

Le Groupement d'intérêt scientifique sur l'impact et la sécurité des ouvrages souterrains (GISOS)

La Rédaction¹.

Introduction

Ce sont les affaissements et effondrements de terrains d'Auboué et de Moutiers, en 1996, dans le bassin ferrière lorrain, qui ont servi de facteur déclenchant pour la création d'une structure d'expertise GEODERIS et d'une structure de recherche, le GISOS. Celui-ci, initié en Conseil des ministres en 1998, associait au départ trois organismes :

- Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM),
- Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS),
- Institut national polytechnique de Lorraine (INPL) au travers du Laboratoire Environnement, Géomécanique et Ouvrages (LAEGO, laboratoire commun à l'École des

mines de Nancy, l'École nationale supérieure de géologie de Nancy et l'INERIS), auxquels est venu se joindre ultérieurement l'École nationale supérieure des mines de Paris (ENSMP). Le laboratoire de psychologie de l'Université de Metz lui est également associé.

Le groupement fonctionne avec un comité exécutif composé de deux représentants de chaque organisme, un bureau exécutif de 4 membres, un conseil scientifique de 9 membres dont 3 scientifiques étrangers, un comité d'orientation et de surveillance avec les représentants des administrations et des élus régionaux. Il est financé par le Contrat de plan État-Région (CPER) Lorraine.

Les travaux de recherche du GISOS sont largement orientés par la demande administrative et sociétale et par les

1. Remerciements à Robert Fabriol, président du GISOS, pour son aide dans l'élaboration de ce texte.

besoins exprimés par GEODERIS (voir article), une part importante de la recherche étant consacrée à la recherche fondamentale destinée à comprendre les mécanismes mis en jeu.

Le programme de recherche du GISOS sur l'après-mine s'articule autour des quatre questions majeures suivantes :

1. Quelle est la stabilité à long terme des travaux souterrains, en particulier quand ils sont ennoyés ?
2. Quel est l'impact des mines abandonnées sur l'eau souterraine et de surface, et sur les émanations de gaz ?
3. Comment détecter, reconnaître et suivre l'évolution des vides miniers ?
4. Comment gérer les risques liés à l'abandon des mines ?

Ces quatre questions se déclinent de différentes façons selon les particularités de chaque gisement (mine de fer, de charbon ou de sel, mine métallique, carrière souterraine) et de leur mode d'exploitation (chambres et piliers, longue taille, filons, dissolution...). Grâce au CPER Lorraine 2000-2006, le GISOS a mené à bien des travaux expérimentaux en laboratoire, et sur le terrain avec des sites pilotes instrumentés dans les bassins ferrifère et salifère lorrains. Des résultats importants ont ainsi été obtenus dans différents domaines : reconnaissance des vides, stabilité à long terme des ouvrages souterrains et rôle de l'eau, impact sur la qualité de l'eau, les émanations de gaz, surveillance et gestion des risques. Ces résultats ont été diffusés par des rapports, des présentations à congrès et des publications scientifiques. Depuis sa création, le GISOS a ainsi organisé deux colloques internationaux (Après-mine 2003, *Post-Mining* 2005) et un autre colloque international, *Post-Mining* 2008 co-organisé GISOS – IMWA, est prévu du 6 au 8 février 2008 à Nancy.

La compréhension du comportement à long terme des mines abandonnées nécessite des observations et des expérimentations de longue durée et c'est l'objectif recherché par le deuxième programme de recherche du GISOS 2007-2013. Les principaux résultats obtenus dans le programme 2000-2006 sont présentés ci-dessus selon les quatre questions abordées par le programme de recherche du GISOS, appliquées principalement aux mines de fer et de sel de Lorraine.

Stabilité à long terme des travaux souterrains, en particulier quand ils sont ennoyés

Mines de fer

Dans les *mines de fer*, les transformations minéralogiques favorisées par l'atmosphère minière oxydante

sont à l'origine d'une diminution de la **résistance mécanique** liée à une altération profonde du ciment interoolithique. La prise en compte de la cinétique de vieillissement dans les équations des lois de comportement, incluant les phénomènes physiques tels que l'écrouissage, la viscoplasticité, l'anélasticité et l'endommagement, a permis la simulation numérique à long terme du comportement mécanique du minerai de fer.

En modélisant l'histoire hydrique complète de la roche, les désordres survenus au cours de la **phase transitoire d'ennoyage** ont pu être expliqués. Ces résultats ont pu être comparés avec succès à ceux de l'expérimentation *in situ* sur le site pilote de Tressange (57) Ce site, localisé dans une ancienne concession ARBED dont l'exploitation a été arrêtée en 1995, se situe dans la couche brune de minerai de fer ; il comprend, en son centre, deux piliers encadrés par 10 barrages en béton fermant les galeries et permettant le remplissage d'eau. À partir de décembre 2005, l'ennoyage du bassin nord a permis de suivre en continu les déformations en utilisant des cannes de convergence et des extensomètres placés dans la mine, et de valider le modèle développé précédemment.

En collaboration avec le GISOS, GEODERIS a développé une méthodologie pour discriminer les possibilités d'apparition d'un **effondrement** (brutal) ou d'un **affaissement** (progressif) dans le bassin ferrifère lorrain. Les recherches ont porté sur le rôle de la couverture, de la raideur à grande échelle et de la morphologie. Une modélisation 3D a été menée à Moutier, pour vérifier si une reculée de vallée augmente la « massivité » de la couverture par frettage dû à un effet géométrique 3D. Il reste à évaluer l'influence des différentes exploitations sur le comportement du recouvrement, en incluant des approches énergétiques plus robustes.

Mines de sel

Les recherches sur les **interactions « marnes »-saurmures**, s'appuyant sur des caractérisations minéralogiques sur échantillons carottés et des tests mécaniques et chimiques en laboratoire, ont montré le rôle de l'hydratation de l'anhydrite dans le processus de dégradation. Ces travaux devraient aboutir au développement de lois de comportement prenant en compte explicitement ce processus de dégradation et permettre de simuler l'évolution de la remontée et de la forme des cavités.

Dans le gisement de sel lorrain, la présence d'un **banc raide** (dolomie de Beaumont et anhydrite) permet la réalisation de cavités très larges, mais ce banc peut se rompre brutalement sous l'effet de sollicitations excessives et entraîner ainsi l'effondrement global du

recouvrement. Pour simuler le comportement élasto-fragile du banc raide, un modèle numérique a été développé avec un arrangement aléatoire des particules collées aux points de contact. Les résultats de la modélisation montrent que le mécanisme de fracturation dans le banc compétent est essentiellement en traction. La localisation de la déformation par coalescence des microfissures dans les zones les plus sollicitées du banc raide ouvre des perspectives intéressantes pour des confrontations avec les mesures microsismiques qui seront enregistrées lors de l'effondrement provoqué.

Les modèles numériques, développés pour évaluer le comportement à long terme des mines de sel exploitées par **chambres et piliers**, une fois abandonnées, ont clairement montré les limites de la méthode de l'aire tributaire pour évaluer la stabilité à long terme des piliers de sel. L'approche proposée avec utilisation d'abaques, tout aussi simple d'emploi, permet d'obtenir des résultats équivalents à ceux de modèles numériques très élaborés mais beaucoup plus lourds à mettre en œuvre. La cohérence des prédictions obtenues avec les abaques a été vérifiée avec des mesures de convergence faites *in situ*.

Impact des mines abandonnées sur l'eau souterraine et de surface, et sur les émanations de gaz

Mines de fer

À la fin de l'ennoyage, l'ensemble des réservoirs des mines de fer en Lorraine représentera une ressource en eau d'environ 430 millions de m³. Pendant l'ennoyage, l'eau se charge en **sulfate** (3g/l dans certains secteurs) issu de la dissolution de gypse néoformé à partir de la pyrite des intercalaires marneux, comme l'ont montré les travaux expérimentaux du GISOS. La concentration en sulfate des réservoirs diminuant progressivement après le débordement, l'enjeu actuel est de modéliser le délai nécessaire pour que cette eau devienne utilisable pour l'alimentation (< 250 mg/l pour le sulfate).

Les **écoulements** et le **transport** dans les réservoirs miniers constitués des réseaux de galeries et des zones foudroyées ne peuvent être simulés efficacement avec un modèle classique de milieu poreux continu. Pour cela, le GISOS développe des modèles basés sur des Réacteurs En Réseau (RER) et sur des Tubes En Réseaux (TER). Le dispositif de suivi de la composition de l'eau en différents points du bassin nord pendant l'ennoyage, devrait permettre d'améliorer la connaissance du fonctionnement des réservoirs et la pertinence de ces modèles.

À l'occasion du **remblayage** réalisé par la DRIRE sous la cité du Stock à Thil (54), le GISOS a réalisé des tests de lixiviation en laboratoire et construit un modèle pour simuler le transport d'éléments chimiques issu du matériau de remblayage. Les simulations numériques, puis les analyses régulières de l'eau s'écoulant autour du remblayage ont montré que la concentration en éléments chimiques dans l'eau du réservoir de Godbrange utilisé pour l'alimentation en eau potable de Longwy, était toujours inférieure aux normes.

La montée du niveau de l'eau lié à l'ennoyage des vides souterrains engendre un effet « piston » qui chasse l'**air** vers la surface au travers des orifices existants. Ce phénomène apparaît simultanément avec l'arrêt de la ventilation mécanique des travaux miniers abandonnés et conduit à une évolution sensible de la composition de l'atmosphère minière, comme cela s'est produit dans le réservoir de Moyeuve-Grande. Le mécanisme principal qui entretient la migration de gaz vers la surface est le tirage naturel thermique, dont les caractéristiques (mode de fonctionnement, intensité, circuits d'écoulements...) ont été étudiées.

Mines métalliques

Le GISOS a procédé à des travaux de recherche sur l'évolution naturelle des contaminations d'anciennes exploitations Pb-Zn, en particulier aux Malines (30) et à Saint-Salvy-de-la-Balme (81). Ces travaux sur les mécanismes d'atténuation naturelle des contaminations devront être consolidés et étendus à d'autres types de mines métalliques en France.

Mines de sel

L'effondrement, provoqué ou accidentel, d'une cavité de dissolution dans le sel peut conduire à la rupture de l'écran imperméable qui protégeait le sel des aquifères sus-jacents et, dans certaines conditions, à une reprise de la dissolution. Pour aborder ce phénomène, le GISOS a combiné une expérimentation sur modèle réduit (cellule de type Hele-Shaw) et une modélisation numérique pour transposer les résultats obtenus expérimentalement à des cas réels. Les simulations montrent qu'à long terme la dissolution du sel pourrait reprendre dans les configurations étudiées, proches du contexte du gisement lorrain.

Détection, reconnaissance et suivi de l'évolution des vides miniers

Mines de fer

Sur le site pilote de Tressange, le GISOS a pu tester et valider deux **méthodes acoustiques** à partir de chutes de

blocs provoquées sous eau : écoute microsismique et hydroacoustique. À l'échelle du bassin nord, entre le début de l'ennoyage en décembre 2005 et fin 2006, seuls trois **événements microsismiques** ont été détectés par le réseau de surveillance de Fontoy. Ces événements correspondent à des foyers vraisemblablement localisés en bordure ou dans la zone de défilage et à des signaux de faible amplitude avec des énergies à la source estimées inférieures à 0,3 kg d'explosif. En 2007, le front de l'ennoyage est en progression vers les communes équipées de réseaux de surveillance microsismique telles que Nondkeil, Aumetz et Angevillers.

Les **mesures microgravimétriques**, réalisées tous les 3 mois sur 146 stations depuis le début de l'ennoyage du bassin nord, ont permis de suivre le remplissage du réservoir. La sensibilité de la mesure et l'algorithme d'inversion avec contraintes permettent de localiser dans l'espace les variations de masse d'eau. On a, en particulier, observé le remplissage et la vidange des albaques latéraux pendant la période initiale du remplissage. Les campagnes de mesures seront poursuivies jusqu'au débordement prévu fin 2007, l'objectif étant d'améliorer la connaissance de la répartition des grandes masses d'eau (zones foudroyées et zones de galeries) dans le réservoir.

Mines de sel

Depuis début 2005, sur le site de la Rape (ancienne exploitation Rhodia, par dissolution, entre 1971 et 1993 ; concession d'Art-sur-Meuse, 54), le GISOS a pu tester et comparer la sismique haute résolution, la microgravimétrie, l'électrique et l'électromagnétique, sur différentes configurations de cavités salines (géologie de l'encaissant, extension latérale, profondeur...). Les contrastes élevés de conductivité électrique des terrains de recouvrement par rapport au sel et à la saumure font que les méthodes électriques s'avèrent efficaces dans ce contexte. L'évolution de certaines de ces cavités vers la surface, par délitement naturel des argilites du recouvrement, offre l'opportunité de réitérer les mesures et d'évaluer la capacité des différentes méthodes à suivre l'évolution d'une cavité jusqu'à la surface.

Par ailleurs, le site de Cerville-Buissoncourt (Solvay) a été instrumenté, depuis 2005, pour suivre l'évolution et l'effondrement provoqué d'une cavité de dissolution. Celui-ci devrait avoir lieu début 2008 et permettra d'identifier les signaux précurseurs à l'effondrement, et de caractériser les mécanismes de la rupture et les transferts de saumure dans l'aquifère supérieur.

Gestion des risques liés à l'abandon des mines

Une méthode de hiérarchisation selon la méthodologie Electre, élaborée par GISOS et mise en œuvre par GEODERIS pour la **hiérarchisation des zones à risques**, permet de localiser et d'évaluer les zones dans lesquelles un mouvement de terrain peut se produire et engendrer des conséquences sur l'environnement physique (bâtiments et infrastructures en particulier).

Le travail sur la constitution d'une **échelle d'évaluation des dommages** a été réalisé dans un cadre méthodologique général, s'appuyant sur une décomposition fonctionnelle des enjeux (systèmes urbains) à travers laquelle a été faite une évaluation des dommages physiques suivie d'une évaluation de leurs conséquences économiques, sociales, politiques, médiatiques. Les tests sur plusieurs mouvements de terrain ayant entraîné des dommages montrent que la méthode est assez facile à utiliser en pratique et conduit à des évaluations convergentes quand elles sont réalisées séparément par différentes personnes, sur les mêmes données de base. Ce travail a montré également à quel point il manquait un dispositif de capitalisation des informations sur les dommages ayant résulté d'un événement passé.

À partir de 2005, le GISOS a démarré la construction d'un **simulateur de dommages** pour l'évaluation de la vulnérabilité globale d'un territoire à un affaissement de terrain. Un premier prototype fonctionne sur le site pilote de la ville de Joeuf (54) dans le bassin ferrifère. Sur le thème de l'estimation des dommages physiques, aux bâtiments notamment, une étude du comportement des ouvrages en maçonnerie lors d'un affaissement de terrain par la méthodologie des plans d'expérience et des surfaces de réponse a été conduite, ainsi qu'une étude sur l'influence de la 3^{ème} dimension et de la nature de l'interaction sol-structure dans les calculs par modélisation numérique. Les recherches sur des modèles de comportement des structures ont permis de simuler la réponse réelle des ouvrages en maçonnerie et des ouvrages « souples » de type poteaux-poutres.

Les travaux de recherche du laboratoire de psychologie de l'Université de Metz ont, dans un premier temps, porté sur les **impacts** d'une situation d'affaissements miniers dans le bassin houiller sur la **santé** des individus (anxiété, dépression), mais également sur la façon dont les habitants accèdent aux informations et sur la confiance qu'ils leur accordent.

Les travaux ont été orientés ensuite sur les conséquences pour la santé des situations de risque lié aux

APPROCHE RÉGLEMENTAIRE ET PROFESSIONNELLE DE L'APRÈS-MINE

affaissements miniers et à l'ennoyage dans le bassin ferrifère nord-lorrain, en s'intéressant aux conséquences psychologiques et aux aspects médicaux. Les résultats indiquent que les personnes confrontées aux problèmes miniers présentent significativement plus de troubles physiques et de symptômes de détresse psychologique que les personnes n'y étant pas confrontées. De plus, parmi ces personnes, celles estimant que leur état de santé s'est dégradé depuis le début des événements présentent plus de symptômes de détresse psychologique que les autres.

Il s'agira maintenant de pousser plus loin les investigations pour proposer un ensemble de dispositifs de prise en charge thérapeutique susceptibles de réduire,

voire de faire disparaître non seulement les symptômes qui s'expriment le plus souvent en termes d'état de stress post-traumatique, de stress, d'anxiété et de dépression, mais également les représentations du risque souvent erronées qui restent à l'origine de troubles psychologiques et sociaux majeurs.

Pour en savoir plus

- GISOS : rapport après-mine de fer 2005.
- GISOS : rapport après-mine de sel 2005.
- GISOS : rapport mine de fer et mine de sel 2006 (sorti fin mai 2007).