

# Proposition d'une méthodologie pour la prévention des désordres en surface liés aux phénomènes hydromécaniques dans les anciennes mines

## Proposal of a methodology to prevent surface disorders due to hydromechanical phenomena in former mines

Arnold BLAISONNEAU<sup>1\*</sup> & Théophile GUILLON<sup>1</sup>

<sup>1</sup> BRGM, Orléans, France

\* a.blaisonneau@brgm.fr

**RESUME :** La compréhension des aléas mécaniques en surface survenant après la phase de fermeture des anciennes mines de charbon est capitale à la vue des enjeux de vulnérabilité et de l'étendue des territoires concernés. Lors de cette phase d'après mine, les arrêts de pompage et de contrôle des niveaux de nappes dans les ouvrages miniers conduisent à une susceptibilité accrue de terrains géologiques, situés entre les vides miniers et la surface, aux battements de nappes et aux phénomènes hydromécaniques associés. L'étude de l'impact des phénomènes hydromécaniques sur la réponse mécanique des terrains géologiques est primordiale afin de mieux prévenir la survenue des aléas en surface notamment ceux présentant une cinétique de déclenchement rapide et incontrôlée tels que les fontis. Les travaux présentés ici sont réalisés dans le cadre du projet européen RFCS SIRIMA et visent à développer une méthodologie d'analyse des anciens sites miniers combinant simulations numériques prédictives, données *in situ* et techniques observationnelles spatio-temporelles. En l'état d'avancement du projet seules les premières briques de cette méthodologie sont présentées.

**ABSTRACT:** The understanding of surface mechanical hazards during the closing phase of coal mines is crucial in regard of the vulnerability issues and the spreading of impacted territories. During this postmining period, the stop of water pumping and control of the water table level leads to an increasing sensitivity of the geological grounds above mining jobs to water table fluctuations and induced mechanical couplings. The study of the impact of such hydromechanical phenomena on the mechanical response of grounds is capital in order to mitigate the occurrence of surface hazards especially those with an uncontrolled and fast triggering kinetic such as sinkholes. The presented works are done in the framework on the EU project RFCS SIRIMA and aim at develop a methodology to analyze former mining sites by combining predictive numerical simulations, *in situ* data and spatio-temporal observational techniques. In the state of project only the first technical bricks of the methodology are presented.

**Mots-clés:** Anciennes mines, ennoyage, battement de nappe, désordres en surface.

### 1 INTRODUCTION

Au cours des dernières décennies et d'ici à 2050 pour les derniers gros pays producteurs (Allemagne, République Tchèque, Pologne), l'arrêt progressif de l'exploitation du charbon dans les grands bassins miniers en Europe, pour des raisons environnementales ou économiques, rend capitale la gestion des risques liés à la phase d'après mine à la vue des enjeux de vulnérabilité et de l'étendue des territoires concernés. En particulier, les risques liés aux désordres en surface du fait des anciens vides miniers et de leur ennoyage sont particulièrement scrutés afin de limiter les dommages sur les infrastructures de surface (bâtiments, réseau de communication). Dans le cadre du projet européen RFCS SIRIMA (Research For Coal and Steel

Sinkhole hazards and Risk Management in post mining areas), une partie des travaux porte sur la compréhension et la prévention des désordres en surface, notamment les fontis, en lien avec l'ennoyage des vides miniers et les battements de nappe. A la vue de l'étendue des territoires concernés par la problématique une méthodologie d'auscultation est proposée combinant simulations numériques prédictives, données *in situ* et techniques observationnelles spatio-temporelles des élévations surfaciques. Cette méthodologie repose sur les connaissances et approches existantes, détaillées dans les premiers paragraphes de l'article, mises en œuvre pour la compréhension des phénomènes hydromécaniques dans les réservoirs profonds, celles sur l'étude des mécanismes d'effondrements miniers et celles sur le phénomène de fontis.

## 2 ETAT DE L'ART

### 2.1 Couplages hydromécaniques et déplacements en surface

Dans le sous-sol, les phénomènes hydromécaniques du fait du pompage ou de l'injection de fluide (voir par exemple Cui et *al.* 2025) induisent des déplacements en surface, fonction de la sollicitation (amplitude, cycles) et de la nature des terrains géologiques. Lorsque les volumes concernés sont conséquents les subsidences (dus à la baisse de pression de fluide par exemple lors de pompage) ou soulèvements (dus au contraire à l'injection de fluide), cumulées sur plusieurs années sont pluricentimétriques. Dans certains cas extrêmes ils sont décimétriques à métriques comme dans le cas de l'exploitation de l'aquifère dans la région de Téhéran occasionnant dans certaines zones des subsidences de 25 cm/an (Haghshenas Haghghi et Motagh 2019). Dans le contexte de l'après mine, ces phénomènes hydromécaniques se produisent du fait de l'arrêt de l'exhaure conduisant à l'envoyage des vides miniers et au battement de la nappe au gré des conditions météorologiques. A l'échelle d'un bassin minier et sur plusieurs décennies d'envoyage des mines, les déplacements induits du fait de l'envoyage peuvent être hétérogènes, allant de zones en subsidence à zones en soulèvement pour la même chronologie (Figure 1). Ces hétérogénéités du champ de déplacement en surface s'expliquent par différents facteurs tels que la nature des milieux géologiques (différentes lithologies ayant des compétences mécaniques hétérogènes), la présence de structures tectoniques (failles, fractures), et la topographie (voir Zhao et Konietzky 2020).

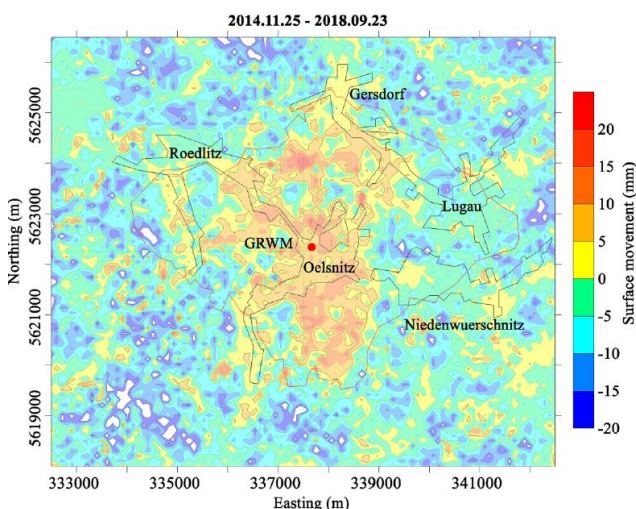


Figure 1. Evolution des élévations en surface mesurées par méthode INSAR entre 2014 et 2018 sur l'ancien champ minier de Lugau-Oelsnitz (Allemagne), image provenant de Zhao et Konietzky 2020.

### 2.2 Désordres en surface dus aux mines

Dans le cas d'exploitations minières souterraines, les aléas mécaniques à l'origine de désordres en surface s'expliquent bien souvent par l'effondrement des terrains au droit des vides miniers. Ces aléas vont de l'affaissement (Figure 2 a) à l'effondrement généralisé (Figure 2 b) en passant par les fontis (Figure 2 c). Ils se traduisent par des cinétiques, des réponses en surface et des schémas de rupture caractéristiques. Le facteur déclenchant est la rupture d'un ou de plusieurs éléments qui assuraient la stabilité mécanique du vide minier, que ce soient les éléments structurels mis en œuvre par le type d'exploitation (par exemple les piliers dans l'exploitation de type « chambres et piliers ») ou les terrains géologiques au toit des cavités (voir par exemple Al Heib et *al.* 2015).

Dans certains cas le collapse des cavités minières est concomitant à des glissements de terrains et une composante essentielle des schémas de déplacements et de rupture va être la topographie de la surface telle que la présence de falaises (Al Heib et *al.* 2023).

Le rôle de l'eau et des battements de nappe autour des anciens vides miniers est bien souvent avancé dans la survenue de l'effondrement des terrains, soit en tant qu'élément déclencheur soit en tant que facteur aggravant. Cela est justifié par le constat dans de nombreux cas d'épisodes pluvieux intenses juste avant la survenue de l'aléa (Al Heib et *al.* 2015, Al Heib et *al.* 2023). L'effet de l'eau peut être multifactoriel :

- Diminution des propriétés mécaniques ou un changement de rhéologie des éléments assurant la stabilité (piliers, bancs lithologiques au toit des vides) ;
- Evolution des pressions interstitielles et des contraintes effectives dans les matrices rocheuses et les fractures ;
- Ecoulement de particules fines et dissolution des matrices rocheuses et des remplissages de fractures ;
- Augmentation du chargement mécanique du fait de la saturation en eau des roches et sols au-dessus des vides miniers.

### 2.3 Fontis

L'aléa fontis n'est pas exclusif à la thématique après mine et il survient dans des contextes géologiques bien spécifiques (Figure 3) :

- Présence de karsts et de roches carbonatées ;
- Milieux fortement fracturés ;
- Présence de matériaux peu cohésifs enclin à l'écoulement tels que les sables ou les loess ;
- Présence de vides et de cavités.

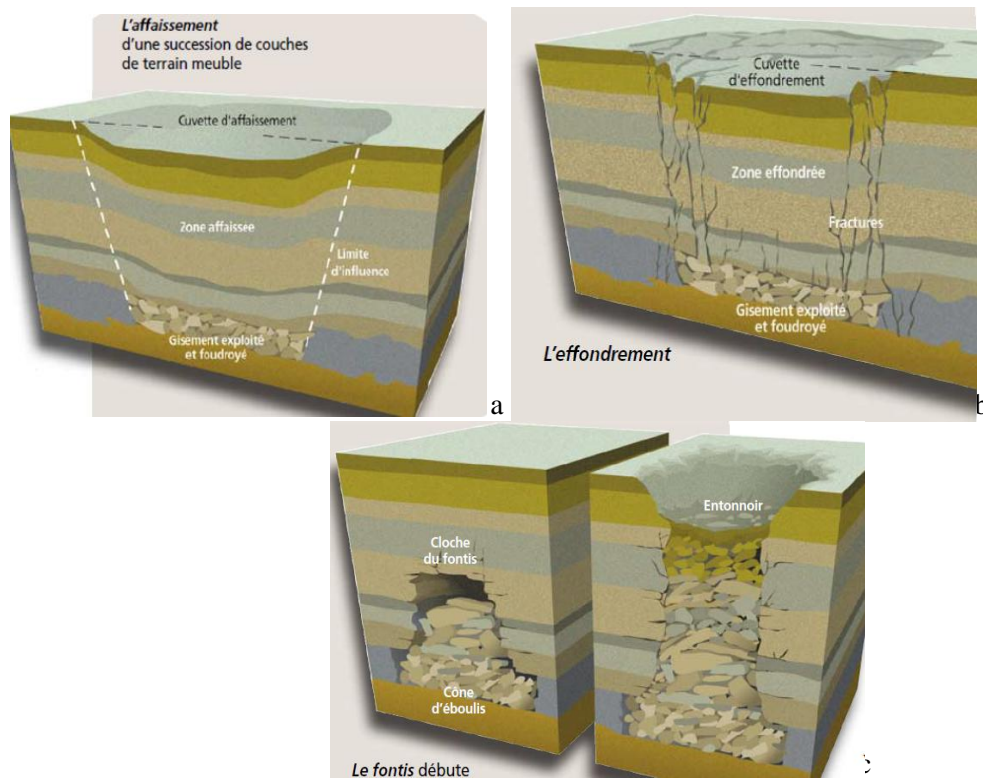


Figure 2. Les types d'aléas mécaniques dans l'exploitation des mines souterraines conduisant à des désordres en surface (illustrations issues de APSRM et al. 2005).

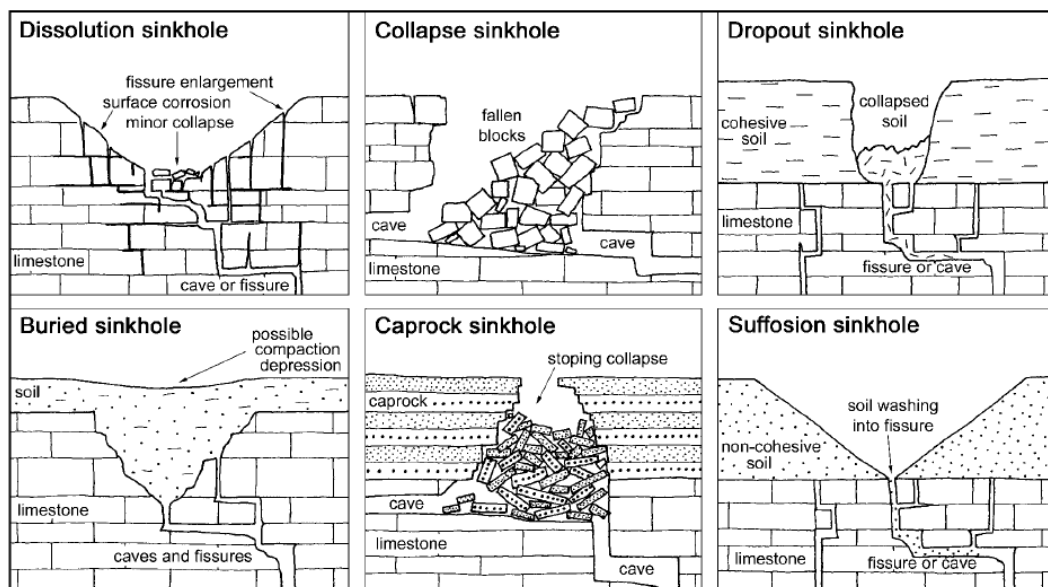


Figure 3. Les différents mécanismes de formation des fontis (Waltham et Fookes 2003).

Le rôle de l'eau comme catalyseur ou déclencheur des fontis est là encore, comme pour la problématique des effondrements miniers, multiple :

- Dissolution des matrices carbonatées ;
- Écoulement et suffosion des éléments particuliers ;
- Dégradation des compétences mécaniques des roches et des sols ;

- Effet de l'augmentation des pressions interstitielles.

### 3 METHODOLOGIE D'AUSCULTATION PROPOSEE

La méthodologie proposée pour l'auscultation des anciennes mines et la prévention des risques de désordre en surface repose sur l'intégration des acquis et connaissances mentionnés ci-dessus.

L'objectif est ici de se placer plutôt dans la mise en œuvre d'outils de prévention de type « alerte précoce ». En fonction de la spécificité des terrains géologiques (lithologies, fracturation), de la profondeur et du volume des vides miniers la méthodologie vise à caractériser la réponse mécanique en surface pour des scénarios stables et pour des scénarios conduisant à l'effondrement des terrains en considérant les cas critiques énoncés ci-dessus. Le but est d'identifier si lors du battement de nappe des réponses spécifiques à un scénario instable peuvent être mises en évidence en amont de la phase rapide et irréversible du déclenchement du fontis. L'objectif n'est pas de simuler le phénomène d'effondrement ou de fontis en lui-même ce qui nécessiterait la mise en œuvre d'outils de modélisation spécifique à chacun des contextes géologiques spécifiques (par exemple, le mécanisme de création de fontis par suffosion de sable ou de loess nécessite la mise en œuvre d'outils de modélisation particuliers Luu *et al.* 2019)

Cette méthodologie repose sur la réalisation de simulations numériques prédictives pour définir les réponses en surface aux battements de nappe et une confrontation des champs de déplacements obtenus avec les données de suivi spatio-temporel par méthode INSAR et les données piézométriques. Cette confrontation servira de test à la fois pour la validation des simulations numériques mais également quant à l'utilisation des méthodes INSAR pour la prévention des effondrements localisés. En effet, si ces méthodes ont déjà été utilisées à l'échelle des bassins miniers (Caro Cuenca *et al.* 2013) il conviendra de tester l'adéquation de la résolution spatio-temporelle de ces méthodes (gamme des déplacements mesurables, fréquence des données dans le temps) pour des phénomènes localisés, tels que les fontis.

Une fois cette phase de confrontation/validation réalisée à l'échelle d'un bassin minier, la dernière phase de la méthodologie portera sur l'étude prospective d'un site en réalisant des simulations prospectives des déplacements attendus en fonction des niveaux de nappes.

## 4 SIMULATIONS PREDICTIVES DES EFFETS DU BATTEMENT DE NAPPE

### 4.1 Modèle numérique 3D

Le modèle numérique doit permettre de reproduire les différents contextes géologiques potentiels au toit des vides miniers tant par les différents types de roches (Figure 4 a) et de sols que par la présence de

fracturation et de failles (Figure 4 b). Pour ces raisons l'outil numérique retenu est 3DEC permettant de prendre en compte ces différents aspects pour la description des phénomènes mécaniques (Itasca 2020).

Les modèles mis en œuvre permettent de considérer l'ensemble des tenseurs de contraintes *in situ* 3D potentiels quel que soit le contexte de bassin minier étudié (extension, compression, décrochement). Cela permet en fonction de la géométrie des couches géologiques et des discontinuités de pouvoir tester les sensibilités de la réponse mécanique par rapport aux orientations et valeurs du tenseur de contraintes *in situ*.

Les effets de l'eau dans le modèle sont pris en compte de la façon suivante :

- Contrôle de la hauteur de nappe ;
- En dessous de cette hauteur de nappe, une répartition hydrostatique des pressions interstitielles en fonction de la profondeur est considérée. Ces pressions interstitielles sont prises en compte dans la réponse mécanique par la résolution en contrainte effective de l'équation d'équilibre. De plus, cette pression hydrostatique est également appliquée sur les parois de la mine, en fonction de son niveau d'envoyage et des battements de nappe au-dessus de la mine ;
- Les roches et sols ont une densité humide (fonction de leur porosité respective) en dessous de la hauteur de nappe, et une densité sèche au-dessus.

Afin de reproduire fidèlement l'environnement mécanique minier les calculs sont réalisés en suivant les étapes suivantes :

- Mise en place de l'état mécanique *in situ* du milieu en appliquant le tenseur mécanique 3D sur les côtés du modèle (le haut du modèle est libre, le bas en déplacement bloqué suivant z) et réalisation de l'équilibre mécanique ;
- Excavation de la cavité minière et calcul de nouvel état d'équilibre mécanique ;
- Remise à zéro des déplacements, la perturbation des contraintes par l'excavation de la cavité minière est maintenue ;
- Mise en place de la nappe au niveau du radier de la mine ;
- Application des niveaux de nappes considérés pour l'envoyage et le battement de la nappe ; pour chacun des niveaux un nouvel état d'équilibre mécanique est calculé considérant les effets de l'eau mentionnés ci-dessus.

## 4.2 Résultats des calculs préliminaires

Du fait de l'état d'avancement du projet RFCS Sirima, à l'écriture de ce papier, seuls les résultats des premiers calculs « génériques » permettant de valider le modèle numérique pour des géométries simples sont présentés.

Pour le modèle géologique et géométrique de référence les caractéristiques suivantes sont considérées :

- La cavité minière est un parallélépipède de  $L \times l \times h = 50 \text{m} \times 50 \text{m} \times 5 \text{m}$  (Figure 5). Le radier est à -20m de profondeur ;
- 5 couches lithologiques sont considérées (avec un pendage de  $2^\circ$  vers l'Est ou direction x du modèle), du plus profond jusqu'à la surface (Figure 4 a) : une roche

générique « rock » en sous-bassement de la cavité, l'horizon exploité « coal » de 5 m d'épaisseur, le toit de la mine représenté par deux bancs calcaires « carbonate1 » et « carbonate2 » (d'une épaisseur totale de 10m), et le régolithe « soil » jusqu'à la surface.

Pour ce modèle de référence aucune discontinuité n'est prise en compte (les joints lithologiques ne sont pas des discontinuités mécaniques) et en première approche des simulations élastiques sont réalisées (les propriétés physiques et élastiques sont détaillées Tableau 1). Un état de contrainte lithostatique est considéré ( $\sigma_v(z) = \rho_{\text{rock}} * g * z$  ;  $\sigma_H = a * \sigma_v$ ;  $\sigma_h = b * \sigma_v$ ).

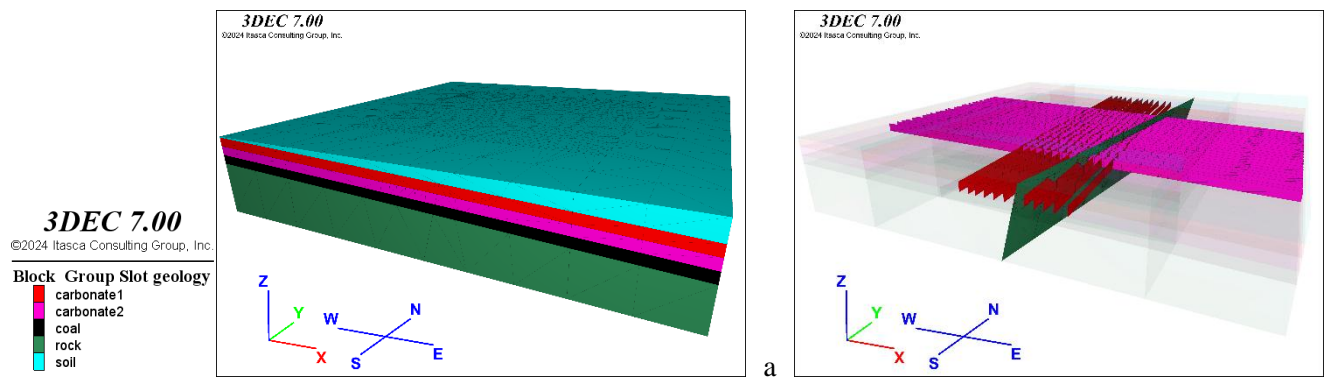


Figure 4. Exemple de modèle numérique intégrant : a/ différentes lithologies au-dessus de l'horizon exploité ("coal") et b/ un réseau de discontinuités (faille, fracturation).

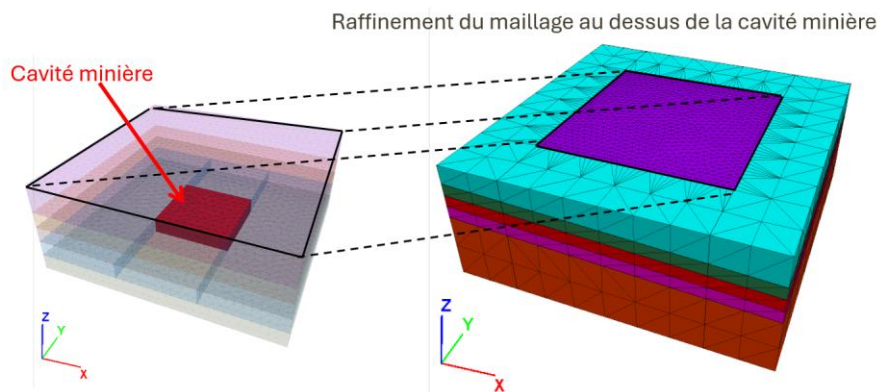


Figure 5. Géométrie du modèle et position de la cavité minière.

Tableau 1. Propriétés physiques et élastiques du modèle de référence

Lithologie	Densité sèche ( $\text{kg/m}^3$ )	Porosité	Module d'Young (GPa)	Coefficient de Poisson
Soil	1500	0.4	6.66	0.25
Carbonate1	2600	0.2	20	0.28
Carbonate2	2600	0.2	20	0.28
Coal	2500	0.1	30	0.3
Rock	2600	0.1	40	0.3

Pour les simulations présentées ici, un ennoyage de la mine puis 3 étapes de montée de la nappe jusqu'à la surface sont pris en compte. Par la suite, pour les simulations d'étude de site, des relevés piézométriques réels seront considérés.

L'excavation de la cavité entraîne un affaissement (Figure 6) maximal de l'ordre de 2mm au toit de la mine. Comme mentionné précédemment avant la prise en compte de l'eau ces déplacements sont remis à zéro et seule la perturbation de l'état de contraintes induit par l'excavation est maintenue (Figure 7).

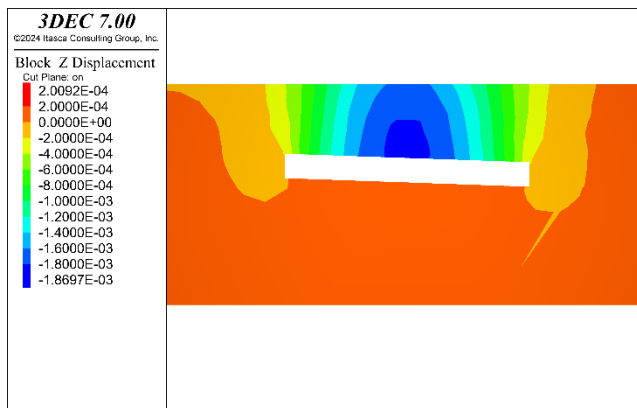


Figure 6. Déplacement suivant z induit par l'excavation de la mine (vue en coupe suivant le plan 0x).

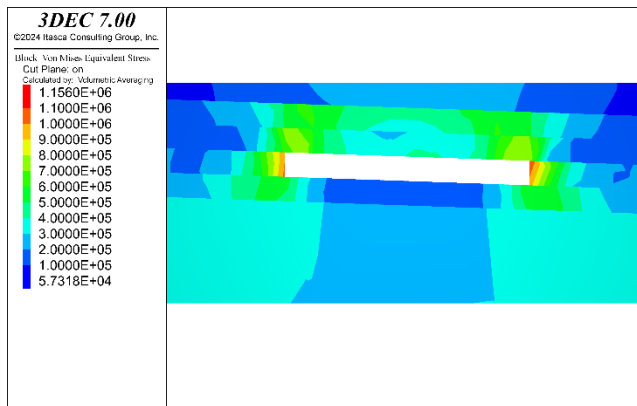


Figure 7 Contrainte de VonMises autour de la cavité à l'issue de l'excavation de la mine (vue en coupe suivant le plan 0x).

L'ennoyage puis la hausse de la nappe conduit à un soulèvement progressif des terrains au droit des vides miniers. Pour le niveau de nappe en surface les déplacements maximaux suivant z restent inframillimétriques (Figure 8 et Figure 9).

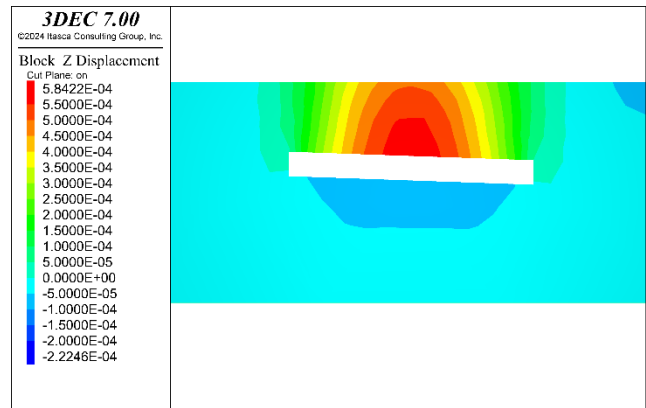


Figure 8. Déplacement suivant z pour le niveau de nappe en surface (vue en coupe suivant 0x).

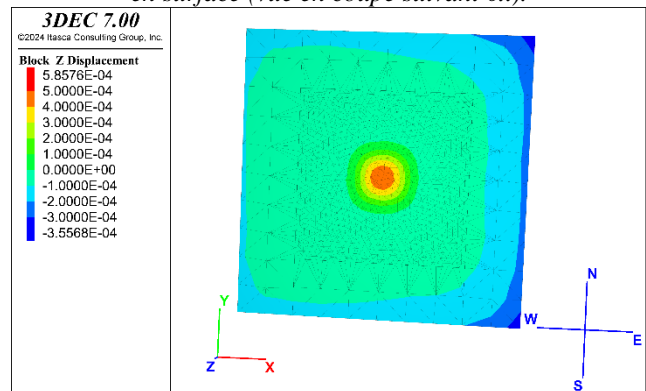


Figure 9. Déplacement suivant z pour le niveau de nappe en surface (vue de dessus).

Afin de simuler une première approche de configuration instable vis-à-vis de la survenue d'un fontis, un second modèle prend en compte un affaiblissement des compétences mécaniques des calcaires au toit de la cavité en divisant leur module d'Young par trois par rapport au modèle de référence. Pour le niveau de nappe en surface, le soulèvement (déplacement suivant z) observé en surface est de l'ordre du millimètre (Figure 10 et Figure 11).

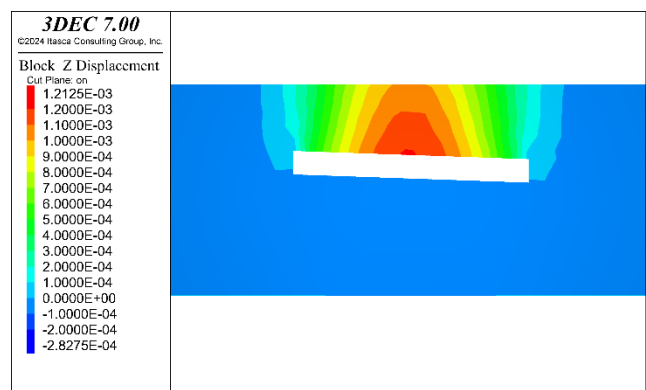


Figure 10. Déplacement suivant z pour le niveau de nappe en surface (vue en coupe suivant 0x).

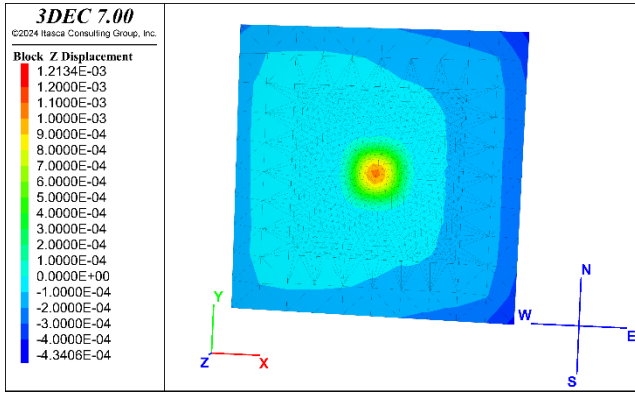


Figure 11. Déplacement suivant z pour le niveau de nappe en surface (vue de dessus).

Par rapport au modèle de référence, des modèles intégrant une discontinuité recoupant les différentes lithologies à l'exception du sol ont été mis en œuvre. Deux cas sont illustrés ici (Figure 12 a et b),

différents seulement dans les caractéristiques de la discontinuité considérées (pendage, direction de pendage position par rapport à la cavité). Pour ces deux modèles (Frac1 et Frac2), le soulèvement maximal pour une montée de la nappe jusqu'à la surface topographique est de l'ordre de 1.3 mm (Figure 13 a et b), du même ordre de grandeur que pour le modèle avec les propriétés mécanique dégradées (Figure 10). L'orientation de la discontinuité influe sur le schéma de déplacements dans les différentes lithologies au-dessus de la cavité par exemple en propageant le soulèvement maximal dans la couche de sol (Figure 13 b) pour le modèle Frac2 alors que le soulèvement maximal est au toit de la cavité pour le modèle Frac1 (Figure 13 a).

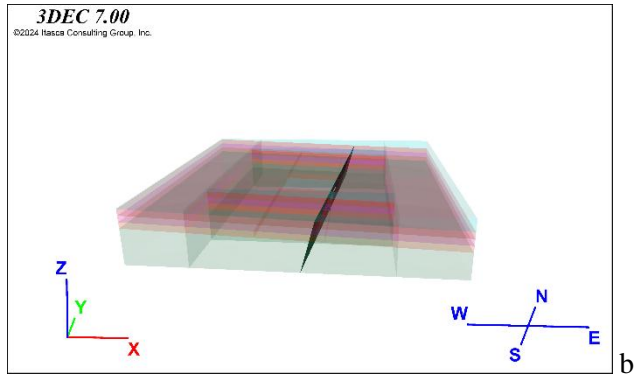
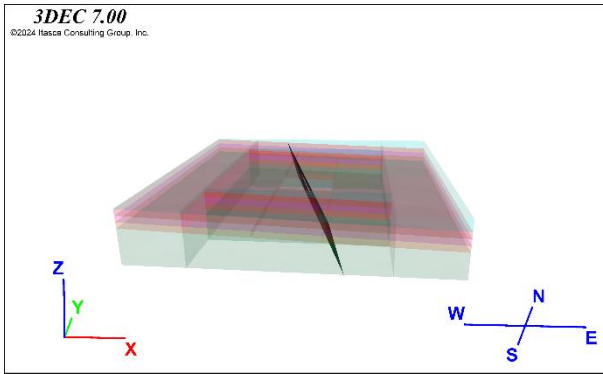


Figure 12. Modèles géométriques intégrant une discontinuité recoupant les lithologies "roches": Modèle Frac1 avec pendage vers l'Est (a) et modèle Frac2 pendage vers l'Ouest (b)

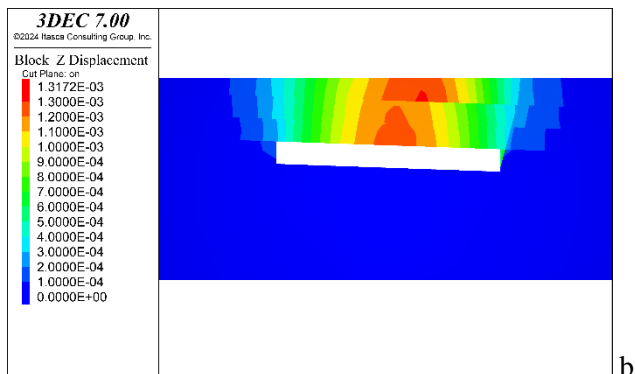
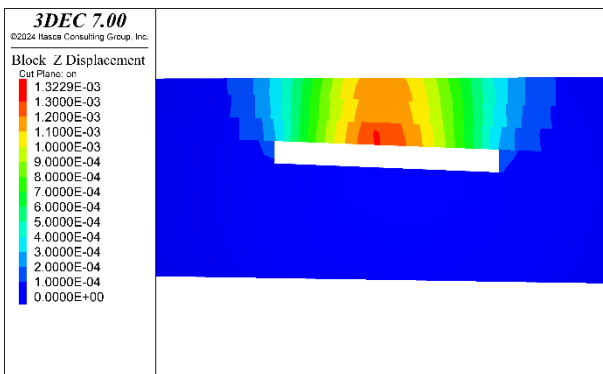


Figure 13. Déplacement suivant z pour le niveau de nappe en surface (vue en coupe suivant Ox) pour le modèle Frac1 (a) et Frac2 (b).

### 4.3 Prochaines étapes

Ces premiers calculs semblent montrer que pour des configurations géologiques "stables" vis à vis des phénomènes d'effondrements et de fontis la réponse mécanique à un ennoyage et une montée de nappe est un soulèvement de l'ordre du millimètre.

Les calculs à venir dans la prochaine phase du projet porteront sur la simulation des cas de terrains "critiques" vis à vis des effondrements et des fontis. Ils porteront sur la simulation des cas de toit de galerie fortement fracturés et l'influence des schémas de fracturation sur la réponse mécanique à la hausse de la nappe.

Des aspects tels que l'influence de la topographie de la surface ainsi que celle des charges localisées (batiments) seront également considérés.

## 5 CONCLUSIONS

Le développement d'une méthodologie d'analyse des anciens sites miniers pour comprendre et prévenir les aléas mécaniques en surface liés à l'ennoyage et aux battements de nappe a été présenté. Cette méthodologie s'appuie sur les connaissances existantes pour la compréhension des phénomènes hydromécaniques dans les réservoirs profonds, les cas d'étude des anciens sites miniers et la compréhension des mécanismes de création des fontis. La méthode d'analyse proposée repose sur l'établissement de schémas de réponse en surface à l'aide de simulations prédictives 3D permettant de reproduire les effets hydromécaniques dus à l'ennoyage et aux battements de nappe, la confrontation à des données *in situ* et aux évolutions des champs de déplacements observées par des méthodes observationnelles spatiotemporelles (INSAR par exemple).

En l'état du projet, la première brique de simulations numériques prédictives a été présentée. Les modèles établis permettent de reproduire les différents aspects des terrains au-dessus de la cavité (lithologie, fracturation). Les premiers résultats montrent la réponse mécanique à un ennoyage puis l'augmentation du niveau de nappe jusqu'à la surface. Pour les modèles considérés l'ennoyage total de la cavité et des terrains géologiques induit un soulèvement contenu (ordre millimétrique) en surface. Ces premiers calculs montrent une première approche de l'impact d'une perte de compétence mécanique des roches au toit de la mine ainsi que l'influence de la prise en compte d'une discontinuité tectonique.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agence de prévention et de surveillance des risques miniers (apsrm) - Institut National de l'Environnement et des Risques industriels (INERIS) - Ministère de l'écologie et du Développement Durable / Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques – SDPRM (2005). Le risque minier – Dossier d'information. *Editeur : Paris : Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD)*. 24 p.
- Al Heib, M., Duval, C., Theoleyre, F., Watelet, J. M., Gombert, P. (2015). Analysis of the historical collapse of an abandoned underground chalk mine in 1961 in Clamart (Paris, France). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 74 : 1001–1018, DOI 10.1007/s10064-014-0677-6.
- Al Heib, M., Conil, N., Gombert, P. (2023). Influence of geology and topography on the occurrence of mine massive collapse: back- analysis of a historical collapse of chalk mine (France). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 82:230, <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03234-z>.
- Caro Cuenca, M., Hooper, A. J., Hanssen, R. F. (2013). Surface deformation induced by water influx in the abandoned coal mines in Limburg, The Netherlands observed by satellite radar interferometry. *Journal of Applied Geophysics* 88. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.10.003>.
- Cui, T., Schoning, G., Gallagher, M., Aghighi, M. A., & Pandey, S. (2025). A coupled hydro- mechanical modeling framework to concurrently simulate coal seam gas induced subsidence and groundwater impacts. *Water Resources Research*, 61, <https://doi.org/10.1029/2024WR039280>.
- Haghshenas Haghghi, M., Motagh, M. (2019). Ground surface response to continuous compaction of aquifer system in Tehran, Iran: Results from a long-term multi-sensor InSAR analysis. *Remote Sensing of Environment*, Volume 221, February 2019, Pages 534-550. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.003>.
- Itasca Consulting Group, Inc. (2020) 3DEC — Three-Dimensional Distinct Element Code, Ver. 7.0. Minneapolis: Itasca.
- Luu, L.-H., Noury, G., Benseghier, Z., Philippe, P. (2019) Hydro-mechanical modeling of sinkhole occurrence processes in covered karst terrains during a flood. *Engineering Geology*, 2019, 260 (105249). <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105249>.
- Waltham, A. C., Fookes, P. G., (2003). Engineering classification of karst ground conditions. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 36, 101–118. Geological Society of London.
- Zhao, J., Konietzky, H, (2020). Numerical analysis and prediction of ground surface movement induced by coal mining and subsequent groundwater flooding. *International Journal of Coal Geology*, Volume 229, 1 September 2020, 103565, <https://doi.org/10.1016/j.coal.2020.103565>