

Stabilité de la surface après l'exploitation totale du charbon et l'arrêt des pompages d'exhaure minière

Marie Degas, Francis Wojtkowiak, M. Metz, M. Branchet

▶ **To cite this version:**

Marie Degas, Francis Wojtkowiak, M. Metz, M. Branchet. Stabilité de la surface après l'exploitation totale du charbon et l'arrêt des pompages d'exhaure minière. Colloque International Après-mine 2003, Feb 2003, Nancy, France. pp.NC. ineris-00972409

HAL Id: ineris-00972409

https://ineris.hal.science/ineris-00972409

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.

STABILITE DE LA SURFACE APRES L'EXPLOITATION TOTALE DU CHARBON ET L'ARRET DES POMPAGES D'EXHAURE MINIERE

DEGAS Marie[1], WOJTKOWIAK Francis[2], METZ Michel[3], BRANCHET Michel[3]

[1] INERIS Direction des Risques du Sol et du Sous-sol, Parc technologique ALATA - BP n°2 - F 60550 Verneuil-en-Halatte, France, marie.degas@ineris.fr.

[2] INERIS - Laboratoire Environnement Géomécanique et Ouvrages, Ecole des Mines de Nancy, Parc de Saurupt – F 54042 NANCY Cedex, francis.wojtkowiak@mines.inpl-nancy.fr

[3] Houillères du Bassin de Lorraine, UGEPI, 2 rue de Metz – F 57802 Freyming-Merlebach Cedex, France, michel.metz@hbl.fr

RESUME : L'expérience acquise en France et dans les charbonnages d'Europe occidentale depuis plus de 50 ans montre que l'essentiel de l'affaissement prévu (90% de l'amplitude) se produit pendant l'exploitation totale du panneau. Le reliquat de l'affaissement est généralement réalisé dans les deux années qui suivent l'arrêt définitif de l'exploitation. Au-delà de cette période, les mouvements ne sont plus très significatifs car ils sont pratiquement de même amplitude que des mouvements naturels du sol, et restent de plus dans la limite des tolérances d'un nivellement de haute résolution. La remontée des eaux après l'arrêt de l'exhaure minière peut générer un soulèvement des terrains qui est fonction de la profondeur de l'exploitation, de la puissance des couches exploitées, de l'extension des travaux et de la hauteur de remontée du niveau piézométrique de la nappe d'eau souterraine. Les études de Bekendam et Pöttgens (1985, 2000) et de Fenk (1997) concernant respectivement des sites miniers aux Pays-Bas et en Allemagne ont mis en évidence ce phénomène. Les observations faites en Lorraine dans le secteur de Faulquemont, où la remontée des eaux est stabilisée, donnent des résultats similaires (Degas, 2001) (Wojtkowiak, 2001). Aucune conséquence sur le bâti et les infrastructures des régions soumises à ce phénomène n'a été constatée jusqu'à présent.

MOTS-CLEFS : Affaissement, exploitation souterraine, Faulquemont, après-mine, ennoyage.

ABSTRACT : Coal mines experience in France and in Western Europe for more than 50 years has shown that the most subsidence (90%) occurs during the extraction of panels. The susbsidence is almost stabilised within 2 years by the end of the extraction. Beyond this period, the movements are no longer significant because they can't be distinguished from the natural ground movements, and can't be measured though leveling, even of high precision. The increase of water level when pumping is stopped can induce a centimetric rise of ground level, function of works depth, thickness of extracted seam (layer) and increase of the underground water level. The studies of Bekendam and Pöttgens (1985, 2000) and of Fenk (1997) concerning respectively minings in the Netherlands and in Germany highlighted this phenomenon. The observations made in Lorraine in the sector of Faulquemont, where the works flooding has been stabilised, give similar results (Degas, 2001) (Wojtkowiak, 2001). No consequence on buildings and surface infrastructures due to this phenomenon has been noticed.

KEY-WORDS : Subsidence, underground mining, Faulquemont, post-mining, flooding.

1. Introduction

L'exploitation souterraine du charbon en France a été le plus largement pratiquée par des méthodes d'extraction dites totales. Ces méthodes consistent à extraire le charbon dans sa totalité et à combler les vides souterrains soit par un remblayage intégral avec des matériaux provenant de la surface ou issus des terrains stériles du fond soit par le foudroyage du toit immédiatement en arrière du chantier d'extraction.
Ce dernier type d'exploitation permet un traitement intégral des vides (exploitations totales, exploitations partielles remblayées ou foudroyées) et minimise le risque d'instabilité des terrains de surface durant la phase post-exploitation. Si, durant la phase d'exploitation, ces travaux peuvent induire des affaissements ou, plus rarement, des effondrements maîtrisés du recouvrement, le comblement rapide des vides par les terrains foudroyés après la cessation de l'extraction conduit à une stabilisation des terrains de surface. Dans tous les cas, les éventuels mouvements différés se caractérisent toujours par des affaissements de faible amplitude du fait du volume très réduit de vides résiduels. A l'arrêt de l'exploitation, les pompages d'exhaure sont aussi arrêtés, en général, provoquant l'ennoyage des anciens travaux miniers et la formation d'une nappe profonde dans les terrains houillers décomprimés par l'exploitation.

Plusieurs anciennes mines de charbon ennoyées existent aujourd'hui en France. C'est le cas notamment du bassin de Faulquemont pour lequel de précédentes études ont permis de suivre la remontée des eaux et d'enregistrer un soulèvement d'ordre centimétrique de la surface du sol au droit des exploitations ennoyées. Les conséquences de l'ennoyage de ce secteur du bassin houiller lorrain comprennent, entre autres, une « resaturation » des terrains dénoyés lors de l'exploitation ainsi qu'une minéralisation des eaux rejoignant les réservoirs constitués par les vides miniers résiduels. L'objectif de cette communication est d'estimer le volume total des vides résiduels et leur répartition en fonction de la profondeur. Deux méthodes d'évaluation des vides miniers résiduels ont été appliquées à l'étude du bassin de Faulquemont (Degas, 2001). Afin de pouvoir conclure sur ces méthodes, les résultats obtenus ont été comparés au volume d'eau nécessaire à l'ennoyage du bassin minier.

2. Estimation des vides miniers résiduels

Deux méthodes d'évaluation peuvent être utilisées : la première établit, de manière empirique, une proportionnalité entre le volume résiduel et le volume de charbon extrait ; la seconde nécessite une connaissance des volumes extraits, remblayés et affaissés.

2.1. Evaluation du volume des vides par la méthode des coefficients de capacité à l'eau

Cette méthode empirique (Rogoz,1978) mise au point pour le bassin de Haute-Silésie (Pologne), présente l'avantage de s'affranchir du calcul du volume affaissé, celui-ci étant fortement dépendant du nombre de points de mesures topographiques ou de l'évaluation de l'affaissement théorique.

La détermination du volume des vides résiduels proposée repose sur la formule suivante :

$$V_{res} = C^* V_{exp} \qquad (1)$$

où V_{res} est le volume total des vides résiduels ;

V_{exp} est le volume total exploité ;

C est le coefficient de capacité à l'eau, déterminé à partir d'un abaque établi par Rogoz (figure 1).

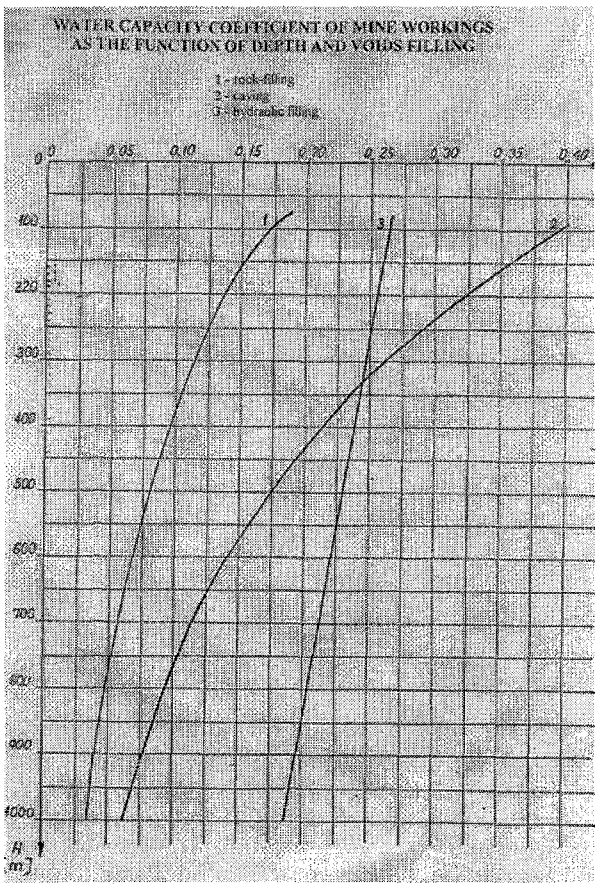


Figure1. Détermination du coefficient de capacité à l'eau (abscisse) en fonction de la profondeur (ordonnée en mètres)(Rogoz, 1978)

Pour ce qui concerne le remblayage hydraulique et le foudroyage, les méthodes de traitement décrites dans l'article de Rogoz (1978) semblent relativement similaires à celles utilisées en France, ce qui justifie l'emploi des coefficients déduits de l'abaque. En revanche, la méthode de remblayage n'étant pas précisée pour ce qui concerne le remblayage non hydraulique, une forte incertitude persiste sur l'utilisation des coefficients présentés dans le cas du remblayage pneumatique. Le facteur d'affaissement issu de la méthode volumétrique (décrite ci-après) varie en effet entre 0,45 et 0,65 respectivement pour le remblayage pneumatique et le remblayage manuel en plateure.

De plus, il faut noter que ces coefficients ne prennent pas en compte les vides liés à la présence des galeries d'infrastructure.

2.2. Evaluation du volume des vides par la méthode volumétrique

Le volume des vides résiduels induit par les travaux miniers (V_{res}) est déduit du volume des vides créés par l'exploitation et est fonction, entre autres, du mode de traitement des panneaux exploités. Indépendamment de la répartition dans le massif de cette "porosité induite", la valeur globale du volume résiduel est égale à :

$$V_{res} = V_{ext} - (1-k_p).V_{rem} - V_{aff} \quad (2)$$

où V_{res} = volume total des vides résiduels induit par l'exploitation ;

V_{ext} = volume total de matériau extrait, c'est-à-dire le volume total extrait dans chacune des tailles ainsi que le volume des stériles provenant des galeries et des puits ;

V_{rem} = volume des remblais mis en place dans les tailles (après tassement du remblai sous l'effet de la pression des terrains surimcombants). Pour les tailles foudroyées, $V_{rem} = 0$. Le tassement des remblais dû à la convergence des épontes est introduit par le coefficient de remblayage, mis au point par Proust (Proust, 1978). Ce coefficient est celui utilisé lors de la prévision des affaissements et dépend du mode de traitement de l'arrière-taille. Pour un remblai hydraulique, il est égal à 0,3 ; pour un remblai pneumatique, il est égal à 0,45 ;

k_p = porosité du remblai après tassement. Le remblai garde une certaine porosité après tassement dont on estime la valeur moyenne à 15% ;

V_{aff} = volume affaissé, c'est-à-dire le volume de la cuvette d'affaissement qui s'est formée en surface.

Le volume affaissé est la valeur la plus difficile à déterminer dans ce calcul car contrairement au volume exploité et au volume remblayé, il ne peut être déterminé à partir des plans d'exploitation.

Pour localiser et quantifier les affaissements de la surface provoqués par des exploitations souterraines, plusieurs méthodes sont utilisées. La première consiste à établir une carte des variations topographiques entre le début et l'arrêt de l'exploitation, à partir des bases de données de l'IGN (Institut Géographique National) et des affaissements calculés par la méthode de Proust (1964). Les bases de données de l'IGN sont deux levés topographiques, nommés BDAlti pour le levé ancien (datant de 1935, en général) et BDTopo pour le levé récent (datant des années 1990).

La carte des variations topographiques entre le début et la fin de l'exploitation minière permet d'évaluer les affaissements engendrés par les travaux miniers. Elle est établie de la manière suivante :

- pour les affaissements ayant eu lieu entre la date de levé de la BDAlti et la date de levé de la BDTopo, par différence des levés topographiques disponibles ;
- pour les affaissements antérieurs à la date de levé de la BDAlti, par calcul de la valeur théorique de l'affaissement engendré par les panneaux exploités antérieurement à la date du levé, suivant la méthode de Proust.

Les variations topographiques reportées sur la carte sont évidemment la somme des affaissements déterminés à l'issue de ces deux calculs.
En ce qui concerne cette carte, il faut noter que :

- on ne peut pas distinguer les réductions d'altitude liées à l'exploitation minière de celles liées à d'autres causes d'origine humaine (carrière à ciel ouvert, terrassement...) ou naturelle.
- il peut exister localement des variations liées au manque de précision des courbes de niveau du levé ancien.

La seconde méthode, la plus appropriée, consiste à établir les auréoles d'iso-affaissement dans le secteur exploité, à partir des mesures de nivellement en surface réalisées depuis le début des travaux.

En général, la détermination du volume affaissé se fait par la modélisation, en trois dimensions, des affaissements engendrés par les travaux miniers.

3. Application au bassin de Faulquemont

3.1. Présentation du cas d'étude (HBL,1999) (Babot, 1997)

Le bassin houiller de Faulquemont fait partie du bassin charbonnier lorrain, situé à 50 kilomètres à l'Est de Metz (département de la Moselle). Il constitue un réservoir souterrain isolé des autres exploitations du bassin. Une trentaine de veines ont été exploitées par la méthode de longues tailles,

remblayées ou foudroyées, entre 1936 et 1974 (fermeture définitive de la mine) et à des profondeurs comprises entre 560 et 1000 mètres (cote NGF entre –160 et –600 m). Le contexte stratigraphique de ce bassin est tel que le Carbonifère (houiller productif non-aquifère à l'état vierge) est recouvert d'environ 400 mètres de Grès triasiques aquifères. La fracturation des terrains de recouvrement, d'origine naturelle et induite par l'exploitation, a provoqué un rabattement important de la nappe (jusqu'à plus de 75 mètres) et a nécessité la mise en place d'un système efficace d'exhaure des eaux pour l'exploitation minière. Malgré l'arrêt de l'exploitation souterraine en 1974, l'exhaure a été maintenue à la cote –400 m NGF jusqu'à mi-octobre 1989, date de l'arrêt des pompages provoquant l'ennoyage du réservoir minier constitué par la fracturation des terrains induite par l'exploitation et les vides résiduels (figure 2). L'ennoyage de l'ancien bassin d'exploitation a été rapide puisque l'ensemble des travaux miniers a été ennoyé dès le début du mois de mai 1990, soit un peu plus de 6 mois après l'arrêt de l'exhaure. L'absence de formations étanches entre le Houiller et les Grès Vosgiens a permis la mise à l'équilibre avec la nappe des Grès Vosgiens, qui s'est effectué pendant environ 6 mois avec la saturation de la porosité de fracture des terrains houillers sus-jacents à l'exploitation. La résorption de l'entonnoir piézométrique, après 50 ans de prélèvements plus ou moins intensifs, s'est effectué alors progressivement pour atteindre, à ce jour, un régime piézométrique en équilibre (figure 2).

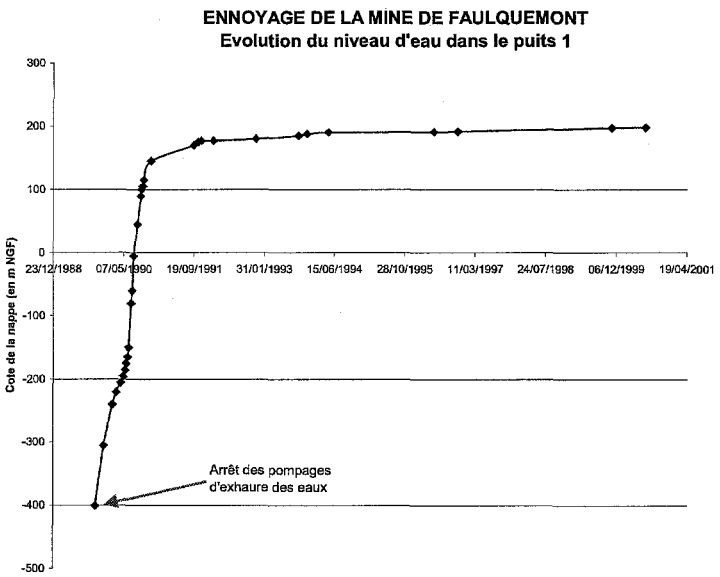


Figure 2. Courbe piézométrique de la remontée de la nappe souterraine (source HBL)

L'ensemble des vides miniers résiduels (cavités résiduelles, zones foudroyées, zones remblayées...) et des zones affectées par la fracturation et la fissuration induites par l'exploitation est ennoyé depuis plus de 10 ans et le niveau piézométrique de la nappe est stabilisé depuis plusieurs années.

Les mesures de nivellement de surface destinées au suivi des affaissements ont été interrompues en 1975. Depuis, deux campagnes de nivellement complémentaires ont été réalisées, respectivement au cours de l'été 1998 et en mars 2001, et ont concerné 36 anciens points de mesure retrouvés depuis et répartis sur l'ensemble de la zone étudiée. Le premier contrôle a donc été effectué près de 8 ans après l'ennoyage de l'ensemble des travaux miniers (mai 1990) (figure 3).

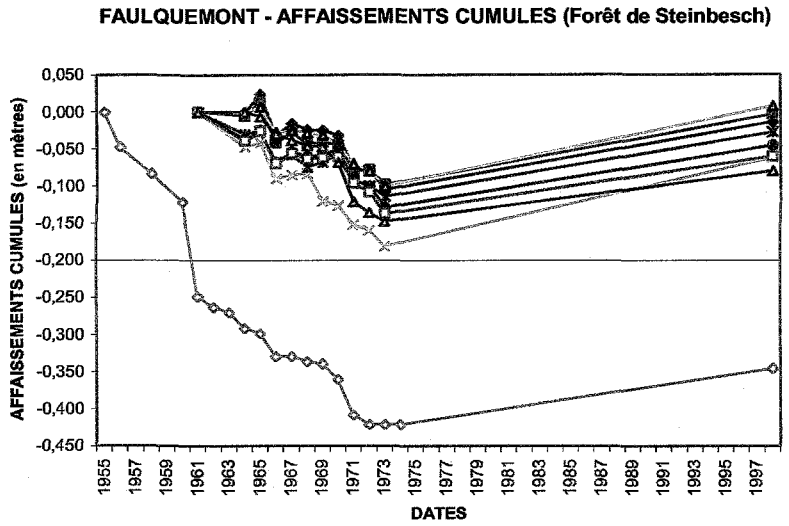


Figure3. Mesures topographiques dans le secteur de Faulquemont (forêt de Steinbesch) (source HBL)

Les mesures de nivellement effectuées en 1998 révèlent, sur l'ensemble des points de mesure, un soulèvement de la surface du sol d'une amplitude centimétrique à décimétrique (14 cm au maximum). Sur 13 des 36 points de nivellement relevés, l'amplitude de ce soulèvement est supérieure à 5 cm. Ces résultats sont d'ailleurs confirmés par la campagne de mesure de nivellement réalisée en mars 2001. Compte tenu de la qualité et de la fiabilité des mesures de nivellement effectuées, on peut considérer que cette amplitude est significative (Wojtkowiak, 2001).

3.2. Calcul du volume des vides résiduels (Degas, 2001)

L'exploitation minière souterraine dans le bassin de Faulquemont a créé des vides miniers qui ont été, en partie, comblés soit par les remblais soit par le fléchissement et la décompression des terrains surincombants. La connaissance des veines exploitées et le suivi de l'ennoyage du bassin qui a eu lieu en 1989-1990, a permis l'estimation du volume des vides miniers résiduels, selon les deux méthodes présentées précédemment.

3.2.1 Méthode des coefficients de capacité à l'eau (Rogoz, 1978)

Cette méthode, appliquée au cas du bassin de Faulquemont, est définie par la formule :

$$V_{res} = \sum_{n=1}^{215} (C_n * V\,exp_n) \qquad (3)$$

où V_{res} = volume des vides résiduels induit par l'exploitation ;

C_n =coefficient de capacité à l'eau pour chacun des panneaux exploités ;

V_{exp} = volume de chacun des 215 panneaux exploités dans le bassin de Faulquemont.

On obtient, pour le bassin de Faulquemont, un volume de vides résiduels de l'ordre de $2{,}4 .10^6 m^3$.

3.2.2 Méthode volumétrique

A partir des plans d'exploitation fournis par l'exploitant et d'éléments techniques tels que les longueurs de galeries, leur section, la profondeur et le diamètre des puits, le volume total extrait est estimé à :

$$V_{ext} = V_{gal} + V_{pui} + V_{pan} \quad (4)$$

$$\text{soit } V_{ext} = 0{,}064.10^6 + 3.10^6 + 23{,}5.10^6 = 26{,}564.10^6 \text{ m}^3$$

On note que le volume des puits est négligeable par rapport au volume exploité.

Connaissant le mode de traitement de l'arrière-taille de chacune des tailles, il est possible d'estimer le volume des remblais, en considérant que le volume des galeries remblayées est proportionnel au volume des tailles remblayées, et en intégrant le tassement du remblai dû à la convergence des épontes.
Dans le bassin de Faulquemont, 71% du volume total exploité est remblayé (56% par remblai pneumatique et 15% par remblai hydraulique) d'où

$$V_{rem} = V_{rem\ panneaux} + V_{rem\ galeries} = 9{,}7.10^6 + 0{,}81.10^6 = 10{,}5.10^6 \text{ m}^3.$$

Le volume de la cuvette d'affaissement calculé d'après les nivellements de surface est de $9{,}4.10^6$ m^3.

Le volume total des vides résiduels calculé par la méthode volumétrique est donc égal à :

$$V_{res} = V_{ext} - k_p.V_{rem} - V_{aff} \quad (5)$$

$$V_{res}(\text{total}) = 26{,}56.10^6 - 0{,}85*10{,}5.10^6 - 9{,}41.10^6 = 8{,}2.10^6 \text{ m}^3$$

3.3. Estimation du volume d'eau nécessaire à l'ennoyage du Houiller

A partir des mesures piézométriques réalisées lors de l'ennoyage du bassin minier de Faulquemont (figure 2) et sachant qu'après l'arrêt de l'exploitation, le débit d'exhaure minière est constant et égal à 24,5 m^3/min, il est possible d'estimer le volume d'eau nécessaire à l'ennoyage du réservoir en fonction des cotes NGF (figure 4).

La figure 4 présente la courbe déduite du volume d'eau nécessaire à l'ennoyage du réservoir et la courbe du volume des vides miniers résiduel obtenu par la méthode des coefficients de capacité à l'eau et par la méthode volumétrique. Elle montre que l'évolution, en fonction de la profondeur, est similaire pour les deux courbes obtenues. En effet, entre la cote –400 m NGF et la cote –160 m NGF, les pentes des courbes sont semblables. On remarque cependant que le volume résiduel est calculé depuis la base des travaux (environ –600 m NGF) alors que le volume total d'eau n'est calculé qu'à partir de la cote –400 m NGF.

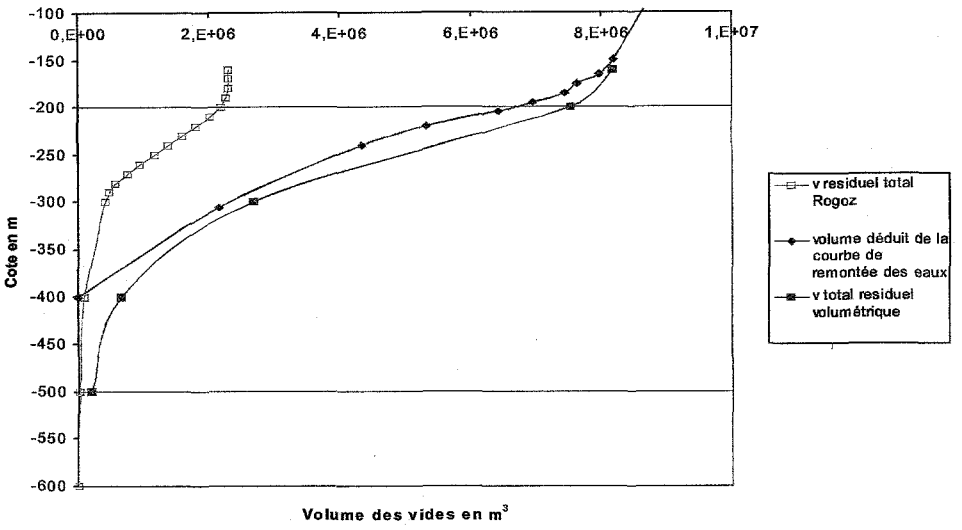


Figure 4. Comparaison entre la répartition selon la profondeur des volumes des vides résiduels cumulés par la méthode empirique de Rogoz (1978), par la méthode volumétrique et par le volume mesuré d'après la remontée de l'eau

Le volume d'eau nécessaire à l'ennoyage des travaux miniers du bassin de Faulquemont de la cote –400 m à la cote –160 m (sommet des travaux) est égal à $8{,}23.10^6$ m^3.
Le volume total des vides miniers résiduel liés à l'exploitation souterraine est égal à $8{,}2.10^6$ m^3. Entre les cotes –400 et –160 m NGF, ce volume vaut $7{,}5.10^6$ m^3.

4. Interprétation

4.1. Répartition du volume des vides résiduels d'après la méthode volumétrique et d'après la méthode empirique de Rogoz (1978).

Les deux méthodes utilisées (volumétrique et empirique) consistent à appliquer un coefficient lié au traitement de l'arrière-taille aux volumes des travaux exploités selon la cote.

Les courbes de répartition du volume des vides, obtenues par les deux méthodes décrites plus haut ont des allures semblables. Par contre, quelle que soit la profondeur, les valeurs obtenues par la méthode volumétrique sont quatre fois supérieures à celles données par la méthode de Rogoz.

	Méthode volumétrique	Méthode de Rogoz
V_{res}/V_{ext}	30%	9%
V_{res}/V_{aff}	86%	25%
$V_{res}/(V_{ext}-V_{remb})$	50%	15%

Tableau 1 : Comparaison de la méthode volumétrique et de la méthode de Rogoz

Il ressort du tableau ci-dessus que le volume des vides résiduels obtenu par la méthode de Rogoz est largement sous-estimé par rapport au volume des vides résiduels déduit de la méthode volumétrique. En effet, cette méthode a été utilisée par l'INERIS pour estimer la capacité du réservoir minier du bassin de Blanzy (Le Gac, Rémond et Josien, 1992). Le calcul avait permis d'évaluer le volume résiduel (ou volume du réservoir minier) à environ $V_{res} = 2{\cdot}10^6$ m^3, soit 30 % du volume des vides initial (V_{ext} - V_{rem}), ou encore 44 % du volume de la cuvette d'affaissement (V_{aff}).

Une approche pratiquement identique a également été mise en œuvre par l'Ecole des Mines de Paris pour évaluer la capacité du réservoir correspondant à la fosse d'Arenberg dans le bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais (Dolliazal et al., 1994). Le volume résiduel a été estimé à $V_{res} = 11{\cdot}10^6$ m^3, soit 29 % du volume total extrait (V_{ext}), 34 % du volume des vides miniers initial (V_{ext} - V_{rem}), ou encore 53 % du volume de la cuvette d'affaissement (V_{aff}).

Enfin, pour ce même bassin, cette méthode a été utilisée dans le cadre de l'estimation des vides résiduels induits par l'exploitation des concessions de Crespin et d'Auchy-Fléchinelle (Thoraval, 1998). Un volume des vides miniers résiduels égal à 26% du volume extrait a été calculé.

Les estimations similaires faites dans d'autres bassins miniers conduit à considérer que la méthode de Rogoz sous-estime largement le volume des vides résiduels. De plus, les rapports obtenus avec la méthode volumétrique sont comparables à ceux obtenus pour les autres bassins. On en déduit alors que les résultats issus de la méthode volumétrique sont satisfaisants. Par conséquent, le volume des vides résiduels pour l'ensemble du bassin de Faulquemont à la fin de l'exploitation est estimé à $8{,}2.10^6$ m^3.

4.2. Volume des vides résiduels calculé par la remontée de l'eau dans le puits

Le volume d'eau nécessaire à l'ennoyage des travaux miniers du bassin de Faulquemont de la cote –400 à la cote –160 (sommet des travaux) est égal à $8{,}23.10^6$ m^3.

Le volume total des vides résiduels provoqués par l'exploitation souterraine vaut $8{,}2.10^6$ m^3. Entre les cotes –400 et –160 m NGF, ce volume est égal à $7{,}5.10^6$ m^3.

Le volume d'eau injecté est donc légèrement supérieur à celui des vides résiduels, d'une différence de $0{,}73.10^6$ m^3, ce qui représente un peu moins de 10% du volume des vides résiduels. Ce volume est peut-être attribué à la part des terrains formant le réservoir qui s'est trouvée désaturée pendant l'exploitation, avant de se resaturer lors de l'ennoyage des travaux.

5. Conclusions

Les calculs d'estimation du volume des vides miniers résiduels présentés dans cette communication, pour le bassin de Faulquemont, permettent de conclure que la méthode empirique des coefficients de capacité à l'eau, mise au point par Rogoz pour les bassins miniers polonais, n'est pas adaptée aux bassins miniers français du fait des différences de contexte géologique et minier des exploitations françaises et polonaises. En revanche, les calculs réalisés par la méthode volumétrique révèlent, qu'à la fin de l'exhaure, le volume d'eau nécessaire à l'ennoyage du réservoir houiller est de 10% supérieur au volume des vides résiduels estimé. Cette différence révèle qu'à la fin de l'exploitation, le réservoir houiller a acquis une porosité plus importante comparée à sa porosité initiale. Ceci est lié à la fracturation des terrains provoquée par l'exploitation.
Par ailleurs, suite à l'ennoyage du bassin houiller de Faulquemont, un léger soulèvement des terrains de surface, d'ordre pluri-centimétrique à décacentimétrique a été constaté. Ce phénomène représente quelques pour-cents de l'affaissement total mesuré. Intervenu dans un secteur touché par les affaissements au cours de l'exploitation minière, ce soulèvement n'a pas eu de conséquences sur le bâti et les infrastructures de surface, les mouvements étant lents, progressifs et relativement homogènes sur l'ensemble du secteur affaissé. Il serait cependant intéressant d'étudier les interactions possibles entre l'augmentation de la porosité du réservoir houiller résultant de l'exploitation et les mouvements de surface liés à l'ennoyage du bassin.

6. Bibliographie

Babot Y. (1997), *Bilan des effets des travaux sur les eaux. Etude hydrogéologique et hydrologique. HBL - Concession De Wendel.* Rapport ANTEA n° A 09302.

Bekendam et Pöttgens J.J.E. (1995). *Ground movements over the coal mines of southern Limburg, the Netherlands, and their relation to rising mine waters. Land Subsidence (Proceedings of the Fifth International Symposium on Land Subsidence.* The Hague. October 1995.

Bukowski P. (2000). *Water storage capacity of rock massif in forecasting the flooding process of mine workings.* 7th International mine water association congress. Ustron (Poland). 11-15 september 2000.

Degas M. (2001). *Etude de la resaturation des vides miniers résiduels. Application au bassin houiller de Faulquemont (Moselle).* Rapport INERIS pour Charbonnages de France référencé INERIS-DRS-02-25293/R02 du 12 septembre 2002.

Dolliazal M., Salignac A.L., Yang B., Cheimanoff N., Ledoux E., Mercier D. (1994). *Modélisation de la remontée de pression de gaz dans les anciens travaux miniers du Bassin Nord Pas-de-Calais - Etude de la faisabilité appliquée à la fosse d'Arenberg.* Ecole des Mines de Paris, ARMINES, avril 1994.

HBL (1999). Rapport final réalisé dans le cadre du projet ECSC agreement 7220-AF/014, 1999.

Le Gac H., Rémond C., Josien J.P. (1992). *Etude de la remontée des eaux après la fermeture des travaux miniers à Blanzy (71).* Rapport n° 1 : Etude d'impact prévisionnelle, BRGM / INERIS, décembre 1992.

Proust (1964). *Etude sur les affaissements miniers dans le bassin du Nord et du Pas-de-Calais.* Revue de l'Industrie Minérale, Juin-juillet 1964, Vol. 46, n° 6 et 7.

Rogoz (1978). *Water capacity of abandoned working in underground coal mines.* Proc. Int. Conf. : Water in Mining and Underground Works. SIAMOS, Granada (Spain).

Thoraval A. (1998). *Estimation des vides résiduels induits par l'exploitation des concessions de Crespin et d'Auchy-Fléchinelle du bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais.* Rapport INERIS SSE-ATh/DMi -26EF66/RN02, août 1998.

Wojtkowiak F. (2001). *Suivi des mouvements de la surface du sol par nivellement et par interférométrie SAR différentielle depuis l'arrêt des pompages d'exhaure dans le secteur de Faulquemont (Moselle).* Rapport INERIS DRS-01-23740/R01, septembre 2001.