

Les recherches sur le stockage des déchets à haute activité et vie longue en formation argileuse profonde

Acquis et perspectives

François Jacq

Résumé L'Andra conduit le programme de recherche français sur le stockage des déchets en formation géologique profonde. L'article présente les travaux engagés sur le milieu argileux, en particulier dans le cadre du laboratoire souterrain de recherche de Bure dans l'est de la France. Il décrit les principales questions ouvertes et le dispositif expérimental mis en place pour apporter des réponses. Il souligne que les premiers résultats acquis suggèrent le caractère homogène et favorable des argilites du Callovo-Oxfordien. Il esquisse les perspectives en vue du rapport que l'Andra présentera en 2005.

Mots-clés Déchet radioactif, stockage, géologie, argile, sûreté.

Abstract **Research on radioactive waste in deep geological formations: present and future**
The French National Radioactive Waste Management Agency (Andra) is responsible for the French research programme on the disposal of radioactive waste in deep geological formations. This paper presents the activities carried out by the Agency in clay media and, more particularly, at the Underground Research Laboratory located in Bure, Eastern France. It describes the main pending issues as well as the experimental programme set in place with a view to providing appropriate answers. It also points out that the first results suggest the homogeneous and suitable nature of Callovo-Oxfordian argillites for disposal purposes. Lastly, it outlines the prospects of the assessment report to be submitted by Andra in 2005.

Keywords Radioactive waste, disposal, geology, clay, safety.

Les déchets HAVL* sont principalement issus du processus de retraitement des combustibles usés sortis des centrales électronucléaires. Ils représentent des quantités faibles en volumes, mais concentrent plus de 95 % de la radioactivité artificielle et doivent faire l'objet de procédures de gestion stricte. La loi de 1991* a prévu qu'un programme de recherches de quinze ans devait apporter des éléments pour un débat au Parlement en 2006 sur les solutions de gestion envisageables.

Dans ce cadre, l'Andra a reçu la responsabilité des recherches sur le stockage en formation géologique profonde. Cette option de gestion vise à isoler les déchets de tout contact avec l'Homme et l'environnement sur de longues durées. Certaines couches profondes de la Terre ayant très peu évolué depuis des dizaines de millions d'années, le principe est d'utiliser ce milieu géologique stable pour confiner les déchets.

Dans le cadre des études sur le stockage géologique, deux types de roches sont étudiés : argile* et granite. Pour la première, l'Andra dispose du laboratoire souterrain de Bure dans l'est de la France. Pour le granite, elle poursuit ses recherches en liaison avec ses homologues étrangers, notamment pour apprécier les performances d'ensemble des granites français. Les travaux se fondent alors sur une

approche générique. Le présent article se concentre sur l'exploration du milieu argileux.

La démarche de recherche

La recherche suppose de rassembler un corpus de connaissances sur les colis de déchets à stocker, le milieu d'accueil du stockage, les ouvrages et les matériaux mis en œuvre. Les études reposent par ailleurs sur des architectures envisageables pour le stockage. Ces éléments sont soumis à une évaluation de sûreté qui porte un regard d'ensemble sur le système de stockage. Les recherches sont ainsi conduites sur un mode itératif avec des évaluations qui permettent de déterminer les pistes de progrès potentiels et de compléter l'acquisition de connaissances (*figure 1*). Une boucle d'itération a été conclue fin 2001 avec la production d'un rapport de synthèse dressant le bilan des connaissances acquises et proposant les orientations pour l'avenir [1-2]. Ce rapport a été soumis à une expertise internationale indépendante sous l'égide de l'AEN-OCDE* qui a confirmé le bien fondé des travaux en cours [3].

Dans le cadre du processus défini par la loi de 1991, l'étape actuelle s'achèvera en 2005. A cette date, l'Andra remettra aux pouvoirs publics son rapport sur la faisabilité du

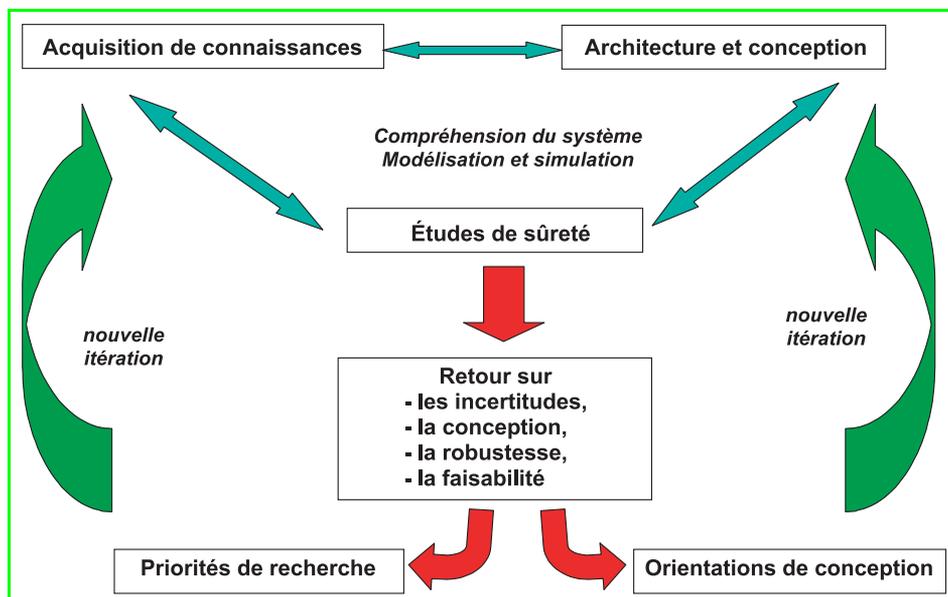


Figure 1 - Schéma général d'organisation des recherches.

stockage en formation géologique. Afin de conduire ses recherches, l'Agence mobilise des compétences scientifiques pluridisciplinaires, notamment dans les domaines des sciences de la Terre, de la chimie, des matériaux, de l'environnement, du calcul et de la modélisation, de la mesure et de la surveillance. Elle suscite, constitue et anime les réseaux scientifiques nécessaires, en mobilisant les compétences adéquates, développant relations et partenariats avec le monde universitaire, les grands organismes de recherche et les acteurs industriels. Il convient de souligner particulièrement l'importance du partenariat avec le CNRS, dans le cadre des groupements de recherche rassemblés au sein du PACE* qui mobilisent plusieurs dizaines de laboratoires.

Le rôle de la conception et de l'ingénierie

Le principe du stockage consiste à placer les déchets radioactifs dans le milieu géologique. Cela nécessite la réalisation d'architectures dédiées à l'accueil des déchets. Elles doivent être adaptées au milieu géologique concerné (géométrie, taille et nature des cavités par exemple), mais aussi prendre en compte des dispositions permettant d'assurer la sûreté à moyen et long terme. Il existe donc une étroite interaction entre définition des architectures et acquisition de connaissances.

Après le bilan des connaissances réalisé en 2001, l'Andra a défini un nouvel ensemble d'architectures de stockage au cours de l'année 2002 [4]. Elle a retenu quelques solutions simples (une par grand type de déchets), permettant de disposer d'options robustes, non optimisées à ce stade, mais servant de support aux recherches tout en attestant l'existence de solutions concrètes (figure 2). On notera que l'ingénierie permet aussi de simplifier le traitement de certaines

questions phénoménologiques. Ainsi, en matière thermique, des critères de dimensionnement ont été retenus qui entendent assurer l'absence d'endommagement de la roche et l'indépendance des différentes zones de stockage du point de vue de la phénoménologie.

Une attention particulière a été accordée à la réversibilité. Cette dernière se traduit par une gestion par étapes du processus de stockage. Cela conduit à préciser, pour chaque étape, les décisions possibles en matière de gestion des installations (passer à l'étape suivante, maintenir le stockage en l'état, revenir en arrière), et à étudier les modalités techniques associées à ces décisions. Il en résulte notamment la définition d'un programme d'observation accompagnant le déroulement du processus.

Le rôle du laboratoire souterrain en milieu argileux

Faisant suite au vote de la loi de 1991, une mission de concertation a été conduite par le député Christian Bataille pour définir des sites d'implantation de laboratoires souterrains. C'est ce qui a permis le lancement en 1994 de premiers travaux de terrain sur le site de Bure dans l'est de la France. L'intérêt d'un laboratoire souterrain est de confronter les réflexions en matière d'ingénierie et de sûreté à la réalité géologique afin de disposer d'une évaluation de faisabilité aussi complète que possible. Il s'agit en particulier d'assurer la caractérisation de la roche et du milieu environnant.

Sur le site de Bure, la couche d'argilite* étudiée, dite du Callovo-Oxfordien, se situe à une profondeur moyenne de 450 m. Elle n'a quasiment pas évolué depuis 150 millions

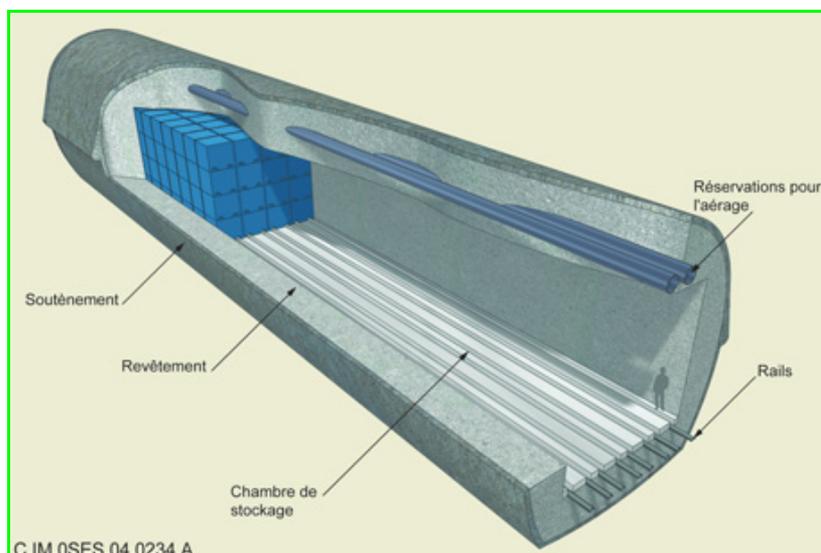


Figure 2 - Exemple d'architecture de stockage de déchets.

d'années et présente une épaisseur d'environ 140 m [5]. Elle a été jugée intéressante pour les études parce que :

- la structure géologique du milieu (Bassin parisien) était simple à comprendre et favorable en termes de stabilité générale ;
- la couche d'argile présentait des propriétés intéressantes en termes de confinement de la radioactivité (couche homogène, très faible perméabilité, capacité à retarder les éléments radioactifs).

De ces considérations découlent les quatre principales questions sur lesquelles les travaux menés à Bure ont permis et permettront d'obtenir des réponses :

- A-t-on une bonne compréhension d'ensemble de la géologie du secteur, notamment un modèle géologique intégrant les couches situées au-dessus et au-dessous de l'argile ?
- Les propriétés pétrophysiques et géochimiques de l'argile sont-elles favorables (perméabilité faible, eau porale, diffusion, rétention) ?
- La couche d'argile est-elle homogène, sans présence de faille qui créerait des drains favorables à la circulation des eaux souterraines ?
- La couche se prête-t-elle au creusement et ne risque-t-on pas de modifier ses propriétés par endommagement ?

La stratégie expérimentale mise en œuvre se fonde sur trois volets principaux :

- l'utilisation du creusement de deux puits, d'une galerie expérimentale à 445 m dans le puits principal et de galeries à une profondeur de 490 m au sein de la couche du Callovo-Oxfordien ;
- les forages réalisés depuis la surface (forages inclinés, forages de secteur) ;
- l'utilisation du laboratoire suisse du Mont Terri où les argiles ont un âge et une composition minéralogique comparable à celles de Bure.

En octobre 2004, l'un des deux puits d'accès a atteint la profondeur finale de 490 m. L'autre puits a atteint la profondeur de 450 m où a été creusée une niche expérimentale d'une quarantaine de mètres d'amplitude. L'ensemble du dispositif expérimental sera ainsi mis en place et exploité au premier semestre 2005 (figure 3).

Dans la suite de cette section, on examine comment les recherches menées, ou en cours, permettent de répondre aux grandes questions concernant le milieu géologique.

Pour la connaissance de l'environnement à l'échelle du secteur, un programme de huit forages a été réalisé dans un rayon de 20 km autour du laboratoire courant 2003. Il a été conçu pour compléter les données existantes et acquises depuis 1994. Il s'agissait de vérifier la continuité de la formation géologique à l'échelle du secteur, de procéder à de nouvelles mesures en matière hydrogéologique et à des prélèvements d'échantillons dans les différents forages [6]. Cette campagne a fourni les données nécessaires à l'élaboration d'un nouveau modèle géologique et hydrogéologique, caractérisant les formations encaissantes du Callovo-Oxfordien (Oxfordien et Dogger). On dispose désormais d'une bonne compréhension d'ensemble du milieu et d'un calage des données hydrauliques. Ces données sont directement utilisées dans les modèles destinés à évaluer la sûreté à long terme.

Sur le site du laboratoire, l'étude de la formation et de son homogénéité a été conduite au travers de deux types d'outils : le creusement des puits et un ensemble de forages dirigés. Les travaux menés dans les puits constituent en eux-mêmes une expérimentation. Ils ont en effet recoupé toute la colonne géologique, ne mettant en évidence aucune discontinuité dans la couche d'argile. Ils ont été accompagnés d'un levé géologique détaillé des parois qui fournit désormais une base de référence précieuse.

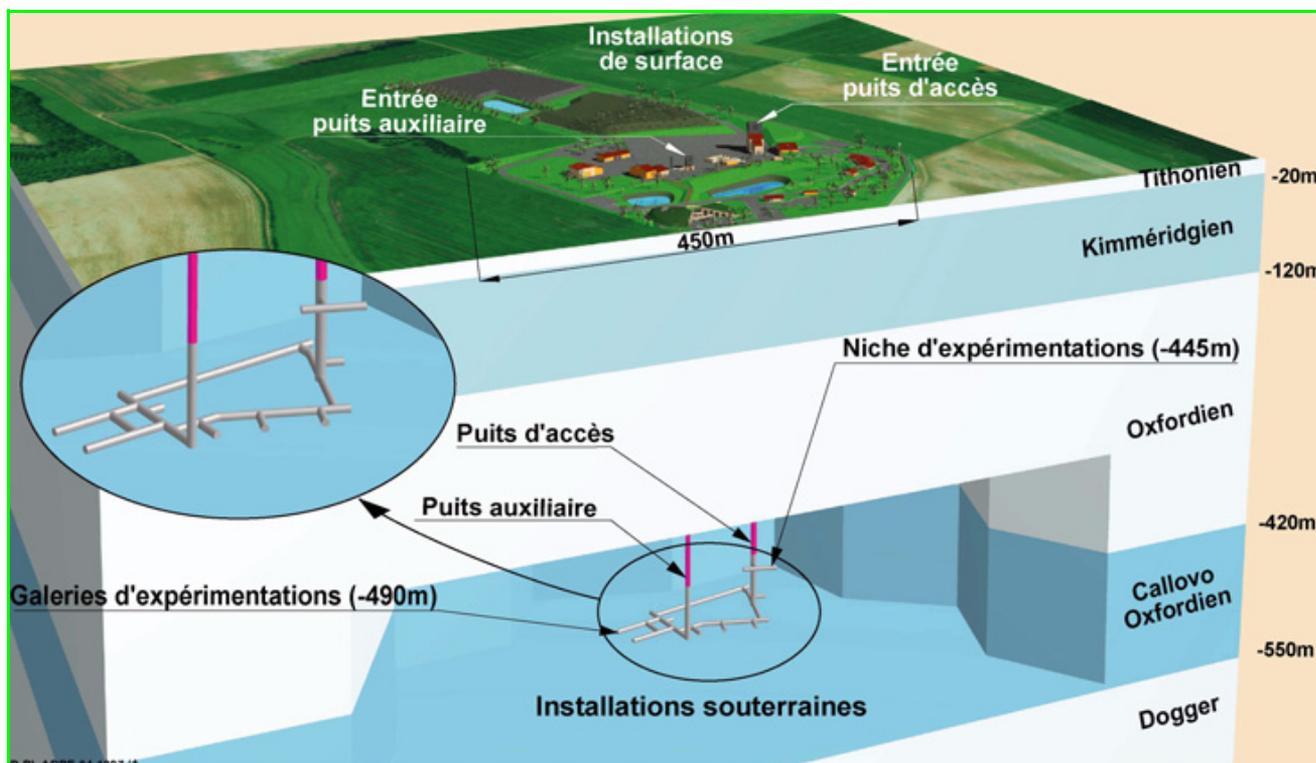


Figure 3 - Vue d'ensemble du laboratoire souterrain de Bure à l'horizon 2006.

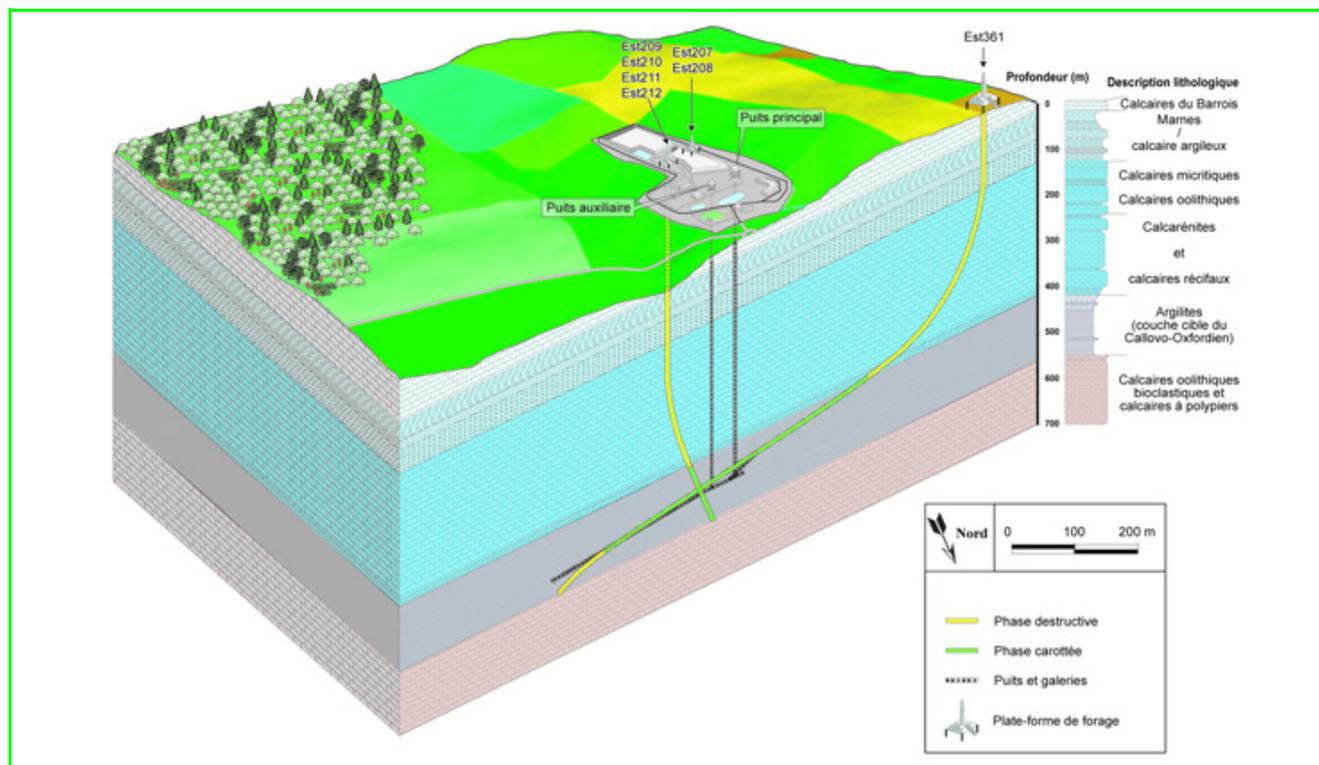


Figure 4 - Exemple de forages dirigés de reconnaissance de la formation géologique.

Par ailleurs, un programme, réalisé de fin 2003 à 2004, s'est appuyé sur quatre forages dirigés sub-horizontaux, c'est-à-dire faiblement inclinés dans leur partie terminale [6]. Ces forages ont été réalisés sur le site du laboratoire, trois visant le Callovo-Oxfordien, un la formation du Dogger. Ils ont été carottés sur près de 2 km. L'un des forages au Callovo-Oxfordien a couvert une longueur de près d'un kilomètre de manière quasi horizontale assurant ainsi une large exploration de la couche. Cette réalisation constitue un succès technologique compte tenu des conditions techniques délicates (figure 4).

Concernant le Dogger, le forage réalisé a montré l'absence de failles. Pour la formation argileuse, les trois forages n'ont mis en évidence aucune structure géologique. Les carottes prélevées montrent la continuité en grand de la formation et permettent d'apprécier la variabilité sédimentologique et pétrophysique. Ainsi, cette campagne a souligné l'absence de fractures dans le Callovo-Oxfordien et son homogénéité à une échelle pluri-hectométrique.

En matière de comportement mécanique, le creusement des deux puits a d'ores et déjà montré que la roche se prêtait à l'excavation. Les forages de reconnaissance de la formation ont également permis de réaliser des mesures géomécaniques (notamment des mesures par fracturation) visant à mieux apprécier les valeurs des paramètres mécaniques des argilites et à disposer de données sur la maîtrise de l'endommagement de l'argilite. Elles sont complétées par des essais sur échantillons.

Une expérience sur la réponse de la roche au creusement sera réalisée au cours de la première partie de 2005. La galerie installée à 445 m dans le puits d'accès est entièrement instrumentée et sert de support à la réalisation d'un essai de type « mine-by test », destiné à caractériser en temps réel l'effet du creusement du puits sur les argilites. Les résultats des mesures disponibles fin 2005 seront comparés

avec ceux des modèles numériques testés dans le cadre du programme européen MODEX-REP.

Enfin, l'année 2005 verra également la conduite d'une expérience sur la possibilité de limiter l'endommagement lors de la réalisation des galeries souterraines grâce à une méthode d'interruption de la zone fracturée déjà testée dans le laboratoire du Mont Terri. Ces différentes expérimentations fourniront les données nécessaires sur le comportement hydromécanique immédiat et à court terme. Elles contribueront à la connaissance détaillée de la zone endommagée dans l'argilite et à confirmer le dimensionnement des ouvrages. Au-delà de ce travail, l'observation devra être poursuivie pour appréhender de manière plus précise le comportement mécanique à long terme.

La caractérisation de la roche a dans un premier temps été réalisée sur la base de nombreux échantillons. Ces derniers ont conduit à définir une première représentation des propriétés. Dans la niche expérimentale, pour la caractérisation géochimique, des échantillons d'eau sont recueillis dans des conditions intégrant les derniers développements instrumentaux validés au Mont Terri, afin de produire les résultats d'analyses après équilibration fin 2005. Pour les propriétés de rétention et la diffusion chimique, des opérations de traçage dans des forages courts sont réalisées à partir de la niche du puits principal, puis à partir du niveau principal. Parallèlement, des investigations similaires sont réalisées à partir de sondages verticaux depuis la surface. Le suivi de la décroissance du traceur injecté permettra de disposer pour fin 2005 de premières données *in situ*.

Les expérimentations conduisent ainsi à acquérir des données qui confortent les paramètres obtenus sur des échantillons prélevés dans les forages depuis la surface (en donnant alors accès à une échelle plus grande), ou d'étayer certaines hypothèses formulées quant au comportement de la formation hôte.

L'apport du laboratoire suisse du Mont Terri

Le laboratoire du Mont Terri constitue un moyen complémentaire d'acquérir des données *in situ* dans une roche dont la composition minéralogique est voisine de celle du Callovo-Oxfordien. Une expérimentation a été lancée visant à caractériser la chimie des eaux interstitielles*. Les dispositifs expérimentaux perfectionnés ont permis d'obtenir de premières mesures de gaz dissous dans ces eaux. Elles sont destinées à conforter les modèles géochimiques développés pour les argiles du Mont Terri et transposés aux argilites du site de Meuse/Haute-Marne. Il a également été possible d'évaluer l'endommagement de la roche créé lors de son creusement et de montrer que l'on pouvait reconstituer ses propriétés originelles au moyen d'un dispositif technologique adapté.

De manière plus générale, la participation aux différentes expériences conforte les méthodes, techniques ou modélisations. L'objectif est d'une part de fiabiliser la conception des essais à Bure par des tests préalables, d'autre part d'étayer les travaux menés par des résultats et validations complémentaires.

Les perspectives

Les travaux menés par l'Andra ont commencé à porter leurs fruits. Des acquis substantiels se dessinent tant en matière d'ingénierie, de comportement à long terme des colis de déchets, de simulation numérique que de connaissance du milieu géologique argileux. Dans ce dernier domaine, plus de dix années de travail sur le terrain ou dans le secteur du laboratoire souterrain de Bure ont rassemblé de nombreuses données. Il apparaît aujourd'hui que la formation du Callovo-Oxfordien constitue une roche bien connue à l'échelle du secteur dans laquelle aucune discontinuité n'a été identifiée. Les recherches sur le comportement mécanique de la roche et ses propriétés de rétention ont également progressé. Les caractéristiques aujourd'hui connues du Callovo-Oxfordien suggèrent des propriétés favorables en matière de rétention des radionucléides*. La stratégie de recherche mise en place

depuis 2002 a permis de pallier les délais rencontrés dans le creusement des puits. Les expériences en cours apporteront au fil de 2005 des données importantes qui viendront consolider l'évaluation de sûreté globale. Il va de soi que ces recherches bénéficieront de développements de plus longue durée consolidant les données acquises au cours de ces dernières années, afin de réduire encore les incertitudes qui peuvent demeurer, par exemple sur le comportement à long terme.

Un autre acquis majeur des dix années de recherche écoulées réside dans la qualité des dispositifs expérimentaux et technologiques mis au point. Ces derniers ont bénéficié de l'expérience acquise dans d'autres laboratoires souterrains. Les expériences aujourd'hui conduites constituent souvent des premières scientifiques et technologiques offrant accès à une grande richesse d'informations. Enfin, les progrès effectués dans le cadre de ce programme de recherche traduisent aussi la mobilisation de toute une communauté scientifique nationale ou internationale qui y a vu une opportunité de premier plan pour tester de nouvelles expériences, appréhender de nouveaux concepts et bâtir des approches conceptuelles inédites.

Références

- [1] Dossier 2001 Argile sur l'avancement des études et recherches relatives à la faisabilité d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue en formation géologique profonde, *Rapport de synthèse*, ANDRA, déc. 2001 (www.andra.fr).
- [2] *Bilan des études et travaux 2001*, Andra, 2002.
- [3] Programme français de R & D sur le stockage géologique de déchets radioactifs, *Revue internationale par des pairs du Dossier 2001 Argile*, OCDE, AEN, 2003.
- [4] *Bilan des études et travaux 2002*, Andra, 2003.
- [5] *Référentiel géologique du site de Meuse Haute-Marne*, A.RP.ADS.99.005.B, Andra, 2001.
- [6] *Bilan des études et travaux 2003*, Andra, 2004.



François Jacq

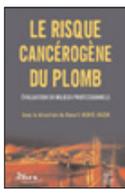
est directeur général de l'Andra*.

* Andra, Parc de la Croix Blanche, 1-7 rue Jean Monnet, 92298 Châtenay-Malabry Cedex.



Sélection EDP SCIENCES "Chimie/Gestion des déchets"

Hors Collection



LE RISQUE CANCÉROGÈNE DU PLOMB

B. Hervé-Bazin

Cet ouvrage, édité en collaboration avec l'INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité), réalise le premier point jamais effectué sur le plomb et les risques que ce métal représente aux niveaux sanitaire, économique et social.

- 2004 • 2-86883-703-4
- 360 pages • 42 €

Collection Science des Matériaux



BIODÉTÉRIORATION DES MATÉRIAUX

C. Lemaître, N. Pèbère et D. Festy, Éd.

Cet ouvrage traite de la phase de détérioration des matériaux. Souvent due à l'environnement vivant dans lequel ces matériaux sont utilisés, elle est pluridisciplinaire : phénomènes physicochimiques (corrosion des métaux, vieillissement des polymères, attaque des bétons, usure...) et biologiques (rôles des champignons, métabolisme des bactéries, biofilms...).

- 1998 • 2-86883-329-2
- 328 pages • 39 €

Collection Savoirs Actuels



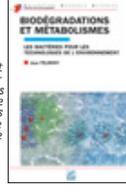
CHIMIE BIOORGANIQUE ET MÉDICINALE DU FLUOR

J.-P. Bégue et D. Bonnet-Delpon

Destiné aux chimistes s'intéressant à la chimie bioorganique et à la chimie médicinale, cet ouvrage tente de faire un tour d'horizon sur les diverses applications des composés fluorés dans ces domaines. Le livre est divisé en deux parties : la première consacrée à des généralités concernant les propriétés spécifiques des composés fluorés et leurs préparations ; la seconde dédiée aux différentes classes de composés fluorés impliqués en chimie bioorganique, et à leurs propriétés biologiques.

- avril 2005
- 2-86883-757-3

Collection Grenoble Sciences



BIODÉGRADATIONS ET MÉTABOLISMES

Les bactéries pour les technologies de l'environnement

J. Pelmont

Cet ouvrage démontre le rôle majeur des bactéries dans la défense de l'environnement et dans le mécanisme biochimique des biodégradations de substances polluantes. Chaque lecteur pourra utiliser cet outil selon ses objectifs : un important glossaire évite les retours aux bases de la biochimie, de la microbiologie et de l'enzymologie et une abondante bibliographie facilite l'approfondissement d'un point particulier.

- avril 2005 • 2-86883-745-X
- 798 pages • 54 €

En vente chez votre libraire habituel ou à EDP Science - 17, av. du Hoggar - P.A. de Courtaboeuf
BP 112 - 91944 Les Ulis Cedex A - Tél. : 01 69 18 75 75 - www.edpsciences.org