HAL
open science

Modélisation hydromécanique de l'ennoyage partiel d'un site expérimental dans une mine de fer de Lorraine

Mountaka Souley, Alain Thoraval

To cite this version:

Mountaka Souley, Alain Thoraval. Modélisation hydromécanique de l'ennoyage partiel d'un site expérimental dans une mine de fer de Lorraine. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur, Jun 2004, Lille, France. pp.553-562. ineris-00972463

HAL Id: ineris-00972463

https://ineris.hal.science/ineris-00972463

Submitted on 3 Apr 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MODELISATION HYDROMECANIQUE DE L'ENNOYAGE PARTIEL D'UN SITE EXPERIMENTAL DANS UNE MINE DE FER LORRAINE

HYDROMECHANICAL MODELING OF A PARTIAL FLOODING OF AN EXPERIMENTAL SITE LOCATED IN A LORRAINE IRON MINE

M. Souley, A. Thoraval

INERIS - LAEGO, Ecole des Mines de Nancy, Parc de Saurupt, 54042 Nancy Cedex, FRANCE

RESUME : Dans le cadre d'une expérimentation in situ réalisée par le GISOS[1] dans le bassin ferrifère lorrain, des mesures de déplacement ont mis en évidence l'effet d'un ennoyage partiel sur la stabilité d'une exploitation par chambres et piliers abandonnés. La modélisation numérique ne reproduit ces mesures que si elle prend en compte l'histoire hydrique du stot et les phénomènes associés à la variation du degré de saturation du milieu rocheux.

ABSTRACT : In the framework of an in situ experiment undertaken by GISOS in the lorrain iron basin, displacement measurements have shown the effect of partial flooding on the stability of abandoned room and pillar mine. The modeling does not reproduce those measurements without taking into account the hydric history of the site and the phenomena associated with the variation of the saturation in the rock mass.

1. Introduction

La gestion des conséquences de l'arrêt de l'exploitation minière dans le bassin ferrifère lorrain justifie qu'un important effort de recherche soit entrepris afin de mieux comprendre et de quantifier les phénomènes qui caractérisent le devenir des ouvrages souterrains créés au cours de l'exploitation. A cette fin, des expérimentions *in situ* visant à étudier, entre autres, l'influence de l'ennoyage sur la stabilité d'anciennes exploitations par chambres et piliers abandonnés ont été entreprises dans le cadre du GISOS. Ces expérimentations, qui comprennent une importante instrumentation géotechnique, géophysique et hydro-chimique, sont localisées dans une partie du stot[2] de Tressange, située au Nord du bassin ferrifère lorrain. Parmi tous ces dispositifs, des stations de mesures d'expansion et de convergence ont été mises en place sur ce site, à l'intérieur et à l'extérieur de la zone ennoyée, afin de suivre l'évolution en continu (avant, pendant et après l'ennoyage) des déformations des piliers et des intercalaires des trois couches superposées exploitées au droit du secteur expérimental.

Afin de mieux comprendre les phénomènes et interpréter ces mesures, nous avons eu recours à des modélisations numériques. Les modèles réalisés tentent de reproduire l'état initial du site, son creusement et l'effet de l'ennoyage sur le comportement mécanique des terrains. Toutefois, compte tenu de la complexité des interactions hydromécaniques et géochimiques entre la roche, l'eau et l'air, la modélisation numérique s'est voulue plus qualitative, l'objectif étant davantage de comprendre les phénomènes mesurés que de les quantifier.

---

1 GISOS (Groupement de recherche sur l'Impact et la Sécurité des Ouvrages Souterrains) réunissant l'INPL, le BRGM, l'INERIS et l'Ecole des Mines de Paris

2 appelé également stot de protection des villages et infrastructures. Cette zone exploitée par chambres et piliers abandonnés devrait en théorie rester stable à long terme (les piliers en place supportant l'ensemble du recouvrement) en opposition aux zones totalement dépilées qui ont induit un affaissement au moment de l'exploitation

Après avoir brièvement décrit la géologie du site, la zone d'expérimentation et l'instrumentation mise en place, l'approche numérique et la méthodologie adoptée (poro-élasto-plasticité en saturé et partiellement saturé), nous présentons une synthèse des mesures et les résultats obtenus à l'issue des différentes modélisations des phases d'ennoyage (mars 2003 à fin juin 2003) et de dénoyage (fin juin 2003 à 13 août 2003), tout en mettant l'accent sur le rôle de l'état hydrique des terrains avant l'ennoyage (hygrométrie imposée pendant l'exploitation).

2. Géologie du site expérimental et instrumentation mise en place

La formation ferrifère lorraine, d'origine sédimentaire et datée du Jurassique moyen, peut atteindre une puissance de 60 m. Les mines les plus profondes sont surmontées par une couverture de 250 m. D'une superficie de 115 000 ha, le gisement ferrifère lorrain s'étend sur 100 km de long et près de 50 km de large de la frontière luxembourgeoise, où le minerai affleure jusqu'au Sud de Nancy.

Le stot de Tressange, dans lequel des expérimentations viennent de s'achever, concerne les communes de Tressange et de Ferdinand (Meurthe-et-Moselle). La zone d'expérimentation, longue de 100 m et large de 80 m, correspond à une partie limitée du stot située à 500 m environ du premier dépilage. Il est exploité sur trois couches : la couche brune, d'une ouverture variant entre 2,5 et 3 m ; la couche grise, d'une ouverture variant entre 3,6 et 4 m ; et enfin, la couche jaune sauvage, d'une ouverture d'environ 3 m. La hauteur de recouvrement à l'aplomb de l'agglomération de Tressange est environ 225 m au-dessus du mur de la couche inférieure exploitée (brune). Les épaisseurs des intercalaires entre les trois couches sont respectivement de 7 m entre les couches brune et grise, et 6,5 m entre les couches grise et jaune sauvage. Les piliers, de dimensions 28 m x 18 m, sont bien superposés avec un décalage maximal de 0,5 m. Le nombre de piliers dans la zone expérimentale ennoyée (au moins partiellement) est de 12 (Fig. 1b). Dans cette zone du stot, trois sondages ont été réalisés durant une période allant de mars 1961 à juin 1962 par la société luxembourgeoise ARBED (exploitant) : l'un au mur de la couche jaune sauvage et les deux autres à partir de la couche grise. De ces sondages, on retiendra la forte hétérogénéité (verticale) des terrains surplombant les trois couches exploitées, avec une dominante calcaire. La figure 1a montre la coupe géologique simplifiée.

Des séries d'observations sur l'état de la fracturation du toit et des parements des galeries, la densité du soutènement et les zones de venues d'eau, ont permis de dresser une première cartographie de l'état du stot (illustré, par exemple, dans Wassermann et al. 2004), notamment un état de dégradation assez avancé, la présence de fractures avec des ouvertures atteignant parfois plusieurs millimètres (l'épaisseur du banc dit *«dégradé»* atteint 2 m dans certaines zones) au toit de la couche brune. Les piliers de la couche brune sont moins fracturés que le toit immédiat. Les quelques fractures rencontrées sont d'origine naturelle et souvent fermées par des matériaux de remplissage.

Ces observations ont également été confirmées par les premiers résultats de caractérisation diagraphique de l'état « avant ennoyage » réalisée dans le pilier G de la couche brune et dans le haut toit de la même couche (Balland, 2002).

L'instrumentation mise en place est constituée de 16 extensomètres multipoints et 13 convergencemètres qui sont tous reliés à une centrale d'acquisition de données. On distingue, en couche brune (Fig. 1c) : (a) 5 cannes de convergence, notées *conv BT-01* à *BT-05*. La canne *conv BT-05* se trouve à l'extérieur de la zone ennoyée ; (b) 4 extensomètres au parement notés BCP-01, BGP-01, BGP-02, et BKP-01. Ce dernier se trouve à l'extérieur de la zone ennoyée ; (c) 5 extensomètres au toit notés BT-01 à BT-05. L'extensomètre BT-05 se trouve à l'extérieur de la zone ennoyée. La canne de convergence a été positionnée au plus près des mesures d'expansion. Il en est de même pour les couches grise et jaune. La mesure d'expansion (verticale ou horizontale) a été effectuée en 4 points situés respectivement à 1 m, 2,5 m, 4 m et 6 m de profondeur par rapport au parement.

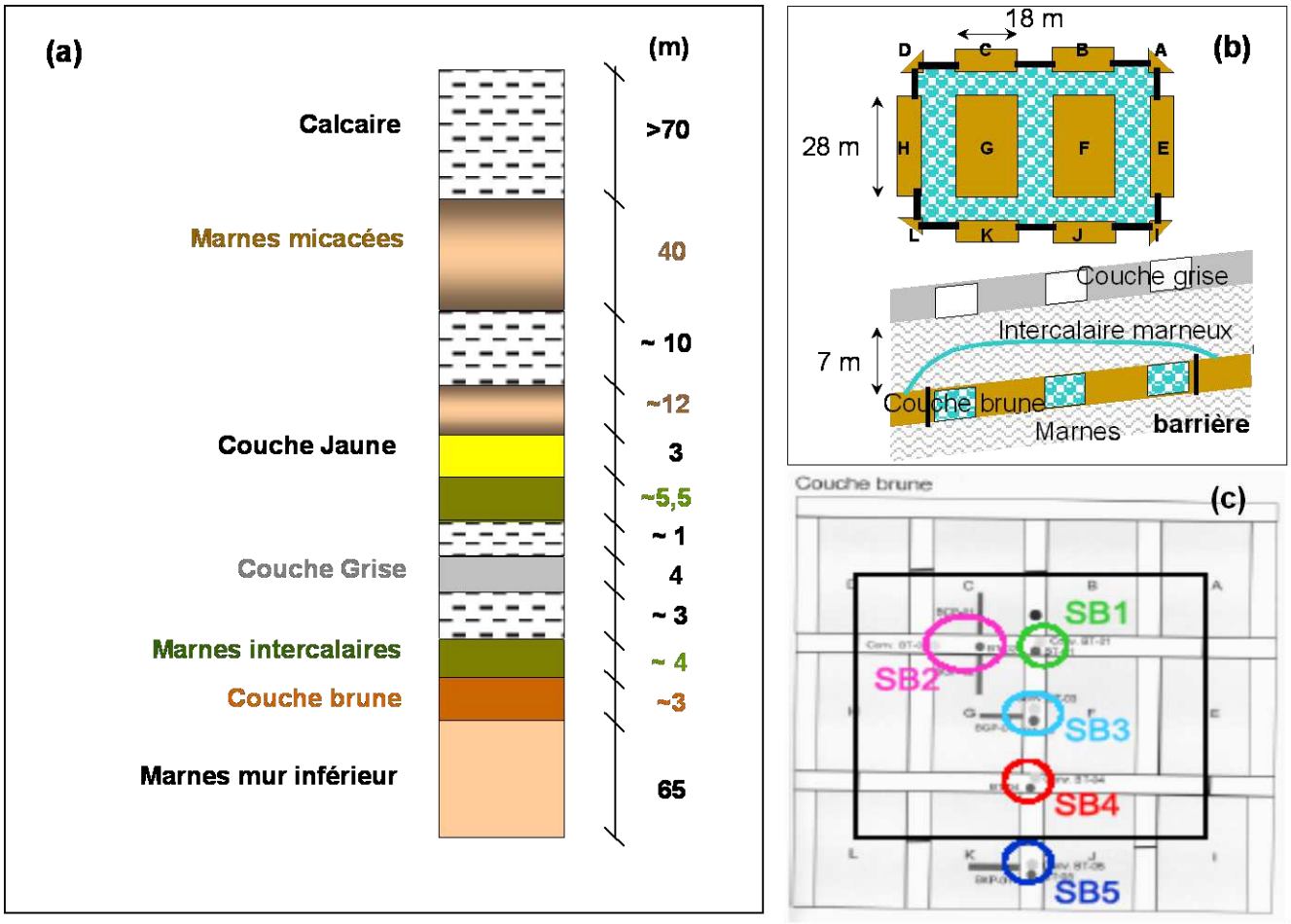

Figure 1. (a) Log géologique simplifié - (b) schématisation de la manip d'ennoyage- (c) localisation des mesures de déplacement

La station SB1 comporte une canne de convergence *(conv. BT-01)* et un extensomètre au toit (BT01). La station SB2 comporte une canne de convergence *(conv. BT-02)* et un extensomètre vertical au toit (BT02) et deux extensomètres horizontaux (BCP-02 et BGP-02) dans les deux piliers C et G (totalement ou partiellement ennoyés). La station SB3 comporte une canne de convergence *(conv BT-03),* un extensomètre vertical au toit (BT03) et un extensomètre horizontal (BGP-03) dans le pilier G (totalement ennoyé). La station SB4 comporte une canne de convergence *(conv BT-04)* et un extensomètre au toit (BT04). La station SB5 comporte une canne de convergence *(conv BT-05),* un extensomètre vertical au toit (BT05) et un extensomètre horizontal dans le pilier K (BGP-05). Cette station est la seule positionnée en dehors de la zone ennoyée.

3. Analyse des mesures de déplacement

Les mesures de déplacement faites dans le site pilote ont globalement bien fonctionné. La sensibilité des appareils de mesure s'est révélée suffisante pour détecter les variations induites au cours de l'expérimentation. Les variations mesurées, bien qu'inférieures au millimètre, restent supérieures à l'incertitude sur les mesures de convergence et d'expansion (±0,02 mm).

Dans la zone ennoyée, on constate que :

- en couche brune, l'effet de l'ennoyage est mis en évidence par les mesures de convergence faites (Fig. 2) dans les carrefours (SB1 : 0,25 mm ; SB2 : 0,4 mm). Il faut noter dans ce cas que l'augmentation de la convergence survient rapidement après l'ennoyage au mois de mars 2002 (on a pu vérifier que l'effet de température peut être négligé dans ce cas). La mesure de convergence faite en voie, dans une zone initialement moins fracturée, ne met pas en évidence une variation aussi importante (SB3 : 0,05 mm). Il semble donc que l'effet de

l'ennoyage se fait d'autant plus sentir que le milieu rocheux est initialement dégradé : ceci est également en accord avec l'activité micro-sismique enregistrée (Wassermann et al., 2004) ;

- une augmentation régulière de l'expansion au toit de la couche brune pendant l'ennoyage et une brusque augmentation suite au dénoyage. Il s'agit essentiellement d'une expansion affectant les 2 premiers mètres du toit. Les variations d'expansion au toit de la couche brune s'étalent sur une période de temps plus longue (environ 1 an). L'expansion affecte surtout le toit immédiat (SB1 : 0,24 mm entre 0 et 1 m ; SB2 : 0,18 mm entre 0 et 2,5 m). Les variations d'expansion apparaissent plus tardivement aux stations SB3 et SB4, soit 4 à 8 mois après le démarrage de l'ennoyage. Les valeurs maximales d'expansion sont également plus faibles (0,08 mm environ) que lorsque les stations sont installées dans un carrefour initialement dégradé ;

- lorsqu'elles ont fonctionné normalement, les mesures d'expansion horizontale faites dans les piliers ennoyés de la couche brune donnent des valeurs faibles (< 0,1 mm). La forte rigidité du minerai et la faible dégradation initiale des piliers expliquent partiellement la faible amplitude des variations mesurées.

Par contre, en dehors de la zone ennoyée, on constate que :

- la convergence mesurée en couche brune, en dehors de la zone ennoyée (SB5), est de 0,12 mm, sachant que la moitié de cette convergence est obtenue régulièrement dans l'année qui suit le démarrage de l'ennoyage. La lente augmentation mesurée est vraisemblablement liée au fait que la station SB5, tout en étant localisée en dehors de la zone ennoyée, reste relativement proche de celle-ci (elle est localisée à moins de 5 m) ;

- les expansions horizontales faites en dehors de la zone ennoyée (en couche brune) donnent des valeurs encore plus faibles que dans la zone ennoyée (<0,04 mm) ;

- les valeurs de convergence en couche grise sont plus faibles qu'en couche brune. L'augmentation devient significative à partir du mois de janvier 2003. Faut-il y voir, dix mois après le démarrage de l'ennoyage du site pilote en couche brune, un effet différé de la mise en eau affectant les stations de mesure de la couche grise ? Les valeurs maximales, obtenues à nouveau dans les carrefours (SG1 et SG2) ou dans les zones initialement les plus dégradées (mur de SG4), ne dépassent pas toutefois 0,2 mm ;

- les expansions mesurées au toit de la couche grise dans les carrefours (SG1 : 1 mm ; SG2 : 0,3 mm) affectent principalement le haut-toit de l'intercalaire grise/jaune. Elles doivent être corrélées avec les mesures de convergence faites dans la couche jaune aux mêmes stations (SJ1 : 0,9 mm) et traduisent un fluage du mur immédiat de la couche jaune (qui est constitué partiellement de « marne truitée » d'après certains sondages). Ce luage est bien moins important au niveau des stations situées en pleine voie (SG3, SJ3 et SG4).

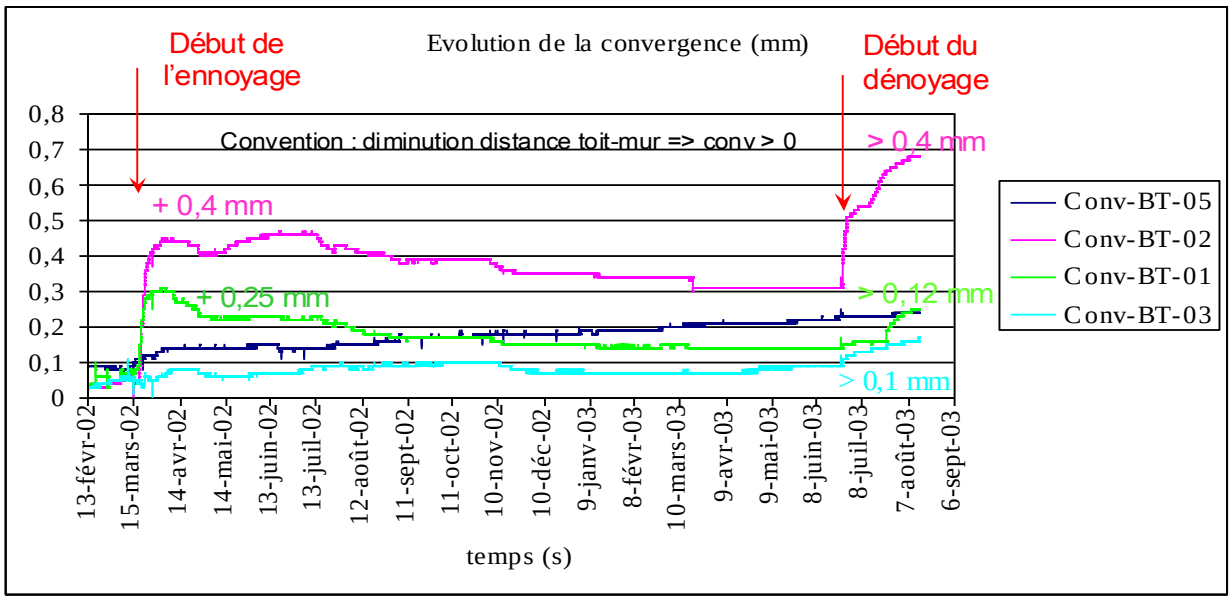

Figure 2. Evolution de la convergence en couche brune pendant l'ennoyage et le dénoyage

4. Modélisation

Afin de mieux comprendre les phénomènes et interpréter les mesures, nous avons eu recours à des modélisations numériques. Ces dernières reposent sur une approche continue du massif rocheux et ont été réalisées avec le code *FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua in two dimensions)*. Ici nous avons privilégié le caractère poreux des matériaux constituant le site, même si le toit immédiat de la couche brune semble comporter des fractures indicatrices des fuites enregistrées au démarrage de l'ennoyage.

Tout d'abord, une approche poro-élasto-plastique en saturé a été utilisée. Dans ce cas, le modèle géomécanique s'inspire de celui réalisé dans la modélisation préliminaire pour le dimensionnement de la manip (Souley et al., 2002), excepté la rhéologie des marnes intercalaires et du minerai de fer récemment affinée sur la base des résultats de caractérisations de laboratoire (Grgic et al., 2003a) et implantée dans les codes *FLAC* (2D et 3D). On cherchera d'abord à reproduire l'état « avant ennoyage » sur la base de l'extension des zones plastiques par une réduction des caractéristiques de laboratoire.

Dans un second temps, on prendra en compte l'historique hydrique du stot ; l'exploitation et l'abandon (arrêt d'aérage et circulation d'engins) : dans ce cas l'extension des zones plastiques et/ou désaturées constituera l'élément de calage des zones « endommagées » estimé dans la caractérisation de l'état « avant ennoyage ». On utilise le module partiellement saturé (à 2 pressions) de *FLAC*.

4.1. Poro-plasticité partiellement saturée dans FLAC

FLAC est un code de calcul utilisant la méthode des différences finies et permettant la modélisation de nombreux problèmes dans les domaines du génie civil et minier. La solution statique d'un problème est déterminée à partir de la résolution par différences finies de l'équation fondamentale de la dynamique. La formulation incrémentale des processus couplés déformation-diffusion dans *FLAC* s'inscrit dans le cadre de la théorie de Biot. En partiellement saturé (à 2 pressions : liquide et gaz ; sans changement de phases et en supposant l'incompressibilité du solide matriciel ; coefficient de Biot égal à 1), les équations sont écrites en adoptant une approche phénoménologique et en utilisant directement les variables macroscopiques, définies pour un volume élémentaire représentatif *VER*. On suppose que le modèle physique est complètement rempli de fluides et les saturations en liquide *(w)* et en gaz *(g)* sont reliées par la première équation de (1). La différence de pression $(P_g - P_w)$ est la pression capillaire (P_c), une fonction de la saturation S_w déterminée expérimentalement : celle-ci montre généralement une hystérésis (Grgic et al., 2003b pour le minerai de fer). Dans *FLAC*, cette fonction est approchée par la loi empirique de van Genuchten (1980), nécessitant deux paramètres : P_0 : résistance capillaire du matériau ; a : une constante.

$$\begin{cases} S_w + S_g = 1 \\ P_g - P_w = P_c(S_w) \end{cases} \qquad (1)$$

La pression macroscopique de chaque constituant α (w ou g), provoque un écoulement selon la loi de Darcy :

$$q_i^\alpha = -\frac{\kappa_{ij}}{\mu_\alpha} K_r^\alpha \frac{\partial(\varphi_\alpha - \rho_\alpha g_k x_k)}{\partial x_j} \qquad (2)$$

où k_{ij} : tenseur de perméabilité intrinsèque (m^2) ; K_r^α : perméabilité relative du constituant α, fonction de S_w (lois empiriques de van Genuchten 1980 dans *FLAC*) ; ρ_α : masse volumique supposée constante ; $\vec{x}$: vecteur position ; $\vec{g}$: vecteur gravité ; μ_α (Pa.s) : viscosité dynamique

et $\vec{q}^{\alpha}$ (m/s) : vecteur courant du constituant α. En négligeant les variations de densité, l'équation d'équilibre de chaque constituant est donnée par :

$$\frac{\partial \xi_\alpha}{\partial t} = -\frac{\partial q_i^\alpha}{\partial x_i} + q_v^\alpha \tag{3}$$

où ξ_α : variation du volume du constituant α par unité de volume du milieu poreux ; q_v^{α} : source. En condition isotherme, l'équation de continuité du constituant α s'écrit :

$$S_\alpha \frac{\partial P_\alpha}{\partial t} = \frac{K_\alpha}{n}\left[\frac{\partial \xi_\alpha}{\partial t} - n\frac{\partial S_\alpha}{\partial t} - S_\alpha \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t}\right] \tag{4}$$

ε_v : déformation volumique ; K_α : compressibilité du constituant α, et par suite (3) dans (4) permet d'exprimer l'équation constitutive du constituant α :

$$n\left[\frac{S_\alpha}{K_\alpha}\frac{\partial P_\alpha}{\partial t} + \frac{\partial S_\alpha}{\partial t}\right] = -\left[\frac{\partial q_i{}^\alpha}{\partial x_i} - q_v{}^\alpha + S_\alpha \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t}\right] \tag{5}$$

La relation (5) pour α = *w* et *q*, combinée à l'équation (1) constitue un système de 4 équations en P_w, P_g, S_w et S_g ; auxquelles il faut rajouter l'équation d'équilibre mécanique dans les calculs couplés. Ainsi la réponse du squelette (avec grains incompressibles) est exprimée en terme de contraintes effectives (somme de l'incrément de contraintes totales et l'incrément moyen de pressions des constituants du VER : $d\sigma_{ij}' = d\sigma_{ij} + \overline{dP}\,\delta_{ij} = d\sigma_{ij} + (S_w dP_w + S_g dP_g)\,\delta_{ij}$. En poro-plasticité, les contraintes effectives de Bishop σ_{ij}^b dans lequel le facteur de Bishop est pris égal à S_w, sont utilisées pour détecter la rupture : c-à-d $\sigma_{ij}^b = \sigma_{ij} + \overline{P}\,\delta_{ij} = \sigma_{ij} + (S_w P_w + S_g P_g)\,\delta_{ij}$. L'implantation numérique consiste à discrétiser les équations (5) pour un volume fini V (associé à un noeud) tout en prenant soin de faire apparaître le terme $(1 - S_w)\,P_c'(S_w)$ au lieu de $P_c'(S_w)$ [3], ce qui permet de calculer les incréments de P_w et S_w entre les instants t et t+Δt.

4.2. Méthodologie adoptée et hypothèses

1°) - Phasages. La modélisation est réalisée en 4 étapes : *phase 0 - état initial avant exploitation* : le pompage pendant l'exploitation entraîne le rabattement de la nappe, initialement située environ 50 m au-dessus de la couche jaune, jusqu'à 5 m en dessous de la couche brune ; *phase 1 :* l'exploitation des couches brune, grise et jaune – calage de l'état « avant ennoyage » ; *phase 2 – ennoyage partiel :* ceci est réalisé en appliquant un champ de pression aux parois des chambres de la zone ennoyée de la couche brune ; variant de 0,06 MPa (soit 6 m d'eau) au mur de la couche jusqu'à 0,03 MPa (soit 3 m d'eau) au toit de couche[4] ; *phase 3 - dénoyage :* on applique à nouveau une pression hydraulique nulle dans les chambres de la zone expérimentale.

2°) – Lois de comportement et caractéristiques de laboratoire. On adopte une loi de comportement élasto-plastique à 11 paramètres avec écrouissages (pré et post-pic) et prenant en compte la transition fragile/ductile identifiée à partir de la caractérisation de laboratoire des marnes intercalaires et du minerai de la grise (Grgic et al., 2003a-b, par exemple) : les

---

[3] $P_c'(S_w) = dP_c/dS_w$ qui devient infini lorsque la saturation en liquide tend vers 1. De plus, $(1 - S_w)\,P_c'(S_w)$ tend vers 0 lorsque S_w tend vers 1 et l'expression de ΔP_w résultante de (5) reste applicable en conditions saturées : deux milieux avec S_w=1 (resaturation) et $S_w < 1$ (désaturation) peuvent ainsi être modélisés ensemble.

[4] Ce champ de pression est appliqué dès le début de la phase d'ennoyage, alors que dans la réalité, le niveau d'eau dans la chambre augmente avec le temps, pour atteindre le toit au bout de 4 mois (Wassermann et al. 2004). Cette simplification aura comme effet la surestimation des phénomènes apparaissant dans la phase transitoire.

paramètres utilisés proviennent de Grgic et al. 2003a. En absence d'une caractérisation fine des calcaires et des marnes micacées du recouvrement, nous avons supposé, comme dans Souley et al. 2002, un comportement élastoplastique parfait dont les caractéristiques utilisées proviennent d'une synthèse bibliographique des données géotechniques du bassin ferrifère lorrain.

3°) – Perméabilités et coefficients de Biot. Les mesures de perméabilité faites en laboratoire sur des échantillons (couche grise, marne intercalaire du toit de la couche grise et mur de la couche brune) provenant de sondages verticaux de Joeuf ont donné des valeurs de l'ordre de 10^{-19} m^2. C'est également le même ordre de grandeur qui a été mesuré dans les piliers de la couche brune et l'intercalaire situé dans le haut toit de la couche brune lors de la caractérisation de l'état « avant ennoyage » du site. Afin de tenir compte des faciès marneux carbonatés et fracturés au toit immédiat de la couche brune (sur 1,5 m de profondeur), on admettra une perméabilité horizontale de 10^{-16} m^2. En effet les mesures de perméabilité des marnes saines ont montré que l'intercalaire marneuse est moins perméable que le minerai contrairement aux mesures in situ dans les zones fracturées[5]. Des coefficients de Biot de 0,8 (marnes) et 0,9 (minerai), mesurés en laboratoire, ont été utilisés en saturé. Par contre, le module partiellement saturé de *FLAC* fait l'hypothèse d'incompressibilité du solide matriciel ; on admet donc un coefficient de Biot de 1.

4°) – Isothermes d'adsorption-désorption. Des isothermes de succion (adsorption-désorption) ont été réalisées sur les minerais de fer des couches brune et grise, mais aussi sur les marnes intercalaires. Les constantes a et P_0 relatives à la loi empirique de van Genuchten (1980) pour le minerai et les marnes ont été identifiées sur la base des courbes d'adsorption (Fig. 3).

5°) – Modèles. Les calculs sont effectués en 2D en considérant une double symétrie (½ chambre et ½ pilier) et deux modèles sont réalisés : modèle *Sat* (poro-plasticité saturé) et modèle *Unsat* (poro-plasticité en partiellement saturé). Dans les deux cas on cherche à reproduire la phase 1 les observations faites « avant ennoyage » par diagraphie et tomographie[6]. Pour le modèle *Sat* (où l'on ne simule aucune désaturation), plusieurs simulations pour différentes valeurs de résistances ont été réalisées afin de reproduire cet endommagement par comparaison aux zones plastiques. La calibration nous conduit à une réduction d'environ 50% et 70% des valeurs laboratoire, respectivement pour le minerai de la couche brune et la marne intercalaire au toit immédiat de la couche brune. Parallèlement à cette réduction de résistance, induisant un endommagement des matériaux, les perméabilités ont été multipliées par 100.

Pour le modèle *Unsat*, l'accent a été mis sur le rôle de l'historique hydrique avant l'ennoyage du stot (exploitation et abandon)[7] : la calibration à la phase 1 a été basée à la fois la fois sur l'extension des zones plastiques et désaturées. L'historique est modélisé comme suit : la ventilation sur une dizaine d'années en imposant une humidité relative de 70% en parois ; et l'abandon du stot sur une période d'une trentaine d'années en atmosphère ambiante en imposant une humidité relative de 90% (en pratique on impose une pression de gaz égale à la pression atmosphérique et une pression liquide $P_w = P_g - P_c(H_r)$).

4.3. Résultats avant les phases d'ennoyage/dénoyage (phase 1)

La figure 4(a) montre la répartition des zones plastiques autour des chambres dans le cas du modèle *Sat*. Dans la couche brune, la plastification s'étend dans la marne dégradée avec une extension de 1,5 m. Dans le pilier de la couche brune, l'extension des zones plastiques varie de

---

[5] Les mesures de perméabilités réalisées dans les zones fracturées de l'intercalaire (toit immédiat de la couche brune) par injection à débit constant montre des valeurs voisines de 10^{-13} m^2. Nous avons choisi 10^{-16} m^2 pour minimiser les contrastes de perméabilité et conserver des temps de calculs raisonnables.

[6] On observe une réduction des vitesses de propagation d'environ 10 à 20% jusqu'à 2 à 3 m au delà du parement du pilier ; ce qui peut traduire soit un endommagement, soit une désaturation.

[7] L'endommagement par microfissuration (résultant des variations des contraintes totales de traction et/ou l'augmentation des contraintes effectives) induit une détérioration des propriétés mécaniques du matériau. Mais la fissuration affecte également les propriétés du couplage hydromécanique, hydrauliques et thermiques. Hélas, très peu de données expérimentales pertinentes sont disponibles pour permettre de déterminer des corrélations fiables.

1,5 m dans la partie inférieure (mur) jusqu'à 2,5 m dans la partie supérieure (toit). Ceci est conforme aux observations faites « avant ennoyage » (voir note 6).

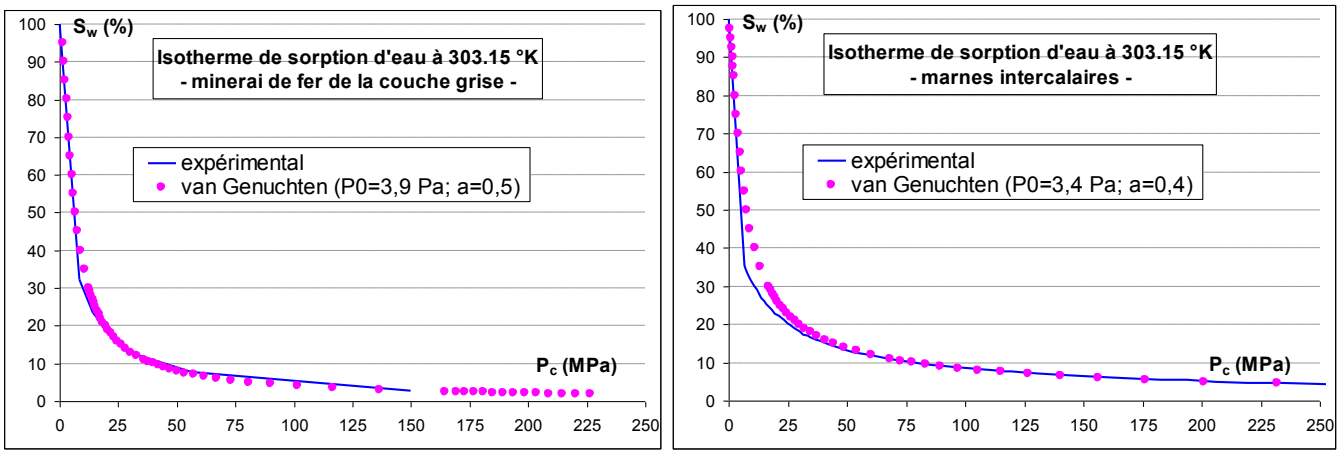

Figure 3. Isothermes de sorption et ajustements de van Genuchten

Les isovaleurs de saturation obtenues avec le modèle *Unsat* (Fig. 4b) montrent une désaturation des roches jusqu'à 3,5 m des parements des piliers (à mi-hauteur) et jusqu'à 1,5 m du toit immédiat constitué des marnes dégradées (plus perméables). Précisons qu'à ce stade, le modèle rhéologique utilisé ne prend pas en compte l'endommagement du massif qui pourrait résulter de cette désaturation. D'un point de vue qualitatif, les zones désaturées mises en évidence par le modèle numérique coïncident assez bien avec les zones à faible vitesse de propagation mises en évidence par tomographie avant l'ennoyage (voir note 6). L'importance de la perméabilité intrinsèque des matériaux sur l'extension des zones désaturées est clairement mise en évidence par la désaturation préférentielle des marnes dégradées du toit immédiat de la couche brune, 100 fois plus perméable que le minerai. L'estimation quantitative de l'extension de la zone désaturée nécessite donc la connaissance exacte à priori de la perméabilité. De la même façon, le processus de resaturation (Hr=90%) est ralenti dans les zones peu perméables (minerai et marnes intercalaires). L'examen des déplacements induits pour la phase 1 montre un rétrécissement (volumique) des matériaux pendant la désaturation. En effet si l'on se limite à un cadre poro-élastique ; le comportement volumique s'écrit :

$$\frac{d\sigma_{ii}}{3} + \left(dP_g - S_w dP_c\right) = K d\varepsilon_v \qquad (6)$$

où K est le module de compressibilité drainée. Au cours de la ventilation et à proximité des parois des chambres la pression de gaz P_g et la contrainte totale moyenne variant très peu, l'équation (6) permet de voir qu'une ventilation ($\Delta S_w < 0$ entraînant l'augmentation de $P_c(S_w)$) produit le retrait du milieu poreux.

4.4. Résultats des phases d'ennoyage/dénoyage

La figure 5, à comparer avec la figure 2, montre les effets d'ennoyage et de dénoyage sur les déplacements (convergence et expansions) autour de la chambre ennoyée pour les deux modèles *Sat* et *Unsat*.

Pour le modèle *Sat*, on note une augmentation de la convergence et d'expansions après l'ennoyage qualitativement conforme à celles mesurée, mais d'amplitudes 50 à 100 fois plus faibles. Contrairement aux mesures, le modèle ne reproduit pas l'augmentation de la convergence constatée au début du dénoyage (le modèle prédit même une légère diminution de cette convergence).

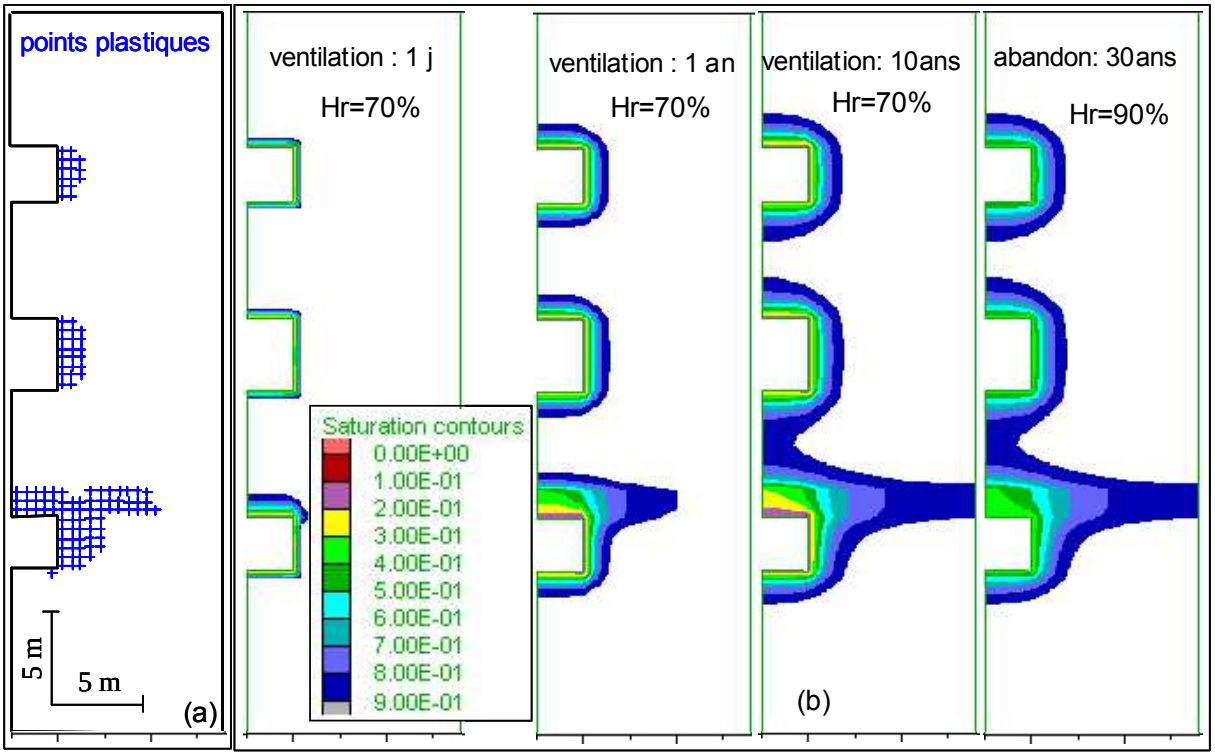

Figure 4. Etat avant ennoyage : (a) zones plastiques (modèle *Sat*) – (b) isovaleurs de saturation résultant de la ventilation et de l'abandon du stot (modèle *Unsat*)

Les effets de l'ennoyage sont quantitativement (et qualitativement) mieux reproduits dans le cas du modèle *Unsat*. En effet, le calcul prédit bien dans ce cas une augmentation rapide de la convergence en couche brune (+0,5 mm environ) dans les jours qui suivent le début de l'ennoyage, suivi d'une diminution progressive (environ 0,2 mm). L'augmentation supplémentaire de convergence mesurée au moment du dénoyage n'est toujours pas reproduite par le modèle *Unsat*. Ceci laisse supposer que certains phénomènes physiques ne sont pas encore bien pris en compte. De manière analogue, les variations d'expansions induites par l'ennoyage sont convenablement bien reproduits. Il en est de même pour la phase de dénoyage mais avec des variations légèrement moins importantes que celles des mesures.

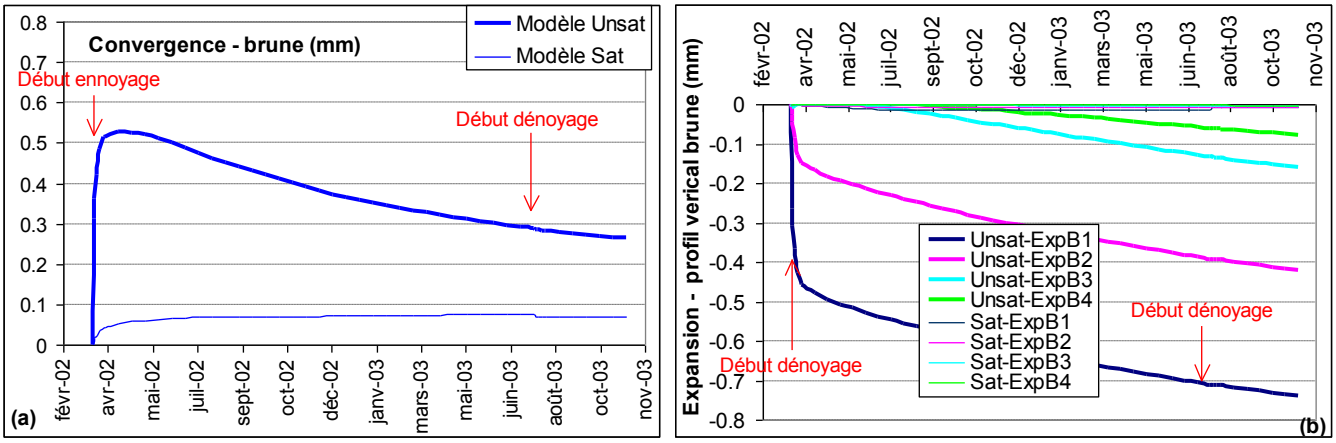

Figure 5. Phases d'ennoyage et de dénoyage :
(a) convergence de la chambre ennoyée – (b) expansions dans l'intercalaire brune/grise

5. Conclusions

Les mesures de déplacements (convergences, expansions) réalisées in situ ont mis en évidence l'effet d'un ennoyage. Ces effets sont plus marqués dans zones initialement les plus dégradées.

Afin de mieux comprendre les phénomènes, des modèles numériques ont été développés. Celui réalisé dans le cadre de l'hypothèse du milieu poro-plastique saturé (modèle *Sat*), qui a été calibré en comparant l'extension des zones plastiques calculée à une caractérisation géophysique de l'état « avant ennoyage », n'a pas permis de reproduire (ni qualitativement et ni quantitativement) les mesures de déplacements induits par l'ennoyage et le dénoyage. Ces résultats nous ont incité à prendre en compte l'historique hydrique du site dans un cadre poro-élastoplastique partiellement saturé avant l'expérimentation (modèle *Unsat*). Le modèle a cette fois été calibré en se basant sur l'extension de la zone désaturée de sorte que celle-ci coïncide avec l'extension zones à faible vitesse de propagation mises en évidence par tomographie avant l'ennoyage. Le modèle prédit alors convenablement les déplacements induits par l'ennoyage. L'augmentation supplémentaire de convergence mesurée au moment du dénoyage n'a pas pu être reproduite numériquement ; certains phénomènes physiques n'étant pas encore bien pris en compte. La perspective de ce travail de recherche consistera à améliorer ce dernier point en prenant notamment en compte l'endommagement induit par la désaturation et son impact sur les propriétés de couplages hydromécaniques.

6. Remerciements

Cette recherche a été effectuée dans le cadre du programme scientifique du GISOS et a été financée par le Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie, le Ministère de la Recherche, et par la Région Lorraine. Les auteurs remercient ces organisations pour l'aide financière et scientifique apportée, ainsi que l'ARBED pour l'appui technique lors des expérimentations effectuées sur le site de Tressange.

7. Références bibliographiques

Balland C. (2002) Programme EAT-DRS-03 – Technique de diagraphies ultrasoniques appliquées à l'auscultation d'ouvrages miniers (Site de Tressange). INERIS DRS-02-25303/RN09, 22p.

Grgic D., Homand F., Hoxha A. D. (2003a) A short- and long-term rheological model to understand the collapses of iron mines in Lorraine, France. *Computers and Geotechnics. 30, 557-570.*

Grgic D., Homand F., Giraud A. (2003b) A study of the partially saturated mechanical behavior of iron ore of Lorraine (France). *10th Congress of the ISRM – Technology Roadmap for Rock Mechanics. South Africa Institute of Mining and Metalurgy*, 8-12 sept., 2003, p. 425-430.

Souley M., Al-Heib M., Thoraval A. (2002) Modélisation hydromécanique préliminaire d'ennoyage d'un site dans le bassin ferrifère lorrain. JNGG 2002, Nancy Octobre 2002.

van Genuchten M. Th. (1980) A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. *Soil Sc. Soc. Am.J.* 44, 892-898.

Wassermann J., Senfaute G., Homand F., Amitrano D. (2004) Auscultation micro-sismique de l'ennoyage du site expérimental de Tressange - Bassin ferrifère lorrain. JNGG2004 (soumis).