

Exemple d'impacts de l'arrêt de l'exploitation minière et de l'exhaure dans le bassin houiller de Faulquemont (Lorraine)

M. DEGAS

INERIS, Direction des
risques du sol et du sous-sol
Parc technologique Alata
BP n° 2
60550 Verneuil-en-Halatte
marie.degas@ineris.fr

F. WOJTKOWIAK

INERIS, Laboratoire
Environnement
Géomécanique
et Ouvrages
École des mines de Nancy
Parc de Saurupt
54042 Nancy Cedex
francis.wojtkowiak@ineris.fr

M. METZ

M. BRANCHET

Houillères du bassin
de Lorraine
Unité de gestion
de l'environnement
et du patrimoine industriel
2, rue de Metz
57802 Freyding-Merlebach
Cedex
michel.metz@hbl.fr

Résumé

L'ensemble du volume des terrains affectés par une exploitation minière souterraine peut être considéré comme un réservoir aquifère qui, contrairement à un aquifère classique, n'est pas matérialisé par des limites physiques bien définies. Il correspond en effet au volume des vides dus à la fracturation naturelle et celle induite par l'exploitation, à la porosité matricielle du massif, ainsi qu'au volume des vides miniers résiduels. Cette communication présente en premier lieu les résultats de deux méthodes d'évaluation des vides miniers résiduels appliquées à l'étude du bassin de Faulquemont et les compare au volume d'eau nécessaire à l'ennoyage de ce bassin. La deuxième partie de cette communication s'intéresse aux éventuels effets sur la stabilité des terrains de surface de la remontée des eaux dans ce même bassin. En effet, des études menées concernant respectivement aux Pays-Bas, en Allemagne et, plus récemment, en France ont mis clairement en évidence que la remontée des eaux après l'arrêt de l'exhaure minière peut générer un soulèvement des terrains. Les observations faites en Lorraine dans le secteur de Faulquemont, où la remontée des eaux est stabilisée, donnent des résultats similaires. Aucune conséquence sur le bâti et les infrastructures n'a été constatée jusqu'à présent dans les bassins miniers soumis à ce phénomène.

Mots-clés : affaissement, exploitation souterraine, charbon, après-mine, ennoyage, réservoir minier.

End of mining extraction and its induced underground water level rise: example of impacts in Faulquemont coal basin (Lorraine, France)

Abstract

A rock-mass mined by underground exploitation can be assimilated as an aquifer reservoir which is not delimited by physical boundaries unlike a geological reservoir. In fact, this ground-water reservoir includes the residual mining voids and mining works (drifts, shafts, galleries), natural porosity (interstitial porosity and of the natural discontinuities) of the fractured rock-mass, including the fracturation induced by mining. Firstly, this communication presents the results obtained with two different methods used to evaluate the total volume of the residual mining voids and compares these results with the volume of water flooding calculated from the curve of the underground water level rise measured in the Faulquemont coal basin (Lorraine). The second part of this communication explains the effects of water level rise on the stability of the surface. Indeed, the water level recovery, when pumping is stopped, can induce a rise of ground level. The studies concerning mining respectively in The Netherlands and in Germany highlighted this phenomenon. The observations made also in the district of Faulquemont, where the works flooding has been stabilised, give similar results. No consequence on buildings and surface infrastructures due to this phenomenon has yet been noticed.

Key words : subsidence, underground mining, coal, post-mining, flooding, mining ground-water reservoir.

Introduction

L'exploitation souterraine du charbon en France a été le plus souvent 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 le 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. Ces méthodes d'exploitation totale et certaines méthodes d'exploitation partielle telles que les exploitations par chambres et piliers remblayées ou foudroyées, assurent donc un traitement intégral des vides créés par l'extraction et minimisent le risque d'instabilité des terrains de surface durant la phase post-exploitation.

Si, durant la phase d'exploitation, ces travaux induisent des affaissements en surface ou, plus rarement, des effondrements maîtrisés du recouvrement, le comblement rapide des vides par les terrains foudroyés dans l'arrière-taille conduit à une stabilisation assez rapide également des terrains de surface. L'expérience acquise en France et dans les charbonnages d'Europe occidentale depuis plus de 50 ans montre, en effet, que l'essentiel de l'affaissement prévu (90 % de l'amplitude globale) 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 de la surface 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 (Piguet et Wojtkowiak, 2001). Dans tous les cas, les éventuels mouvements différés pendant cette phase, dite d'affaissement résiduel, se caractérisent toujours par des mouvements verticaux (affaissements) de faible amplitude du fait du volume très réduit des vides miniers résiduels. En général, peu après la cessation de l'exploitation, les pompages d'exhaure minière sont également arrêtés, provoquant l'ennoyage des anciens travaux miniers et la formation d'un aquifère profond contenu dans les terrains houillers décomprimés et les vides miniers résiduels laissés par l'exploitation.

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 J.J.E. Pöttgens *et al.* (1995, 2001) et de J. Fenk (1997), concernant respectivement des sites miniers aux Pays-Bas et en Allemagne, ont mis en évidence ce phénomène. Les observations et mesures topométriques faites plus récemment en France dans le bassin houiller de Blanzky et en Lorraine, notamment dans le secteur de Faulquemont où la remontée des eaux est maintenant stabilisée, donnent des résultats similaires. En effet, les études menées dans ces deux bassins ont permis de suivre la remontée des eaux et d'enregistrer un soulèvement d'amplitude pluricentimétrique de la surface du sol au droit des secteurs exploités et ennoyés. Aucune conséquence sur le bâti et les infrastructures des régions soumises à ce phénomène n'a été constatée jusqu'à présent.

Les conséquences de l'ennoyage du siège de Faulquemont, bien individualisé du reste du bassin houiller lorrain, comportent, entre autres, une « resaturation » des terrains de recouvrement dénoyés lors de l'exploitation ainsi que le remplissage du réservoir constitué par les vides miniers résiduels. Le premier objectif de cette communication est de présenter les résultats de l'estimation du volume total des vides miniers résiduels et de leur répartition en fonction de la profondeur, étude effectuée pour mieux comprendre et interpréter la courbe de remontée des eaux en fonction du temps qui avait été enregistrée lors de l'ennoyage de ce secteur. Pour ce faire, deux méthodes d'évaluation des vides miniers résiduels différentes ont été appliquées dans le cadre de cette étude (M. Degas, 2001). Afin de pouvoir conclure sur les résultats obtenus par ces deux méthodes, ceux-ci ont été comparés au volume d'eau nécessaire à l'ennoyage de ce petit bassin minier. Le deuxième volet traité dans cette communication concerne le suivi des mouvements de la surface du sol effectué dans ce secteur depuis l'arrêt des pompages d'exhaure minière. Ce suivi a mis également en œuvre deux méthodes de mesure différentes : une méthode classique de nivellement de haute précision dont les résultats sont confrontés à ceux issus du traitement interférométrique différentiel d'une série temporelle constituée de scènes radar (Carnec, 2001). Ces deux méthodes ont été respectivement mises en œuvre par le service « géologie, topographie et sondages » des Houillères du bassin de Lorraine (HBL) et par le BRGM (Carnec et Raucoules, 2000).

2

Estimation du volume 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 méthode, qualifiée de volumétrie, nécessite une parfaite connaissance des volumes extraits, remblayés et affaissés.

2.1

Évaluation du volume des vides par la méthode du coefficient de capacité à l'eau

Cette méthode empirique (Rogoz, 1978 ; Bukowski, 2000), 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 mesure topographiques ou de l'évaluation de l'affaissement à partir d'approches également empiriques (Proust, 1964).

La détermination du volume des vides résiduels proposée par M. Rogoz repose sur la formule suivante :

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

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, défini par M. Rogoz (1978) et déterminé à partir de l'abaque qu'il a établi et représenté sur la figure 1.

WATER CAPACITY COEFFICIENT OF MINE WORKINGS
AS THE FUNCTION OF DEPTH AND VOIDS FILLING

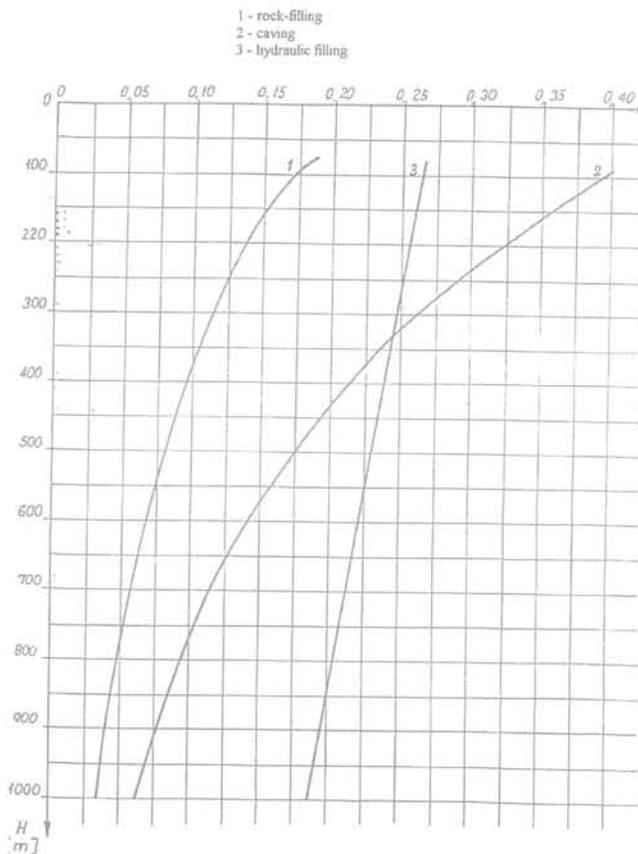


FIG. 1 Détermination du coefficient de capacité à l'eau en fonction de la profondeur H (mètres) et du mode de traitement de l'arrière-taille (M. Rogoz, 1978)

Water capacity coefficient of mine workings as the function of depth and voids filling (M. Rogoz, 1978).

1 - remblayage (rock-filling); 2 - foudroyage (caving); 3 - remblayage hydraulique (hydraulic filling).

Les méthodes de traitement de l'arrière-taille par remblayage hydraulique ou par foudroyage, décrites dans l'article de Rogoz (1978), semblent relativement similaires à celles utilisées en France, ce qui justifie l'emploi des coefficients déduits de cet abaque. En revanche, l'autre méthode de remblayage, correspondant à la courbe 1 de l'abaque (Fig. 1), n'étant pas précisée (remblayage manuel ou par voie pneumatique?), une forte incertitude persiste sur l'application des coefficients présentés dans le cas du remblayage pneumatique. Cette incertitude est loin d'être négligeable. En effet, le facteur d'affaissement issu de la méthode volumétrique décrite ci-après varie respectivement entre 0,8 et 0,45 pour le remblayage manuel et le remblayage pneumatique en plateaux, ce qui représente une plage de variation importante (Proust, 1964).

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

2.2

Évaluation 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 également fonction, entre autres, du mode de traitement de l'arrière-taille. Indépendamment de la répartition dans le massif de cette « porosité induite », la valeur globale du volume résiduel est égale à :

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

où

V_{res} = volume total des vides miniers résiduels induits par l'exploitation ;

V_{ext} = volume total de matériau extrait, comprenant le volume total de charbon 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. Pour les tailles foudroyées, $V_{rem} = 0$. Le tassement des remblais dû à la convergence des épontes est introduit par le coefficient de remblayage défini par A. Proust (1964). 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 compris entre 0,2 et 0,3 ; pour un remblai pneumatique, il est égal à 0,45 ;

k_p = porosité du remblai après tassement. On estime que le remblai garde toujours une certaine porosité, même après tassement sous le poids des terrains sus-jacents. La valeur moyenne de cette porosité est estimée à 0,15 ou 15 % ;

V_{aff} = volume affaissé correspondant au 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 aux volumes exploités et remblayés, 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.

Il faut noter que, sur cette carte :

- 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 lorsqu'on dispose des données pour ce faire, 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 géométrique, en trois dimensions, des affaissements engendrés par les travaux miniers à l'aide de logiciels de DAO.

3

Application au bassin de Faulquemont

3.1

Contexte hydrogéologique et minier

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 houiller lorrain. Une trentaine de veines ont été exploitées par la méthode des longues tailles, remblayées ou foudroyées, entre 1936 et 1974 (arrêt définitif de la mine) et à des profondeurs comprises entre 560 et 1 000 mètres (cote NGF entre - 160 et - 600 m). Le contexte stratigraphique de ce bassin est tel que le Carbonifère (houiller productif très peu aquifère à l'état vierge) est recouvert d'environ 400 mètres de grès vosgiens du Trias inférieur.

Malgré l'arrêt de l'exploitation souterraine en 1974, l'exhaure de la mine de Faulquemont a été maintenue à partir de l'étage 680 (cote - 400 m NGF) pour alimenter en eau industrielle le complexe de Carling jusqu'à mi-octobre 1989. Le bilan des eaux effectué en 1976 fait apparaître un volume d'exhaure atteignant 24,5 m³/min. La fracturation naturelle des terrains de recouvrement et celle induite par l'exploitation, ont provoqué un rabattement important de la nappe du Trias qui a nécessité la mise en place d'un système efficace d'exhaure de ces eaux pour l'exploitation minière. Ce rabattement atteint son maximum en 1977 avec un niveau hydrostatique à la cote + 175 m au puits 1 de Faulquemont (rabattement de plus de 75 mètres d'amplitude). En effet, le niveau piézométrique d'origine, avant travaux, devait se situer aux environs de + 250 m (nappe en charge car ce niveau correspond au toit des grès à Voltzia). Après l'arrêt de l'exhaure, d'après les simulations réalisées par le BRGM puis ANTEA (Babot, 1997), le niveau piézométrique remonterait vers les cotes + 220 à + 230.

Le suivi de la remontée de la nappe semble mettre en évidence que le niveau de l'eau de la mine ennoyée a atteint, à ce jour, son régime d'équilibre piézométrique avec la nappe des grès du Trias inférieur. Ce niveau est actuellement à la cote + 198 environ dans le puits 1. De

plus, il apparaît que l'ensemble des vides miniers résiduels (cavités résiduelles, zones foudroyées, zones remblayées...) et des terrains situés dans le cône d'influence des travaux miniers, affectés par la fracturation naturelle et induite par l'exploitation, est ennoyé dès le début du mois de mai 1990, soit un peu plus de six mois après l'arrêt de l'exhaure, soit depuis plus de dix ans maintenant. De même, le niveau piézométrique de la nappe est également stabilisé depuis plusieurs années.

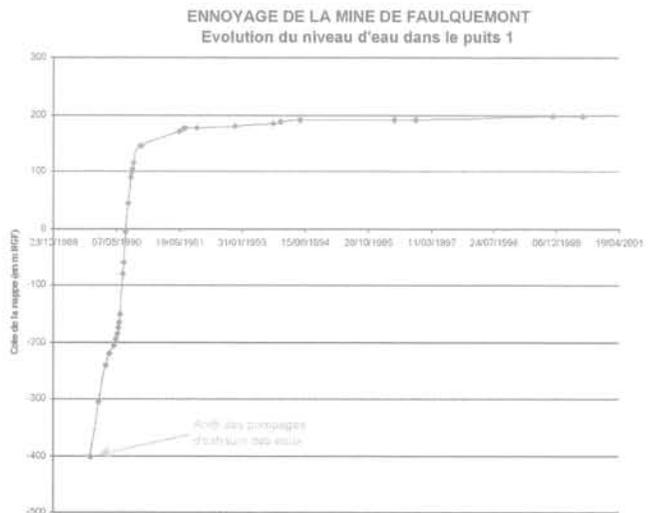


FIG. 2 Courbe piézométrique de la remontée de la nappe souterraine au puits 1 de Faulquemont (HBL, 1999).

Water level rising curve versus time within the Faulquemont ground-water reservoir (HBL, 1999).

3.2

Suivi des mouvements de la surface du sol

3.2.1

A partir de mesures de nivellement pendant l'exploitation

En phase d'exploitation, le suivi des affaissements n'a été systématisé qu'à partir de 1961 mais, localement, ce suivi a été mis en œuvre dès 1955. L'analyse des documents (plan d'ensemble des affaissements de Faulquemont-Folschviller et des cahiers d'affaissements) permet d'avoir des données couvrant la période 1955-1975. L'évolution des affaissements a été suivie sur très grand nombre de points de nivellement répartis dans l'ensemble de la zone étudiée. On notera que, lors de l'arrêt des mesures de nivellement (entre 1972 et 1975 selon les points), la stabilisation des terrains n'était pas toujours acquise puisque les dernières exploitations n'ont été arrêtées qu'en 1974. C'est plus particulièrement le cas des points de nivellement situés dans la forêt de Steinbesch, au sud de Bambiderstroff. Ces éléments ont été reportés sur une carte des affaissements cumulés qui fait apparaître les points suivants :

- entre 1955 et 1961, on note la présence de deux cuvettes d'affaissement centrées sur les travaux de deux champs d'exploitation, les champs B₁ (Bambi-

derstroff) et B₂ (Haute-Vigneulles), avec des valeurs comprises entre 0,30 et 1,0 m au maximum ;

– entre 1961 et l'arrêt des mesures de nivellement en 1975, trois cuvettes d'affaissement sont individualisées :

- une à l'aplomb des travaux du champ B₁, vers l'ouest, atteignant 2,7 m d'amplitude,
- une nouvelle cuvette à l'aplomb des travaux du champ D, située au Nord-Ouest de Bambiderstroff, atteignant 1,66 m,
- une à l'aplomb des travaux du champ B₂, située au Sud-Est de Bambiderstroff, atteignant une valeur de 1,37 m.

Le cumul des affaissements induits par les exploitations entre 1955 et 1974 serait donc de l'ordre de 3,0 m pour la cuvette située à l'Ouest du champ B₁, et d'environ 2,0 m pour la cuvette du champ B₂.

La surveillance des nivellements dans ce secteur a été interrompue en 1975.

3.2.2

A partir de mesures de nivellement après l'arrêt des pompes d'exhaure

Nous avons vu que les nivellements de surveillance des effets des travaux miniers sur la surface ont été réalisés jusqu'en 1975 dans le meilleur des cas. Afin d'analyser les éventuels effets de l'ennoyage sur la stabilité des terrains de surface, deux nivellements complémentaires ont été effectués : le premier au cours de l'été 1998, et le second, réalisé au vu des résultats du premier et à titre de contrôle, au cours du mois de mars 2001 (Wojtkowiak, 2001).

Le problème essentiel du premier nivellement complémentaire a été la recherche et la caractérisation des points de nivellement surveillés au cours de l'exploitation. Trente-six points de nivellement, répartis sur l'ensemble de la zone, ont pu être ainsi retrouvés et nivelés.

L'analyse des mesures de nivellement effectuées indique une constante variation positive par rapport aux derniers levés, variation comprise entre 1 et 14 cm et répartie de façon inégale sur l'ensemble de la zone. Sur les 36 points nivelés, 13 indiquent une amplitude de mouvement supérieure à 5 cm (Fig. 3). Ils sont situés le long de la route départementale D74 joignant Haute-Vigneulles à Bambiderstroff, et à proximité ou dans la forêt de Steinbesch. L'amplitude maximale du mouvement (près de 14 cm) est mesurée en un point situé en bordure d'un chemin champêtre. Si l'on tient compte des compensations sur les écarts de fermeture (de l'ordre de 2 cm), écarts s'inscrivant à l'intérieur des tolérances des nivellements de haute précision, on doit admettre l'existence de mouvements de soulèvement de la surface de l'ordre de la dizaine de centimètres au maximum par endroits.

Le nombre et la répartition des points par rapport aux cuvettes d'affaissement initiales ne sont cependant pas suffisants pour rechercher une relation empirique entre l'amplitude de ce mouvement de soulèvement de la surface du sol et la hauteur de remontée du niveau d'eau dans le réservoir minier. De telles relations ont déjà été proposées par différents auteurs à partir des retours d'expérience de l'ennoyage d'exploitations houillères souterraines en Hollande, Allemagne et Belgique notamment (Pöttgens *et al.*, 1995 et 2001 ; Fenck, 1997).

FAULQUEMONT - AFFAISSEMENTS CUMULES (Forêt de Steinbesch)

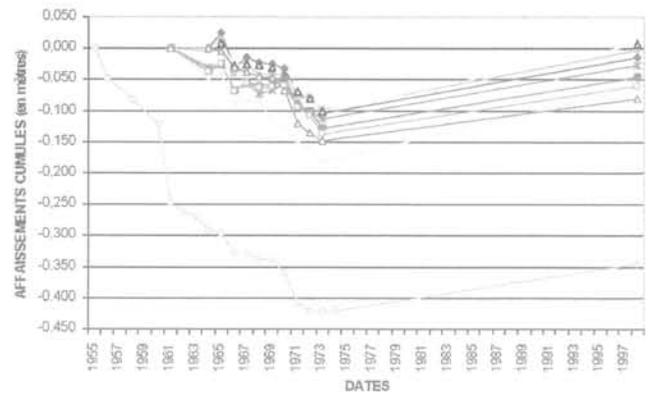


FIG. 3 Mesures topographiques dans le secteur de Faulquemont (forêt de Steinbesch) après l'ennoyage des travaux.
Levelling measurements in the sector of Faulquemont (Steinbesch Forest) after the mine flooding.

3.2.3

Suivi des mouvements de la surface par interférométrie radar différentielle

L'auscultation satellitaire est susceptible de fournir une information synoptique complémentaire des observations et des mesures de nivellement par exemple effectuées in situ, avec une fréquence régulière d'observation (35 jours pour les satellites radars européens ERS). La technique d'interférométrie radar différentielle (Carnec, 2001) a donc été expérimentée sur le secteur de Faulquemont, afin de confirmer ou d'infirmer l'existence de mouvements de la surface mis en évidence par les mesures de nivellement précédentes (Carnec et Raucoules, 2000).

Les résultats obtenus sur le secteur de Faulquemont reposent sur l'interprétation d'une série temporelle de 18 scènes radar ERS-1/ERS-2 acquises entre juin 1993 et juin 1999. Il ressort de l'analyse des différentes combinaisons radar effectuée par le BRGM, les remarques suivantes :

1) le faible rapport signal/bruit réduit considérablement la surface observable, y compris pour les combinaisons interférométriques réalisées avec de faibles écarts temporels ;

2) à l'exception des interférogrammes couvrant des champs encore en exploitation dans le bassin houiller lorrain, l'analyse de la série temporelle n'a révélé aucune signature caractéristique de mouvements sur les zones où le niveau de cohérence est significatif ;

3) à l'issue de l'analyse complète de la série temporelle, seules les combinaisons interférométriques précitées présentent une signature de phase susceptible de représenter une déformation de surface, de type affaissement, localisée à proximité de l'intersection des routes départementales n° 20 et 24 au Sud de Faulquemont. Les caractéristiques de la signature peuvent se résumer comme suit : maximum d'amplitude : environ 2,5 cm entre le 14-06-1993 et le 23-08-1993 ; position du centre de la surface (km, Lambert II étendu) : Xcentre : 912,5 et Ycentre : 2 457,7 ; aire estimée de la surface : 1 300 ha.

Toutefois, compte tenu de la faible amplitude de la signature par rapport aux fluctuations atmosphériques et au bruit environnant, nous sommes amenés à émettre des réserves quant à la signification de ce terme de frange. De plus, le fait que les combinaisons interférométriques ne soient pas indépendantes (une image commune), l'origine de la signature ne peut pas être établie avec certitude au vu de ces seuls interférogrammes.

En d'autres termes, pour le secteur de Faulquemont, le contexte environnemental peu favorable de la zone (forte activité agricole, variation de l'humidité de surface, faible urbanisation...) au regard des contraintes et limitations liées à la mise en œuvre de la technique, n'a pas permis de circonscrire d'éventuels mouvements de surface significatifs pour la période d'observation (1993-1999).

Cela dit, les premières images radar disponibles pour cette analyse datent de juin 1993, c'est-à-dire qu'elles ont été prises un peu plus de 3 ans après l'ennoyage des travaux miniers. Or, il est vraisemblable, par analogie avec la durée de la phase d'affaissement résiduel, que l'essentiel des mouvements de soulèvement de la surface s'est produit pendant la phase de remontée des eaux au sein des travaux miniers et s'est poursuivi quelques mois voire quelques années (2 à 3 ans) après l'obtention du régime d'équilibre piézométrique de l'aquifère minier. Les images radar les plus anciennes n'ont donc pu saisir au mieux que la phase terminale, au demeurant de faible amplitude, de ce mouvement de soulèvement.

3.3

Estimation du volume des vides miniers résiduels

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 foudroyage des terrains. La connaissance des veines exploitées et le suivi de l'ennoyage du bassin, qui a eu lieu en 1989-1990, ont permis l'estimation du volume des vides miniers résiduels, selon les deux méthodes présentées précédentes (Degas, 2001).

3.3.1

Méthode des coefficients de capacité à l'eau

Cette méthode, appliquée au cas du bassin de Faulquemont, est définie par la formule (Rogoz, 1978) :

$$V_{\text{res}} = \sum_{n=1}^{215} (C_n * V_{\text{exp}_n}) \quad (3)$$

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 ainsi, pour le bassin de Faulquemont, un volume de vides miniers résiduels de l'ordre de $2,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

3.3.2

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 :

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

soit $V_{\text{ext}} = 0,064 \cdot 10^6 + 3,000 \cdot 10^6 + 23,500 \cdot 10^6 = 26,564 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

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 et le foudroyage du toit. Dans le bassin de Faulquemont, 71 % du volume total exploité est remblayé (56 % par voie pneumatique et 15 % par voie hydraulique) d'où :

$$V_{\text{rem}} = V_{\text{rem panneaux}} + V_{\text{rem galeries}} = 9,70 \cdot 10^6 + 0,81 \cdot 10^6 = 10,51 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

Le volume de la cuvette d'affaissement calculé d'après les nivellements de surface est de $9,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

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

$$V_{\text{res}} = V_{\text{ext}} - (1 - k_p) \cdot V_{\text{rem}} - V_{\text{aff}} \quad (5)$$

$$V_{\text{res}}(\text{total}) = 26,56 \cdot 10^6 - (1 - 0,15) \cdot 10,51 \cdot 10^6 - 9,41 \cdot 10^6 = 8,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

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 (Fig. 2) et sachant qu'après l'arrêt de l'exploitation, le débit d'exhaure minière est constant et égal à $24,5 \text{ m}^3/\text{min}$, il est possible d'estimer le volume d'eau nécessaire à l'ennoyage du réservoir en fonction des cotes NGF (Fig. 4). Cette figure présente la courbe déduite du volume d'eau nécessaire à l'ennoyage du réservoir et la courbe du volume des vides miniers résiduels 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.

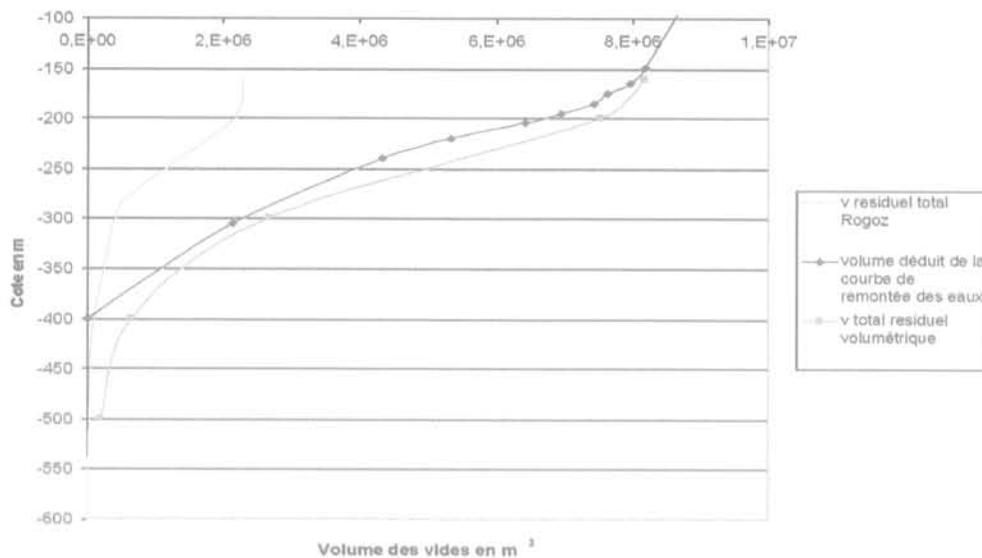


FIG. 4 Comparaison entre la répartition selon la profondeur des volumes des vides résiduels cumulés par la méthode empirique de M. Rogoz (1978), par la méthode volumétrique et par le volume mesuré d'après la remontée de l'eau.

Compared repartition of the residual mining voids versus depth evaluated from empirical and volumetric methods and from the volume of the water flooding.

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 $8,23 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Le volume total des vides miniers résiduels liés à l'exploitation souterraine est égal à $8,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Entre les cotes - 400 et - 160 m NGF, ce volume vaut $7,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

3.3.4

Interprétation

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

Ces deux méthodes consistent à appliquer aux volumes des travaux exploités à la profondeur considérée un coefficient réducteur lié au mode de traitement de l'arrière-taille.

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 M. Rogoz.

TABLEAU I Comparaison des résultats de la méthode volumétrique et de la méthode de M. Rogoz.

Comparison of the results obtained respectively with volumetric and empirical methods.

	Méthode volumétrique	Méthode empirique
$V_{\text{res}} / V_{\text{ext}}$	30 %	9 %
$V_{\text{res}} / V_{\text{ext}} - V_{\text{rem}}$	86 %	25 %
$V_{\text{res}} / (V_{\text{ext}} - V_{\text{rem}})$	50 %	15 %

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 Blanzly (Le Gac *et al.*, 1992). Le calcul avait permis d'évaluer le volume résiduel (ou volume du réservoir minier) à environ $V_{\text{res}} = 2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, soit 30 % du volume des vides initial ($V_{\text{ext}} - V_{\text{rem}}$), ou encore 44 % du volume de la cuvette d'affaissement (V_{aff}).

Une approche pratiquement identique a également été mise en œuvre par l'école 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 $V_{\text{res}} = 11 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, soit 29 % du volume total extrait (V_{ext}), 34 % du volume des vides miniers initial ($V_{\text{ext}} - V_{\text{rem}}$), 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 conduisent à considérer que la méthode de M. Rogoz sous-estime largement le volume des vides miniers résiduels. De plus, les rapports obtenus avec la méthode volumétrique sont comparables à ceux obtenus pour les autres bassins. On en déduit que les résultats issus de la méthode volumétrique sont plus satisfaisants. Par conséquent, le volume des vides résiduels retenu à partir de cette analyse pour l'ensemble du bassin de Faulquemont à la fin de l'exploitation est estimé à $8,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

• *Volume des vides résiduels calculé par la remontée de l'eau*

Le volume d'eau nécessaire à l'ennoyage des travaux miniers du bassin de Faulquemont de la cote - 400 à la cote - 160 m NGF (sommet des travaux) est égal à $8,23 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Le volume total des vides résiduels provoqués par l'exploitation souterraine vaut $8,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Entre les cotes - 400 et - 160 m NGF, ce volume est égal à $7,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Le volume d'eau injecté est donc légèrement supérieur à celui des vides résiduels, d'une différence de $0,73 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, ce qui représente un peu moins de 10 % du volume des vides résiduels estimé. Cette différence de volume peut aussi être éventuellement attribuée à la part des terrains constituant l'ensemble du réservoir minier qui s'est trouvée désaturée pendant l'exploitation, avant de se resaturer lors de l'ennoyage des travaux consécutif à la remontée des eaux (Wojtkowiak et al., 2000). Partant de cette hypothèse, si on calcule le volume des terrains susceptibles d'avoir été influencés par les travaux miniers, on obtient :

1) avec un angle d'influence de 23° (mesuré par rapport à la verticale) pris de la base des travaux miniers (entre les cotes - 400 et - 200 m) jusqu'au toit du Houiller, puis de 45° du toit du Houiller jusqu'à la surface du sol (morts-terrains), le volume total estimé est de $8\,260 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

2) avec un angle d'influence moyen de 35° mesuré de la base des travaux jusqu'à la surface, le volume total estimé est de $7\,600 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Ainsi, si on rapporte la différence de volume d'eau de $0,73 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ à chacune de ces estimations du volume des terrains susceptibles d'avoir été influencés par l'exploitation souterraine, on peut calculer la porosité supplémentaire induite dans ces terrains par cette exploitation. On obtient dans les deux cas une porosité induite inférieure à 10^{-4} soit moins de 0,01 %, ce qui est on ne peut plus négligeable surtout lorsqu'on la compare à la porosité moyenne des grès vosgiens par exemple qui est de l'ordre de 0,15 ou 15 %. Il semblerait donc que la contribution de la porosité supplémentaire induite dans les terrains environnants et/ou du volume d'eau provenant d'une éventuelle désaturation des terrains influencés par l'exploitation reste négligeable comparée au volume des vides miniers résiduels engendrés par l'exploitation.

4

Conclusion

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, proposée par M. Rogoz (1978) pour les bassins miniers polonais, n'est pas adaptée aux bassins miniers français du fait vraisemblablement des différences notables des contextes géologique et minier entre les exploitations françaises et polonaises. En revanche, les calculs réalisés par la méthode volumétrique donnent des résultats jugés satisfaisants lorsqu'ils sont confrontés au volume d'eau nécessaire à l'ennoyage du réservoir minier déterminé à partir de la courbe de remontée de son niveau piézométrique. D'autre part, l'évaluation de ce volume conduit à une valeur légèrement supérieure à celle du volume des vides miniers résiduels estimé. Cette différence semble indiquer que la porosité supplémentaire liée à la fracturation des terrains induite par l'exploitation et/ou leur degré de désaturation restent négligeables comparés aux volumes des vides miniers résiduels et à la porosité initiale de ces terrains.

Par ailleurs, suite à l'ennoyage du bassin houiller de Faulquemont, un léger soulèvement des terrains de surface, d'ordre pluri-centimétrique a été mesuré. L'amplitude maximale de ce soulèvement du sol (14 cm) ne représente que quelques pour-cent (5 à 7 %) de l'amplitude globale de l'affaissement mesuré pendant l'exploitation (2 à 3 m). Ce phénomène n'a pas eu de conséquences dommageables pour le bâti et les infrastructures de surface car ces mouvements de soulèvement restent de faible amplitude et sont lents, progressifs et relativement homogènes sur l'ensemble du secteur affaissé.

Enfin, les résultats obtenus sur le secteur de Faulquemont ne doivent donc pas pour autant conduire à une condamnation définitive de la technique d'interférométrie radar différentielle pour la surveillance des mouvements de terrain dans les régions minières en voie de cessation d'activité. En effet, la technique des réflecteurs permanents, en cours de développement, semble une alternative dans un contexte comparable à celui de Faulquemont. Cette technique vise à cumuler les interférogrammes d'une série temporelle sur des pixels contenant des cibles restées cohérentes (bâti, structures métalliques...). Ainsi, on peut ainsi s'affranchir de la limitation introduite par la perte de cohérence tout en améliorant la précision accessible. Ces réflecteurs permanents sont identifiés à partir des caractéristiques de rétro-diffusion issues des images d'intensité. La densité du réseau de réflecteurs permanents doit par ailleurs être compatible avec le gradient de déformation maximum mesurable entre les dates extrêmes de la série. Ceci rend la méthode plus adaptée aux mouvements continus de faible vitesse.

- Babot Y. – *Bilan des effets des travaux sur les eaux. Étude hydrogéologique et hydrologique*. HBL – Concession De Wendel. Rapport ANTEA n° A 09302, 1997.
- Bekendam R.F et Pöttgens J.J.E. – 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, IAHS Publ., October 1995, n° 234, p. 3-12.
- Bukowski P. – 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.
- Carnec C. – Un exemple de suivi par satellite des déformations de surface : l'interférométrie radar. *Mines et Carrières-Industrie minière*, vol. 10, juin 2001, p. 36-38.
- Carnec C., Raucoules D. – *Étude de faisabilité : détection et suivi de déformations de surface liées à l'existence de cavités minières souterraines par interférométrie radar différentielle. Applications à la région de Faulquemont, bassin houiller lorrain*. Rapport BRGM, RP-50228-FR, mai 2000, 48 p.
- Degas M. – *Étude 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.
- Dolliazai M., Salignac A.L., Yang B., Cheimanoff N., Ledoux E., Mercier D. – *Modélisation de la remontée de pression de gaz dans les anciens travaux miniers du bassin Nord-Pas-de-Calais. Étude de la faisabilité appliquée à la fosse d'Arenberg*. École des Mines de Paris, ARMINES, avril 1994.
- Fenk J. – *Zeitreiheanalyse für Hebungsprozesse über stillgelegten Steinkohlen-Bergwerken*. Moderne Messtechniken und Deformationanalyse, 41. DMV-Tagung Bad Neuenahr 10, 1997.
- HBL – Rapport final réalisé dans le cadre du projet ECSC agreement 7220-AF/014, 1999.
- Le Gac H., Rémond C., Josien J.P. – *Étude de la remontée des eaux après la fermeture des travaux miniers à Blanzly (71)*. Rapport n° 1 : Étude d'impact prévisionnelle, BRGM/INERIS, décembre 1992.
- Piguet J.P. et Wojtkowiak F. – Affaissements et déformations au-dessus des exploitations minières : mécanismes et évolution dans le temps. *Mines et Carrières - Industrie minière*, vol. 10, juin 2001, p. 9-21.
- Pöttgens J.J.E. et Van Herk J.M. – Ground movements over abandoned coal mines in relation to rising mine waters in Limburg (The Netherlands). *Mines et Carrières - Industrie minière*, vol. 10, juin 2001, p. 86-90.
- Proust A. – Étude sur les affaissements miniers dans le bassin du Nord et du Pas-de-Calais. *Revue de l'industrie minière*, vol. 46, n° 6 et 7, juin-juillet 1964.
- Rogoz M. – Water capacity of abandoned working in underground coal mines. *Proc. Int. Conf. Water in Mining and Underground Works*, SIAMOS, Granada, Spain, 1978.
- Thoraval A. – *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., Couillet J.C., Daupley X. et Tauziède C. – Geotechnical and environmental impacts on the surface of water rising in French underground coal mines after closure. *7th Int. Mine Water Association Congress*, Katowice-Ustron, Poland, september 2000.
- Wojtkowiak F. – *Suivi des mouvements de la surface du sol par nivellement et par interférométrie SAR différentielle depuis l'arrêt des pompes d'exhaure dans le secteur de Faulquemont (Moselle)*. Rapport INERIS DRS-01-23740/R01, septembre 2001.