L’après-mine et la mécanique des roches

Mehdi GHOREYCHI, Farid LAOUAFA, Frédéric POULARD
Institut national de l’environnement industriel et des risques (INERIS)
Parc technologique ALATA, BP n° 2, 60550 Verneuil-en-Halatte

Résumé

Après une période d’exploitation minière longue et intense, la France comme de nombreux pays industriels est confrontée à la problématique de la gestion de l’après-mine. L’un des défis soulevés est la maîtrise des risques de mouvement de terrain liés à la présence des vides souterrains. Des accidents du type effondrement et affaissement de la surface du sol survenus parfois longtemps après la fermeture des mines soulèvent la nécessité de bien comprendre les phénomènes physiques mis en jeu, de bien évaluer la stabilité à long terme d’anciennes exploitations et de proposer des méthodes de gestion appropriée des risques.

Après une présentation succincte d’un exemple représentatif de l’après-mine, celui du bassin ferrifère lorrain, deux effets géomécaniques responsables de certains désordres et accidents sont discutés : le rôle de l’ennoyage qui a lieu après la fermeture d’exploitations souterraines et l’impact d’exploitations opérées sur plusieurs niveaux plus ou moins rapprochés. L’accent est mis sur les mécanismes intervenants qui n’ont pas encore fait, à notre connaissance, l’objet d’une recherche suffisamment approfondie.

Mots clés : après-mine, exploitation, chambres et piliers, ennoyage, stabilité, effondrement, affaissement.

Abstract

After a period of long and intense mining, France as many industrial countries is confronted with post-mining management. One of the challenges raised is the control of the risks of ground movement due to the presence of underground voids. Accidents such as collapse and subsidence of the ground level, which have sometimes occurred long after the closure of mines, raise the need for a clear understanding of the physical phenomena involved, to assess the long-term stability of old mines and to propose appropriate methods of risk management.

After a brief presentation of a representative case of the post-mining, that of the Lorraine iron ore basin, two geo-mechanical effects responsible for certain disorders and accidents are discussed: the role of flooding that takes place after the closure of underground exploitations, and the impact of multi-level facilities with more and less close rooms. Emphasis is placed on the involved mechanisms which, to our knowledge, have not yet been matters for sufficiently basic researches.

Key words: post-mining, exploitation, rooms and pillars, flooding, stability, collapse, subsidence.

Introduction

Au cours notamment du siècle dernier, le développement industriel de notre société a conduit à exploiter massivement des ressources minérales disponibles dans le sous-sol. Si l’exploitation des mines était génératrice de richesse et d’emploi, des « séquelles » liées à la fermeture et à l’après fermeture des travaux miniers continuent à apparaitre plusieurs décennies après l’arrêt des différentes mines. Les plus préoccupantes pour les populations concernées et les autorités sont les accidents du type effondrement ou affaissement survenant en surface du sol et menaçant la sécurité publique, l’intégrité des biens et la protection de l’environnement. D’autres risques et nuisances sont également générés par l’après-mine : pollution des eaux, émanations de gaz, modifications de paysages. Un grand défi reste à relever : restaurer ces zones pour les restituer dans des configurations et des états qui permetteront à l’écosystème, Homme compris de s’y redéployer harmonieusement.

La France a pris conscience des problèmes posés par l’après-mine dès les années 1990- 2000 marquées par la fermeture de ses grands bassins miniers (Petit et al, 2003). Des dispositifs réglementaires tels que le Plan de Prévention des Risques Miniers (PPRM) ont été mis en œuvre. Des structures d’expertise (Groupent d’Intérêt Public GEODERIS créé par l’INERIS et le BRGM) et de recherche (Groupement d’Intérêt Scientifique GISOS réunissant l’INERIS, le BRGM, l’INPL et l’Ecole des Mines de Paris) ont été créés pour le besoin spécifique de la fermeture et de la post-fermeture des mines. En dépit d’une importante expérience disponible dans les pays à forte tradition minière (Stacey, 1981 ; Van der Merwe et al, 2002), l’expérience française dans le domaine de l’après-mine a été saisie par la Société Internationale de Mécanique des Roches qui a créé en son sein une commission internationale sur l’après-mine confiant sa présidence à la France (voir rapport de cette commission, Didier, 2008).

Le savoir-faire français dans le domaine minier en particulier en géotechnique minière a été naturellement mis à contribution dans le contexte de l’après-mine. En effet, la problématique de la stabilité des ouvrages souterrains notamment miniers correspondait à une préoccupation majeure dès la création du Comité Français de Mécanique des Roches. L’article du Professeur Jean Mandel, premier président du CFMR « Les calculs en matière de pression de terrains » (Mandel, 1959)

continue à faire référence dans le domaine. D'autres présidents et membres du CFMR ont également œuvré en initiant des travaux théoriques, numériques et expérimentaux dans le domaine de la Mécanique des Roches appliquée aux mines et à l'après-mine (Tincelin, 1962 ; Habib, 1968 ; Maury, 1979 ; Piguet, 1983 ; Vouille et al, 1999, Ghoreychi, 2006 ; Berest et al, 2010).

Une partie importante de ces travaux concerne le bassin ferrifère lorrain dont l'exploitation a largement bénéficié des recherches et expertises menées par l'Ecole des Mines de Paris. Ces travaux ont été mis à profit dans le contexte de la fermeture et de la post-fermeture des mines de fer de Lorraine où GEODERIS mène un important programme d'études depuis sa création (Piguet et al, 1999 ; Josien et al, 2013) en s'appuyant sur un comité d'experts constitué de l'Ecole des Mines de Paris, de l'INERIS et de l'Ecole des Mines de Nancy.

De par les enjeux de la sécurité publique soulevés par de nombreux accidents survenus dans les mines de fer de Lorraines, la problématique de la stabilité mécanique de ces mines constitue le fil directeur de cet article. Après une présentation succincte du bassin ferrifère lorrain, la problématique des risques géomécaniques du type effondrement ou affaissement dans le contexte de l'après-mine de ce bassin est discutée en se bornant exclusivement sur deux exemples de mécanismes potentiellement générateurs d'instabilité mécanique et de rupture : l'impact de l'ennoyage des vides souterrains et l'incidence d'une exploitation partielle réalisée sur plusieurs niveaux (exploitation de plusieurs couches de minerai par la méthode des chambres et piliers).

Ces exemples retenus en raison de leur nature très liée à la Mécanique des Roches ne préjugent en rien de l'importance d'autres phénomènes rencontrés ou suspectés dans ce bassin ou plus généralement dans le contexte de l'après-mine.

1- Bassin ferrifère lorrain : un exemple représentatif de l'après-mine

Le bassin ferrifère lorrain est l'un des plus importants bassins miniers français. Près de 120 km de long et 30 km de large ; il se situe entre la frontière luxembourgeoise et le Sud de Nancy (figure 1 gauche). Un peu plus de trois milliards de tonnes de minerai de fer y furent exploités en creusant près de 60 000 km de galeries.

La formation ferrifère est d'origine sédimentaire et date du Jurassique moyen. Elle peut atteindre une puissance de 60 m. Les mines les plus profondes sont surmontées par une couverture de 250 m tandis que certaines concessions minières étaient très superficielles.

Trois principales couches de minerai de fer, baptisées par les mineurs marron, grise (la plus exploitée) et jaune (figure 1 droite) ont été exploitées durant plus d'un siècle par la méthode de chambres et piliers. Les piliers ont été torpillés ou laissés en place selon le contexte et la méthode d'exploitation. La méthode des piliers abandonnés (non torpillés) était retenue en particulier dans des zones, dites de stots, où des enjeux étaient présents en surface du sol et devaient être préservés des mouvements de terrain.

Le bassin ferrifère lorrain est divisé en trois « sous-bassins » hydrogéologiquement indépendants : Sud, Centre et Nord (au sein du bassin de Briey-Longwy, au nord, et le bassin de Nancy au sud). La dernière exploitation minière fut arrêtée en 1997 alors que l'activité minière avaient déjà cessé dans une grande partie du bassin. En fait, l'arrêt des pompages d'exhaure suite à la cessation d'activité a conduit à l'ennoyage des réservoirs Centre et Sud entre 1994 et 1999 (figure 2) alors que l'ennoyage du bassin Nord n'a commencé que le 1er décembre 2005. Il peut être utile de rappeler que près de ¾ du volume des vides souterrains résiduels sont ennoyés ce qui représente environ 450 millions de m^3.

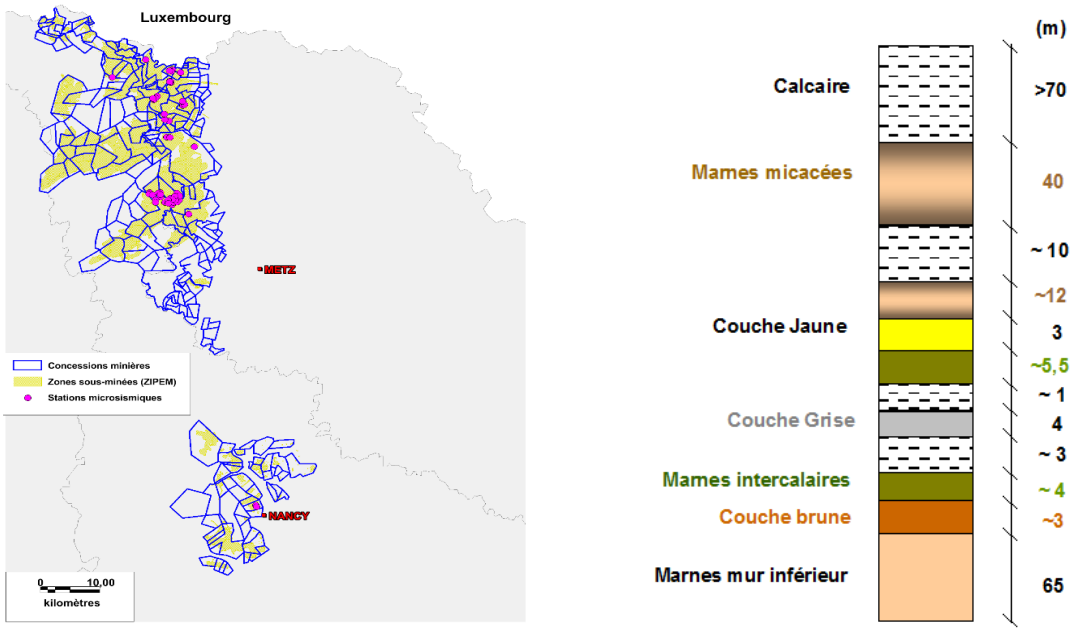


Figure 1- Bassin ferrifère lorrain :3 sous bassins et concessions minières (gauche) et principales couches de minerai de fer (droite) -source INERIS.

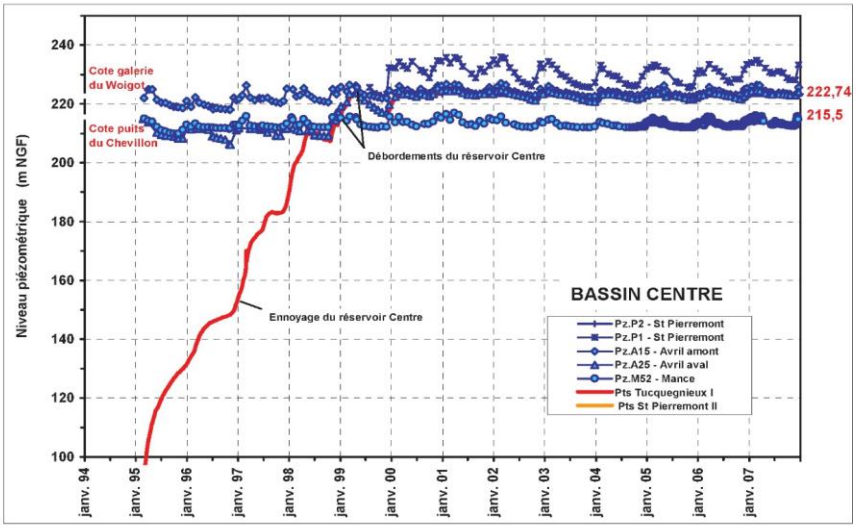


Figure 2- Remontée du niveau d'eau dans le bassin Centre des mines de fer de Lorraine (extrait du rapport BRGM, Thonnon et al, 2010).

De par le nombre d'accidents qui y ont été recensés jusqu'à présent, le bassin ferrifère lorrain est un cas suffisamment représentatif des risques liés à l'après-mine (Poulard, 2002 et 2007). Si l'on se limite au seul risque de mouvement de terrain, on peut citer les accidents survenus dans plusieurs mines : Auboué, 1996 (quartier Coinville puis rue de Metz) ; Moutiers, 1997 ; Roncourt, 1999. Les conséquences de ce type d'accidents pour les habitations sont visibles sur la figure 3 qui témoigne de l'ampleur des dégâts mais également de l'émotion et l'inquiétude légitimes des populations concernées. C'est dans ce contexte que des travaux de recherche ont été menés en laboratoire et in situ notamment sur le comportement mécanique du minerai de fer de Lorraine (Homand, 1997 ; Grgic 2001 ; Grgic et al, 2002) en mettant à profit les travaux antérieurs menés pour le besoin de l'exploitation minière (Pineau, 1978).

En dehors de risques de mouvement de terrain, d'autres types de risques et nuisances continuent à être tout aussi préoccupants. C'est le cas d'émanations gazeuses résultant d'une communication entre l'atmosphère souterraine et les bâtiments de surface. Ce cheminement a lieu au travers des ouvrages d'accès encore ouverts ou mal bouchés et également via les fractures générées par le mouvement de terrain. Il s'agit d'émissions de gaz généralement riches en CO_2 et également en radon mais au contraire appauvries en oxygène. Ces gaz nocifs en se concentrant dans des locaux mal ventilés constituent de sérieuses menaces pour la santé des personnes concernées. Un autre risque sanitaire et environnemental est la pollution des eaux souterraines et/ou de surface. Cette pollution n'est pas seulement liée à la présence de contaminants dans des résidus miniers. Elle a également pour origine les interactions géochimiques entre l'eau d'ennoyage et les roches minéralisées. Un exemple en est la forte concentration en sulfates des eaux d'ennoyage des mines de fer, phénomène responsable d'une pollution d'eaux souterraines pendant une période relativement longue pouvant atteindre quelques décennies (temps caractéristique du retour à l'équilibre géochimique eau-roche).

En dehors de la pollution des eaux, il existe également le risque.et la nuisance liés à l'inondation de certaines zones de surface provoquée par la remontée des eaux souterraines.

Ces derniers phénomènes d'origine hydro-géochimique bien qu'importants d'un point de vue environnemental et sanitaire, ils ne seront pas abordés dans la suite de cet article dédié exclusivement aux aspects géomécaniques de l'après-mine.



Figure 3- Désordres liés à l'après-mine – Auboué, 1996, bassin ferrifère lorrain (photo et extraits des journaux locaux provenant des rapports du groupement scientifique GISOS).

2- Deux facteurs d'instabilité mécanique dans le contexte de l'après-mine

Cette partie est consacrée à l'analyse de deux exemples de facteurs potentiellement générateurs d'instabilités géomécaniques dans le contexte d'anciennes exploitations souterraines : ennoyage et exploitation en multicouches. Il s'agit de deux configurations de natures distinctes et tout à fait indépendants. Ils sont abordés séparément ici bien que les deux configurations puissent être réunies dans une anciennes mine comme c'est le cas dans le bassin ferrifère lorrain.

Le premier exemple, l'ennoyage, est un phénomène qui se produit dans toutes les exploitations souterraines situées en dessous du niveau des nappes aquifères (qu'il s'agisse de mines ou éventuellement de carrières souterraines). Les pompages des eaux d'exhaure étant arrêtés après la cessation de l'activité et la fermeture d'exploitation, les eaux souterraines remplissent les vides résiduels et remontent progressivement dans les terrains de recouvrement pour atteindre le niveau d'exhaure défini dans le dossier d'arrêt de l'exploitation. En dépit d'études menées sur l'ennoyage des mines dans plusieurs pays concernés, les conséquences mécaniques de l'ennoyage d'exploitations souterraines ne semblent pas encore relever d'un consensus suffisamment partagé entre les exploitants et les géotechniciens. En effet, il existe en France et à l'étranger, des exemples des mines volontairement ou accidentellement ennoyées sans que l'ennoyage n'ait donné lieu à des instabilités mécaniques et des risques d'effondrement ou d'affaissement. Un exemple est l'ancienne mine de sel de Dieuze en Lorraine, exploitée il y a un siècle et demi et ennoyée accidentellement en 1864. Les investigations menées par GEODERIS ont attesté clairement que la mine était entièrement remplie de saumure et que sa tenue mécanique ne posait aucun problème (Feuga, 2003) !

Cependant, il existe d'autres exemples d'anciennes mines ennoyées qui ont généré des mouvements de terrains se traduisant par des accidents du type effondrement ou affaissement. C'était le cas du bassin ferrifère lorrain. C'était également le cas d'autres mines et carrières souterraines où l'hypothèse d'une mise en charge hydraulique du recouvrement a été avancée pour expliquer les effondrements survenus en particulier dans des périodes fortement pluvieuses (Maury, 1970).

C'est cet impact visiblement « paradoxal » de l'ennoyage qui a motivé le choix de ce facteur dans l'analyse qui suit.

Le deuxième facteur, abordé ensuite, est l'impact d'une exploitation sur plusieurs niveaux. A la différence du premier, ce dernier facteur n'est pas général à toute mine abandonnée et n'existe que dans des mines (et carrières) où plusieurs couches de minerai plus ou moins rapprochées furent exploitées. C'est le cas dans certaines zones du bassin ferrifère lorrain où quelques niveaux de vides sont séparés par des bancs d'intercalaires peu épais.

Là encore, comme pour l'ennoyage, ce facteur est analysé compte tenu du fait que les mécanismes d'instabilité liés à des exploitations partielles à plusieurs niveaux ne sont pas encore, à notre connaissance, suffisamment maîtrisés.

3.1- Effets mécaniques d'ennoyage d'une exploitation souterraine

Pour discuter de l'impact d'ennoyage sur l'état de stabilité d'une exploitation souterraine réalisée par la méthode de chambres et piliers abandonnés, trois cas de figure sont analysés ci-dessous :

a- le cas d'un massif rocheux entièrement sec dans lequel une exploitation est réalisée ;

b- la même configuration pour un massif entièrement saturé mais sans ennoyage, c'est-à-dire, sans la présence d'eau dans les chambres excavées (aucune pression d'eau n'est exercée sur la paroi des excavations) ;

c- la configuration d'un massif rocheux entièrement saturé mais cette fois avec ennoyage des chambres (leur paroi est soumise à la pression hydrostatique dont l'intensité est fonction du niveau d'eau d'ennoyage remontée dans les terrains de recouvrement).

Dans les trois cas, nous allons considérer que :

- l'exploitation souterraine se trouve à la profondeur H ;
- la contrainte verticale initiale (avant travaux) à cette profondeur est donnée par le poids des terrains de recouvrement ;
- le taux de défruitement (ζ) est défini par le ratio surface « excavée/surface totale ».

a- Etat sec

Dans l'hypothèse extrême où tous les terrains sont dans un état sec avec un poids volumique ρ_{sec}, la contrainte verticale initiale vaut $\sigma_v = \rho_{sec}\, g\, H$ (g : accélération de la pesanteur). La valeur moyenne de la contrainte verticale dans les piliers vaut :

$\sigma_{vpil}^{sec} = \rho_{sec}\, g\, H /(1-\zeta)$.

Pour simplifier l'analyse, nous allons négliger le frettage des piliers entre le toit et le mur des excavations ce qui revient à négliger l'effet bénéfique du confinement du cœur des piliers (cet effet a été évalué par Laouafa et Ghoreychi, 2005 et 2016) Tout se passe alors comme si les piliers étaient soumis à un état uniaxial de contrainte σ_{vpil}^{sec}. Dans ce cas, l'état de stabilité des piliers peut être évalué aisément en comparant cette contrainte à la résistance uniaxiale à long terme des piliers à l'état sec (R_{sec}). Le coefficient de sécurité des piliers vaut alors : $F_{sec} = R_{sec}(1-\zeta). / (\rho_{sec}\, g\, H)$ (1)

b- Etat saturé

Considérons maintenant que les piliers et les terrains de recouvrement sont entièrement saturés sans que le niveau exploité ne soit ennoyé. Dans ce cas, le poids volumique des terrains est donné par la valeur saturée ρ_{sat}. Dans la mesure où la pression d'eau est supposée nulle (état drainé), le raisonnement en contrainte totale revient au même qu'en contrainte effective. Le raisonnement exprimé dans le paragraphe ci-dessus (a) s'applique donc en prenant cette fois pour la valeur de la contrainte verticale régnant en moyenne dans les piliers $\sigma_{vpil}^{sat} = \rho_{sat}\, g\, H /(1-\zeta)$. Le coefficient de sécurité F_{sat} vaut alors :

$F_{sat} = R_{sat}(1-\zeta). / (\rho_{sat}\, g\, H)$ (2)

c- Etat ennoyé

Reprenons le cas (b) en considérant cette fois que le niveau exploité est ennoyé et que la pression d'eau à un niveau (P) est donnée par la cote d'ennoyage qui atteint la profondeur H_{eau} soit $P = \rho_{eau}\, g\, H_{eau.}$où ρ_{eau} est le poids volumique de l'eau.

Le raisonnement fait ci-dessus dans les sections a et b doit être repris ici en termes de contraintes effectives :

$\sigma' = \sigma - bP$, b : coefficient de Biot considéré égal à 1 dans la suite pour simplifier le raisonnement (contrainte effective de Terzaghi).

En fait, la contrainte effective verticale dans les piliers vaut $\sigma'_{vpil} = \sigma_{vpil}$- P alors que la contrainte effective horizontale σ'_{hpil} est nulle, la contrainte horizontale totale valant P.

Dans ce cas, le coefficient de sécurité des piliers (F'_{sat}) vaut :

$$F'_{sat} = R_{sat} / (\sigma_{vpil}{}^{sat} - P) = R_{sat}\,(1-\zeta). / (\rho_{sat}\, g\, H - P) = R_{sat}\,(1-\zeta). / [g\,(\rho_{sat}\, H - \rho_{eau}\, H_{eau})] \quad (3)$$

Le choix de R_{sat} dans cette expression se justifie par le fait que l'essai de compression uniaxiale est réalisée en condition drainée.

d- Comparaison des cas

A nouveau pour simplifier l'analyse, prenons le cas extrême où la cote d'ennoyage atteint la surface du sol $H_{eau} = H$. Le coefficient de sécurité s'exprime alors comme suit :

$$F'_{sat} = R_{sat}\,(1-\zeta). / [g\, H\, (\rho_{sat} - \rho_{eau})] \quad (4)$$

En comparant les relations (4) et (2), on note que

$$F'_{sat} / F_{sat} = \rho_{sat} / (\rho_{sat} - \rho_{eau}) > 1$$

En d'autres termes, les terrains de recouvrement sont déjaugés et la pression d'ennoyage contribue à soulager les piliers. De ce point de vue, l'ennoyage joue un rôle bénéfique sur l'état de stabilité de l'exploitation.

En revanche, tant que le niveau d'ennoyage n'a pas suffisamment remonté dans le recouvrement et que la pression d'eau exercée sur la paroi des chambres est négligeable, le coefficient de sécurité est donné par la relation (2). On peut le comparer à celui de la relation (1) obtenu pour le milieu sec et en déduire le ratio des coefficients :

$$F_{sat} / F_{sec} = (R_{sat} / R_{sec}) \times (\rho_{sec} / \rho_{sat}) \quad (5)$$

Or pour une roche donnée, la résistance à l'état saturé est inférieure à celle de la roche à l'état sec ($R_{sat} < R_{sec}$). C'est le cas également du minerai de fer de Lorraine pour lequel les expériences de laboratoire réalisées par Grgic et al (2005 et 2006) ont montré (figure 4) que la résistance de la roche saturée était deux fois plus faible que celle de la roche à l'état sec. Par ailleurs, le poids volumique d'une roche sèche est inférieur à celui de la roche saturée ($\rho_{sec} < \rho_{sat}$). L'écart est d'autant plus important que la porosité de la roche est forte. Sous l'effet conjugué des résistances et des poids volumiques, le ratio des coefficients de sécurité $F_{sat} / F_{sec} < 1$. Cela indique que toute chose identique par ailleurs, le coefficient de sécurité des piliers d'une exploitation souterraine diminue au fur et à mesure que les terrains deviennent saturés. Cette situation correspond au début d'ennoyage où l'état de saturation des terrains augmente progressivement. On conçoit que dans la phase transitoire d'ennoyage durant laquelle le niveau d'eau continue à remonter dans les terrains de recouvrement (avant d'atteindre un niveau stabilisé dans le haut-toit), il existe une période critique (hauteur d'eau critique) où la stabilité mécanique d'une ancienne exploitation partielle peut être menacée. Un majorant de cette période critique est la durée d'ennoyage qui dépend principalement du volume du réservoir minier et du débit d'ennoyage. Elle peut varier de quelques années à plusieurs dizaines, voire centaines d'années selon le cas.

Le caractère critique de la phase transitoire de l'ennoyage est confirmé par les retours d'expérience de l'après-mine où plusieurs accidents du type effondrement ou affaissement se sont produits pendant la phase d'ennoyage. Cela fut également le cas dans le bassin ferrifère lorrain :

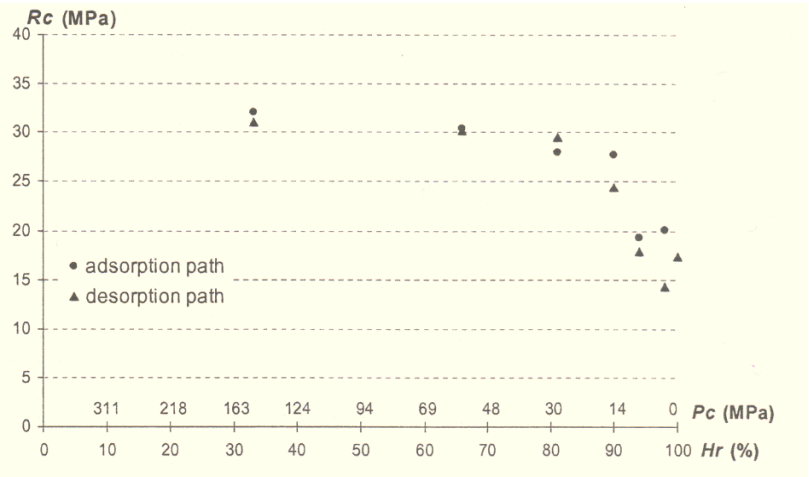


Figure 4- Baisse de la résistance à la compression uniaxiale du minerai de fer de Lorraine en fonction de l'humidité (expériences réalisées par Grgic et al, 2006 à l'Ecole de Géologie de Nancy, dans le cadre du groupement scientifique GISOS).

3.2- Effets mécaniques d'une exploitation partielle sur plusieurs niveaux

Pour discuter du deuxième point de ce papier concernant les mécanismes d'instabilité d'une exploitation en multicouches (réalisée sur plusieurs niveaux), l'esprit de la démarche adoptée dans ce qui précède pour l'analyse de l'ennoyage est préservé en ce sens que nous allons nous efforcer à isoler les phénomènes autant que possible et éviter d'être tenté par le progrès technique de la modélisation numérique qui permet aujourd'hui de prendre en compte, en général, dans un même modèle tous les détails structurels et rhéologiques et la majorité des phénomènes physiques. Nous pensons que cela compliquerait l'identification et la compréhension des phénomènes intervenants.

Ce raisonnement nous conduit à simplifier volontairement le modèle en considérant des terrains homogènes et isotropes, des piliers et des chambres de section carrée et de mêmes dimensions (prises égales à 4 m) et un taux de défruitement identique pour tous les niveaux exploités, supposé égal à 50 %. Soulignons que ces dernières valeurs n'ont aucune incidence sur les résultats de cette étude, d'un point de vue qualitatif.

Dans le même esprit, afin de ne pas faire intervenir l'effet des bords de l'exploitation pouvant influer sur la tenue mécanique du toit et des piliers, on fait l'hypothèse d'une infinité de chambres et piliers quel que soit le niveau horizontal exploité (i.e. la largeur totale de l'exploitation est théoriquement infinie à tous les niveaux).

Compte tenu de ces hypothèses, des modélisations ont été réalisées en 3D et en 2D. Cette dernière a été effectuée en déformations planes ce qui revient à considérer une coupe verticale des terrains avec des piliers allongés. Toutes les modélisations ont été effectuées à l'INERIS à l'aide du code de calcul aux éléments finis COMSOL Multiphysics. Les figure 5 à 7 présentent des exemples des maillages utilisés.

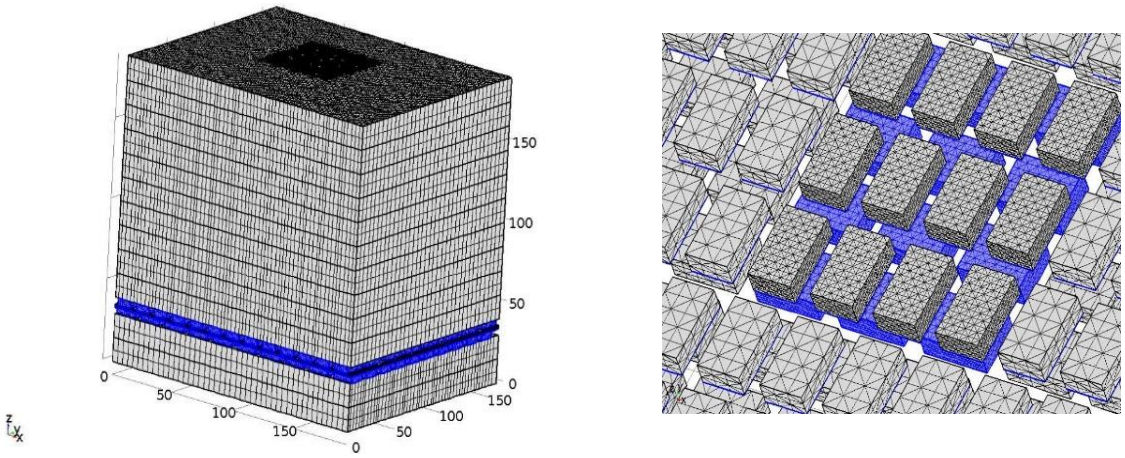


Figure 5- Exemples des maillages utilisés pour la modélisation 3D (cas de 2 niveaux exploités par chambres et piliers)

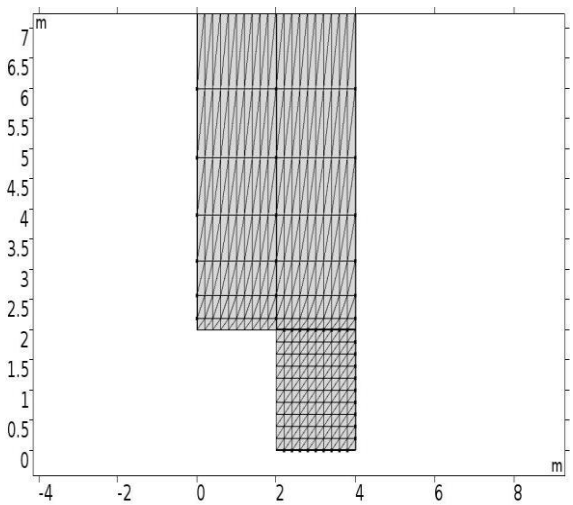


Figure 6- Maillage pour la modélisation d'un seul niveau exploité par une infinité de chambres et piliers représentés dans une coupe en 2D plane par 3 plans de symétrie : 2 verticaux l'un passant par le milieu du pilier, l'autre par le milieu de la chambre et un plan de symétrie horizontal passant par le milieu des piliers (le modèle représente donc ¼ de pilier et ¼ de chambre).

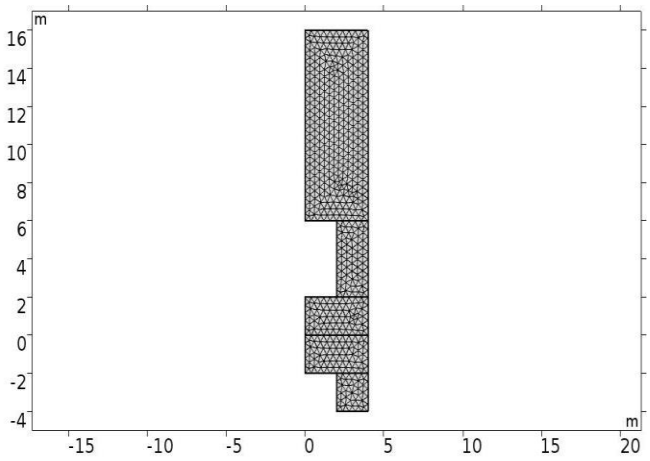


Figure 7- Maillage pour la modélisation de 3 niveaux exploités chacun par une infinité de chambres et piliers représentés dans une coupe en 2D plane par 3 plans de symétrie : 2 verticaux, l'un passant par le milieu du pilier, l'autre par le milieu de la chambre et un plan de symétrie horizontal passant par le milieu des piliers du niveau intermédiaire (le modèle représente donc un niveau et demi, le niveau intermédiaire représentant 1/4 de pilier et ¼ de chambre et le niveau supérieur ½ pilier et ½ chambre).

3.2.1- Effet d'une exploitation multi-niveaux en termes de stabilité des piliers

Comme pour l'analyse de l'ennoyage, nous suggérons de nous concentrer, dans une première approche, sur la valeur moyenne de la contrainte verticale dans les piliers. La contrainte horizontale étant nulle sur les bords des piliers (pas de contrainte normale en l'absence d'une pression d'eau ou de soutènement), nous allons négliger (comme dans le cas d'ennoyage), la contrainte horizontale s'exerçant au cœur des piliers du fait de leur frettage avec le toit et le mur (ce frettage est bien intégré dans les modèles numériques comme le montrent les maillages ; il est pris en compte dans l'analyse des contraintes principales, présentée plus loin).

Cette approche volontairement simplifiée présente l'avantage de ne pas faire intervenir le modèle de comportement mécanique des terrains. En effet, la valeur moyenne de la contrainte verticale dans les piliers est donnée directement par l'équilibre des forces verticales (équation d'équilibre) au travers de ce qu'est appelé communément « le modèle de l'aire tributaire », valable quel que soit le modèle rhéologique des terrains (la contrainte normale (verticale) étant nulle dans les vides, elle est nécessairement reportée sur les piliers et sa valeur doit équilibrer le poids du recouvrement).

Ce raisonnement, soulignons-le, n'est valable qu'en moyenne : la répartition des contraintes, quant à elle, dépend, dans toute structure, de la loi de comportement de matériaux qui la constituent. A plus forte raison, les concentrations de contraintes ne peuvent être étudiées sans recours à une modélisation numérique complète tenant compte à la fois des spécificités structurales et rhéologiques.

Cela dit, si l'on se limite à la contrainte verticale régnant en moyenne dans les piliers, sa valeur est pratiquement la même pour tous les niveaux exploités. Cela tient au fait que le poids de la roche extraite des chambres est négligeable devant celui du recouvrement. Ce raisonnement n'est évidemment pas valable si le nombre de niveaux exploités est très important et/ou le poids extrait n'est plus négligeable comparé au poids de recouvrement. Cette dernière situation peut être le cas d'une exploitation multi-niveaux à faible profondeur. Dans le cas théorique extrême d'une infinité de niveaux exploités, la contrainte verticale s'exerçant en moyenne dans les piliers est naturellement plus faible que celle d'une exploitation réalisée sur quelques niveaux suffisamment éloignés de la surface du sol. Le ratio calculé par la modélisation numérique est de 0,87. Pour mieux comprendre, prenons un exemple numérique : le cas d'une exploitation avec un taux de défruitement de 50 %. Dans ce cas, la contrainte verticale dans les piliers est en moyenne doublée par rapport à la contrainte initiale si l'exploitation est réalisée sur un ou quelques niveaux. En revanche, dans le cas théorique d'une infinité de niveaux exploités, la contrainte verticale moyenne vaut 1,74 fois la contrainte initiale. On retrouve le ratio 1,74/2 = 0,87.

Dans l'ensemble, ces éléments suggèrent que dans des configurations habituelles d'exploitations minières réalisées sur quelques niveaux, les piliers soient sollicités pratiquement de la même manière (à l'effet pesanteur près sur la contrainte initiale) indépendamment du nombre de niveaux exploités. Leur coefficient de sécurité n'apparait pas affecté sensiblement par la présence d'autres niveaux d'exploitation.

Il faut se garder de déduire de ce résultat des conclusions rapides en termes de stabilité globale d'une exploitation sur multi-niveaux avant d'évaluer, en plus de la stabilité des piliers, celle du toit en particulier des bancs d'intercalaires. C'est l'objet de la section suivante.

3.2.2- Effet d'une exploitation multi-niveaux en termes de tenue des intercalaires

Les bancs d'intercalaires séparant les différents niveaux d'exploitation constituent un élément critique pour la stabilité à long terme d'une mine abandonnée. Sa fracturation peut conduire à des chutes de blocs de toit voire l'ensemble du banc d'intercalaire. Ce phénomène fait augmenter, à son tour, l'élancement des piliers (qui pourrait être pratiquement doublé en l'absence d'intercalaire) ce qui est évidemment défavorable à leur stabilité (diminution de la résistance, risque de flambage…).

L'analyse du champ de contraintes dans les intercalaires permet de mieux cerner les mécanismes initiateurs de ce risque. La figure 8 regroupe les résultats de la modélisation d'une exploitation sur 3 niveaux séparés par deux bancs d'intercalaires (un

seul banc est représenté dans le modèle du fait de la symétrie). L'épaisseur des intercalaires est supposée égale à la hauteur des chambres. L'analyse est effectuée en termes de contraintes principales susceptibles de caractériser le critère de rupture des matériaux constituant la structure. On constate en particulier que la contrainte principale mineure devient une traction dans les intercalaires. Son extension peut être visualisée facilement à l'aide de la figure 8c présentant les lieux géométriques des points où la contrainte principale mineure est nulle. En dehors de parements des chambres où la contrainte principale mineure est nulle (pas de contrainte normale à la paroi), on constate que la traction commence à s'introduire également à l'intérieur des intercalaires en affectant une petite zone située au milieu du banc. Son extension est d'autant plus importante que l'épaisseur du banc d'intercalaires est faible. Cela apparait clairement en comparant les figures 8 et 9 ; cette dernière correspond aux résultats d'une modélisation pour laquelle la seule différence avec celle de la figure 8 tient à l'épaisseur des intercalaires qui est réduite de moitié dans le cas relatif à la figure 9 par rapport à celui de la figure 8. Lorsque l'épaisseur d'intercalaires correspond à la moitié de la hauteur des chambres, une zone étendue à toute la partie centrale du banc d'intercalaires est soumise à la traction sur toute son épaisseur. Dans la pratique, ce type de situation conduit à l'éboulement du banc d'intercalaires puisque les roches sont pratiquement dépourvues d'une résistance à la traction à long terme.

Un autre facteur aggravant l'état de stabilité d'une exploitation partielle sur plusieurs niveaux est la mauvaise superposition des piliers. Cette situation est fréquente dans les anciennes mines et carrières souterraines. Elle conduit à des fortes concentrations de contraintes liées au poinçonnement/cisaillement des intercalaires, à l'apparition des contraintes de cisaillement et à l'endommagement des piliers et des intercalaires. Cette situation est visible sur les figures ci-dessous (regroupées en figure 10) issues d'une modélisation effectuée dans un cadre élastoplastique. Des zones marquées par une accumulation de déformations plastiques induites par la mauvaise superposition des piliers révèlent l'endommagement de la roche et la dégradation de l'état de stabilité globale de l'exploitation.

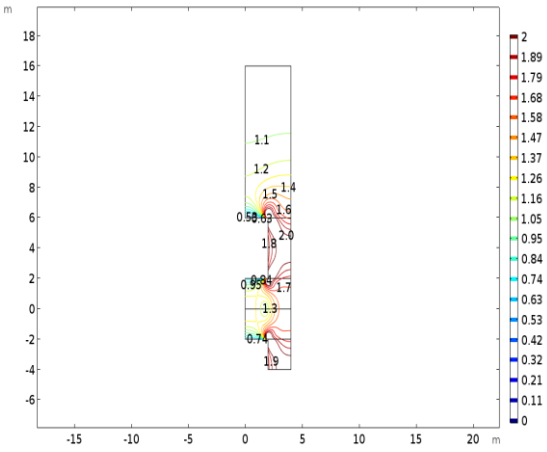
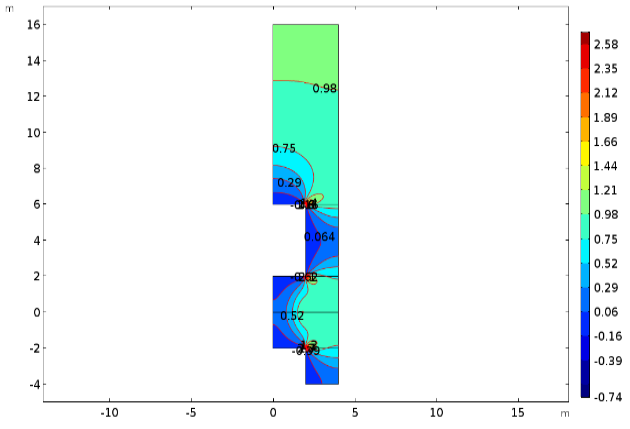


Figure 8a



Figre 8b-

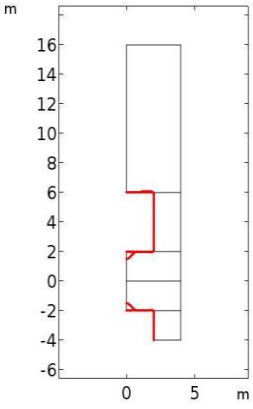


Figure 8c

Figure 8- Isovaleurs de la contrainte principale majeure (8a) et de la contrainte principale mineure (8b) et le lieu géométrique des points où la contrainte principale mineures est nulle (8c) - Convention de signe : contrainte de compression positive - Cas de 3 niveaux d'exploitations séparés par des intercalaires dont l'épaisseur est égale à la hauteur des chambres.

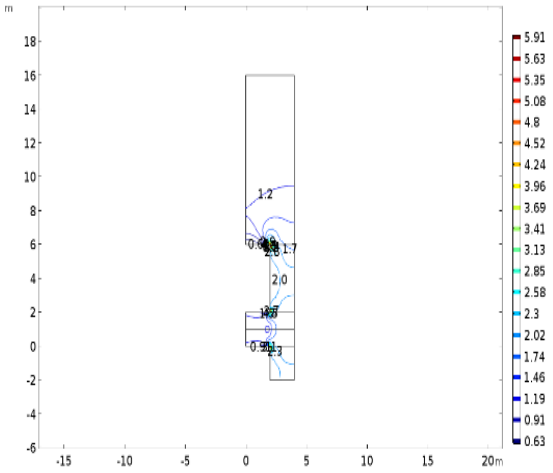
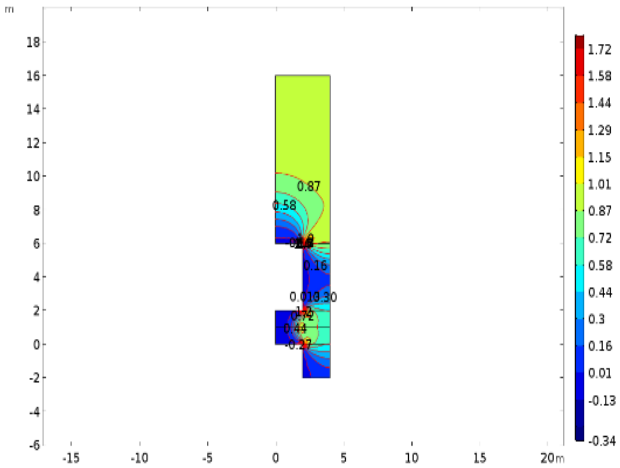


Figure 9a



Figre 9b-

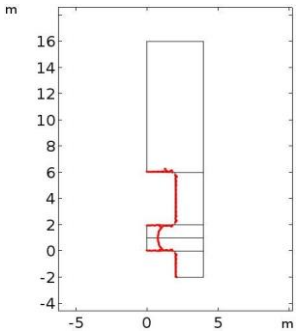


Figure 9c

Figure 9- Isovaleurs de la contrainte principale majeure (8a) et de la contrainte principale mineure (8b) et les lieux géométriques des points où la contrainte principale mineures est nulle (8c) - Convention de signe : contrainte de compression positive - Cas de 3 niveaux d'exploitations séparés par des intercalaires dont l'épaisseur est égale à la mi-hauteur des chambres.

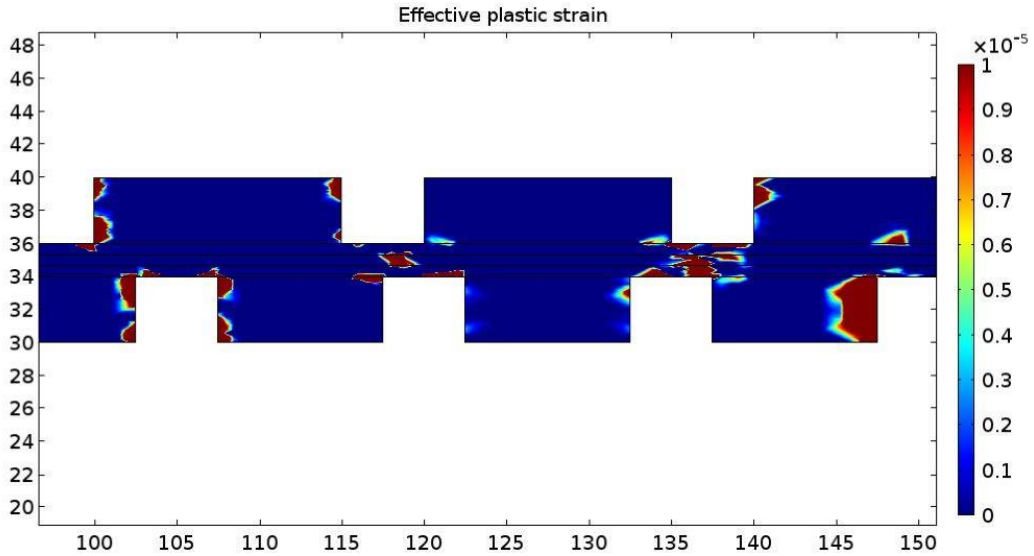


Figure 10- Exemple d'accumulation des déformations plastiques induites par une mauvaise superposition des piliers dans une exploitation sur deux niveaux.

Conclusion

La gestion de l'après-mine est confrontée aux importantes questions soulevées par la sécurité des personnes et des biens, la protection de l'environnement et l'aménagement du territoire. Les progrès récents dans le domaine de la géomécanique en termes de compréhension des mécanismes d'instabilité et de rupture des ouvrages souterrains, leur modélisation, leur auscultation-surveillance et leurs méthodes de confortement-traitement contribuent favorablement à la maîtrise des risques de l'après-mine. Le savoir-faire français dans le domaine minier et en après-mine est un atout majeur, reconnu au niveau international.

En dépit d'importants efforts déployés dans les domaines techniques, administratifs et réglementaires, la maîtrise des risques environnementaux, sanitaires et liés à la sécurité publique d'anciennes mines abandonnées nécessite encore des travaux de recherche. Ils doivent mobiliser des compétences variées et complémentaires disponibles aux niveaux national et international.

Le retour d'expérience des accidents et des impacts environnementaux de l'après-mine permet d'affirmer que les réflexions sur l'après-mine doivent être intégrées désormais, de manière approfondie, dans tout nouveau projet d'exploitation du sous-sol qu'il s'agisse de ressources minières ou pétrolières, voire de stockage souterrain. Cette réflexion convient d'être engagée très tôt dès le stade de projet en prenant en compte également les dimensions socio-économiques et environnementales et ce dans une logique de développement durable, indispensable désormais à tout développement industriel.

Bibliographie

Berest P, Brouard B ; Feuga B., Karimi-Jafari M., 2010, « Effondrement de 1873 à la mine de Varangéville », Revue Française de Géotechnique, N° 131-139, 2ème et 3ème trimestres, pp. 105-108.

Didier C., 2008, « Mine closure and post-mining management – International state-of-the-art", *Report of ISRM international commission on mine closure.*

Feuga B., 2003. "Old salt mine at Dieuze (France) revisited 150 years after being abandoned", *SMRI Fall Meeting, Chester (UK), October 2003.*

Ghoreychi M., Daupley X., 2004. « Devenir à long terme d'exploitations abandonnées de sel ». *Revue française de Géotechnique, pp.73-83.*

Ghoreychi M, 2006. "Coupled processes involved in post-mining", Van Cotthem A., Charlier R.; Thimus JF., Tshibangu JP. (Eds.). Multiphysics coupling and long term behaviour in rock mechanics: proceedings of the international symposium Eurock 2006, 9-12 May 2006, Liege, Belgium. London: Taylor and Francis, invited lecture, pp. 45-53.

Grgic D., 2001. *« Modélisation du comportement à court et à long terme des roches de la formation ferrifère lorraine », Thèse Doct. INPL, Nancy.*

Grgic D., Homand F. et Hoxha D. 2002, « Influence du vieillissement et de l'eau sur le comportement mécanique des mines de fer abandonnées de Lorraine ». *Revue française de génie civil, 6(6), 1-X.*

Grgic D., Giot R., Homand F., Giraud A., 2005 "Effect of succion on the mechanical behavior of iron ore rock". *Numerical and Anytical Methods in Geomechanics, Vol. 29, Issue 8, pp. 789-827.*

Grgic D.,Homand F. Hoxha D., 2006. "Short- and long-term constitutive model for porous rocks*", Eurock 2006: Multiphysics Coupling and Long Term Behaviour in Rock Mechanics, Proc. of Internat. Symp. of ISRM, Liège (Belgium), 9-12 May 2006, Van Cotthem A.,Charlier R., Thimus J-F., Tshibangu J-P (eds), Taylor & Francis, pp. 281–286.*

Habib P., 1968a. « La recherche de mécanique des roches au Laboratoire de Mécanique des Solides de l'Ecole Polytechnique », *Revue de l'Industrie Minérale, 15 décembre, pp. 31-6.*

Habib P., 1968b, « Introduction à la fissuration des roches », *Revue de l'Industrie Minérale spéciale issue, 15 mai, pp.5-15.*

Homand F, 1997. « Caractérisation géomécanique des sondages de Jœuf », *RS 26/97. Laboratoire de Géomécanique, ENSG, INPL/.*

Josien JP., Hadadou R., Contrucci I. 2013 , « Stratégie de gestion de l'après-mine du bassin ferrifère lorrain », *Manuel de Mécanique des Roches, Tome 3, Presses des Mines, CFMR, PP ; 40-58.*

Laouafa F., Ghoreychi M., 2005a "Contribution to improve pillar analysis in adandoned room and pillar salt mines". *Proc. of the symposium Post mining 2005, 16-18 november 2005, Nancy.*

Laouafa F., Ghoreychi M., 2005b « Une méthode pour l'analyse du comportement d'exploitations minières de sel exploitées par la méthode des chambres et piliers », *Proc.15ème Congrès Français de Mécanique, septembre 2005, Troyes, France, 6 p.*

Laouafa F., Ghoreychi M.2016, "Analysis of failure of a salt room and pillar mine", *Proc. 3rd Internat. Symp. On Mine Safety and Engineering, Miti et al (Ed), McGill Univ., Montréal, 13 août.*

Mandel J., 1956. "Les calculs en matière de pression de terrains", *Revue de l'Industrie Minérale, janvier 1959.*

Maury V., 1979, « Effondrements spontanés – Synthèse d'observations et possibilité de mécanisme initiateur par mise en charge hydraulique », Revue de l'Industrie Minérale, octobre 1979.

Petit D., Dumas Ph., Palat P., Moura P., 2003. « Rapport de synthèse sur l'après-mine », *Conseil Général des Mines, Inspection Générale des Finances*

Piguet J-P., 1983. « La modélisation en mécanique des terrains et son application à l'exploitation minière », *Thèse de Docteur es-Sciences, INPL, Nancy.*

Piguet JP., Josien JP, Kouniali S., Bigarre P., Vouille G., 1999. « Apport de la mécanique des roches pour l'évaluation et la gestion des risques à long terme dans les exploitations minières abandonnées Cas des mines de fer de Lorraine ». *9ème Congrès International de Mécanique des Roches, Paris, France. pp.317-322.*

Pineau J.L., 1978. « Contribution à la caractérisation géomécanique des roches. Application au minerai de fer lorrain », *Thèse Doct. INPL, Nancy.*

Poulard F. 2002, « Proposition d'une méthode d'analyse et de hiérarchisation des risques résiduels liés à l'exploitation d'un ancien bassin minier ». *Rapport INERIS DRS-02-25304/R02.*

Poulard F., 2007. « Les exploitations minières françaises passées au crible ». *La Lettre Techniques de l'Ingénieur - Risques Industriels & Environnement, n°5, pp. 1-2.*

Thonnon J., Vaute L.,2010. « Surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain en 2007 », *rapport final, BRGM/RP 58029 FR, mars 2010.*

Tincelin E., Sinou P.,1962 « Effondrements brutaux et généralisés – Coup de toit », Revue de l'Industrie Minérale.

Vouille G., Piguet, J-P, Josien J-P, Kouniali S; Bigarre P., 1999. « Apport de la mécanique des roches pour l'évaluation et la gestion des risques à long terme dans les exploitations minières abandonnées - Cas des mines de fer de Lorraine ». *Actes du 9ème Congrès International de Mécanique des Roches, Paris, vol. 1. 1999, 317-322.*

Stacey T.R., 1981. « Interaction of underground mining and surface development in a central city environment », *Proc. Conf. Rock Engineering in an Urban Environment, Hong Kong Institution of Mining and Metallurgy, pp. 397-404.*

Van der Merwe, J.N., Madden B.J., 2002. "Rock Engineering for Underground Coal Mining", *The South African Institute of Mining and Metallurgy, 234 p.*