

INFLUENCE DES EXPLOITATIONS DE CHARBON PROFONDES SUR LA STABILITE DE CAVITES SOUTERRAINES

INFLUENCE OF DEEP COAL MINES ON THE STABILITY OF UNDERGROUND CAVITIES

Temenuga GEORGIEVA^{1,2}, Fanny DESCAMPS¹, George AJDANLIJSKY³, Sara VANDYCKE¹, Jean-Pierre TSHIBANGU¹

¹ Université de Mons, Mons, Belgique

² Euridice, Mol, Belgique

³ University of Mining and Geology "St Ivan Rilski", Sofia, Bulgarie

RÉSUMÉ – Les Hauts-de-France et la Wallonie sont concernés par d'anciennes exploitations profondes de houille auxquelles se superposent de nombreuses cavités souterraines à faible profondeur. L'influence des exploitations de charbon sur la stabilité d'une ancienne carrière en chambres et piliers est étudiée par le biais de modélisations aux éléments finis. Les effets à la surface sont également abordés.

ABSTRACT – Hauts-de-France and Wallonia are concerned by deep coal mines, overlaid by numerous underground cavities at shallow depth. The influence of coal mines on the stability of an abandoned room-and-pillar quarry is studied by means of finite element models. The effects on surface are also investigated.

1. Introduction

L'amélioration transfrontalière de la prévention et de la gestion des risques du sous-sol engendrés par les terrains sous-cavés fait l'objet de recherches dans le cadre du projet Interreg FWVI RISSC. En effet, ces régions sont marquées par de nombreuses cavités souterraines, anthropiques ou naturelles, situées à faible profondeur. Parallèlement, ces territoires sont aussi concernés par d'anciennes exploitations de houille allant du bassin du Nord-Pas-de-Calais jusqu'à la région liégeoise, et même au-delà.

Dans la démarche transfrontalière, une analyse systématique a été menée sur les deux versants pour identifier les contextes spécifiques où des cavités souterraines à faible profondeur se superposent à des exploitations profondes. Dans ce travail, nous présentons d'abord les contextes des cavités souterraines et des exploitations de houille dans les Hauts-de-France et en Wallonie. Ensuite, nous étudions un cas particulier dans la région de Mons (Belgique) où la craie phosphatée a été exploitée à faible profondeur et où l'exploitation du charbon a été particulièrement intense. Des modèles numériques intégrant les deux types d'exploitation sont proposés en tenant compte de la séquence d'extraction.

2. Contexte des cavités souterraines et exploitations minières profondes en Hauts-de-France et en Wallonie

2.1. Cavités souterraines à faible profondeur

Un inventaire des cavités souterraines dans les Hauts-de-France et en Wallonie a été réalisé (Lefebvre 2019, Pacyna 2019). Vu leur contexte géologique comparable, des similitudes existent entre les deux régions en termes de typologie des cavités souterraines (Figure 1). Ainsi, on y retrouve des exploitations souterraines de craie ou de sable, des cavités karstiques - certes moins nombreuses en Hauts-de-France qu'en Wallonie - et des mines de fer notamment. Cependant, certaines disparités ont été mises en évidence, avec des types de cavités qui influencent de manière plus prégnante certaines zones des Hauts-

de-France. C'est le cas des sapes de guerre, des souterrains refuges ou d'habitats troglodytiques par exemple. A l'inverse, en Wallonie, existent de vastes carrières souterraines de craie phosphatée alors qu'en Hauts-de-France, ce type d'exploitation est d'emprise réduite ou plutôt à ciel ouvert.

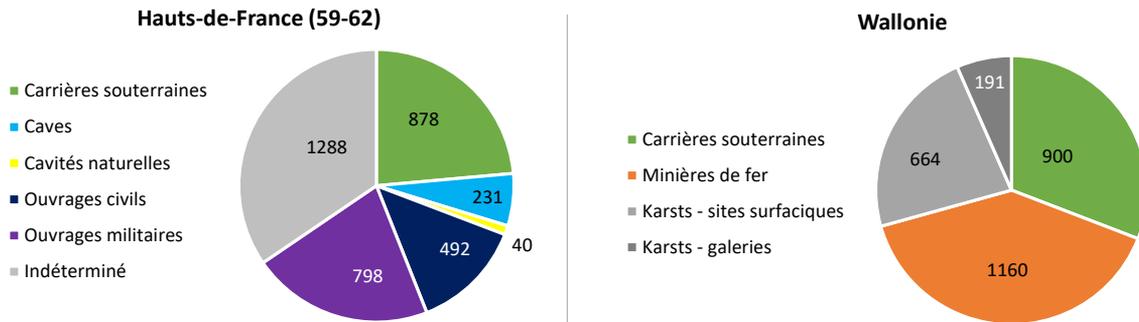


Figure 1. Inventaire des cavités souterraines dans le Nord (59), le Pas-de-Calais (62) et en Wallonie d'après les données et la nomenclature de Géorisques (<https://www.georisques.gouv.fr/>) et du géoportail de la Wallonie WalOnMap (<https://geoportail.wallonie.be/walonmap>).

2.2. Panorama des bassins houillers du Nord-Pas-de-Calais et de Wallonie

Les Hauts-de-France et la Wallonie présentent une histoire industrielle similaire, en étroite relation avec le développement des exploitations de houille.

Sur le plan géologique, les gisements s'étendent depuis le bassin du Nord-Pas-de-Calais (NPC) jusqu'à la région liégeoise, et même au-delà. Ils se caractérisent par des couches nombreuses et peu puissantes : de 0.5 à 1m en Wallonie, de 0.8 à 2.9 m en Hauts-de-France. Les veines sont séparées par des intercalaires stériles schisto-gréseux plus ou moins épais. En Wallonie, le nombre de veines reconnues passe de 120, à l'ouest de Mons, à zéro, un peu à l'ouest d'Andenne.. Dans les Hauts-de-France, plusieurs dizaines de veines ont été exploitées dans le NPC. Le gisement est en plateure à l'ouest et au centre du bassin, puis se redresse vers l'est jusqu'à 40-50°.

La présence de grisou est une autre caractéristique commune de ces gisements. De plus, en raison d'une géologie complexe (plissements, charriages, failles), les travaux miniers, qui suivent les veines de charbon, ont des géométries très variables.

Historiquement, l'exploitation du charbon a commencé en Wallonie dès le 10ème siècle et n'a démarré en Hauts-de-France qu'au 18ème siècle. Les exploitations ont évolué jusqu'à plus de 1000m de profondeur. La longue taille a été la méthode la plus répandue pour exploiter des gisements de houille en plateure en Wallonie et dans les Hauts-de-France.

La production cumulée de houille est comparable dans les deux régions, de l'ordre de 2 milliards de tonnes. De nos jours, des archives documentaires sont conservées au Service Public de Wallonie et par le Département Prévention et Sécurité Minière (DPSM) en France.

3. Etude de cas dans la région de Mons (Belgique)

3.1. Présentation du site

Entre 1877 et 1925, la craie phosphatée a été exploitée au Sud-Ouest de Mons pour la production d'engrais. Les carrières souterraines de la Malogne constituent un ensemble d'exploitations contiguës par chambres et piliers sur une superficie globale de 67 ha. L'exploitation y a été principalement menée sur un niveau, à une profondeur de 13 à 25m. Les chambres mesurent 4 à 5m de large pour 5 à 9m de hauteur. Elles sont séparées par des piliers de 3.5 à 4.5m de largeur. Aujourd'hui, la partie septentrionale est complètement noyée. Le site sert de zone test dans le cadre du projet RISSC. Ainsi, un secteur de 25ha a été étudié en détails (Georgieva et al. 2020a). De nombreuses données y ont été

collectées : cartographie, caractérisation du massif rocheux (levés structuraux, RMR, GSI), essais en laboratoire sur la craie phosphatée et les épontes.

La région est également connue pour ses exploitations de houille, particulièrement intensives (bassin du Borinage). Au droit de la Malogne, la concession des Produits et Levant du Flénu a exploité, entre 1860 et 1963, jusqu'à 24 veines de charbon, à des profondeurs allant de 200 à 840m environ. Les coupes verticales et les plans miniers archivés permettent de reconstituer précisément les anciens travaux miniers.

Chronologiquement, on peut donc distinguer 4 périodes : (1) l'exploitation du charbon uniquement (1860-1877), (2) l'exploitation simultanée du charbon et de la craie phosphatée (1877-1925), (3) l'exploitation du charbon (1925-1963) et (4) l'abandon des exploitations.

3.2. Cadre géologique

La craie phosphatée s'intègre dans le contexte géologique du Bassin de Mons. Généralement reconnu comme une extension du Bassin de Paris, il forme une accumulation de sédiments, principalement crétacés, dans une zone de subsidence suivant une élongation Est-Ouest (Vandycke et al. 1991). La craie phosphatée est une calcarénite qui se retrouve au sommet du groupe des craies, sur le flanc sud du bassin, sous forme de lentille avec un pendage vers le Nord. Sous la craie phosphatée se trouve la craie blanche de la Formation de Spiennes tandis qu'au toit, un hardground de 60 cm d'épaisseur moyenne marque la transition avec le Tuffeau de Cipluy (Vandycke 1987, Robaszynski et al. 2001 ; Figure 2).

Sur le plan structural, le bassin a été soumis à une tectonique en extension selon des directions NW-SE et NE-SW à la fin du Crétacé et de direction N-S et E-W au Tertiaire. Ainsi, le site présente une allure en horsts et grabbens.

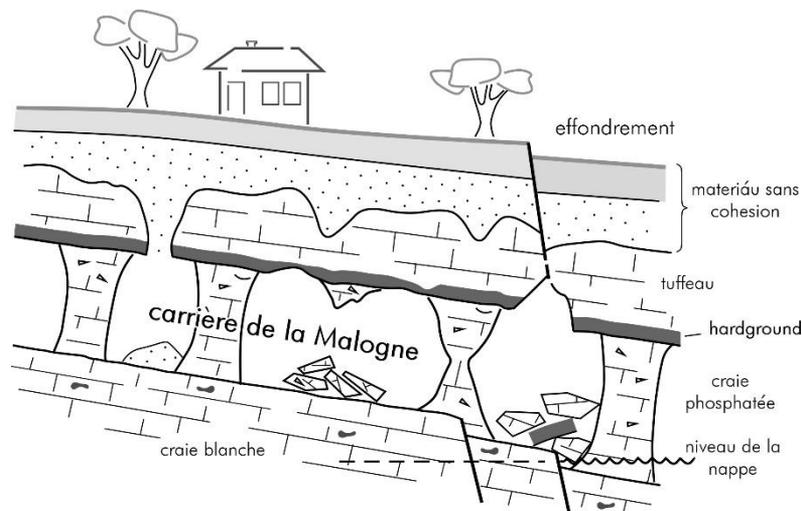


Figure 2. Coupe type N-S de la Malogne avec les principales lithologies.

Au droit du site de la Malogne, sous la couverture méso-cénozoïque, les formations paléozoïques sont essentiellement constituées des terrains houillers, à l'allure complexe. Les couches sont monoclinales au Nord de la zone étudiée et se redressent vers le Sud. Il s'agit principalement d'alternances de grès, de siltites et de schistes et de minces couches de charbon non exploitées.

3.3. Méthodologie

Des modèles 2D déformations planes aux éléments finis ont été construits qui conviennent aux géométries de grande échelle en intégrant à la fois les carrières souterraines de craie et les exploitations profondes de charbon sous-jacentes avec les conditions aux limites représentatives. L'objectif est d'étudier les interactions entre les cavités profondes et moins

profondes et d'évaluer leurs effets en surface. La méthodologie comprend 3 étapes : (1) la construction d'un modèle géométrique (topographie initiale et actuelle, carrières de craie et exploitations de charbon), (2) la modélisation des limites lithologiques et la connaissance du comportement géomécanique des formations et (3) l'analyse FEM à proprement parler, en tenant compte de la séquence d'extraction.

Pour construire un modèle géométrique représentatif, un grand nombre de données ont été collectées à partir de documents à différentes échelles et de levés sur site. La surface topographique initiale est construite à partir de la carte du dépôt de la guerre, établie entre 1865 et 1880. Ce premier levé topographique disponible sur la zone d'étude coïncide avec le début de l'exploitation du charbon. Par ailleurs, la topographie actuelle est fournie par le modèle numérique de terrain réalisé en 2013-2014 à partir de mesures LIDAR (données SPW).

Pour ce qui concerne l'exploitation de craie phosphatée, la cartographie des chambres et piliers a été réalisée par le SPW (Direction de la Géotechnique). Elle a été complétée par des mesures systématiques des hauteurs de chambres (Pacyna et Manceau 2018).

La géométrie des exploitations de charbon est principalement reconstituée à partir des plans miniers au 1:1000. Dans les exploitations par longue taille, l'angle d'influence détermine l'extension du modèle pour évaluer les effets en surface (Brady et Brown 2005). Sur base de travaux menés sur les charbonnages belges et français (Al Heib et al. 2005, Vervoort et Declercq 2017), une valeur de 30° a été retenue. Comme les exploitations les plus profondes sont situées à -800m, nous avons donc considéré l'ensemble des travaux miniers situés dans un rayon de 500m tout autour des carrières souterraines (Figure 3), ce qui correspond à 19 veines.

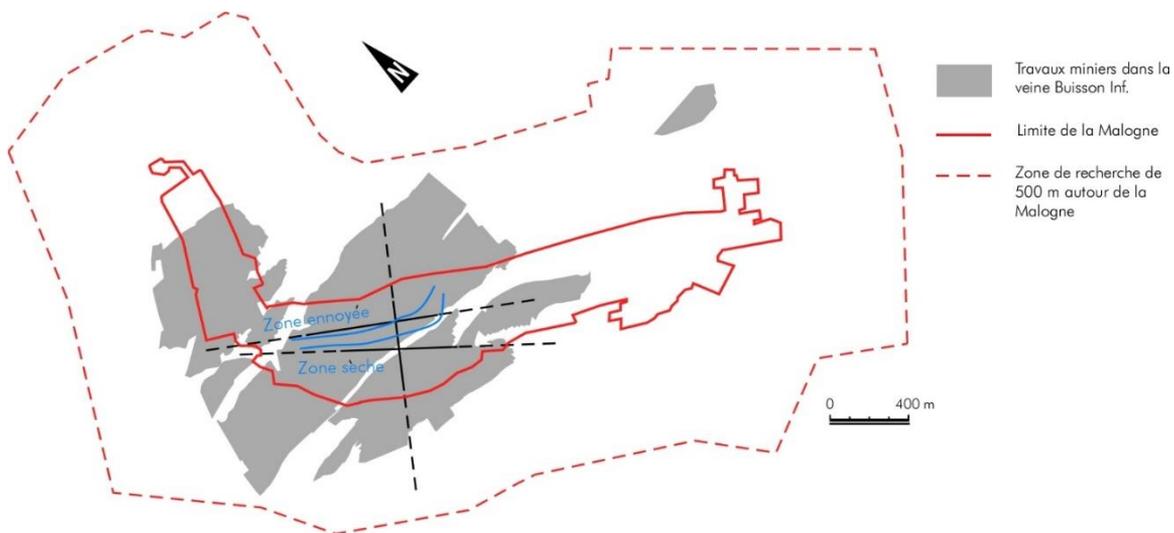


Figure 3. Exemple de numérisation des travaux miniers dans une veine. Les limites de la Malogne, de la zone de recherches des travaux miniers et les 3 sections verticales pour les modélisations FEM sont aussi représentées.

Les limites des zones exploitées ont été digitalisées et les épaisseurs des veines de charbon ont été cartographiées. La base de données 3D obtenue a permis de construire les solides géologiques des différentes veines.

Un autre aspect concerne la construction de coupes verticales représentatives pour les simulations FEM (Figure 4). Trois profils-types ont été définis compte tenu des conditions hydrogéologiques dans la carrière de craie (délimitées par les traits bleus à la Figure 3).

Sur le plan géologique, les ensembles lithologiques ont été définis en fonction de leur comportement géomécanique. Ainsi, on distingue depuis la surface : les terrains meubles, le Tuffeau de Cipluy, le hardground, la craie phosphatée, la craie blanche, les grès et schistes houillers et le charbon. Les limites des formations ont été modélisées à partir des données géologiques (sondages et cartes).

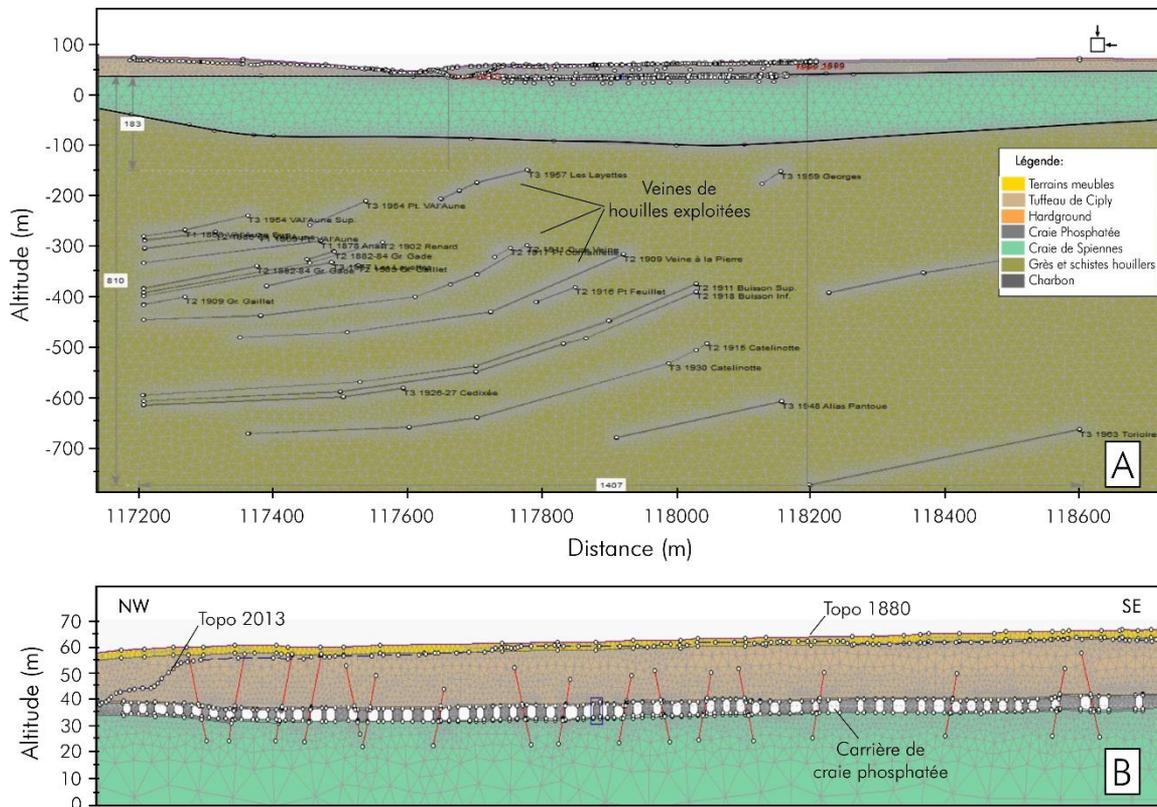


Figure 4. Aperçu de la géométrie du modèle pour le profil-type en zone sèche. A. Vue globale des exploitations en chambres et piliers peu profondes et des veines de charbon situées dans la zone d'influence. B. Détail dans l'exploitation de craie phosphatée avec simulation des discontinuités.

Les propriétés géomécaniques sont tirées d'essais de laboratoire et in-situ pour les formations crétacées et de la littérature pour les terrains meubles et le houiller (Tableau 1). On suppose un comportement isotrope élastique parfaitement plastique avec un critère de Mohr-Coulomb avec seuil de traction. Ce type de modèle peut raisonnablement prédire les déformations des couches induites par l'exploitation des veines de charbon (Ghabraie et al 2017). Grâce aux données structurales collectées (Vandycke, 1987), des discontinuités sont également intégrées au modèle ; elles concernent surtout la craie phosphatée et les formations supérieures (Figure 4B).

L'état de contraintes initial est gravitationnel. Elle est calculée à partir de la surface topographique initiale. Les conditions aux limites restreignent les déplacements verticaux et horizontaux à la base du modèle tandis que seuls les déplacements horizontaux sont bloqués sur les bords latéraux. Un maillage graduel est utilisé, plus dense autour des excavations.

Finalement, l'analyse FEM 2D est menée à l'aide de RS2 (Rocscience 2015) en tenant compte de la séquence d'extraction du charbon et de la craie phosphatée évoquée précédemment. Pour chaque veine de charbon, la séquence d'extraction, année après année, a été récupérée dans les plans miniers et implémentée dans le modèle. Pour essayer de tenir compte des spécificités de la longue taille, l'exploitation de chaque veine est simulée en deux étapes distinctes : d'abord, l'extraction du charbon (création d'un vide) et ensuite son remplacement par un matériau représentant l'arrière-taille recompressée. Il s'agit là d'une première approche qui ne tient pas compte du volume réellement foudroyé. La séquence d'extraction dans la craie phosphatée est beaucoup plus incertaine. Elle est conceptualisée en trois phases.

Tableau 1. Propriétés géomécaniques des matériaux implémentées dans le modèle.

E, module d'Young. ν , coefficient de Poisson. R_t , résistance en traction.
C, cohésion. φ , angle de frottement interne.

Matériau	E (MPa)	ν	R_t (MPa)	C (MPa)	φ (°)	Références
Terrains meubles	20	0.33	0	0	30	Georgieva et al. 2020 a, b
Tuffeau de Cibly	160	0.2	0.01	0.1	30.4	
Hardground	16600	0.11	0.7	5.4	30.4	
Craie phosphatée	1140	0.23	0.06	0.4	30.4	
Craie blanche	1400	0.25	0.07	0.54	30.4	
Grès et schistes houillers (propriétés homogénéisées)	17 000	0.15	4.8	5.2	41	Lagneau et Willame 1992 + Calibration du modèle
Charbon	3 000	0.3	1.5	1.9	48	
Arrière-taille compactée	7 750	0.1	1.5	1.7	21	

Une calibration du modèle est réalisée par itérations en adaptant les propriétés des formations paléozoïques jusqu'à ce que la topographie prédite par les simulations soit cohérente avec les levés actuels. Les propriétés renseignées dans le Tableau 1 correspondent aux valeurs finales retenues.

3.4. Résultats

Dans ce travail, nous présentons uniquement les résultats pour le profil en zone sèche. Après plusieurs simulations pour garantir que les conditions aux limites n'influencent pas les résultats, l'extension finale du modèle, tant en largeur qu'en profondeur, est de 3960m de large et 1170m de haut.

L'extraction du charbon avant l'exploitation de la craie phosphatée (T1) a d'abord été simulée. Cette phase induit des contraintes plus grandes dans les terrains houillers mais ne perturbe pas les terrains crétacés. Les plus grandes variations de contraintes verticales apparaissent à la limite entre le houiller et les craies, ainsi qu'entre les craies et les matériaux meubles. Ceci est vraisemblablement lié au contraste de propriétés mécaniques entre ces lithologies. A ce stade, les effets en surface sont très limités.

Lors de l'exploitation simultanée de la craie et du charbon (T2), les contraintes augmentent dans les intercalaires stériles, avec la formation de zones plastiques (Figure 5a). La propagation de la rupture se fait par étapes, en fonction des contraintes induites par l'exploitation et des déformations associées. Après la création d'un vide suffisant, la rupture s'initie au toit des veines de charbon et se propage graduellement vers le haut ou à travers les interbanco jusqu'aux veines exploitées les plus proches. Cela traduit le processus de foudroyage en arrière-taille. Après un certain degré d'exploitation au cours de T2, les effets du foudroyage atteignent l'exploitation de craie, montrant l'influence de l'exploitation du charbon sur les cavités moins profondes. Avec la progression de l'exploitation, la redistribution des contraintes et les déplacements induits affectent aussi des répercussions jusqu'en surface. A la fin du processus d'excavation, un déplacement vertical maximal de 5.9m est estimé en surface (Figure 5b). Le profil de subsidence a une allure asymétrique et la subsidence maximale est observée là où l'épaisseur cumulée de charbon exploité est plus importante. La Figure 5c compare les déplacements verticaux prédits par les simulations à la topographie actuelle. Dans la zone étudiée, l'écart entre les 2 profils varie de 0 à 60cm. Cela confirme la bonne corrélation entre les simulations et la topographie réelle et valide donc la calibration proposée.

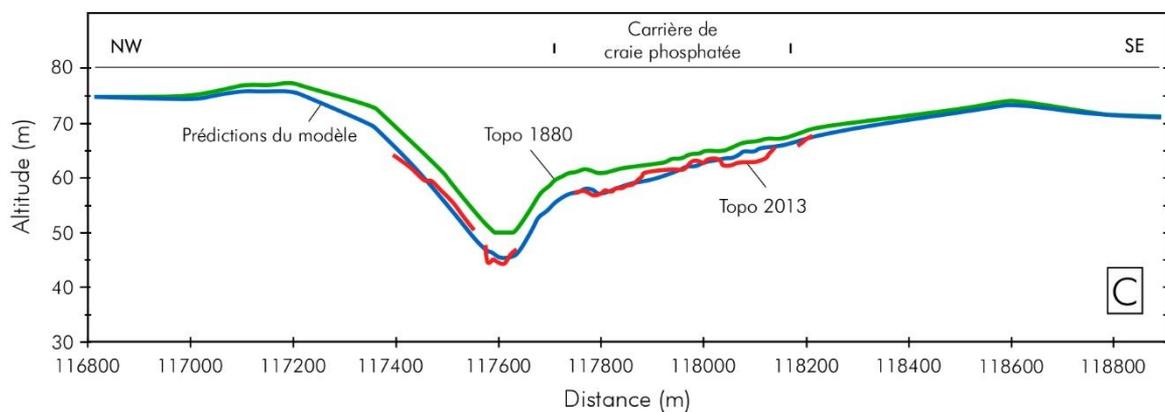
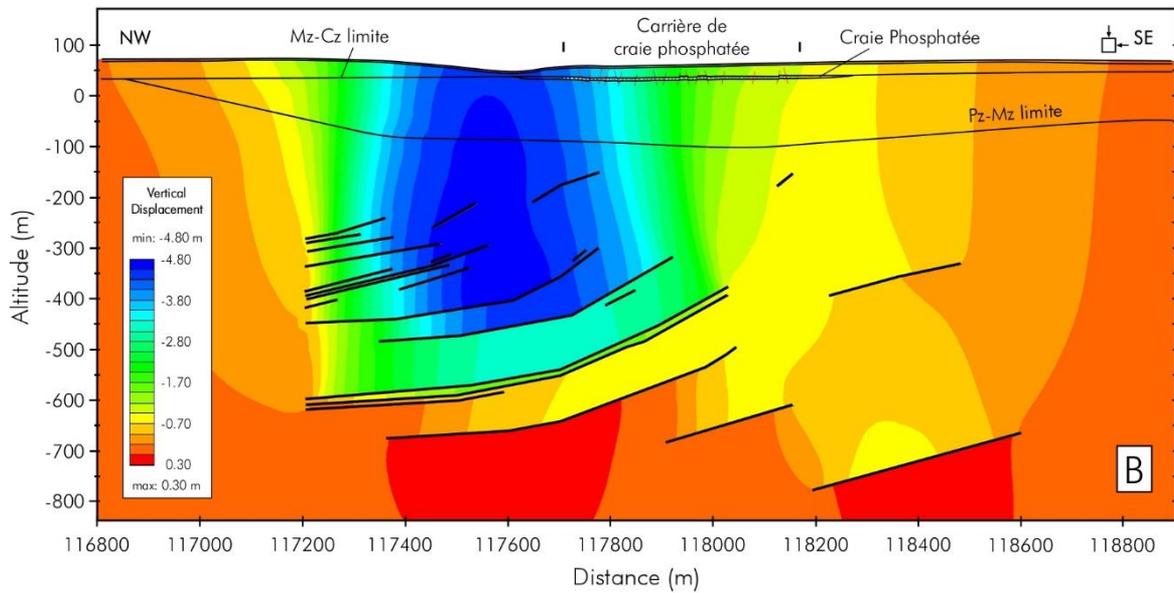
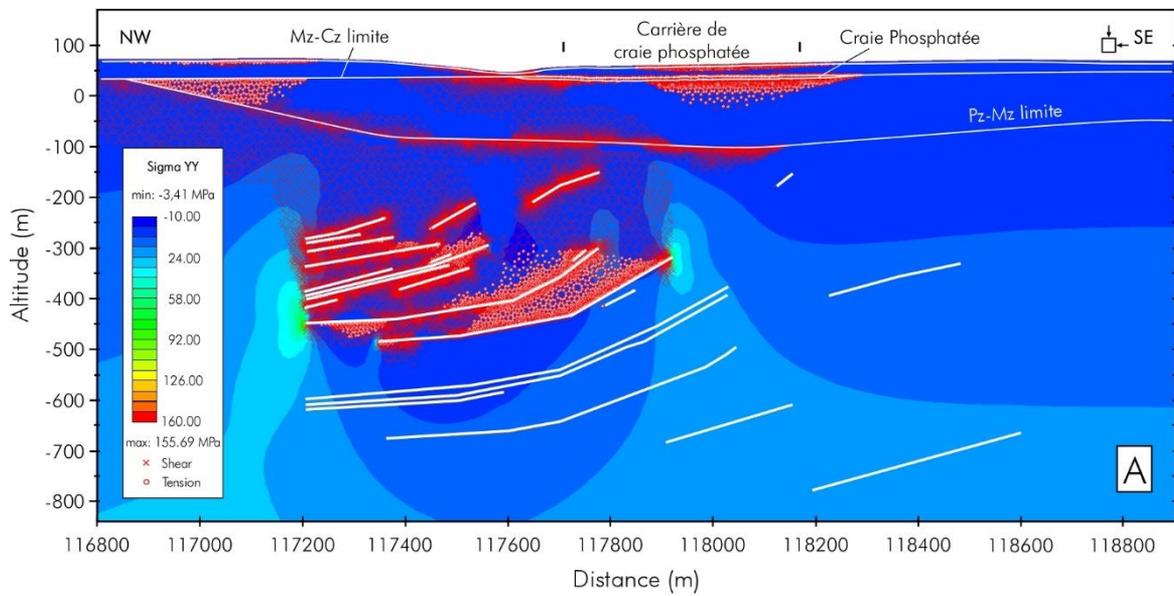


Figure 5. Résultats de analyses FEM. A. Distribution des contraintes verticales au cours de la période T2, avec développement de zones plastiques. B. Distribution des déplacements verticaux à la fin de l'exploitation. C. Comparaison des profils topographiques simulé et actuel.

4. Conclusions

Les exploitations de charbon en Hauts-de-France et en Wallonie ont eu des effets importants en surface. L'étude de cas menée dans ce travail en témoigne encore. Mais ces exploitations peuvent avoir influencé des cavités souterraines moins profondes, comme c'est le cas sur le site de la Malogne. Une méthodologie a été proposée pour modéliser de telles configurations à l'aide des éléments finis. Les résultats de simulation indiquent qu'un certain niveau d'extraction du charbon peut générer des instabilités au niveau des cavités peu profondes. Cela peut déclencher des instabilités, qui se propagent également en surface.

5. Remerciements

Cette recherche a été réalisée avec le soutien de la Wallonie et du FEDER dans le cadre du projet Interreg FWVI «RISSC». Les auteurs remercient l'équipe de l'ISSeP pour le support technique et la numérisation des cartes minières, Charbonnages du Borinage pour l'aide avec les données d'archives, et l'ASBL Projet Malogne pour leur soutien pendant les travaux sur le terrain.

6. Références bibliographiques

- Al Heib M., Nicolas M., Noiret J.F., Wojtkowiak F. (2005). Residual subsidence analysis after the end of coalmine work. Example from Lorraine colliery, France. Proc. Symp. Post Mining, Nancy, FR, pp. 1-9.
- Brady B.H.G., Brown E.T. (2005). Rock mechanics for underground mining, 3ème édition, Kluwer Academic Publishers.
- Ghabraie B., Ren G., Smith J. (2017). Characterising the multi-seam subsidence due to varying mining configuration, insights from physical modelling. Int. J Rock Mech. Min. Scien., vol. 93, pp. 269-279.
- Georgieva T., Descamps F., Vandycke S., Ajdanlijsky G., Tshibangu J.P. (2020a). Caractérisation géomecanique d'une carrière souterraine abandonnée par des mesures in-situ. Proc. JNGG 2020, 02-03 Nov. 2020, Lyon, FR.
- Georgieva T., Descamps F., Gonze N., Vandycke S., Ajdanlijsky G., Tshibangu J.P. (2020b). Stability assessment of a shallow abandoned chalk mine of Malogne (Belgium). Europ. J. Environ and Civil Eng., doi.org/10.1080/19648189.2020.1762752.
- Lagneau O., Willame C. (1992). Considérations sur les possibilités de production de gaz méthane à partir des veines de charbon à l'aide de forages profonds forés depuis la surface. Travail de fin d'études, Faculté Polytechnique de Mons, 102 pp.
- Lefebvre C. (2019). Les types de cavités en Hauts-de-France. Colloque RISSC, Lille, FR.
- Pacyna D., Manceau P. (2018). Cartographie de la hauteur des chambres à la Malogne.
- Pacyna D. (2019). Les types de cavités en Wallonie. Colloque RISSC, Lille, FR.
- Robaszynski F., Gale A., Juignet P., Amédéo F., Hardenbol J. (2001). Sequence stratigraphy in the upper Cretaceous series of the Anglo-Paris basin: exemplified by the Cenomanian stage. SEPM, Spec. Public., vol. 60, pp. 363-386.
- Rocscience (2015). RS2-Phase 2 Version 9.010 64 bit. RocScience Inc., Toronto, ON, Canada. www.RocScience.com.
- Vandycke S. (1987). Tectonique et sédimentation à la limite Crétacé-Tertiaire dans le Bassin de Mons. Etudes Souterraines des Phosphatières de la Malogne. Mém. de licence en Sc. géol. et minér., ULB, 75 pp.
- Vandycke S., Bergerat F., Dupuis C. (1991). Meso-Cenozoic faulting and inferred paleostresses in the Mons Basin. Tectonophysics, 192, pp. 261-271.
- Vervoort A., Declercq P.Y. (2017). Surface movement above old coal longwalls after mine closure. Int. J. Min. Sci. Technol., vol. 27, pp. 481-490.