observation spécifique des évolutions phénoménologiques, en support à la réévaluation périodique de la sûreté du centre en exploitation et au suivi des conditions de la réversibilité. Le système sera mis en œuvre dès le début de la construction des premiers ouvrages courants et alvéoles de stockage et sera maintenu autant que possible au-delà des premières fermetures partielles. L'objectif est d'amener des éléments de connaissance additionnels à ceux issus de la modélisation et des études actuellement réalisées en laboratoires de surface et dans le Laboratoire souterrain du CMHM, pour alimenter la prise de décision, au fur et à mesure du processus de stockage.

Il s'agit de :

- confirmer les connaissances intervenant dans l'évaluation de sûreté à long terme et préciser les modèles, sur la base de données obtenues *in situ* (échelle, construction, exploitation), dans le cadre de l'évaluation périodique des ouvrages ;
- observer les évolutions des ouvrages et des conditions d'environnement nécessaires à une gestion réversible pouvant aller jusqu'au retrait de colis ;

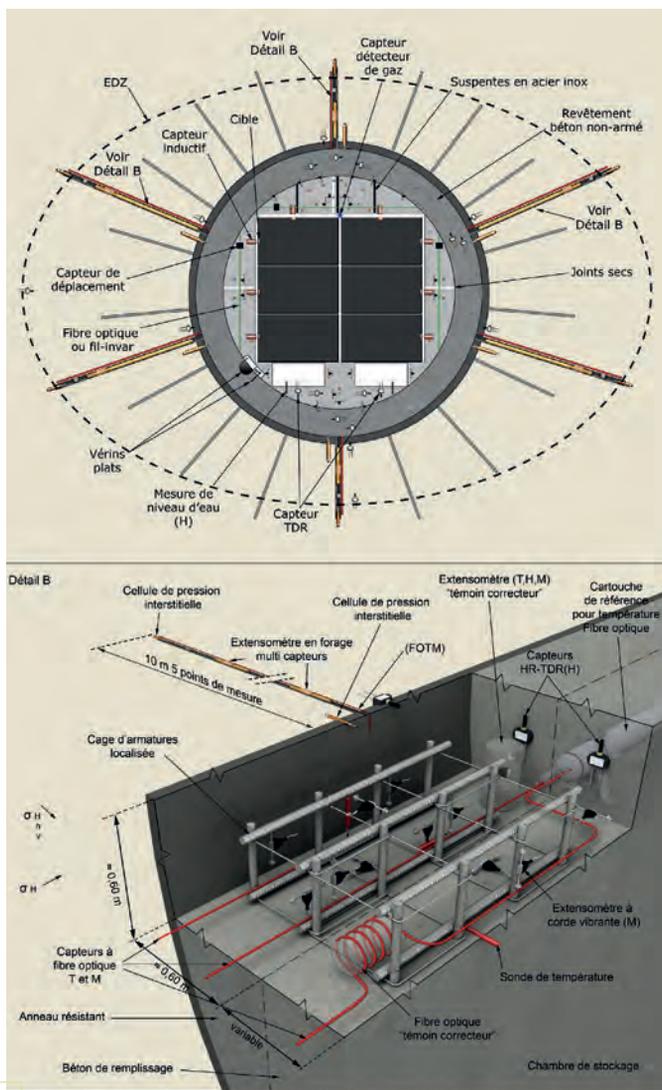


Figure 2 - Exemple d'auscultation prévue pour une alvéole MA-VL

- surveiller certaines évolutions susceptibles d'influer sur la sûreté d'exploitation, en complément et en lien avec les dispositions de sûreté opérationnelle prévues par le « contrôle – commande ».

Les contraintes à respecter vis-à-vis des technologies d'auscultation sont sévères :

- la durée de fonctionnement exigée est pluri-décennale ;
- les dispositifs d'auscultation seront inaccessibles dès leur mise en place dans les ouvrages de stockage ;
- les instruments devront être « discrets », c'est-à-dire ne pas dégrader les conditions favorables à la sûreté à long terme ;
- les conditions d'environnement seront localement agressives (température, chimie, irradiation...).

La stratégie repose donc sur la mise en œuvre d'approches d'auscultation complémentaires, avec une instrumentation à demeure complétée par des inspections visuelles pour les ouvrages accessibles (galeries d'accès par exemple) et par des méthodes d'évaluation non destructives, éventuellement robotisées pour les zones non accessibles.

Cette démarche de redondance et de complémentarité est également déclinée pour l'instrumentation *in situ*.

Les capteurs seront placés en grand nombre. Ils seront associés suivant leurs complémentarités de paramètres à mesurer mais aussi leur technologie : les capteurs éprouvés seront à côté de capteurs innovants, des enregistrements localisés seront associés à des dispositifs réalisant des mesures réparties. Des capteurs étalons placés à cœur compléteront le dispositif global pour surveiller d'éventuelles dérives à long terme des chaînes de mesure.

Dans la même démarche, des alvéoles « témoin » seront fortement instrumentées (figure 2), pour répondre de façon exhaustive aux objectifs techniques d'auscultation. Elles seront réparties au sein de chaque zone de stockage de façon à rendre compte de l'influence du type de colis et des scénarios d'exploitation (durée de ventilation, rapidité de chargement...).

Les autres alvéoles seront équipées d'une instrumentation allégée pour assurer un suivi par comparaison avec les ouvrages « témoin ».

6.2.2 La démarche de R&D et de qualification – démonstration de matériel

En soutien à cette stratégie d'auscultation des ouvrages, de nombreux axes de R&D avaient été engagés sur le développement de moyens technologiques ; plusieurs d'entre eux ont vu leur concrétisation sur la période de 2010 à 2012, notamment à travers la finalisation de thèses et d'un post-doctorat.

Il s'agit en premier lieu d'une recherche en instrumentation visant au développement ou l'amélioration de matériels adaptés aux spécifications du stockage, aux besoins de mesures THMCR et aux contraintes, telles que l'irradiation, la température, l'inaccessibilité du capteur.

C'est ainsi que des avancées significatives ont été obtenues sur :

- le durcissement aux radiations de capteurs à fibre optique capables de fournir des enregistrements thermomécaniques de façon spatialement continue sur de grandes longueurs, capteurs qui pourraient être utilisés en complément de capteurs plus classiques mais fournissant une mesure plus ponctuelle (extensomètre à corde vibrante, etc.) ;
- le développement de la qualification métrologique des capteurs, en particulier à fibre optique fondés sur la rétrodiffusion Raman¹, et de systèmes d'étalonnage *in situ* des fibres optiques ; l'un de ceux-ci a été breveté et implanté dans une des expérimentations du Laboratoire souterrain ;
- le développement d'approches « sans fil » pour l'auscultation et la transmission de données.

¹ Méthode consistant à envoyer une impulsion lumineuse dans la fibre et à mesurer l'énergie qui est renvoyée par rétrodiffusion. L'effet Raman utilise les effets non linéaires dans les fibres.

6 | La réversibilité du stockage géologique profond et ses implications temporelles

Le développement de capteurs et de techniques de traitement du signal

Un des paramètres particuliers à déterminer dans le futur stockage sera la teneur en eau des matériaux et son évolution, notamment celle des argilites pendant la période d'exploitation. Des mesures sont également envisagées dans les bétons, comme indicateur de leur durabilité. Depuis 1995, la couverture du Centre de Stockage de l'Aube a permis de converger vers une chaîne de mesure basée sur la technologie TDR (Time Domain reflectometry) pour évaluer la teneur en eau dans les matériaux géologiques remaniés. Cependant, le transfert de cette technologie vers les matériaux de l'environnement du stockage profond pour répondre aux besoins de suivi de la saturation et désaturation nécessite des efforts complémentaires.

Le principe des sondes TDR consiste à émettre une impulsion électromagnétique dans des tiges métalliques conductrices solidaires (en général deux, voire trois) et à analyser le temps d'aller / retour de l'impulsion au long de ces tiges. Pour un matériau non magnétique, tel que les sols où ces technologies sont souvent déployées (en soutien à l'agriculture), ce temps de parcours est proportionnel à la racine carrée de la permittivité relative du milieu environnant, elle-même largement dépendante de la teneur en eau. Toutefois, dans les milieux poreux, le lien entre teneur en eau et permittivité n'est pas une simple dépendance aux quantités ; l'influence de la fréquence de travail (1MHz ou 1GHz) peut devenir prépondérante. Les méthodes habituelles d'étalonnage ne sont plus suffisamment précises dans des milieux composites comme le sont l'argillite et les bétons. De plus, les résultats dépendent du logiciel de traitement du signal et varient d'une sonde à l'autre suivant la qualité de la transition entre le câble coaxial de rallonge et les tiges conductrices noyées dans le matériau à caractériser.

Pour s'affranchir de ces faiblesses, des études ont été engagées sur une évolution de l'utilisation de ce capteur et sur l'exploitation de la chaîne de mesure. Classiquement, la chaîne utilisée fonctionne avec un système interrogateur temporel, en mode impulsionnel. Ici, les essais ont porté sur une interrogation fréquentielle. L'intérêt réside dans une augmentation considérable de l'information et une possible amélioration du rapport signal sur bruit. Cette approche a de nombreux autres intérêts, tels que la pérennité de la mesure et l'obtention de la valeur directe de la grandeur physique d'intérêt qu'est la permittivité. Enfin, les mesures fréquentielles permettent de réduire la longueur de sonde tout en s'affranchissant de l'influence de la longueur du câble.

Les intérêts pour une excitation fréquentielle sont donc nombreux et ont pu être vérifiés en utilisant un analyseur fréquentiel portatif et les sondes TDR classiques. Deux exemples simples ont été testés, avec de l'eau distillée et un sable « humide » dont la teneur en eau n'était pas connue. Les résultats obtenus à ce stade sont prometteurs et seront poursuivis dans les années à venir grâce à une collaboration quadripartite avec des établissements spécialisés dans ce domaine.

D'autres sondes de mesures sont en cours d'essai ou de qualification. Ainsi, a été lancé en 2012 le développement de capteurs chimiques innovants en complément des technologies actuellement disponibles qui nécessitent un étalonnage régulier, en particulier pour des capteurs gaz, de corrosion et pH pérennes. Cet axe de R&D s'est concrétisé par le dépôt de plusieurs brevets, notamment pour la mesure de l'H₂.

Licences et brevets obtenus sur la période

- « Dispositif de détection et/ou de dosage d'hydrogène et procédé de détection et/ou de dosage d'hydrogène » ; French Patent n° 11 62587, 30/12/2011.
- « Dispositif d'étalonnage en température et procédés d'étalonnage en température et positionnement d'un capteur de température à fibre optique » ; French patent FR 11 58032 du 09.09.2011, dispositif appelé Evertherm.
- « Détecteur d'espèces chimiques à corde vibrante » ; French patent FR 2975184.

Les tests « en situation »

En complément de ces essais en laboratoire, les différents outils de mesures sont installés dans différentes situations, les plus proches possible de ce qu'elles seront en stockage, pour comparer, évaluer et qualifier les matériels développés.

Parmi les divers équipements, on peut citer :

- l'instrumentation installée depuis près de vingt ans par l'Andra sur ses centres de stockage de surface (comportement mécanique des ouvrages, température, etc.) ;
- les capteurs de type extensomètres à corde vibrante, pour une évaluation de la teneur en eau ou pour des mesures réparties thermomécaniques, ont été placés dans des poutres en béton de l'EPR de Flamanville ou des ouvrages en terre (digue de Curbans) ;
- l'instrumentation du scellement de puits du Laboratoire souterrain canadien (expérimentation ESP), dont le suivi se poursuit.

Au sein du Laboratoire souterrain, l'instrumentation est bien évidemment importante. Ainsi, l'ensemble des capteurs dont le développement était suffisamment avancé y a été installé en 2011. Des capteurs à fibre optique destinés à fournir des valeurs réparties de température et de déformation ont été noyés dans le revêtement en béton d'une galerie à l'image de ce qui est envisagé pour le futur stockage Cigéo (figure 3).

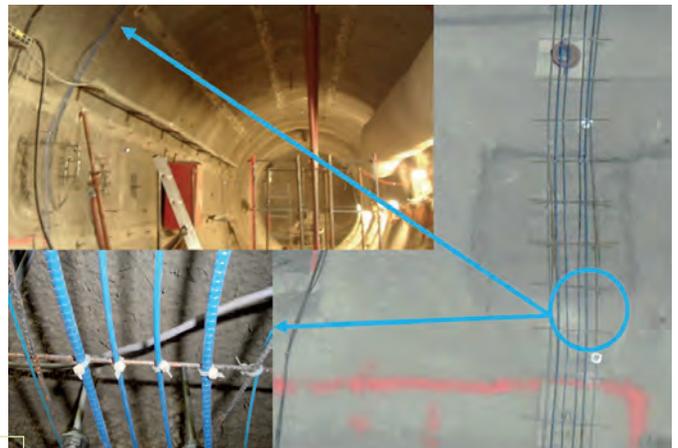


Figure 3 - Photographies des fibres optiques de mesure de température et de déformation placées en galerie avant coulage du revêtement

Cette instrumentation a d'ores et déjà fourni des résultats, en particulier grâce au caractère réparti des mesures, thermiques lors de la prise du béton et mécaniques lors de son retrait. La résolution métrique des appareils de mesure utilisés permet un suivi structural de l'ouvrage. En outre, sur les mêmes fibres optiques, par un simple changement d'interrogateur optoélectronique placé en extrémité, il sera possible de détecter, localiser et quantifier des fissures du revêtement en béton, comme l'ont confirmé les tests menés dans les poutres béton de Flamanville.

De même, des capteurs à fibre optique pourvus d'un enrobage métallique ont été placés sur les faces internes et externes du chemisage d'une alvéole de même type que celles prévues pour les déchets HA (figure 4).

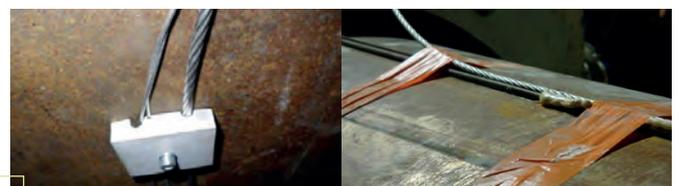


Figure 4 - Photos des dispositifs d'instrumentation de chemisage d'alvéole HA, À gauche : face interne - À droite : face externe

À l'extérieur du chemisage, un câble enregistre les déformations pour détecter le comportement de l'argilite. En face interne, un second câble contient une fibre pour les mesures réparties de déformations ; un troisième câble de fibre optique, isolé des sollicitations mécaniques, fournit des valeurs de température.

Tous ces dispositifs d'instrumentation sont prévus pour des enregistrements de plusieurs années.

6.3 L'Observatoire Pérenne de l'Environnement (OPE) : un suivi séculaire

Pour suivre et analyser dans le temps les impacts environnementaux éventuels associés au projet Cigéo, l'Andra a progressivement mis en place, à partir de 2007, l'Observation Pérenne de l'Environnement, un dispositif capable de décrire précisément l'environnement actuel du site de Meuse/Haute-Marne, grâce à un programme d'observation multidisciplinaire de l'ensemble des milieux composant l'environnement (voir bilan précédent « 2006-2009 – 4 ans de recherches scientifiques à l'Andra pour les projets de stockage »). Cet équipement est prévu pour être fonctionnel sur une durée minimale d'un siècle.

Au-delà des obligations réglementaires imposées aux installations industrielles, l'OPE, qui couvre une surface de 900 km², est un outil de recherche en environnement comme l'atteste sa labellisation comme SOERE par Allenvi à mi-2010.

Après la période initiale, de 2007 à 2009, qui a donné lieu à un important travail d'acquisition de données, principalement obtenues sur échantillons prélevés et qui se poursuit actuellement, l'Andra a mis en place, *in situ*, un réseau de stations instrumentées d'étude des écosystèmes (aquatique, forestier, agricole) et de leur environnement physique (air et eau) au sein de la zone d'observation de l'OPE.

6.3.1 La station atmosphérique d'Houdelaincourt

Cette station, inaugurée en septembre 2011, est dédiée au suivi atmosphérique. Elle est placée sous les vents dominants à quelques kilomètres de la ZIRA. La représentativité recherchée s'étend de la zone OPE au grand quart nord-est de la France.

Il s'agit d'un mât de 120 mètres de haut (figure 5) destiné à enregistrer, en continu et à différentes hauteurs, la qualité de l'air et les paramètres météorologiques (température, humidité relative, précipitations, rayonnement solaire, direction et vitesse des vents) et d'effectuer des prélèvements d'échantillons d'air et de particules.

L'observation des propriétés atmosphériques ne livre d'informations que grâce à une couverture spatiale offerte par les réseaux d'observations et par des séries temporelles longues pour accéder à des descriptions statistiques.

Elle implique donc de partager des protocoles communs d'observation et les données recueillies. La station d'Houdelaincourt s'intègre donc dans des réseaux français et européens. En particulier, elle entre dans le cadre du projet européen ICOS (Integrated Carbon Observation System).

À chaque catégorie de paramètres atmosphériques enregistrés sont ainsi associés des organismes ou laboratoires référents : Météo-France pour les données météorologiques, AIR Lorraine pour les polluants classiques pour lesquels une réglementation existe, IRSN pour la surveillance radiologique, le LGGE et LOA pour le suivi des particules, le LSCE (CEA/CNRS) pour le suivi des gaz à effet de serre.

Un système d'observation portant sur les propriétés physiques, chimiques et optiques des particules a pour objectif de caractériser les particules ambiantes sur le long terme. Il regroupe des analyseurs en continu, des préleveurs au sol et des outils de télédétection. Les mesures *in situ* doivent fournir des informations systématiques sur la masse, la taille et le nombre de particules, leurs propriétés optiques et leur composition chimique.

C'est ainsi que cet ensemble d'équipement a permis d'observer le panache de cendres volcaniques issu de l'éruption du volcan islandais l'Eyjafjöll en mars-avril 2010 (figure 6).



Figure 5 - Vue aérienne de la station d'Houdelaincourt et de son mât

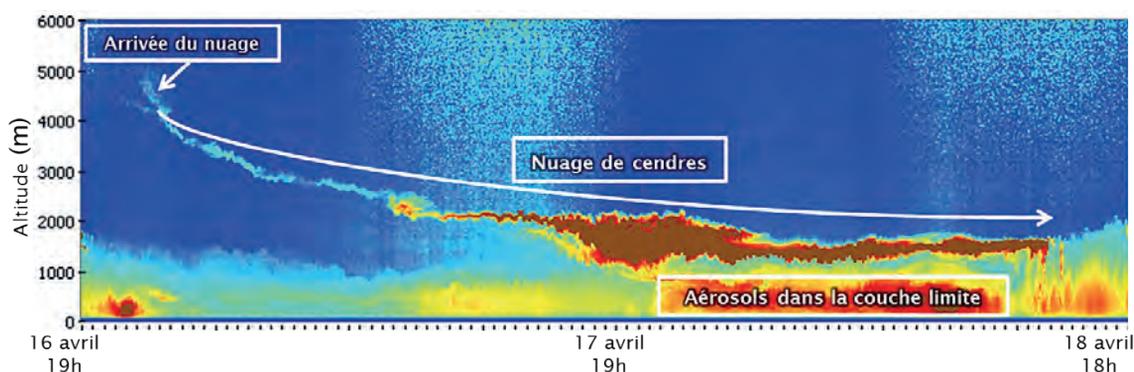


Figure 6 - Évolution de la couche d'aérosol volcanique depuis l'arrivée de la masse d'air au-dessus du sud meusien jusqu'à son mélange dans la couche limite atmosphérique

6 | La réversibilité du stockage géologique profond et ses implications temporelles

6.3.2 Les stations de suivi de la qualité des eaux

Après plusieurs campagnes d'analyses des eaux réalisées depuis 2007 pour décrire la variabilité de leur qualité, six stations de suivi ont été installées sur le bassin versant de la Saulx-Ornain. Elles sont équipées pour mesurer en continu le niveau d'eau et son débit, ainsi que plusieurs paramètres physico-chimiques et biologiques :

Paramètres
pH, conductivité, température, oxygène dissous, turbidité, chlorures
Chlorophylle a et cyanobactéries
Matières organiques, nitrates
HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques)
Métaux, phosphates
PCB (polychlorobiphényles)

Avant l'installation des instruments, une évaluation métrologique de l'ensemble des équipements a été réalisée en collaboration avec le LNE. Il s'agissait d'en déterminer les caractéristiques et d'estimer l'incertitude des mesures en fonction des paramètres enregistrés et du type d'appareil utilisé. Cette évaluation a été double, en premier lieu en laboratoire, puis sur site pendant six mois sur la première des stations. Après mise en place, test et qualification de celle-ci en octobre 2011, l'ensemble du dispositif a été déployé au printemps 2012 (figure 7).



Figure 7 - Exemple de station de suivi de la qualité des eaux

L'originalité de ces stations est l'importance donnée au contrôle qualité des mesures, non seulement en laboratoire, mais également *in situ*. Ces travaux menés sur la robustesse des mesures en fonction des conditions d'utilisation et de la durée sont une garantie de leur validité.

De plus, l'utilisation de ces stations en continu, en parallèle d'enregistrements et d'échantillonnage ponctuels, devrait apporter une évaluation sur la pertinence des suivis intermittents, question sans réponse à ce jour.

6.3.3 Les stations d'étude des écosystèmes

Des stations d'étude des cycles biogéochimiques et des flux de matières dans les écosystèmes ont été installées sur la période considérée. Il s'agit des sites expérimentaux de :

- Montiers-sur-Saulx, dont la mise en place a été terminée en fin d'année 2011, destiné à l'étude d'un écosystème forestier ;

- Osnes-le-Val, dont l'installation a débuté en 2012 sur un écosystème agricole (prairie et culture) ; cet emplacement est également équipé de lysimètres pour l'étude des sols et le suivi du comportement biogéochimique des vers provenant du Laboratoire souterrain.

Le site de Montiers-sur-Saulx se compose de trois stations de mesures représentatives de trois types de sols (alocrisol, calcosol et rendosol) et d'une tour à flux (figure 8). Chacune des trois stations est équipée de capteurs d'humidité et température et de préleveurs de différents éléments à suivre : litières, eau d'écoulement de tronc, eau libre et eau liée à différentes profondeurs de sol... Parmi les données qui sont régulièrement récoltées, figurent la flore, les lichens, les champignons... en plus de l'inventaire forestier.

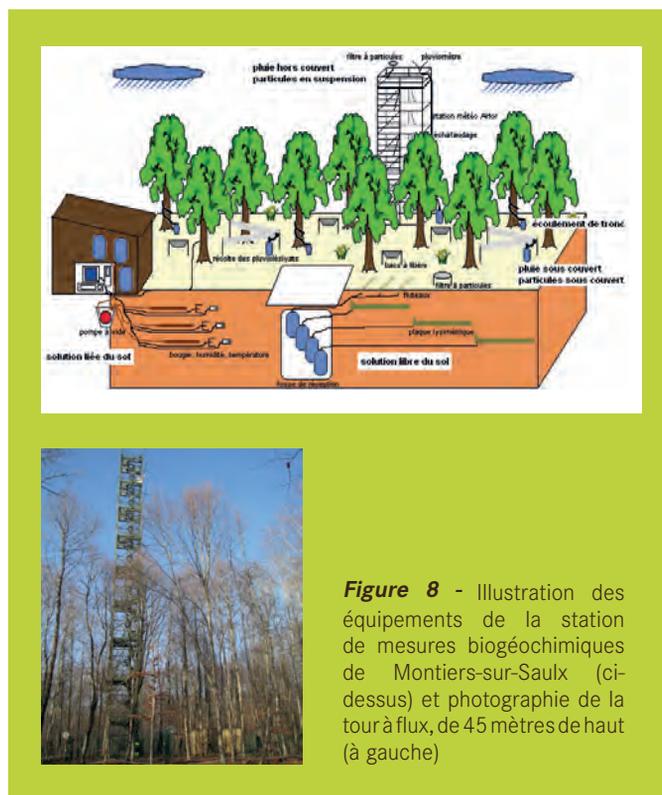


Figure 8 - Illustration des équipements de la station de mesures biogéochimiques de Montiers-sur-Saulx (ci-dessus) et photographie de la tour à flux, de 45 mètres de haut (à gauche)

L'objectif de la tour à flux, haute de 45 mètres pour dépasser la canopée, est de mesurer d'une part les échanges de matière, d'énergie et de quantité de mouvement entre l'atmosphère et la biosphère (sols et peuplement forestier) et d'autre part tous les paramètres essentiels pour connaître l'état de l'écosystème et comprendre son fonctionnement et son évolution. Température de l'air, flux de chaleur sensible, flux de CO₂ et H₂O, pression atmosphérique et vent, rayonnement... , sont mesurés en continu avec des capteurs installés à différentes hauteurs de la tour.

Ces mesures en continu seront complétées par des observations et mesures ponctuelles réalisées à différentes périodicités :

- respiration du sol et des arbres ;
- flux de CH₄ et N₂O au sol.

In fine, il s'agit de comprendre le fonctionnement de l'écosystème au travers de ses échanges avec l'atmosphère.

6.3.4 L'évolution de l'OPE

Après cette phase de mise en place de suivis en continu en complément des analyses menées sur prélèvements, l'observatoire entre dans une

démarche plus prospective, qui consiste à identifier et hiérarchiser les indicateurs les plus pertinents, les mesures à conserver, celles à renforcer ou, au contraire, à étaler dans le temps.

Le développement scientifique de l'OPE passe par l'interaction avec des réseaux de nombreux laboratoires qui étudient l'environnement par une approche multidisciplinaire et à toutes les échelles. À cette fin, l'Observatoire a intégré en 2012 le SOERE-RBV (-Réseau de Bassins Versants).

Il est inclus dans quatre autres SOEREs : FORET, ORAURE (aérosols-particules), GREAT GAZES (Gaz à effet de serre) et ECOSCOPE (Biodiversité).

Afin de faciliter les échanges d'informations scientifiques, un site web OPE (www.andra.fr/ope/) a été créé, incluant un espace de travail pour les équipes. Les données recueillies sont d'ores et déjà accessibles sur les réseaux partenaires.

En termes d'équipements, la construction d'une écothèque est en cours d'achèvement pour la conservation à long terme et de haute qualité d'échantillons à fin d'analyses ultérieures, si besoin.

Les premiers travaux de construction ont démarré début 2012 (figure 9) et la mise en service de l'installation est programmée pour l'été 2013.

Trois modes de conservation seront possibles :

- 1 par séchage sous atmosphère régulée autour de 18°C pour les sols et céréales ;
- 2 en surgélation à -80°C pour les échantillons bruts (sols, eau...) ;
- 3 par cryogénie, à -150°C pour les échantillons broyés de végétaux forestiers et agricoles et de produits d'origine animale.

L'Écothèque sera ainsi la première installation de conservation cryogénique des milieux de l'Environnement de France. Cette écothèque est une des installations mises à disposition pour le projet SOMET (voir encadré ci-dessous).



Figure 9 - Le chantier de construction de l'écothèque en février 2013

L'Infrastructure de Recherche « SOMET »

L'Andra a la volonté de valoriser les infrastructures et moyens qu'elle met en place sur le site de Meuse - Haute-Marne pour accompagner et développer le programme Cigéo de stockage souterrain des déchets radioactifs, en mobilisant la participation d'équipes scientifiques et techniques extérieures à l'Agence.

À cet effet, elle porte le pôle scientifique désigné par SOMET (Structure pour l'Observation et la Mémoire de l'Environnement et de la Terre), qui a l'ambition d'être un Campus national, dont l'objectif est de mettre en œuvre un ensemble de moyens cohérents et thématiques autour du suivi de l'environnement local et de la conservation de la mémoire.

SOMET est d'ores et déjà labellisée « Infrastructure de Recherche » par le Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. Elle a pour vocation de donner accès à différentes installations pour des programmes scientifiques nationaux et internationaux ne relevant pas des objectifs immédiats de l'Andra.

Elle regroupe à ce jour deux grands équipements déjà opérationnels et un troisième sur le point de l'être :

- Le Laboratoire souterrain qui, au-delà de sa vocation scientifique d'acquisition des paramètres devant guider les conditions d'implantation d'un futur stockage géologique, est un remarquable outil pour la réalisation d'expérimentations dédiées à l'étude du comportement des formations géologiques et la démonstration de technologies d'ingénierie minière ;
- L'Observatoire Pérenne de l'Environnement (labellisé SOERE) dont la vocation est la surveillance, la recherche d'indicateurs pertinents pour le suivi multifactoriel de l'environnement : biodiversité, qualité de l'atmosphère, des eaux, des sols, évolution socio-économique du territoire. L'OPE a des caractéristiques structurelles pluridisciplinaires uniques en France. Son originalité réside dans l'opportunité du suivi des paramètres de l'Environnement durant un siècle par son association à Cigéo. Il est inséré dans de nombreux réseaux et programmes nationaux et internationaux ;

- Une Écothèque, qui archive et conserve sur le long terme des matrices physiques et biologiques prélevées dans l'environnement, constituant la mémoire de différents compartiments de la Planète et de ses enveloppes superficielles, milieux de vie des sociétés humaines. Elle appartient au réseau international des écothèques (Environmental Specimen Bank).



Vue d'architecte de l'écothèque

Un projet de Centre de la mémoire pourrait y être associé. Son objectif est d'élaborer les outils et les méthodes pour conserver sur le long terme la mémoire du stockage souterrain des déchets radioactifs et garantir le maintien d'un niveau optimal de connaissances sur ces stockages, afin de permettre aux générations futures de comprendre nos choix actuels et laisser aux historiens du futur des archives étayées.

Enfin, l'Andra développe, autour du groupement de ces infrastructures, le projet de création d'une Station pédagogique apte à recevoir des étudiants des Universités et Grandes Écoles en formation dans des disciplines relevant notamment des Sciences de l'Univers et de l'Environnement mais également de la météorologie, des travaux souterrains et des sciences humaines et sociales. Cette station sera ouverte à la totalité des établissements d'enseignement français, avec une potentielle ouverture européenne favorisée par son implantation géographique dans l'est de la France.

6 | La réversibilité du stockage géologique profond et ses implications temporelles

6.4 Comment garder la mémoire d'un stockage géologique profond ?

Dans le cas d'un stockage géologique profond, les durées prises en compte doivent être considérées à l'échelle temporelle des plus longues décroissances radioactives des éléments contenus dans les déchets. Si ces durées sont incomparablement plus longues que celles des activités humaines habituelles, d'autres échelles de temps, intermédiaires, pour la gestion même du stockage puis sa réversibilité, sont à prendre en considération.

6.4.1 L'appréhension des échelles de temps

Le caractère exceptionnel des temporalités mises en jeu marque donc fortement le projet dans ses dimensions sociétales, tant du point de vue de leur perception que dans celui de la question de la transmission de l'information. Comment garder la mémoire d'un lieu ou d'une activité humaine sur de telles durées ? Pour réfléchir à cette question, une quinzaine d'organismes internationaux, dont l'Andra, travaillent sous l'égide de l'AEN/OCDE.

Les recherches, qui font l'objet de réunions trimestrielles et d'un *Workshop* annuel, portent sur l'état des lieux dans ce domaine et sur les facteurs de perte de mémoire dans une logique de conservation des outils et dans une autre logique de perte de ces outils.

Pour communiquer avec les générations futures, il faudrait non seulement une information adéquate, la continuité de la langue et la pérennité des moyens de conservation, mais aussi une volonté sociétale que cette mémoire perdure. Mais la mémoire peut aussi reposer sur les paysages qui seront modifiés, volontairement ou non, et sur les « débris » laissés volontairement ou non, voire sur l'enracinement humain que l'activité aura provoqué.

À l'Andra, un groupe de travail interne a été mis en place pour considérer la spécificité des grandes échelles de temps du projet Cigéo, et ce qu'elle implique en termes de transmission des informations au fil des générations. Par ailleurs, ce sujet, à la frontière des connaissances scientifiques et techniques, est traité par le groupement de laboratoires en Sciences Humaines et Sociales.

La réflexion sur certains aspects plus particuliers de la notion de temporalité est abordée dans une thèse Andra en épistémologie et histoire des sciences démarrée en 2012. Si le cœur du sujet est d'aborder la question de la place et du rôle de l'Andra dans la gouvernance des déchets radioactifs, la première partie s'interrogera sur les différentes temporalités du projet (durée de vie des déchets, temps de la recherche, temps industriel) pour appréhender les manières d'inscrire le temps long dans le temps politique et sociétal.

6.4.2 La transmission intergénérationnelle

Une des problématiques en lien avec les échelles de temps du stockage en milieu géologique profond est la transmission aux générations futures des moyens et ressources d'intervention. Cette communication de l'information peut être abordée sous deux facettes différentes : ① la mise au point de supports techniques sur lesquels sont recueillies les données, ② la diffusion la plus large possible de l'information au sein de la société, la multiplication des porteurs en facilitant le souvenir.

Les moyens techniques de transmission de la mémoire

Ceux-ci recouvrent de multiples moyens, tel que l'archivage de longue durée, qui sous-entend aussi de faire un état des lieux sur l'archivage numérique déjà produit et sur la pérennité des supports et des techniques de lecture.

D'autres moyens techniques de conservation de la mémoire tels que les disques saphir gravés qui sont conçus pour conserver des données sensibles pendant plus de 100 000 ans et pallier ainsi la faible espérance de vie des modes de stockage numériques sont à l'état de prototypes.

Plus spécifiquement, l'Andra travaille sur un projet de futur Centre de mémoire et d'archivage historique qui s'intégrera dans le projet Cigéo.

La société comme moyen de transmission de la mémoire

La transmission des savoirs et des connaissances associées aux stockages ne saurait cependant être garantie par les seuls moyens techniques au-delà de périodes millénaires, voire simplement séculaires. Cette problématique est abordée par l'Andra depuis 2011 avec le concours des sciences humaines et sociales, dans le cadre d'un projet intitulé « Mémoire des centres de stockages des déchets radioactifs pour les générations futures » destiné à analyser les processus de création de la mémoire au sein de la société.

Ce travail a commencé par une revue de la littérature sur la notion de mémoire plurimillénaire. Force est de constater que les travaux académiques dans ce domaine sont rares. De plus, dans le cas du stockage géologique profond, la problématique présente en plus un caractère paradoxal : les déchets doivent être maintenus à l'écart sur de très longues durées alors que la connaissance de la présence du stockage devrait être transmise, sans variations, de génération en génération.

Partant du principe que la mémoire se construit toujours au présent, une enquête a été menée en 2012 sur le Centre Meuse/Haute-Marne par une équipe du Centre d'étude des techniques, des connaissances et des pratiques (Cetcopra) de l'université Paris 1- Sorbonne visant à définir les enjeux scientifiques d'une approche socio-anthropologique sur cette thématique. La mémoire de Cigéo est apparue ainsi comme étant structurée par une série de tensions duales (mémoire - oubli, fond - surface, dedans - dehors, ingénierie - science...).

Une poursuite de ce travail ethnographique est prévue sur la période 2013-2016 qui devra mener à une mise en évidence plus fournie de ces apparentes contradictions.

Parallèlement à cette analyse de l'état des lieux, une autre approche a consisté à rechercher quels peuvent être les moyens de garder la mémoire en s'appuyant sur les interrelations au sein des sociétés humaines elles-mêmes. Il s'agit, par exemple, de propager l'information via les réseaux sociaux. Ainsi, des messages pour les générations futures pourraient être diffusés via Facebook Andra mémoire. L'art est également un vecteur possible ; pour ce faire, l'Andra soutient de nombreux artistes qui, selon leur sensibilité, laissent leur « message » (figure 10).

D'autres moyens sont envisagés : le projet SOMET (voir encadré « *L'infrastructure de Recherche SOMET* ») sera un campus destiné à accueillir plusieurs centaines d'étudiants par an pour qu'ils bénéficient d'un



Figure 10 - Exposition de Julien CARREYN au centre d'art contemporain de Troyes de mai à juillet 2013 « Les informations sont disponibles, dans des blocs en plastique symbolisant le stockage des déchets, mais il faut se baisser pour aller les chercher »

enseignement pratique en environnement, géosciences, métrologie et mémoire. Par là-même, ils acquerront une connaissance scientifique et technique du stockage géologique profond et transmettront, au moins partiellement, leurs connaissances sur le sujet.

6.5 L'analyse des traces humaines passées selon différentes temporalités

Le sujet traité dans ce domaine est celui de la mémoire passive qui intéresse le très long terme, au-delà de la conservation de la mémoire humaine. Il s'agit, en effet, de savoir si des humains ayant notre niveau de développement technique et intellectuel auront la possibilité de détecter les traces d'un stockage géologique dans les paysages du futur, qu'il s'agisse des traces physiques du stockage proprement dit, ou des traces des installations connexes de surface. En d'autres termes, est-ce que le stockage lui-même peut être un facteur de mémoire ?

Le travail engagé en fin 2011 doit durer jusqu'en 2014, en plusieurs étapes :

- 1 évaluer la durée de vie possible (en ordres de grandeur et jusqu'à des périodes de plusieurs centaines de milliers d'années) de conservation des traces du stockage géologique selon la localisation et les caractéristiques initiales de ces traces et en prenant en compte les évolutions futures possibles (climat, installations anthropiques, etc.) ;
- 1 estimer dans quelles mesures les populations du futur ayant notre niveau de développement pourront détecter les traces du site à long terme ;
- 1 analyser la possibilité que des spécialistes en géosciences du futur fassent une interprétation correcte des traces laissées par un stockage profond de déchets radioactifs.

Les études en cours portent sur la première phase, l'archéologie des techniques et des paysages. Des premiers résultats, il apparaît que les versets constituent les vestiges les plus significatifs d'une activité anthropique souterraine pour deux raisons essentielles. D'une part, elles constituent des reliefs postiches, de hauteurs métriques à décimétriques, selon le volume des versets, avec des formes « pas naturelles ». D'autre part, elles sont formées de matériaux profonds distincts (âge, minéralogie...) du substratum sur lesquelles elles reposent.

Sur des périodes de plusieurs siècles, la reconnaissance de versets dépend de la granulométrie et de la nature lithologique (blocs calcaires des formations sus-jacentes, ou particules fines d'argiles du Callovo-Oxfordien), de la durée et du type de paysage. Les versets argileux ne peuvent constituer des formes de relief que pendant une durée limitée sous forêt.

Les versets caillouteuses ont davantage de chances d'être conservées pour des durées plus longues également dans des espaces boisés. Cependant, même si la quasi-totalité des versets étaient réutilisées ou/et érodées, un seul caillou caractéristique de l'Oxfordien permettrait de révéler la présence d'éléments allochtones et de poser clairement la problématique de leur origine sur le plateau des Calcaires du Tithonien.

En revanche, et contrairement aux mines anciennes non comblées (figure 11), les puits et descenderies du stockage ne seront pas de bons indicateurs d'activité humaine car ces accès au stockage souterrain seront scellés et rebouchés pour des questions de sûreté à long terme. En effet, les anciens puits de mines comblés ne restent détectables que quelques dizaines (centaines, au maximum) d'années.

Les bâtiments sont des éléments ponctuels qui ne peuvent subsister que quelques siècles surtout s'ils ne sont pas entretenus. Ils sont souvent plus difficiles à interpréter surtout s'ils n'ont laissé que des traces en profondeur.

Les limites de parcellaire et les voies de communication sont conservées sur de longues durées même si ces éléments linéaires sont apparemment fragiles : des éléments de parcellaire gallo-romain ou le tracé de voies romaines sont toujours visibles dans l'est de la France. Le cas



Figure 11 - Puits antique (mines du Laurion)

le plus intéressant est constitué par les voies ferrées : le relief marqué contraint les créateurs de ces voies à établir des tracés en déblais et en remblais (figure 12) et ces voies sont fréquemment réutilisées comme chemins ruraux ou comme voie verte. Il est donc probable que les éléments linéaires liés au stockage (routes de desserte, voie ferrée et parcellaire) seront conservés au moins pendant plusieurs siècles.

Sur des échelles de temps beaucoup plus longues, de l'ordre de plusieurs milliers d'années, il est impossible de transposer les traces humaines d'un passé antérieur à 2 000 ans à une période supérieure à 2 000 AP (Après le Présent), d'autant plus qu'on assiste à des destructions rapides depuis le XIX^{ème} siècle. Si la société continue à ce rythme, peu de traces vont subsister. Aussi est-il légitime de se poser la question de savoir si l'exemple du passé est transposable au futur.

La recherche de traces potentielles des activités liées au projet de stockage s'intéresse donc aux témoins d'ordre géomorphologique, au sens large. C'est ainsi qu'il apparaît que, si les versets ont disparu, érodés par les vents et les pluies, les alluvions des cours d'eau contiendront des argiles du Callovo-Oxfordien alors même qu'elles devraient en être absentes.

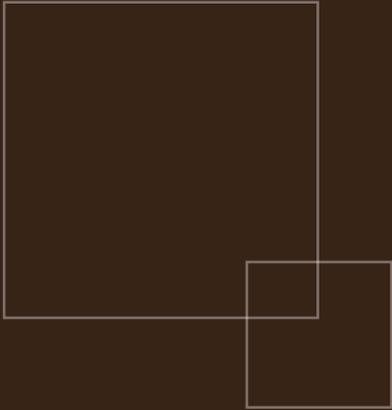
La « mémoire » du stockage subsistera donc, indirectement, sur de très longues périodes de temps.



Figure 12 - Carte de localisation de la tranchée ferroviaire de Longeaux (Meuse) – les rectangles entourent les portions de voie ferrée dont les traces vont perdurer

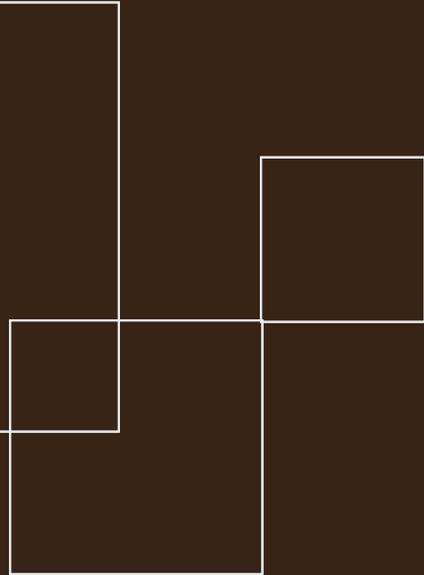
Références bibliographiques

- ANDRA (2010) Rendre gouvernables les déchets radioactifs. Andra 381 – juin 2010 – DCOM-10-0066 – ISBN 2.916162.070.0.
- BUSCHAERT S., LESOILLE S., BERTRAND J., LANDAIS P. (2012) Andra's Geologic repository monitoring strategy. Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, 176-177.
- GENET A., SEYNAVE I., SAINT-ANDRE L., LECLERC E., CONIL S., DIDIER S., SIMON B., GEGOUT J.C., DUPOUEY J.L., NYS C. & TURPAULT M.P. (2011) Mise en place d'un réseau de suivi des écosystèmes forestiers en limite des départements de la Meuse et de la Haute-Marne, Revue forestière française. LXIII-3, 347-360.
- HERMAND G., BERTRAND J., FARHOUD R., SUZUKI K., ETO J., TANABE H., TAKAMURA H., SUYAMA Y. (2012) Seals monitoring systems using wireless communications. Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, 184-185.
- IONESCU-RIFFAUD O. (Thèse Andra soutenue fin 2011, publiée en janvier 2013) Réversibilité du stockage géologique des déchets radioactifs : la théorie des options réelles dans l'aide à la décision. Université de Nancy II. Thèse primée par l'Académie Lorraine des Sciences.



7. La diffusion des résultats et la valorisation

Bien que l'Andra n'ait pas le rôle d'organisme de recherche au sens académique, l'Agence cherche à favoriser la diffusion scientifique à haut niveau, via l'organisation de congrès et colloques nationaux et internationaux, la publication d'articles dans des revues de rang A et le soutien de la recherche doctorale.



7 | La diffusion des résultats et la valorisation

Bien que l'Andra n'ait pas le rôle d'organisme de recherche au sens académique, l'Agence cherche à favoriser la diffusion scientifique à haut niveau, via l'organisation de congrès et colloques nationaux et internationaux, la publication d'articles dans des revues de rang A et le soutien de la recherche doctorale.

7.1 Les congrès

Les congrès « Clays in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement »

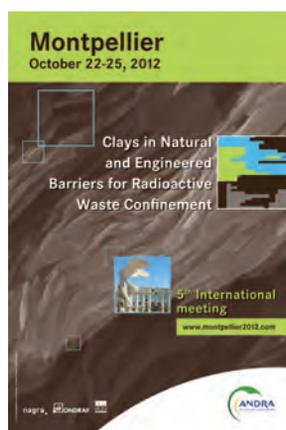


Figure 1 - Affiche du congrès de Montpellier

Deux congrès internationaux sur les propriétés de confinement des argiles ont été organisés par l'Andra sur la période écoulée. Le quatrième s'est tenu au palais des Congrès de Nantes du 29 mars au 1^{er} avril 2010 ; il a rassemblé 492 participants en provenance de 18 pays. Le cinquième congrès a eu lieu au Corum de Montpellier du 22 au 25 octobre 2012 (figure 1) ; 560 personnes, de 21 nationalités y étaient présentes.

Ces manifestations scientifiques voient la participation de nombreux instituts, universités et laboratoires de recherche impliqués dans les études sur les argiles, ainsi que la quasi-totalité des organisations nationales de gestion des déchets radioactifs des pays ayant une industrie nucléaire. Une large gamme de sujets scientifiques, appliqués à l'isolement des déchets, est couverte au travers des différentes sessions orales et des thématiques présentées sous forme de posters. Les sujets régulièrement abordés sont :

• general strategy: from exploration to simulation ;
• diffusion processes and solute transport ;
• pore-water chemistry ;
• retention/Sorption ;
• host rocks permeability and self-sealing ;
• excavation Damaged Zone: characterization, evolution and modeling ;
• thermo-Hydro-Mechanical Processes ;
• clay Imaging & nano characterization ;
• geochemical modeling ;
• coupled Processes & Modeling ;
• metal / Clay Interactions ;
• gas transfer ;
• microbial Activities.

- general strategy: from exploration to simulation ;
- diffusion processes and solute transport ;
- pore-water chemistry ;
- retention/Sorption ;
- host rocks permeability and self-sealing ;
- excavation Damaged Zone: characterization, evolution and modeling ;
- thermo-Hydro-Mechanical Processes ;
- clay Imaging & nano characterization ;
- geochemical modeling ;
- coupled Processes & Modeling ;
- metal / Clay Interactions ;
- gas transfer ;
- microbial Activities.

Un numéro spécial de *Physics and Chemistry of the Earth* (36 – 2011) rassemble plusieurs articles issus du congrès de Nantes 2010. La plupart des présentations faites à Montpellier 2012 seront publiées sous forme d'articles dans deux revues spécialisées "Clay Minerals" et "Geol Soc books" (publications prévues en 2013).

Les autres congrès

Le colloque international « Reversibility and Retrievability » s'est tenu à Reims du 14 au 17 décembre 2010 sous l'égide de l'AEAN, avec le soutien de l'Andra ; il a rassemblé près de 200 participants de 16 pays différents.

Cette manifestation scientifique s'est concrétisée par la parution de l'ouvrage « *Rendre gouvernables les déchets radioactifs - Le stockage profond à l'épreuve de la réversibilité* » en versions française et anglaise.

7.2 Les publications 2010 à 2012 dans des revues à comité de lecture

Chaque année, les recherches menées par les partenaires, prestataires et doctorants de l'Andra font l'objet de publications scientifiques dans des revues dites de « rang A ». Les auteurs en sont les chercheurs des différents organismes qui travaillent avec l'Andra, les doctorants et les ingénieurs de l'Agence. Sur la période considérée, le nombre de publications est compris entre 47 et 66 (figure 2).

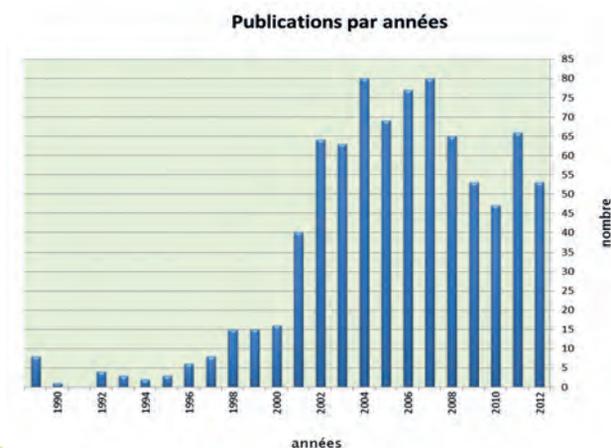


Figure 2 - Histogramme du nombre de publications depuis 1990 (avant cette date, les publications sont regroupées)

La liste des publications de la période 2010 – 2012 résultant des recherches menées pour l'Andra est donnée ci-dessous, par année.

Publications en 2010

ABOU-CHAKRA GUERY A., CORMERY F., SHAO J.F., KONDO D., A comparative micromechanical analysis of the effective properties of a geomaterial: Effect of mineralogical compositions, Computers and geotechnics, 37, 5, 585-593.

ACKERER P., DELAY F., Inversion of a set of well-test interferences in a fractured limestone aquifer by using an automatic down-scaling parametrization technique, Journal of hydrology, 389, 1-2, 42-56.

AMMAR M.R, ROUZAUD J.N., VAUDEY C.E., TOULHOAT N., MON-COFFRE N., Characterization of graphite implanted with chlorine ions using combined Raman microspectrometry and transmission electron microscopy on thin sections prepared, Carbon, 48, 1244-1251.

ANDRE G., HIBSCH C., FOURCADE S., CATHELIN M., BUSCHAERT S., Chronology of fracture sealing under meteoric fluids environment: microtectonic and isotopic evidences of major Cenozoic events in the eastern Paris Basin (France), Tectonophysics, 490, 214-228.

BATAILLON C., BOUCHON F., CHAINAIS-HILLAIRET C., DESGRANGES C., HOARAU E., MARTIN F., PERRIN S., TUPIN J., TALANDIER J., Corrosion modeling of iron based alloy in nuclear waste repository, Electrochimica acta, 55,15, 4451-4467.

BLANC P., BOURBON X., LASSIN A., GAUCHER E., Chemical model for cement-based materials: Temperature dependance of thermodynamic functions for nanocrystalline and crystalline C-S-H phases, Cement and Concrete Research, 40, 6, 851-866.

BLANC P., BOURBON X., LASSIN A., GAUCHER E., Chemical model for cement-based materials: Thermodynamic data assessment for phases other than C-S-H, Cement and Concrete Research, 40, 9, 1360-1374.

BREVET J., GRASSET L., SCHAFFER T., CLARET F., GAUCHER E., ALBRECHT A., AMBLES A., First spectroscopic characterization of the organic matter associated with rocks minerals in the Callovo-Oxfordian formation, Organic geochemistry, 41, 221-233.

BRIGAUD B., VINCENT B., DURLET C., DECONINCK J-F., BLANC P., TROUILLER A., Acoustic properties of ancient shallow-marine carbonates: Effects of depositional environment and diagenetic processes (middle Jurassic Paris Basin France), Journal of sedimentary research, 80, 9, 791-807.

CALVARUSO C., TURPAULT Marie-Pierre, LECLERC E., RANGER J., GARBAYE J., UROZ S., FREY-KLETT P., Influence of forest trees on the distribution of mineral weathering-associated bacterial communities of the scleroderma citrinum mycorrhizosphere, Applied and environmental microbiology, 76, 14, 4780-4787.

DAUZERES A., LEBESCOPP, SARDINIP., Physico-chemical investigation of clayey, cement-based materials interaction in the context of geological waste disposal: experimental approach and preliminary results, Cement and Concrete Research, 40, 8, 1327-1340.

DELAY J., LEBON P., REBOURS H., Meuse, Haute-Marne center: Next steps towards a deep disposal facility, Journal of rock mechanics and geotechnical engineering, 21, 41-47.

DUBACQ B., VIDAL O., DE ANDRADE V., Dehydration of dioctahedral aluminous phyllosilicates: thermodynamic modelling and implications for thermobarometric estimates, Contributions to Mineralogy and Petrology, 159, 159-174.

EBNER H., TOUSSAINT R., SCHMITTBUHL J., KOEHN D., BONIS P., Anisotropic scaling of tectonic stylolites: A fossilized signature of the stress field ?, Journal of Geophysical Research, 115.

EL ALAOU L., ERN A., VOHRALIK M., Guaranteed and robust a posteriori error estimates and balancing discretization and linearization errors for monotone nonlinear problems, Computer methods in applied mechanics and engineering.

EL HAJJ H., ABDELOUAS A., GRAMBOW B., DION M., Microbial corrosion of radioactive waste containers under geological conditions, Physics and Chemistry of the Earth A/B/C, 35, 6-8, 248-253.

ERN A., MOZOLEVSKI I., SCHUH L., Discontinuous Galerkin approximation of two-phases flows in heterogeneous porous media with discontinuous capillary pressures, Computer methods in applied mechanics and engineering, 199, 1491-1501.

ERN A., STEPHANSEN A., VOHRALIK M., Guaranteed and robust discontinuous Galerkin a posteriori error estimates for convection-diffusion-reaction problems, Journal of computational and Applied mathematics, 234, 114-130.

GRASSET L., BREVET J., SCHAFFER T., CLARET F., GAUCHER E., ALBRECHT A., AMBLES A., Sequential extraction and spectroscopy characterization of the organic matter of the Callovo-Oxfordian formation, Organic geochemistry, 41, 221-233.

HENAU L. J.-M., MOREAU M.G., BLAIRON S., SALIN J., COURIVAUD J.-R., TAILLADE F., MERLIOT E., DUBOIS J.P., BERTRAND J., BUSCHAERT S., MAYER S., DELEPINE-LESOILLE S.,

Truly distributed optical fiber sensors for structural health monitoring: From the telecommunication optical fiber drawing tower to water leakage detection in dikes and concrete structure strain monitoring, Advances in Civil Engineering, volume 2010.

JODIN-CAUMON M-C., MOSSER-RUCK R., ROUSSET D., RANDI A., CATHELINIEAU M., MICHAU N., Effect of a thermal gradient on iron-clay interactions, Clays and clay minerals, 58, 5, 667-681.

JOUGNOT D., GHORBANI A., REVIL A., LEROY P., COSENZA P., Spectral induced polarization of partially saturated clay-rocks: a mechanistic approach, Geophysical journal international, 180, 210-224.

JOUGNOT D., REVIL A., Thermal conductivity of unsaturated clay-rocks, Hydrology and Earth System Sciences (HESS), 14, 91-98.

JOUGNOT D., REVIL A., LU N., WAYLLAC A., Transport properties of the Callovo-Oxfordian clay-rock under partially saturated conditions, Water Resources Research, 46.

LADAOU W., VIDAL T., SELLIER A. & BOURBON X. (2010) Thermal activation of basic creep for HPC in the range 20-80°C. Computational Modelling Concrete Structures. EURO-C 2010. p 513-518. Bicanic *et al.* Eds. Taylor and Francis Group, London.

LAVASTRE V., LE GAL LA SALLE C., MICHELOT J.L., GIANNESINI S., BENEDETTI L., LANCELOT J., LAVIELLE B., MASSAULT M., THOMAS B., GILABERT E., BOURLES D., CLAUER N., AGRINIER P., Establishing constraints on groundwater ages with ³⁶Cl ¹⁴C 3H and noble gases: a case study in the eastern Paris basin France, Applied Geochemistry, 25, 123-142.

LEROUGE C., CLARET F., DENECKE M.A., WILLE G., FALKENBERG G., RAMBOZ C., BENY C., GIFFAUT E., SCHAFFER T., GAUCHER E.C., TOURNASSAT C., Comparative EPMA and u-XRF methods for mapping micro-scale distribution of iodine in biocarbonates of the Callovo-Oxfordian clayey formation at Bure Eastern part of the Paris Basin, Physics and Chemistry of the Earth Parts A, B, C, 35, 6-8, 271-277.

LEROUGE C., GAUCHER E.C., TOURNASSAT C., NEGREL P., CROUZET C., GUERROT C., VINSOT A., BUSCHAERT S., MICHEL P., Strontium distribution and origins in a natural clayey formation (Callovo-Oxfordian Paris Basin France): a new sequential extraction procedure, Geochimica et Cosmochimica Acta, 74, 10, 2926-2942.

LIN J.C., KANIT T., MONCHIET V., SHAO J.F., KONDO D., Numerical implementation of a recent improved Gurson-type model and application to ductile fracture, Computational Materials Sciences, 47, 901-906.

MARTY N., FRITZ B., CLEMENT A., MICHAU N., Modelling the long term alteration of the engineered bentonite barrier in an underground radioactive waste repository, Applied clay science 47, 1-2, 82-90.

MATHIEU R., VIEILLARD P., A predictive model for the enthalpies of formation of zeolites, Microporous and Mesoporous Materials, 132, 335-351.

MISHRA S., JAFFRE J., On the upstream mobility scheme for two-phase flow in porous media, Computational Geosciences, 14, 105-124.

MOSSER-RUCK R., CATHELINIEAU M., GUILLAUME D., CHARPENTIER D., ROUSSET D., BARRES O., MICHAU N., Effects of temperature Ph iron, clay and liquid, clay ratios on experimental conversion of di-octahedral smectite to berthierine chlorite vermiculite or saponite, Clays and clay minerals, 58, 2, 280-291.

7 | La diffusion des résultats et la valorisation

NEFF D., SAHEB M., MONNIER B., PERRIN S., DESCOTES M., L'HOSTIS V., CRUSSET D., MILLARD A., DILLMANN P., A review of the archaeological analogue approaches to predict the long-term corrosion behaviour of carbon steel overpack and reinforced concrete structures in the French disposal systems, *Journal of Nuclear Materials*, 402, 2-3, 196-205.

NICOLLIN F., GIBERT D., LESPARRE N., NUSSBAUM C., Anisotropy of electrical conductivity of the excavation damaged zone in the Mont Terri Underground Rock Laboratory, *Geophysical journal international*, 181, 1, 303-320.

PONS-BRANCHU E., HAMELIN B., LOSSON B., JAILLET S., BRULHET J., Speleothem evidence of warm episodes in north-east France during Marine Isotope Stage 3 and implications for permafrost distribution in northern Europe, *Quaternary Research*, 74, 2, 246-251.

PRET D., SAMMARTINO S., BEAUFORT D., FIALIN M., MICHOT L.J., A new method for quantitative petrography based on image processing of chemical elements maps: Part 1. Mineral mapping applied to compacted bentonites, *American Mineralogist*, 95, 1379-1388.

PRET D., SAMMARTINO S., BEAUFORT D., FIALIN M., SARDINI P., COSENZA P., MEUNIER A., A new method for quantitative petrography based on image processing of chemical elements maps: Part II Semi-quantitative porosity maps superimposed on mineral maps, *American Mineralogist*, 95, 1389-1398.

QUANG THAI SON, GHAZI H., DE BUHAN P., A three-phase model for evaluating the seismic resistance of soils reinforced by a network of symmetrically inclined piles, *Computers and geotechnics*, 37, 545-554.

ROGER G., DURAND VIDAL S., BERNARD O., MERIGUET G., ALTMANN S., TURQ P., Characterization of humic substances and polyacrylic acid: a high precision conductimetry study, *Colloids and Surfaces A: physicochemical and engineering aspects*, 356, 1-3, 51-57.

SAHEB, M., NEFF, D., DEMORY, J., FOY, E., DILLMANN, P., Characterization of corrosion layers formed on ferrous artefacts buried in anoxic media, *Corros. Eng. Sci. Technol.* 45, 381-387.

SAVOYE S., PAGE J., PUENTE. C., COELHO D., A new experimental approach for studying diffusion through an intact and partially-saturated medium: A case study with Callovo-Oxfordian argillite, *Environmental Science and Technology*, 44, 10, 3698-3704.

SBoui A., JAFFRE J., Henry's law and gas phase disappearance, *Transport in porous media*, 82, 521-526.

SELLIER A., BUFFO-LACARRIERE L., EL GONOUNI M., BOURBON X., Behaviour of HPC nuclear waste storage structures in leaching environment, *Nuclear Engineering and Design*.

TOLU J., LE HECHO I., BUENO M., THIRY Y., POTIN-GAUTIER M., Selenium speciation analysis at trace level in soils, *Analytica Chimica Acta*.

TRUCHE L., BERGER G., DESTRIGNEVILLE. C., GUILLAUME D., GIFFAUT E., Kinetics of pyrite to pyrrhotite reduction by hydrogen in calcite buffered solutions between 90 and 180°C: Implications for nuclear waste disposal, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, 10, 2894-2914.

TRYOEN J., LE MAITRE O., NDJINGA M., ERN A., Intrusive galerkin methods with upwinding for uncertain nonlinear hyperbolic systems, *Journal of computational and Applied mathematics*, 228, 18, 6485-6511.

Publications en 2011.

ABABOU R., VALERA I.C., POUTREL A., Macro-permeability distribution and anisotropy in a 3D fissured and fractured clay rock: EDZ' around a cylindrical drift in Callovo-Oxfordian argillite (Bure), *Physics and chemistry of the earth*, 36, 1922-1931.

ALTMANN S., TOURNASSAT C., GOUTELARD F., PARNEIX J.C., GIMMI T., MAES N., Diffusion-driven transport in clayrock formations, *Applied Geochemistry*, 75, 23, 7566-7584.

ARSON C., GATMIRI B., Numerical study of damage in unsaturated geological and engineering barriers, *Physics and chemistry of the earth*, 36, 1981-1989.

BAECHLER S., LAVANCHY J-M., ARMAND G., CRUCHAUDET M., Characterization of the hydraulic properties within the EDZ around drifts at level - 490 m of the Meuse/Haute-Marne URL: A methodology for consistent interpretation of hydraulic tests, *Physics and chemistry of the earth*, 36, 16922-1931.

BATTANI A., SMITH T., ROBINET JC., BRULHET J., LAVIELLE B., COELHO D., Contribution of logging to understanding helium porewater data across the Mesozoic sequence of the East of the Paris Basin, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, 23, 7566-7584.

ETELU S., POLYCHRONOPOULOU K., REBHOLZ C., IGNATIADIS I., Novel CeO₂ based screen-printed potentiometric electrodes for pH monitoring, *Talanta*, 87, 126-135.

BLAISE T., IZART A., MICHELS R., CATHELINEAU M., SUAREZ-RUIZ I., LANDREIN P., Vertical and lateral changes in the organic matter from the Mesozoic sediments from the eastern Paris Basin (France) : variability of source and burial history, *International Journal of Coal Geology*, 88, 2-3, 173-178.

BLANCO MARTIN L., HADJ-HASSEN F., TIJANI M., ARMAND G., New numerical modeling of the mechanical long-term behavior of the GMR gallery in Andra's underground research laboratory, *Physics and chemistry of the earth*, 36, 1872-1877.

BOURDOISEAU, J-A., JEANNIN M., REMAZEILLES C., SABOTA R., REFAIT P., The transformation of mackinawite into greigite studied by Raman spectroscopy, *journal of Raman spectroscopy*, 42, 496 - 504.

BYTWERK D., LIMER D., ALBRECHT A., MARANG L., SMITH G., THORNE M., Sources and significance of variation in the dose estimates of ³⁶Cl biosphere transfer models: a model intercomparison study, *Journal of radiological protection*, 31, 63-82.

CAILTEAU C., PIRONON J., DE DONATO P., VINSOT A., FIERZ T., GARNIER C., BARRES O., In situ gas monitoring in clay rocks: Mathematical developments for CO₂ and CH₄ partial pressure determination under non-controlled pressure conditions using FT-IR sensors, *Analytical methods*, 3, 888-895.

CAILTEAU C., PIRONON J., DE DONATO P., VINSOT A., FIERZ T., GARNIER C., BARRES O., FT-IR metrology aspects for on-line monitoring of CO₂ and CH₄ in underground laboratory conditions, *Analytical methods*, 3, 877-887.

CROISE J., MAYER G., TALANDIER J., WENDLING J., Impact of water consumption and saturation dependent corrosion rate on hydrogen generation and migration from an intermediate level radioactive waste repository, *Transport in porous media*, 90, 1, 59-75.

- DEHOUX A., BOUCHELACHEM F., BERTHAUD Y., NEFF D., L'HOSTIS V., Micro-mechanical study of corrosion products' layers. Part I: experimental characterization, *Corrosion science*, 54, 52-59.
- ENSSLE C.P., CROISE J., POLLER A., MAYER G., WENDLING J., Full scale 3D modeling of the coupled gas migration and heat dissipation in a planned repository for radioactive waste in the Callovo-Oxfordian clay, *Physics and chemistry of the earth*, 36, 1754-1769.
- ENSSLE C.P., CRUCHAUDET M., CROISE J., BROMMUNDT J., Determination of the permeability of the Callovo-Oxfordian clay at the metre to decametre scale, *Physics and chemistry of the earth*, 36, 1669-1678.
- FOURRE E., JEAN-BAPTISTE P., DAPOIGNY A., LAVIELLE B., SMITH T., THOMAS B., VINSOT A., Dissolved helium distribution in the oxfordian and dogger deep aquifers of the Meuse/Haute-Marne area, *Physics and chemistry of the earth*, 36, 1511-1520.
- GARCIA M., RABAUTE A., YVEN B., GUILLEMOT D., Multivariate and spatial statistical analysis of Callovo-Oxfordian physical properties from lab and borehole logs data towards a characterization of lateral and vertical spatial trends in the Meuse, Haute-Marne transposition zone, *Physics and chemistry of the earth*, 36, 1469-1485.
- GENET A., WERNSDORFER H., JONARD M., PRETZSCH H., RAUCH C., PONETTE Q., NYS C., LEGOUT A., RANGER J., VALLET G., SAINT-ANDRE L., Ontogeny partly explains the apparent heterogeneity of published biomass equations for *Fagus sylvatica* in central Europe, *Forest ecology and management*, 261, 7, 1188-1202.
- GIOT R., GIRAUD A., AUVRAY C., HOMAND F., GUILLON T., Fully coupled poromechanical back analysis of the pulse test by inverse method, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 35, 329-359.
- HAWKINS I.R., SWIFT B., HOCH A., WENDLING J., Comparing flows to a tunnel for single porosity, double porosity and discrete fracture representations of the EDZ, *Physics and chemistry of the earth*, 36, 1990-2002.
- HERZOG G.F., ALBRECHT A., MA P., FINK D., KLEIN J., MIDDLETON R., BOGARD D., NYQUIST L.E., SHIH C.Y., GARRISON D.H., REESE R.C., MASARIK J., REEDYR.C., RUGEL G., FAESTERMANN T., KORSCHINEK G., Cosmic-ray exposure history of the Norton country enstatite achondrite, *Meteoritics & Planetary Science*, 46, 2, 284-310.
- HOCH A., WENDLING J., Migration of gases around a cell containing high-activity vitrified wastes during the operational phase, *Physics and chemistry of the earth*, 36, 1743-1753.
- HOLMEN J., BENABDERRAHMANE H., BUORO A., BRULHET J., Modelling of permafrost freezing and melting and the impact of a climatic cycle on groundwater flow at the Meuse/Haute-Marne site, *Physics and chemistry of the earth*, 36, 1531-1538.
- HURET E., THIESSON J., TABBAGH A., GALBURN B., COLLIN P.Y., Improvement of cyclostratigraphic studies by processing of high resolution magnetic susceptibility logging: example of PEP1002 borehole (Bure, Meuse, France), *Comptes Rendus Géosciences*, 343, 6, 379-386.
- KOROLEVA M., LEROUGE C., MADER U., CLARET F., GAUCHER E., Biogeochemical processes in a clay formation in-situ experiment: Part-B Insights and data from the overcoring of a microbially perturbed in situ-pore water chemistry experiment - evidence of strong buffering by the rock formation, *Applied Geochemistry*, 26, 6, 954-966.
- LADAOUI W., VIDAL O., SELIER A., BOURBON X., Effect of a temperature change from 20 to 50° C on the basic creep of HPC and HPFRC, *Materials and Structures*, 44, 9, 1629-1639.
- LANDAIS P., ARANYOSSY J-F., Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement, *Physics and chemistry of the earth*, 36, 1437.
- LAVASTRE V., ADER M., BUSCHAERT S., PETIT E., JAVOY M., Water circulation control on carbonate $\delta^{18}\text{O}$ records in a low permeability clay formation and surrounding limestones: the Upper Dogger - Oxfordian sequence from the eastern Paris basin, France, *Applied Geochemistry*, 26, 5, 818-827.
- LEFORT A., LATHUILIERE B., CARPENTIER C., HUAULT V., Microfossils assemblages and relative sea level fluctuations in a lagoon at the Oxfordian, Kimmeridgian boundary (Upper Jurassic) in the Eastern part of the Paris Basin, *FACIES*, 57,4, 649-662.
- LEROUGE C., GRANGEON S., GAUCHER E.C., TOURNASSAT C., AGRINIER P., GUERROT C., WIDORY D., FLEHOC C., RAMBOZ C., VINSOT A., BUSCHAERT S., Mineralogical and isotopic record of biotic and abiotic diagenesis of the Callovo-Oxfordian clayey formation of Bure (France), *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, 10, 2633-2663.
- LIBOUREL G., VERNEY-CARRON A., MORLOK. A., GIN S., STERPENICH J., NEFF D., DILLMANN P., The use of natural or archaeological analogues for understanding the long-term behavior of nuclear glasses, *CR Geosciences*, 343, 2-3, 237-245.
- LINARD Y., VINSOT A., VINCENT B., DELAY J., WECHNER S., DE LA VAISSIERE R., SCHOLZ E., GARRY B., LUNDY M., CRUCHAUDET M., DEWONCK S., VIGNERON G., Water flow in the Oxfordian and Dogger limestone around Meuse/Haute-Marne Underground Research, *Physics and chemistry of the earth*, 36, 1450-1468.
- LOFFREDO N., MOUNIER S., THIRY Y., COPPIN F., Sorption of selenate on soils and pure phases: kinetic parameters and stabilization, *Journal of Environmental Radioactivity*, 102, 843-851.
- MARI J.L., GAUDIANI P., DELAY J., Characterization of geological formations by physical parameters obtained through full waveform acoustic logging, *Physics and chemistry of the earth*, 36, 1438-1449.
- MARTY N., CAMA J., SATO T., CHINO K., VILLIERAS F., RAZAFITIANAMAHARAVO A., BRENDLE J., GIFFAUT E., SOLER J.M., GAUCHER E.C., TOURNASSAT C., Dissolution kinetics of synthetic Na-smectite. An integrated experimental approach, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, 20- 5849-5864.
- MAZUREK M., ALT-EPPING P., BATH A., GIMMI T., WABER H.N., BUSCHAERT S., DE CANNIERE P., DE CRAEN M., GAUTSCHI A., SAVOYE S., VINSOT A., WOUTERS L., Natural tracer profiles across argillaceous formations, *Applied Geochemistry*, 26, 7, 1035-1064.
- MILLOT R., GUERROT C., INNOCENT C., NEGREL P., SANJUAN B., Chemical multi-isotopic (Li-B-Sr-U-H-O) and thermal characterization of Triassic formation waters from the Paris Basin, *Chemical Geology*, 283, 226-241.
- MOHAJERANI M., DELAGE P., MONFARED M., TANG AM., SULEM J., GATMIRI B., Oedometric compression and swelling behavior of the Callovo-Oxfordian argillite, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48, 4, 606-615.

7 | La diffusion des résultats et la valorisation

NEEWAY J., ABDELOUAS A., GRAMBOW B., SCHUMACHER S., Dissolution mechanism of the SON68 reference nuclear waste glass: new data in dynamic system in silica saturation conditions, *Journal of Nuclear Materials*, 415, 1-1, 31-37.

PEARSON F.J., TOURNASSAT C., GAUCHER E., Biogeochemical processes in a clay formation in-situ experiment: Part E - Equilibrium controls on chemistry of pore water from opalinus clay Mont Terri underground laboratory Switzerland, *Applied Geochemistry*, 26, 6, 990-1008.

PERON X., OUERDANE Y., GIRARD S., TORTECH B., DELEPINE-LESOILLE S., BERTRAND Y., SIKALI MAMDEM Y., BOUKENTER A., UV irradiation influence on stimulated Brillouin scattering in photosensitive optical fibers, *Electronics Letters*, 47, 2, 132-133.

POLLER A., ENSSLE C.P., MAYER G., CROISE J., WENDLING J., Repository-scale modeling of the long term hydraulic perturbation induced by gas and heat generation in a geological repository for high and intermediate level radioactive waste: Methodology and example of application, *Transport in porous media*, 90, 1, 77-94.

POPPEI J., MAYER G., HUBSCHWERLEN N., PEPIN G., WENDLING J., Estimation of humidity during tunnel ventilation supported by tough2 calculations of liquid, vapor, and heat transport, *Nuclear Technology*, 174, 317-326.

RANAIVOMANANA H., VERDIER J., SELLIER A., BOURBON X., Toward a better comprehension and modeling of hysteresis cycles in the water sorption-desorption process for cement based materials, *Cement and Concrete Research*, 41, 8, 817-827.

REBEIX R., LE GAL LA SALLE C., MICHELOT J-P., VERDOUX P., NORET A., MONTVOISIN G., GIANESINI S., L., LANCELOT J., Tracing the origin of water and solute transfers in deep groundwater from Oxfordian, Dogger and Trias formations in the east of the Paris Basin, France, *Physics and chemistry of the earth*, 36, 1496-1510.

REDON P.O., ABDELOUAS A., BASTVIKEN D., CECCHINI S., ULRICH E., THIRY Y., Chloride and organic chlorine in forest oils: storage, residence times and influence of ecological conditions, *Environmental Science & Technology*, 45, 7202-7208.

RICHARD L., GAONA X., Thermodynamic properties of organic iodine compounds, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, 7304-7350.

SAHEB M., NEFF D., BATAILLON C., FOY E., DILLMANN P., Copper tracing to determine the micrometric electronic properties of a thick ferrous corrosion layer formed in an anoxic medium, *Corrosion Science*, 53, 6, 2201-2207.

SAHEB M., NEFF D., BELLOT-GURLET L., DILLMANN P., Raman study of a deuterated iron hydroxycarbonate to assess long-term corrosion mechanisms in anoxic soils, *Journal of Raman Spectroscopy*, 2011, 42, 1100 - 1108.

SAVOYE S., GOUTELARD F., BEAUCAIRE C., CHARLES Y., FAYETTE M., HERBETTE M., LARBY Y., COELHO D., Effect of temperature on the containment properties of argillaceous rocks: the case study of Callovo-Oxfordian claystones, *Journal of Contaminant Hydrology*, 125, 1, 102-112.

SCHAFFER T., HUBER F., SEHER H., MISSANA T., ALONSO U., KUMKE M., EIDNER S., CLARET F., ENZMANN F., Nanoparticles and their influence on radionuclide mobility in deep geological formations, *Applied Geochemistry*, 27, 2, 390-403.

SHAO H., SONNKE J., MOREL J., KRUG S., In situ determination of anisotropic permeability of clay, *Physics and chemistry of the earth*, 36, 1688-1692.

SOULEY M., ARMAND G., SU K., GHOREYCHI M., Modeling the viscoplastic and damage behavior in deep argillaceous rocks, *Physics and chemistry of the earth*, 36, 1949-1959.

SUZUKI T., VANDENBORRE J., ABDELOUAS A., GRAMBOW B., Solution controls for dissolved silica at 25, 50 and 90_C for quartz, Callovo-Oxfordian claystone, illite and MX80 bentonite, *Physics and chemistry of the earth*, 36, 1648-1660.

TANG C.S., TANG A.M., CUI Y.J., DELAGE P., SCHROEDER C., DE LAURE E., Investigating the swelling pressure of compacted crushed Callovo-Oxfordian claystone, *Physics and chemistry of the earth*, 36, 1857-1866.

TOURNASSAT C., ALT-EPPING P., GAUCHER E., GIMMI T., LEUPIN X.O., WERSIN P., Biogeochemical processes in a clay formation in-situ experiment: Part F - Reactive transport modeling, *Applied Geochemistry*, 26, 6, 1009-1022.

TOURNASSAT C., APPELO C.A.J., Modelling approaches for anion-exclusion in compacted Na-bentonite, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, 13-1, 3698-3710.

TOURNASSAT C., BIZI M., BRAIBANT G., CROUZET C., Influence of montmorillonite tactoid formation on Na-Ca cation exchange reactions, *Journal of Colloid and Interface Science*, 364, 2, 1009-1022.

TREILLE E., WENDLING J., PLAS F., Simulation of gas transfer at the scale of a disposal cell in the context of high-level and long-lived radwaste disposal in a deep clay formation during the operating phase, *Nuclear Technology*, 174, 353-363.

TROTIGNON L., THOUVENOT P., MUNIER I., COCHÉPIN B., PIAULT E., TREILLE E., BOURBON X., MIMID S., Numerical simulation of atmospheric carbonation of concrete components in a deep geological radwaste disposal site during operating period, *Nuclear Technology*, 174, 424-437.

VIEILLARD P., BLANC P., FIALIPS C.I., GAILHANOU H., GABOREAU C., Hydration thermodynamic of the SWy-1 montmorillonite saturated with alkali and alkaline-earth cations: a predictive model, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, 19-1, 5664-5685.

VINSOT A., DELAY J., DE LA VAISSIERE R., CRUCHAUDET M., Pumping tests in a low permeability rock : Results and interpretation of a four-year long monitoring of water production flow rates in Callovo-Oxfordian argillaceous rock, *Physics and chemistry of the earth*, 36, 1679-1687.

WERSIN P., LEUPIN X.O., METTLER S., GAUCHER E., MADER U., VINSOT A., DE CANNIERE P., GABLER H.E., KUNIMARO T., KIHŌ K., Biogeochemical processes in a clay formation in-situ experiment: Part A - Overview experimental design and water data, *Applied Geochemistry*, 26, 6, 931-953.

WERSIN P., STROES-GASCOYNE S., PEARSON F.J., TOURNASSAT C., LEUPIN X.O., SCHWYN B., Biogeochemical processes in a clay formation in-situ experiment: Part G: Key interpretations and conclusions. Implications for repository safety, *Applied Geochemistry*, 26, 6, 1023-1034.

ZHANG K., CROISE J., MAYER G., Computation of the couple-gaz exercise with tough2-MP: Hydrogen flow and transport in the pore water of a low-permeability clay rock hosting a nuclear waste repository, *Nuclear Technology*, 174, 364-374.

Publications en 2012.

AMMAR M.R, ROUZAUD J.N., How to obtain reliable structural characterization in polished graphitized carbons by Raman microspectrometry, *Journal of Raman Spectroscopy*, 43,2,207-211.

BACH TTH., CAU-DIT-COUMES C., POCHARD I., MERCIER C., REVEL B., NONAT A., Influence of temperature on the hydration products of low pH cements, *Cement and concrete research*, 42, 805-817.

BAECHLER S., CROISE J., ALTMANN S., Modelling coupled chemico-osmotic and advective-diffusive transport of nitrate salts in the Callovo-Oxfordian Clay, *Advances in Water resources*, 49, 76-85.

BEUCAIRE C., TERTRE E., FERRAGE E., GRENUY B., PRONIER S., MADE B., A thermodynamic model for the prediction of pore water composition of clayey rock at 25 and 80 °C – Comparison with results from hydrothermal alteration experiments, *Chemical geology*, 334, 62-76.

BENSENOUCI F., MICHELOT J.L., MATRAY J.M., SAVOYE S., TREMOSA J., GABOREAU S., Profiles of chloride and stable isotopes in pore-water obtained from a 2000 m-deep borehole through the Mesozoic sedimentary series in eastern Paris Basin, *Physics and chemistry of the earth*.

BLANC P., LASSIN A., AZAROUAL M., JACQUEMET N., FABBRI A., GAUCHER E., Thermodem : A geochemical database focused on low temperature water/rock interactions and waste materials, *Applied Geochemistry*, 27, 2107-2116.

BRUE F., DAVY C., SKOCZYLAS F., BURLION N., BOURBON X., Effect of temperature on the water retention properties of two high performance concretes, *Cement and Concrete Research*, 42,2,384-396.

CARIOU S., DUAN Z., DAVY C., SKOCZYLAS F., DORMIEUX L., Pore-mechanics of partially saturated Cox argillite, *Applied Clay Science*, 56, 36-47.

CARIOU S., SKOCZYLAS F., DORMIEUX L., Experimental measurements and water transfer models for the drying of argillite, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 54, 56-69.

CHEN W., LIU J., BRUE F., SKOCZYLAS F., DAVY C.A., BOURBON X., TALANDIER J., Water retention and gas relative permeability of two industrial concretes, *Cement and Concrete Research*, 42, 1001-1013.

CORNET F., ROCKEL T., Vertical stress profiles and the significance of "stress decoupling", *Tectonophysics*.

CUMUNEL G., DELEPINE-LESOILLE S., ARGOUY P., Long-gage optical fiber extensometers for dynamic evaluation of structures, *Sensors & Actuators A*, 184, 1-15.

DELEPINE-LESOILLE S., BERTRAND J., LABLONDE L., PHÉRON X., Distributed hydrogen sensing with Brillouin scattering in optical fibers, *IEEE Photonics Technology Letters*, 24, 17, 1475-1477.

DELEPINE-LESOILLE S., PHÉRON X., BERTRAND J., PILORGET G., HERMAND G., FARHOUD R., OUERDANE Y., BOUKENTER A., GIRARD S., LABLONDE L., SPOREA D., LANTICQ V., Industrial qualification process for optical fibers distributed strain and temperature sensing in nuclear waste repositories, *Journal of Sensors*, 2012, id369375, 9 pages.

GABOREAU S., CLARET F., CROUZET C., GIFFAUT E., TOURNAS-SAT C., Caesium uptake by Callovo-Oxfordian clayrock under alkaline perturbation, *Applied Geochemistry*, 27,6, 1194-1201.

GABOREAU S., LEROUGE C., DEWONCK S., LINARD Y., BOURBON X., FIALIPS C., MAZURIER A., PRET D., BORSCHNECK D., MONTOUILLOUT V., GAUCHER E., CLARET F., In-situ interaction of cement paste and shotcrete with claystones in a deep disposal context, *American Journal of Science*, 312, 314-356.

GAILHANOU H., BLANC P., ROGEZ J., MIKAEILIAN G., KAWAJI H., OLIVES J., AMOURIC M., DENOYEL R., BOURRELY S., MONTOUILLOUT V., VIEILLARD P., FIALIPS C., MICHAU N., GAUCHER E., Thermodynamic properties of illite, smectite and beidellite by calorimetric methods : Enthalpies of formation, heat capacities, entropies and Gibbs free energies of formation, *Geochimica et Cosmologica Acta*, 89, 279-301.

GAULARD-BALANDRET C., LARABI-GRUET N., MISERQUE F., RADWAN J., FERRY C., CHAUSSE A., Kinetics of oxidation and dissolution of uranium dioxide in aqueous acid solutions, *Electrochimica Acta*, 83, 471-477.

GRENIER C., REGNIER D., MOUCHE E., BENABDERRAHMANE H., COSTARD F., DAVY P., Impact of permafrost development on groundwater flow patterns : a numerical study considering freezing cycles on two dimensional vertical cut through a generic river-plain system, *Hydrogeology Journal*, 1007, 0909-4.

GUILLON T., GIOT R., GIRAUD A., ARMAND G., Response of Callovo-Oxfordian claystone during drying tests: unsaturated hydromechanical behavior, *Acta Geotechnica*, 7, 4, 313-332.

GUSTAVSSON M., KARLSSON S., ÖBERG G., SANDÉN P., SVENSSON T., VALINIA S., THIRY Y., BASTVIKEN D. Organic matter chlorination rates in different boreal soils: the role of soil organic matter content. *Environmental Science & Technology*, 46 (3): 1504-1510.

HAMMER S., KONRAD G., VERMEULEN A., LAURENT O., DELMOTTE M., JORDAN A., HAZAN L., CONIL S., LEVIN I. Feasibility study of using a "travelling" CO₂ and CH₄ 1 instrument to validate continuous in-situ measurement 2 stations, *Atmospheric Measurement Techniques*, issue 5.

HARRINGTON J.F., DE LA VAISSIERE R., NOY D., CUSS R., TALANDIER J., Gas flow in Callovo-Oxfordian claystone (COx): results from laboratory and field-scale measurements, *Mineralogical Magazine*, 76,8, 441-456.

HENNAULT J.M., QUIERTANT M., DELEPINE-LESOILLE S., SALIN J., MOREAU G., TAILLADE F., BENZARTI K., Quantitative strain measurement and crack detection in RC structures using a truly distributed fiber optic sensing system, *Construction and Buildings Materials*, 37, 916-923.

HENNAULT J.M., SALIN J., MOREAU G., DELEPINE-LESOILLE S., BERTRAND J., TAILLADE F., QUIERTANT M., BENZARTI K., Qualification of a truly distributed fiber optic technique for strain and temperature measurements in concrete structures, *European Physics Journal*.

HURTEVENT P., THIRY Y., LEVCHUK S., YOSCHENKO V., HENNER P., MADDOZ-ESCANDE C., KASHPAROV V., Translocation of ¹²⁵I, ⁷⁵Se and ³⁶Cl to wheat edible parts following a wet foliar contamination in field conditions, *Journal of Environmental Radioactivity*, on line.

7 | La diffusion des résultats et la valorisation

JODIN-CAUMON MC., MOSSER-RUCK R., RANDI A., PIERRON O., CATHELINÉAU M., MICHAU N., Mineralogical evolution of a claystone after reaction with iron under thermal gradient, *Clays and clay minerals*, 60,5, 443-455.

JOLLIVET P., FRUGIER P., PARISOT G., MESTRE J.P., BRACKX E., GIN S., SCHUMACHER S., Effect of a clayey groundwater on the dissolution rate of the simulated nuclear waste glass SON68, *Journal of Nuclear Materials*, 420, 347-361.

JOLLIVET P., GIN S., SCHUMACHER S., Forward dissolution rate of silicate glasses of nuclear interest in clayey groundwater, *Chemical Geology*, 330-331, 207-217.

LEQUY E., TURPAULT M.P., CONIL S., Impacts of Aeolian dust deposition on European temperate forest ecosystems sustainability, *Forest Ecology and Management*, 267, 240-252.

LORILLIERE R., COUVET D., ROBERT A., The effects of direct and indirect constraints on biological communities, *Ecological Modeling*, 224, 103-110.

MA J-L., CARASCO C., PEROT B., MAUERHOFER E., KETTLER J., HAVENITH A., Prompt gamma neutron activation analysis of toxic elements in radioactive waste packages, *Applied radiation and isotopes*, 70,7, 1261-1263.

MARI J.L., GUILLEMOT D., Detection of porous and permeable formations: from laboratory measurements to seismic measurements, *Oil & Gas Science Technology*, 67, 4, 703-721.

MERCADO H., LORENTE S., BOURBON X., Chloride diffusion coefficient: A comparison between impedance spectroscopy and electrokinetic tests, *Cement and Concrete Composites*, 34, 1, 68-75.

MERCADO H., LORENTE S., BOURBON X., The diffusion coefficient of ionic species through unsaturated concrete, *Transport in porous media - à paraître DOI 10.1007/s11242-012-0100-3*.

MOHAJERANIM., DELAGE P., SULEM J., MONFARED M., TANGA M., GATMIRI B., A laboratory investigation of thermally induced pore pressures in the Callovo-Oxfordian claystone, *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 52, 112-121.

NEEWAJ J., ABDELOUAS A., GRAMBOW B., SCHUMACHER S., MARTIN C., KOGAWA M., UTSUNOMIYA S., GIN S., FRUGIER P., Vapor hydration of SON68 glass from 90°C to 200°C: a kinetic study and corrosion products investigation, *Journal of Non-crystalline Solids*, 358-21, 2894-2905.

PERLOT C., CARCASSES M., VERDIER J., Diffusivity evolution under decalcification: influence of aggregate natures and cement type, *Materials and structures*, on line.

PHÉRON X., GIRARD S., BOUKENTER A., BRICHARD B., DELEPINE-LESOILLE S., BERTRAND J., OUERDANE Y., High Gamma-ray dose radiation effects on the performances of Brillouin scattering based optical fiber sensors, *Optics Express*, 20, 24, 26978-26985.

POYET S., BOURBON X., Experimental investigation of concrete packages for radioactive waste management: Permeability and influence of junctions, *Transport in porous media*, 56-70.

RANAIVOMANANA N., MULTON S., TURATSINZE A., Basic creep of concrete under compression, tension and bending, *Construction and Building Materials*, 38, 173-180.

REDON P-O., JOLIVET C., SABY N., ABDELOUAS A., THIRY Y., Occurrence of natural organic chlorine in soils for different land uses. *Biogeochemistry (In press)*, doi: 10.1007/s10533-012-9771-7.

RIVARD C., MONTARGES-PELLETIER E., VANTELON D., PELLETIER M., KARUNAKARAN C., MICHOT L., VILLIERAS F., MICHAU N., Combination of multi-scale and multi-edge X-ray spectroscopy for investigating the products obtained from the interaction between kaolinite and metallic iron in anoxic conditions at 90°C, *Physics and Chemistry of Minerals*.

ROBINET J.C., SARDINI P., COELHO D., PARNEIX J.C., PRET D., SAMMARTINO S., ALTMANN S., Effects of mineral distribution at mesoscopic scale on solute diffusion in a clay-rich rock. Example of the Callovo-Oxfordian mudstone of Bure, *Water Resource Research*, 48.

SAVOYE S., BEAUCAIRE C., FAYETTE A., HERBETTE M., COELHO D., Mobility of caesium through the Callovo-Oxfordian claystones under partially saturated conditions, *Environmental Science & Technology*, 46,5, 2633-2641.

SCHWYN B., WERSIN P., RUEDI J., SHNEIDER J., ALTMANN S., MISSANA T., NOSECK U., FUNMIG Integrated Project results and conclusions from a safety case perspective, *Applied Geochemistry*, 27, 501-515.

SELLIER A., CASAUX-GINESTET G., BUFFO-LACARRIÈRE L. & BOURBON X. Orthotropic damage coupled with localized crack reclosure processing. Part I: constitutive laws. *Engineering Fracture Mechanics*, 97, 146-167.

SELLIER A., CASAUX-GINESTET G., BUFFO-LACARRIÈRE L., BOURBON X., Orthotropic damage coupled with localized crack reclosure processing. Part II: applications, *Engineering Fracture Mechanics*, 97, 168-185.

SHEN W.Q., SHAO J.F., KONDO D., GATMIRI B., A micro-macro model for clayey rocks with a plastic compressible porous matrix, *International Journal of Plasticity*, 36, 64-85.

TRUCHE L., BERGER G., ALBRECHT A., DOMERGUE L., Abiotic nitrate reduction induced by carbon steel and hydrogen: implications for environmental processes in waste repositories, *Applied Geochemistry*.

VAN DEN HOOF C., THIRY Y., Modelling the natural chlorine cycling in a coniferous stand: implications for chlorine-36 behaviour in a contaminated forest environment, *Journal of Environmental Radioactivity*, 107, 56-67.

WANG Q., TANG A.M., CUI Y.J., DELAGE P., GATMIRI B., Experimental study on the swelling behavior of bentonite/argillite mixture, *Engineering Geology*, 124, 59-66.

YANG D.S., BORNERT M., CHANCHOLE S., GHARBI H., VALLI P., GATMIRI B., Dependence of elastic properties of argillaceous rocks on moisture content investigated with optical full-field strain measurement techniques, *Intern. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 53, 537-550.



Document Andra cité (2010)

2006-2009 – 4 ans de recherches scientifiques à l'Andra pour les projets de stockage. Andra 383 – juin 2010 - DCOM/10-0081.

7.3 Les thèses publiées en 2010, 2011 et 2012

Chaque année, l'Andra attribue des allocations de doctorat d'une durée de trois ans sur les thématiques qui s'intègrent dans ses objectifs prioritaires. Ce sont ainsi quinze thèses qui ont été publiées par l'Andra¹ (figure 3), la liste en est détaillée ci-dessous.

En 2010

Pierre BOULIN : Expérimentation et Modélisation du Transfert d'hydrogène à travers des argiles de centre de stockage de déchets radioactifs ; Université de Grenoble – Institut Polytechnique.

Benjamin BRIGAUD : Influence du contexte sédimentaire et de la diagenèse sur les propriétés pétro-physiques du Dogger calcaire de l'Est du Bassin de Paris ; Université de Bourgogne – Dijon.

Guillaume CAMPS : Étude des interactions chemo-mécaniques pour la simulation du cycle de vie d'un élément de stockage en béton ; Université Paul Sabatier – Toulouse.

Thomas MIGLIORE : Estimation des paramètres de transport dans un milieu hydrogéologique et analyse d'incertitudes ; Université de Nice Sophia Antipolis.

Jean-Charles ROBINET : Minéralogie, porosité et diffusion des solutés dans l'argilite du Callovo-Oxfordien de Bure Meuse/Haute-Marne, France) de l'échelle centimétrique à micrométrique ; Université de Poitiers.

Laurent TRUCHE : Transformations minéralogiques et géochimiques induites par la présence d'hydrogène dans un site de stockage de déchets radioactifs ; Université Paul Sabatier – Toulouse.

En 2011

Olivier BELCOURT : La perturbation chimico-minéralogique (Hydratation, état d'oxydation et eau interstitielle) de la zone perturbée excavée et ses relations avec la perturbation texturale et mécanique ; application aux argilites des galeries de Bure ; Nancy-Université.

Flore BRUE : Rôles de la température et de la composition sur le couplage Thermo-Hydro-Mécanique des bétons ; Ecole Centrale de Lille.

Alexandre DIDOT : Corrosion sous contrainte des aciers non alliés dans les conditions du stockage géologique ; Université de Compiègne.

Jérémy FREY : Modélisation multi-échelle de l'endommagement hydro-mécanique des roches argileuses ; Université de Grenoble – Institut Polytechnique.

Damien JOUGNOT : Étude géophysique des phénomènes de transfert dans les argilites du Callovo-oxfordien partiellement saturées en eau : application à l'EDZ du site de Bure ; Université de Savoie.

Benjamin ROTENBERG : Modélisation multi-échelles du comportement de l'eau et des ions dans les argiles ; Université Pierre et Marie Curie – Paris.

En 2012

Pierre LE COINTE : Impact des colloïdes sur le transport de l'Uranium appliqué à la nappe phréatique du Centre de Stockage FMA de l'Aube ; Université Mines-ParisTech.

Mandana SAHEB-DJAHROMI : Les analogues archéologiques ferreux pour la compréhension des mécanismes de corrosion multiséculaire en milieu anoxique ; Université de Paris-Est – SIS2M.

Thomas SMITH : 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 porales de l'argilite du Callovo-Oxfordien ; Université de Bordeaux I.



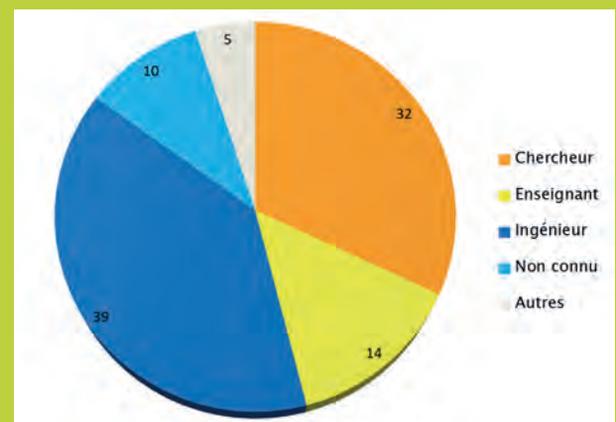
Figure 4 - Exemple de thèse Andra publiée en 2012

Le devenir des doctorants de l'Andra

L'Andra reste en contact avec ses anciens doctorants et post-doctorants. Il ressort que, sur 100 anciens étudiants en thèse de la période 2000 – 2011, près de la moitié s'oriente vers la recherche (32%) ou l'enseignement supérieur (14%), alors que 39 % ont une activité d'ingénieur dans de grands organismes ou sociétés.

Les 15 % restant se répartissent en 1/3 qui a totalement changé d'activité et 2/3 dont l'Andra et le laboratoire d'accueil n'ont plus de nouvelles (Schéma ci-dessous).

Cette répartition des activités des anciens étudiants entre industrie et recherche/ enseignement reflète la dualité des activités de l'Andra. Pour Oana Ionescu-Riffaud dont la thèse est en cours d'édition « *C'était une expérience de recherche très riche sur le plan scientifique et sur le plan humain ; un gain de maturité dans la recherche m'a permis de m'adapter par la suite à de nouveaux thèmes scientifiques dans le domaine de l'énergie... cette thèse a constitué un réel tremplin pour l'obtention du poste que j'occupe actuellement en tant qu'enseignant-chercheur à Grenoble INP.* »



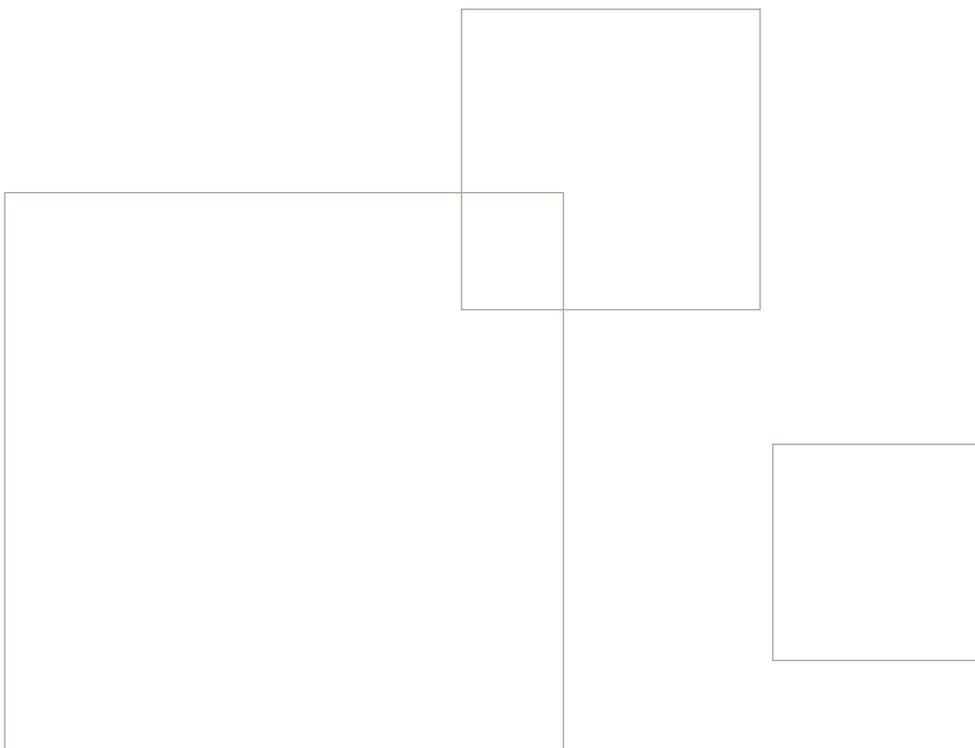
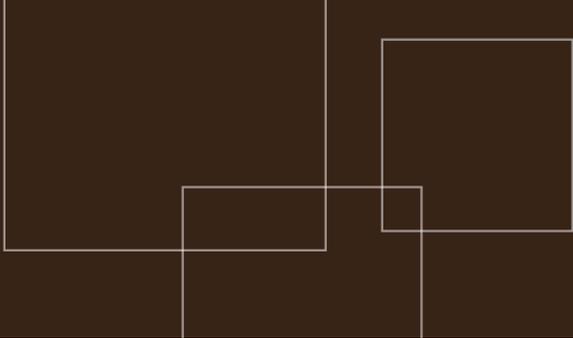
Devenir des 100 anciens doctorants de l'Andra de 2000 à 2011 (en %)

¹ Nota : la publication définitive d'une thèse intervient fréquemment plus d'un an après la soutenance.

Glossaire des termes, acronymes et sigles utilisés

AEN :	Agence pour l'Énergie Nucléaire (instance internationale)
AERES :	Agence d'Évaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur
Allenvi :	Alliance nationale de recherche pour l'Environnement
BGS :	British Geological Survey, organisme britannique dont les activités sont consacrées aux sciences de la Terre
BRGM :	Bureau de Recherche Géologique et Minière
CEA :	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies renouvelables
Cigéo :	Centre Industriel de stockage géologique
CIZA :	Centres industriels de l'Andra dans l'Aube, regroupant le CSA et le Cires
Cires :	Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage pour les déchets TFA
CMHM :	Centre de Meuse / Haute-Marne
CNRS :	Centre National de Recherche Scientifique
CSA :	Centre de Stockage de l'Aube
CSM :	Centre de stockage de la Manche
DAC :	Demande d'autorisation de création du stockage
DRD :	Direction Recherche et Développement de l'Andra
EDZ :	Excavation Damaged Zone (ou Zone endommagée par l'excavation)
FA-VL :	(déchets de) Faible Activité à Vie Longue
FMA-VC :	(Déchets radioactifs de) Faible et Moyenne Activité à Vie Courte
GNR FORPRO :	Groupe National de Recherche - Formations Profondes, études réalisées dans le cadre du programme PACEN (Programme sur l'Aval du Cycle et la production d'Énergie Nucléaire) du CNRS
HA-MAVL :	(Déchets radioactifs de) Haute Activité et de Moyenne Activité à Vie Longue
ICOS :	Integrated Carbon Observation System, infrastructure de recherche qui observe les flux des gaz à effet de serre en Europe
IFP :	Institut Français du Pétrole – aujourd'hui IFP Énergies nouvelles
IFSTTAR :	Institut français des sciences et technologies des transports et de l'aménagement des réseaux
IGD-TP :	Implementing geological disposal of radioactive waste management-Technological Platform, créée en 2009 à la demande de l'Union européenne.
INRA :	Institut national de Recherche Agronomique
INRIA :	Institut national de recherche en informatique et en automatique
INERIS :	Institut national de l'environnement industriel et des risques
IRSN :	Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire
LNE :	Laboratoire national de métrologie et d'essais

NAGRA :	Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (agence suisse homologue à l'Andra)
NEEDS :	Programme de recherche de CNRS : Nucléaire, Énergie, Environnement, Déchets, Société
OCDE :	Organisation de Coopération et de Développement Économiques
ONDRAF :	Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies (agence belge homologue à l'Andra)
OPE :	Observatoire Pérenne de l'Environnement
PCRD :	Programme Cadre de Recherche et Développement, défini au niveau européen
SKB :	Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (agence suédoise homologue à l'Andra)
SOERE :	Système d'Observation et d'Expérimentation sur le long terme pour la Recherche en Environnement
SOMET :	Structure pour l'Observation et la Mémoire de l'Environnement et de la Terre
STB :	Spécifications Techniques de Besoin
TAPSS :	Transferts Actuels et Passés dans un Système Sédimentaire aquifère / aquitard – programme de recherche multidisciplinaire mis en place dans le cadre de la réalisation du forage EST433 ayant atteint la base du Trias à 2 000 mètres de profondeur
THM(CR)	Thermo-Hydro-Mécanique-(Chimique-Radiologique)
TFA :	(Déchets radioactifs de) Très Faible Activité
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 et MA-VL – projet Cigéo
ZT :	Zone de Transposition, d'environ 250 km ² , pour le projet Cigéo de stockage de déchets HA et MA-VL, 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

