

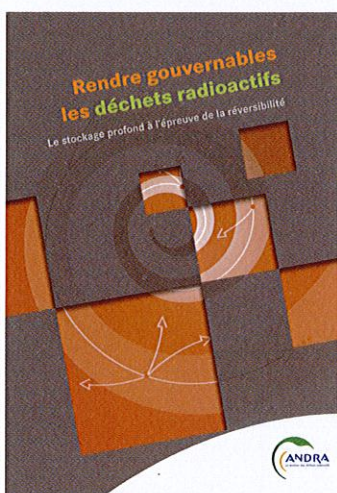
6 | La réversibilité du stockage géologique profond et ses implications temporelles

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'initée 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.

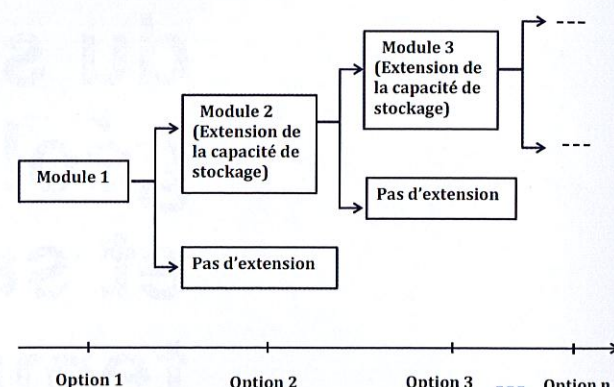


Figure 1 - Représentation d'une option d'extension de la capacité installée

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'acquiescer 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 ;

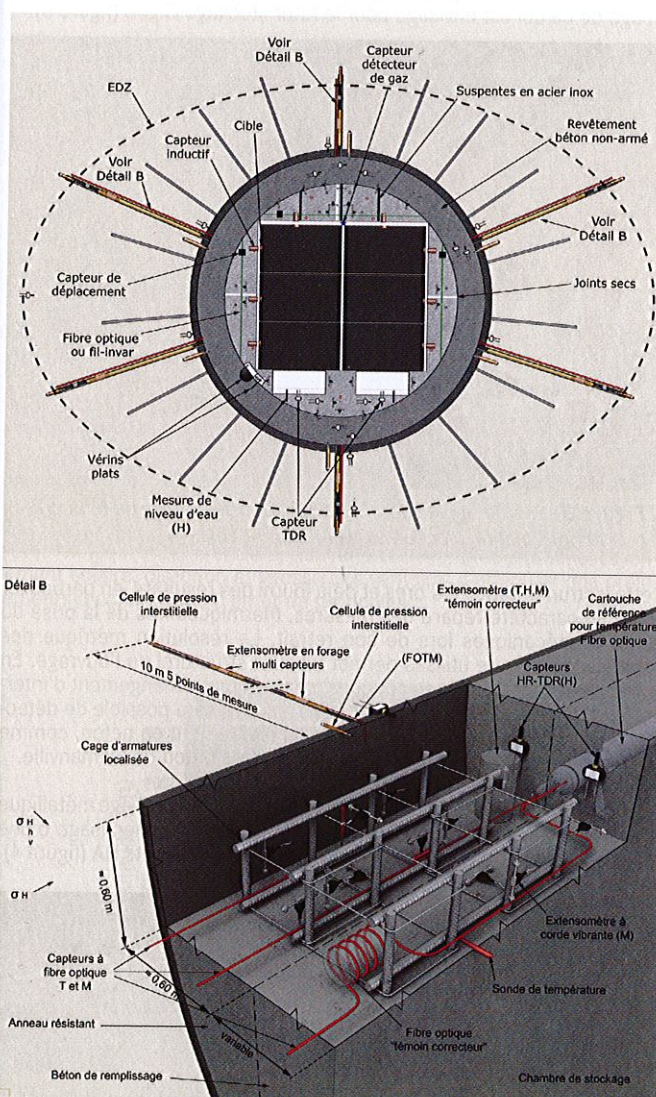


Figure 2 - Exemple d'auscultation prévue pour une alvéole MA-VL

- 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.

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 (1 MHz ou 1 GHz) peut devenir prépondérante. Les méthodes habituelles d'étalonnage ne sont plus suffisamment précises dans des milieux composites comme le sont l'argilite 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).

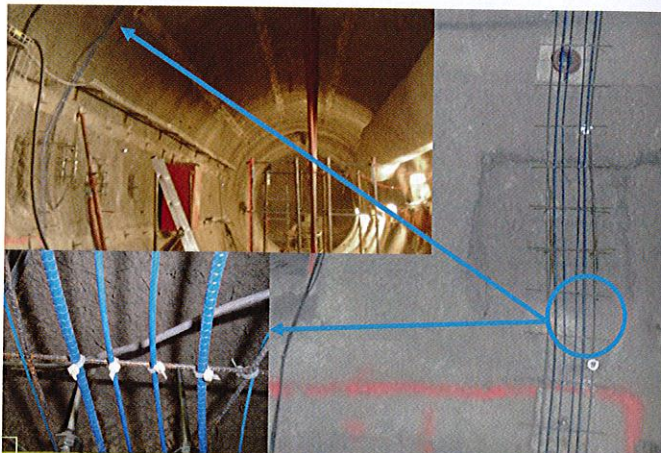


Figure 3 - Photographies des fibres optiques de mesure de température et de déformation placées en galerie avant coulage du revêtement

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).

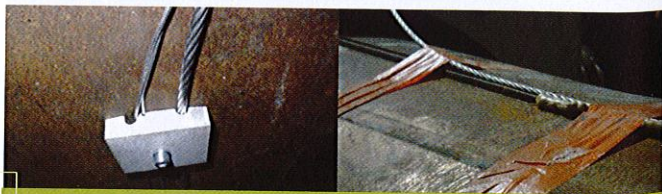


Figure 4 - Photos des dispositifs d'instrumentation de chemisage d'alvéole HA. À gauche : face interne - À droite : face externe

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'Observatoire 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.

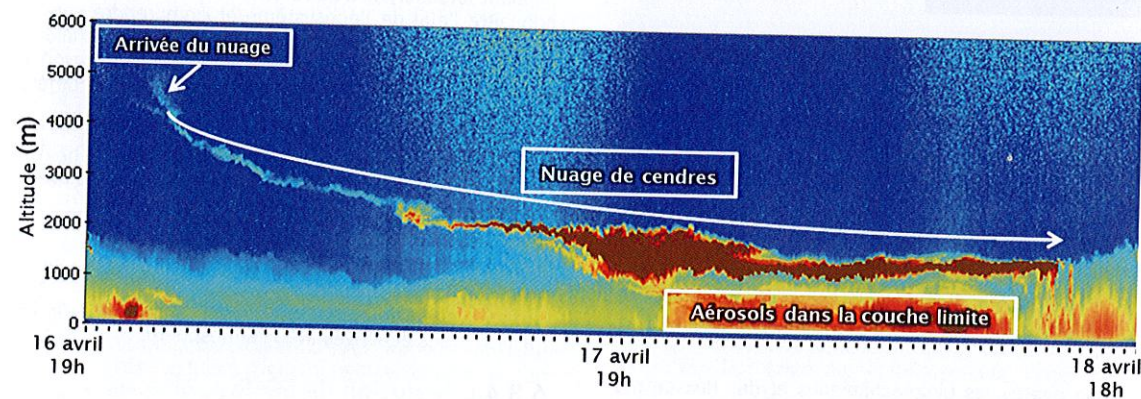


Figure 6 - Évolution de la couche d'aérosol volcanique depuis l'arrivée de la masse d'air au-dessus du sud meusien jusqu'à son mélange dans la couche limite atmosphérique

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

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.

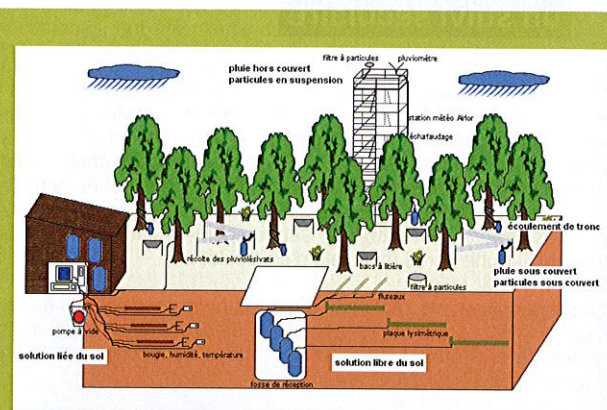


Figure 8 - Illustration des équipements de la station de mesures biogéochimiques de Montiers-sur-Saulx (ci-dessus) et photographie de la tour à flux, de 45 mètres de haut (à gauche)

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 SOERs : 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.

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 ;

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

- 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 métrologie, 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

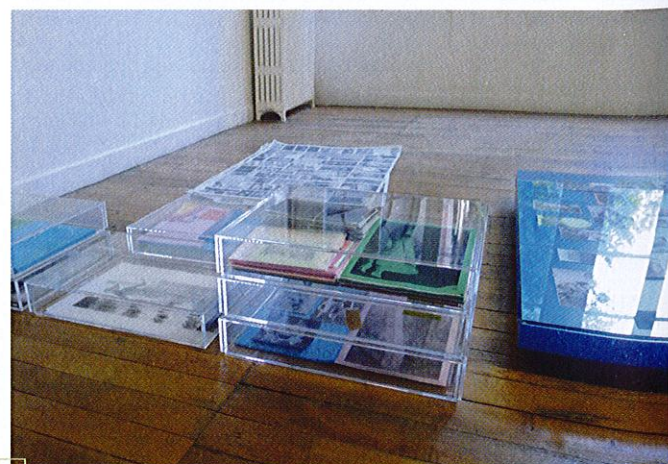


Figure 10 - Exposition de Julien CARREYN au centre d'art contemporain de Troyes de mai à juillet 2013 « Les informations sont disponibles, dans des blocs en plastique symbolisant le stockage des déchets, mais il faut se baisser pour aller les chercher »

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.) ;
- ② estimer dans quelles mesures les populations du futur ayant notre niveau de développement pourront détecter les traces du site à long terme ;
- ③ 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 caillouteux ont davantage de chances d'être conservés pour des durées plus longues également dans des espaces boisés. Cependant, même si la quasi-totalité des versets étaient réutilisés ou/et érodés, 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.

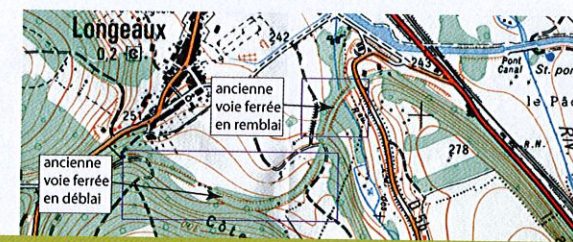


Figure 12 - Carte de localisation de la tranchée ferroviaire de Longeaux (Meuse) - les rectangles entourent les portions de voie ferrée dont les traces vont perdurer

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.