

Analyse des mesures d'affaissement et de mouvement horizontal induit par l'exploitation d'une mine de charbon sous un château d'eau

Analyze of subsidence measurements and horizontal movement induced by the exploitation of a coal mine under a water tank

Al Heib M. et Noirel J.F.***

INERIS – LAEGO : Ecole des Mines de Nancy. Parc de Saurupt 54042 Nancy

CDF : 2 rue de Metz Freymin Merlebach

Résumé : L'exploitation du dernier panneau de mines de charbon françaises a bénéficié de mesures de déplacements verticaux et horizontaux. Les paramètres relatifs à la cuvette d'affaissement et son évolution, notamment la période de stabilisation des mouvements (affaissement résiduel), ont été analysés. Nous avons également analysé l'amplitude des déformations horizontales du château d'eau du village, un paramètre important pour qualifier les dommages.

Mots clés : Affaissement résiduel, prédiction, mesures, déformation, structures.

Abstract : The exploitation of last panel of French coal mines has been accompanied with measurements of vertical and horizontal displacements. The parameters relating to the subsidence and its evolution according to time and in particular the stabilization period of the movements (residual subsidence) were analyzed. We also analyzed the amplitude of the horizontal deformations of the water tank of the village, an important parameter to qualify the damage.

Key words: Residual subsidence, prediction, measurements, strain, structures.

1 Introduction et objectif

La prévision de l'affaissement dû à l'exploitation minière (charbon, fer, sel, etc.), a de tout temps constitué une priorité pour CdF. Plusieurs approches ont vu le jour et sont couramment utilisées (Arcamone, 1989, Al Heib, 1993, Aissaoui, 1999). Les méthodes empiriques basées sur les mesures et le retour d'expérience restent les plus robustes et pragmatiques (Al Heib et al. 2001). Les points suivants nécessitent toutefois, un travail complémentaire de recherche : la mesure et la qualification de la déformation horizontale puis l'amplitude de l'affaissement résiduel et la durée de stabilisation de l'affaissement. Cette analyse complète les nombreuses études réalisées par Charbonnages de France et l'INERIS au vu du traitement des dossiers d'affaissement résiduel. L'exemple traité dans cet article correspond à un cas complet et bien documenté.

Il s'agit de l'exploitation du secteur 7 de l'Unité d'Exploitation La Houve Charbonnages de France correspondant à la dernière d'une longue histoire de l'exploitation du charbon en Lorraine.

La rétro-analyse réalisée a pour objectif de vérifier le modèle de prévision d'affaissement adoptée pour le cas d'exploitation de la Houve grâce à la comparaison avec les mesures réalisées avant, pendant et après l'exploitation de deux panneaux. Les deux approches empiriques utilisées sont l'approche de Proust (1964) et l'approche de NCB¹ (1975) adoptées aux Houillères de Bassins de Lorraine (HBL). Les mesures de distances entre les points de mesures permettent notamment de préciser l'amplitude des déformations horizontales, un paramètre rarement mesuré et souvent utilisé pour qualifier les dommages sur les structures et les infrastructures.

¹ NCB : National Coal Board (Royaume-Uni)

2 Affaissement et paramètres associés

Chaque vide souterrain artificiellement créé perturbe l'équilibre initial et induit des mouvements en surface. Lorsqu'apparaissent les mouvements dus aux exploitations souterraines (stade final), on observe un déplacement des points du sol suivant la verticale, c'est l'**affaissement** proprement dit ainsi qu'un **déplacement** dans le plan horizontal. Des déplacements différents entre deux points voisins induisent des **déformations** du sol ou variations différentielles de la longueur du sol : une variation positive correspond à une **extension**, et une variation négative correspond à une **compression**. L'affaissement lui-même, différent d'un point à un autre, génère un déplacement différentiel appelé **pente** dont la variation est la **courbure**.

La figure 1 montre les formes des courbes correspondant à chacun des termes ainsi définis. L'affaissement est caractérisé par :

- angle d'influence (γ) : c'est l'angle formé par la verticale élevée en un point à la limite des travaux et la ligne qui joint ce point à celui de la surface où les mouvements deviennent négligeables.

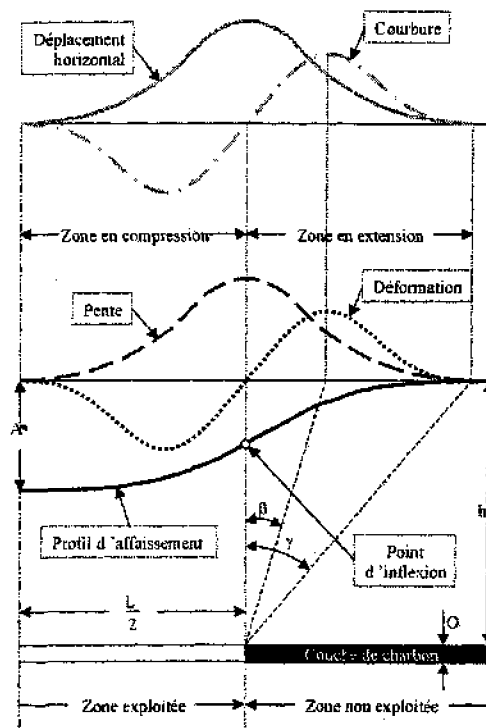


Figure 1 : Les différents mouvements de surface engendrés par une exploitation horizontale.

- angle de fracture (β) : c'est l'angle formé par la verticale élevée en un point à la limite des travaux et la ligne joignant ce point à celui de la surface où les déformations sont maximales.
- affaissement maximum (A_m) : pour une exploitation à une profondeur donnée, l'affaissement en surface croît en fonction des dimensions caractéristiques (largeur et longueur) de l'aire exploitée, mais il ne peut dépasser une valeur limite appelée **affaissement maximum**.

L'affaissement maximal est obtenu pour une aire d'exploitation critique correspondant à une surface exploitée dont les dimensions caractéristiques induisent un seul point d'affaissement maximum en surface. L'affaissement est moins important pour une aire sous-critique.

3 Présentation du secteur 7

L'exploitation du secteur 7 de l'Unité d'Exploitation de la Houve aux Houillères du Bassin de Lorraine (HBL) a concerné une seule veine, la veine Albert se limitant à deux panneaux (7-2-1 et 7-2-2), séparés par un pilier de 100 m de large. L'exploitation est située à une profondeur d'environ 600 m par rapport à la surface, le pendage des veines, dont la veine Albert, dans cette zone est de 17°. Un banc horizontal de grès vosgien de 200 m d'épaisseur surplombe les terrains houillers. L'affaissement a concerné pour l'essentiel la commune de Porcellette. Le tableau 1 présente les caractéristiques des deux panneaux exploités. Ils sont largement sous-critiques.

Tableau 1 : Caractéristiques géométriques des panneaux du secteur 7

| | 7-2-1 | 7-2-2 |
|------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Période d'exploitation | janvier 99 à décembre 99 | septembre 00 à septembre 02 |
| Ouverture | 3,5 m | 3,75 |
| Profondeur moyenne | 615 m | 650 m |
| Largeur | 240 m | 240 m |
| Longueur | 650 m | 900 m |
| Largeur/profondeur | 0,40 | 0,37 |
| Longueur / profondeur | 1,05 | 1,38 |

4 Analyse des mesures d'affaissement disponibles

4.1 Présentation et analyse des mesures réalisées in situ

L'affaissement induit a été suivi en réalisant des mesures de nivellement régulières, tous les trois mois durant la phase de l'exploitation. La détermination de la zone d'influence de l'exploitation est réalisée pour un affaissement de 5 cm. La figure 2 présente un profil d'affaissement Nord-Sud, perpendiculaire à l'axe des panneaux. L'affaissement maximal est localisé pratiquement au centre du premier panneau exploité 7-2-1, il est égal à 75 cm. Il vaut environ 50 cm au centre du deuxième panneau 7-2-2. La cuvette d'affaissement ainsi que le profil ne montrent pas d'influence du pilier sur l'affaissement. L'affaissement est stabilisé à la date de 19 décembre 2003, soit 15 mois après l'arrêt de l'exploitation du deuxième panneau du secteur 7-2-2. Ceci est parfaitement compatible avec l'expérience acquise dans le bassin houiller de Lorraine, selon laquelle la durée de la phase de l'affaissement résiduel est généralement de l'ordre de 12 à 18 mois.

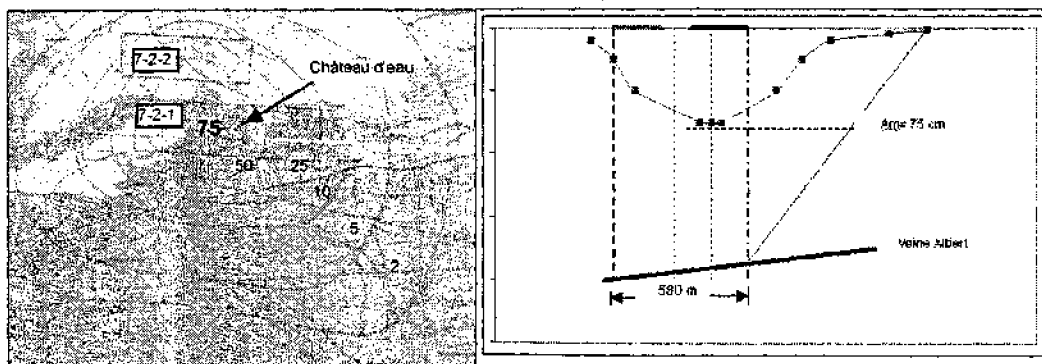


Figure 2 : Carte d'affaissement (cm) et profil passant au centre de la cuvette

4.2 Méthodes de prévision de l'affaissement

Il existe plusieurs méthodes (approches) permettant de réaliser une prévision de l'affaissement résultant d'une exploitation minière. Les deux méthodes habituellement utilisées dans les mines de charbon françaises pour la prévision de l'affaissement sont :

- la méthode de Proust, 1964 permet de calculer l'affaissement au centre de(s) panneau(x), elle est empirique et basée sur une formule donnée par la relation suivante :

$$\text{Affaissement maximal} = \text{ouverture} * f1 * f2 * g$$

Avec

f1 : dépendant de la méthode d'exploitation et du mode de traitement de l'arrière taille. Il est égal, pour les exploitations lorraines, à : 0,1 pour un remblayage hydraulique, 0,5 pour un remblayage pneumatique et 0,9 pour un foudroyage ;

f2 : facteur décroissant avec la profondeur, il est égal à 1 pour des profondeurs de l'ordre de 500 à 600 m (pour les mines de charbon françaises) ;

g : coefficient correcteur variable selon les dimensions de la surface exploitée, il est égal à 0,25 pour des surfaces largement sous-critiques et 1 pour des panneaux critiques et sur-critiques.

- la deuxième méthode de prévision est la méthode NCB. Cette méthode nécessite la construction d'une courbe spécifique des rapports affaissement/ouverture et largeur/profondeur (figure 3).

Les deux méthodes sont empiriques et présentent l'avantage d'être simples à utiliser. Chacune présente des inconvénients. On note particulièrement la difficulté d'obtenir une cuvette complète d'affaissement et de faire une prévision pour des panneaux sous-critique avec la méthode de Proust qui surestime sensiblement l'affaissement pour des panneaux sous-critiques (figure 3). Elle est, en revanche beaucoup mieux adaptée à des largeurs de panneaux critiques ou sur-critiques. En revanche la méthode de NCB est plus avantageuse sur ce point mais ne tient pas compte de la longueur des panneaux.

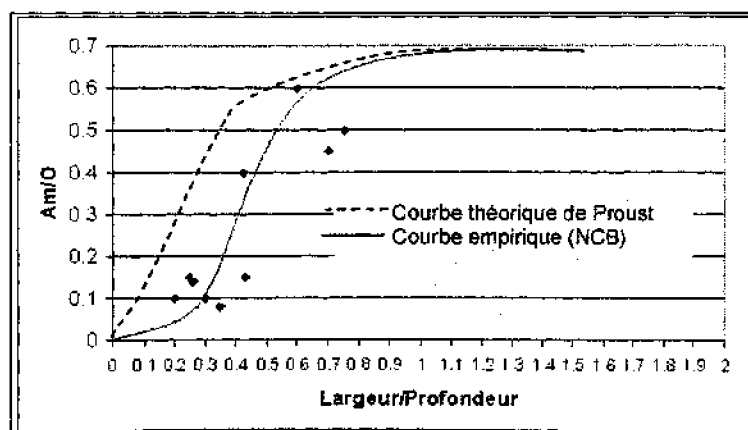


Figure 3 : Courbe de prévision d'affaissement en fonction de la largeur et de la profondeur de(s) panneau(x) exploité(s)

Nous avons réalisé une prévision avec les données disponibles pour les deux panneaux. Les caractéristiques géométriques des deux panneaux figurant dans le tableau 1 ont été prises en compte pour mener à bien les calculs d'affaissement au centre de chaque panneau. Les panneaux sont sous-critiques et séparés par un pilier. La courbe nécessaire pour la prévision de l'affaissement par la méthode de NCB a été établie grâce à une étude de l'ensemble des mesures d'affaissement de 7 secteurs du champ de Vernejoul Ouest - La Houve. Le tableau 2 présente les paramètres nécessaires pour les deux méthodes de prévision de l'affaissement. Précisons que les paramètres des calculs choisis correspondent

à une interpolation des valeurs fournies par la courbe de la figure 3 et les tableaux de méthode de Proust.

Tableau 2 : Prévion de l'affaissement selon deux méthodes : Proust et NCB

| Panneau | | 7-2-1 | 7-2-2 |
|--------------|---------------------------------------|--------|--------|
| Méthode | Ouverture (m) | 3,5 | 3,75 |
| Proust, 1964 | g | 0,62 | 0,52 |
| | f1 | 0,9 | 0,9 |
| | f2 | 1 | 1 |
| | Affaissement au centre (HBL) | 2,17 m | 1,95 m |
| NCB, 1975 | Coefficient largeur | 0,2 | 0,2 |
| | Coefficient longueur | 0,71 | 1 |
| | Affaissement au centre (NCB modifiée) | 0,75 m | 0,50 m |

La comparaison entre les deux méthodes de calcul d'affaissement montre un écart très important. L'affaissement maximal, d'après la méthode de Proust, est égal 3 à 4 fois celui de la méthode de NCB. Le calcul réalisé à partir de la courbe empirique de la Houve selon la méthode de NCB fournit des résultats proches des mesures. Cette comparaison est également utile pour l'estimation de l'affaissement résiduel. Généralement l'affaissement résiduel est compris entre 5% et 10% de l'affaissement total mesuré au centre de la cuvette (Piguet J.P. et Wojtkowiak F. 2001).

4.3 Comparaison de la déformation maximale et de la pente maximale

Pour réaliser la prévision de la déformation horizontale maximale (en extension et en compression) et la pente maximale induite par l'exploitation, on utilise généralement les relations empiriques suivantes valables pour les deux méthodes :

$$\text{Déformation horizontale maximale} = \alpha (\text{Affaissement} / \text{profondeur})$$

$$\text{Pente maximale} = \beta (\text{Affaissement} / \text{profondeur})$$

Nous avons utilisé l'affaissement maximal mesuré au centre de panneau 7-2-2 pour déterminer la déformation horizontale maximale et la pente maximale. Nous avons également adopté les valeurs de coefficients α et β relatives à l'expérience des mines françaises et pour des panneaux sur-critiques.

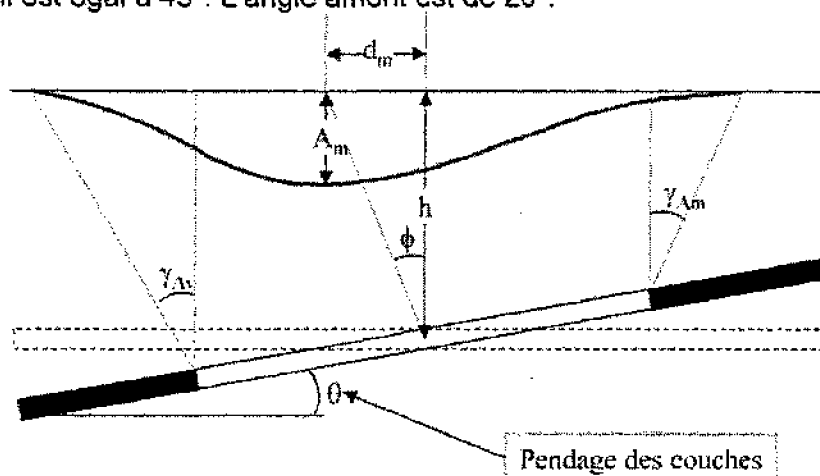
Le tableau 3 présente les valeurs obtenues. On note que la pente calculée à partir de deux courbes d'iso-affaissement est de 0,2 %. La valeur donnée par la prévision à partir de la relation empirique est 0,16 %. Les deux valeurs sont très proches. En revanche, les mesures de nivellement ne permettent pas une comparaison directe avec la déformation maximale estimée. La prévision de la déformation maximale et de la pente à partir des relations empiriques en utilisant une bonne prévision de l'affaissement maximal est tout à fait acceptable.

Tableau 3 : Estimation et comparaison de la pente maximale et de la déformation de deux panneaux

| Panneau | 7-2-1 | 7-2-2 |
|--|------------|-----------|
| Affaissement Aff. (m) | 0,50 | 0,75 |
| Profondeur (m) | 615 | 650 |
| α et β | 1,5 | |
| Estimation de la pente maxi. Pmax=1,5 Aff/Prof. | 0,12 % | 0,16 % |
| Mesure de la pente à partir du profil d'affaissement (figure 2) | 0,2% | |
| Estimation de la déformation max. = 1,5 Aff/Prof. | 1,22 mm /m | 1,6 mm /m |

4.4 Angles d'influence

La figure 4 présente le profil d'affaissement théorique d'une veine en pente d'un angle (θ). L'angle d'influence amont (γ_{Am}) est plus petit que l'angle aval (γ_{Av}). L'angle amont, d'après l'expérience des mines de charbon françaises est égal à l'angle d'influence des exploitations en veines horizontales (35°) moins le pendage de la veine. L'angle aval est égal à l'angle des exploitations des veines horizontales (35°) plus le pendage de la veine. Le pendage de la veine Albert est de 17° , ces angles amont et aval doivent être respectivement égaux à 18° et 52° . L'angle aval est pratiquement identique à la valeur déterminée à partir du profil d'affaissement, il est égal à 45° . L'angle amont est de 20° .



h : profondeur moyenne au centre du panneau, ϕ : angle de décalage de l'affaissement, d_m : distance de décalage.

Figure 4 : Profil d'affaissement pour une exploitation ayant un pendage (θ)

5 Analyse des mesures d'affaissement du château d'eau

Le château d'eau, de diamètre 16 m et d'une capacité de 1000 m^3 , se trouvait dans la zone d'influence de l'exploitation de deux panneaux du secteur 7 de la Houve (figures). Il alimente en eau potable la ville de Porcellette. Le réservoir est posé directement sur le sol et partiellement enterré. Il est pratiquement localisé au centre du panneau 7-2-2 (figure).

La prévision de l'affaissement selon la méthode de NCB au niveau du réservoir d'eau est de 7 cm pour l'exploitation du premier panneau et de 40 cm pour le deuxième panneau. Douze points ont été installés par Charbonnages de France pour suivre l'évolution de l'affaissement du château d'eau :

- quatre points de mesures ont été installés, dans le sol, à une distance de 20 m du château d'eau, il s'agit des points 1, 2, 3 et 4.
- quatre points de mesures ont été installés dans le sol, à proximité immédiate du château d'eau (moins de 1 m), 10, 20, 30 et 40 ;
- quatre points de mesures ont été installés sur les parois du château d'eau, points notés 100, 200, 300 et 400.

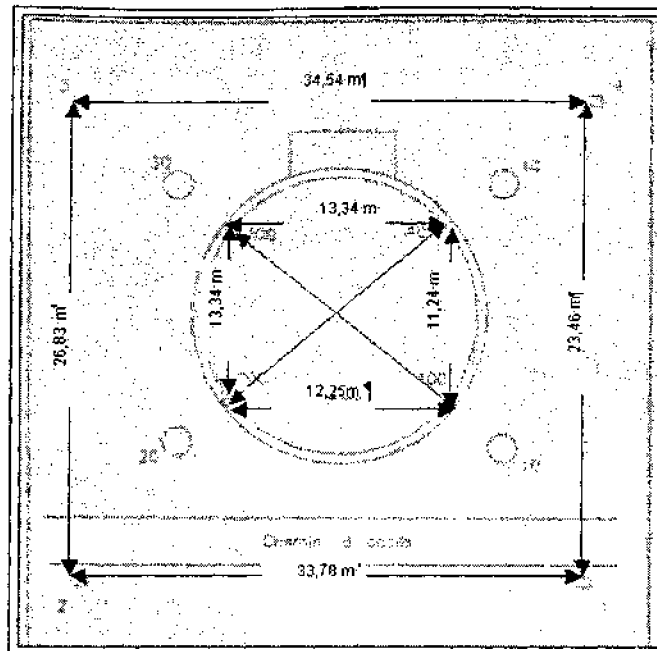


Figure 7 : Plan de château d'eau, localisation de points de mesures

Pour chaque point de mesure les coordonnées (X, Y et Z) des points de nivellement ont été relevées de janvier 1999 à janvier 2005. Le tableau présente les valeurs finales du déplacement vertical (affaissement) des douze points.

La valeur maximale mesurée est de 66,8 cm (point 2) à proximité du chemin d'accès proche du réservoir. La valeur minimale mesurée est de 56,8 cm (point 4), ce point est diamétralement opposé au point 2. On ne note pas d'écart important entre les trois catégories de points de mesures (1 à 4), (10 à 40) et (100 à 400).

Tableau 4 : Déplacement vertical dans la zone du château d'eau

| | | | | |
|-----------------|------------|------------|------------|------------|
| Point | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Dép. Vert. (cm) | 60,1 | 66,8 | 62,9 | 56,8 |
| Point | 10 | 20 | 30 | 40 |
| Dép. Vert. (cm) | 60,3 | 63,2 | 61,9 | 57,8 |
| Point | 100 | 200 | 300 | 400 |
| Dép. Vert. (cm) | 60,3 | 63,2 | 62,1 | 57,8 |

5.1 Analyse de l'évolution de l'affaissement

La courbe de la figure 5 montre l'évolution de la valeur moyenne de l'affaissement de douze points en fonction du temps. On note que l'affaissement est égal à 10 cm après l'exploitation du premier panneau 7-2-1 et 61 cm après l'exploitation du deuxième panneau 7-2-2. L'affaissement est stabilisé 12 mois après l'arrêt de l'exploitation avec une valeur de 60 cm. La figure 6 présente l'évolution de l'affaissement de quatre points 1, 2 (dans le sol) et 100 et 200 (sur les murs du château d'eau) et l'écart entre eux est très insignifiant (figure 6). En conséquence, quelle que soit la position des points de mesures, la rigidité de la structure en béton n'influence pas l'amplitude de l'affaissement.

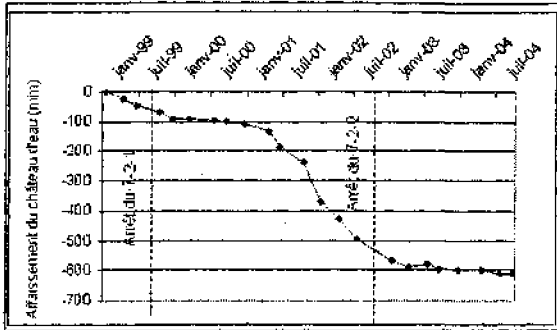


Figure 5 : Profil moyen d'affaissement de douze points de mesures

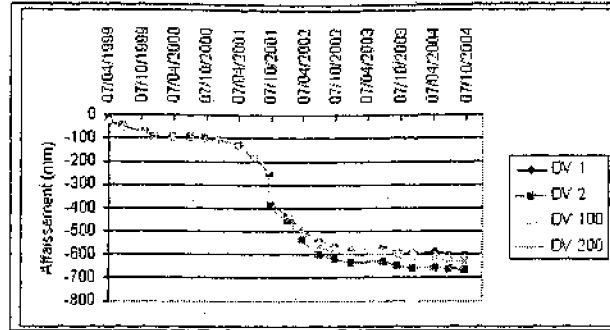


Figure 6 : Comparaison entre les points de mesures installés dans le sol et ceux installés sur le château d'eau

5.2 Analyse des déplacements horizontaux

Grâce aux mesures de distances (de coordonnées X et Y) de chaque point, les variations de la distance horizontale entre deux points successifs de mesures ont été calculées. La figure 7 présente les valeurs de la distance absolue entre les points de mesures du château d'eau. La figure 8 présente l'évolution du déplacement horizontal et du déplacement vertical entre les points 1 et 2 situés dans le sol. On note que la variation des deux déplacements vertical et horizontal suit la même évolution que la progression du front de l'exploitation. L'écart entre les deux composants de variation de déplacements vertical et horizontal est pratiquement de 20 mm. Le déplacement horizontal s'est stabilisé avant le déplacement vertical, le déplacement horizontal final est toutefois pratiquement atteint très peu de temps après l'arrêt de l'exploitation. La figure 9 présente l'évolution de deux points de mesure installés sur le château d'eau. L'évolution de la variation de déplacement vertical est identique aux autres points de mesures. La variation de déplacement horizontal est pratiquement constante. La structure de béton est relativement rigide, la variation de ses dimensions est très faible comparée à celle du sol.

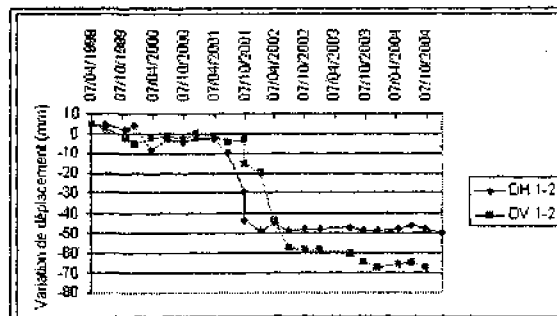


Figure 8 : Evolution de la variation de déplacements de deux points de mesures (1-2) installés dans le sol

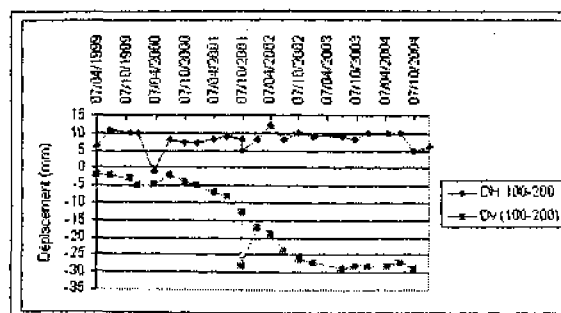


Figure 9 : Evolution de la variation de déplacements de deux points de mesures (100-200) installés sur le château d'eau

5.3 Analyse de la déformation et de la pente maximale

Pour calculer la pente et la déformation horizontale relatives à deux points de mesures voisins, nous avons utilisé les mesures de nivellement (A_v) et la variation de la distance entre les points de mesures (A_h). La figure 7 présente un plan du château d'eau, la localisation des points de mesures et les distances entre les points de mesures.

Une variation de la distance négative correspond à une diminution de la distance initiale donc à un mouvement de compression. En revanche une variation positive correspond à une augmentation de la distance donc à une extension :

- les déformations horizontales les plus élevées concernent essentiellement les points (10, 20, 30 et 40) se situant à proximité du réservoir d'eau, distance comprise entre 60 et 70 cm. En revanche, les points de mesures de la structure (100 à 400) et du sol (1, 2, 3 et 4) montrent une déformation horizontale nettement moins importante ;
- la valeur maximale calculée de la déformation horizontale, en tenant compte du point 30, est très élevée, elle induit théoriquement des dommages horizontaux très sévères (tableau 5). En excluant ce point, la valeur de la déformation maximale se situe autour de 1,5 mm/m et correspond à une classe de dommage « appréciable, tableau 5 ». La valeur de la pente maximale est 3,34‰ correspond également à la classe des dommages légers (tableau 5). Le réservoir d'eau n'a pas subi de dommages et a bien supporté les mouvements induits par l'exploitation des deux panneaux du secteur 7.

Tableau 5 : Synthèse de valeurs seuils pour les différentes classes de dommage

(NCB, 1975, Whittaker et Reddish, 1989)

| Classe de dommage | Déformation (mm/m) | Pente (‰) | Rayon de courbure (km) |
|-------------------|-------------------------|-----------|------------------------|
| Très léger | $\varepsilon < 0,5$ | <2,5 | >50 |
| Léger | $0,5 > \varepsilon < 1$ | <5 | >20 |
| Appréciable | $1 > \varepsilon < 2$ | <10 | >11 |
| Sévère | $2 > \varepsilon < 3$ | <15 | >8 |
| Très sévère | >3 | >15 | <6 |

A partir des valeurs de mouvements mesurées ou calculées, nous avons cherché à estimer les paramètres α et β permettant empiriquement de calculer la pente maximale et la déformation. Nous avons considéré l'affaissement maximal mesuré (0,75 cm) et la profondeur maximale de 650 m.

$$\text{Pente max.} = \beta \frac{A_m}{H} : \beta = (\text{pente} \cdot H) / (A_m) : \beta = (3,34 \cdot 650) / (1000 \cdot 0,75) = 2,9$$

$$\text{Déformation horizontale max.} = \alpha \frac{A_m}{H} : \alpha = (1,5 \cdot 650) / (1000 \cdot 0,75) = 1,3$$

Les coefficients α et β obtenus sont respectivement 2,9 et 1,3. On note que les valeurs de α et β sont supérieures (notamment la valeur de α) aux valeurs données dans les différentes références bibliographiques sans la présence de la structure.

Tableau 6 : Château d'eau – estimation des valeurs d'affaissement, de déplacement horizontal, déformation, et pente, pour les différents points de mesures

Les cellules marquées en jaune sont associées au point de mesure n°30 (point peut-être pas précis)

| N° de repère | | Pente (%) | Def. (mm/m) | N° de repère | | Pente (%) | Def. (mm/m) |
|--------------|------|-----------|-------------|--------------|-------|-----------|-------------|
| 1 | 2 | 1.98 | -1.48 | 10 | 20 | 2.20 | -0.45 |
| | 4 | 1.34 | 0.26 | | 30 | 2.07 | 0.33 |
| | 10 | 0.14 | -0.77 | | 300 | 0.93 | 0.68 |
| | 100 | 0.13 | -0.74 | 20 | -1.43 | -0.28 | |
| 2 | 3 | 1.43 | 0.34 | 30 | 2.13 | 0.72 | |
| | 20 | 2.39 | -1.53 | 20 | 40 | 3.09 | 0.34 |
| | 200 | 2.29 | -1.52 | 100 | 2.37 | 0.49 | |
| 3 | 4 | 1.77 | -0.70 | 200 | 300 | 0.82 | 0.37 |
| | 30 | 0.83 | -1.65 | | 400 | 3.34 | 0.43 |
| | 300 | 0.63 | -1.17 | 400 | 100 | 3.11 | 0.18 |
| 40 | 1.03 | -0.72 | 300 | | 3.22 | 0.37 | |
| 4 | 400 | 0.97 | -0.68 | 100 | 300 | 1.13 | -0.13 |

6 Conclusion

Nous disposons de mesures d'affaissement et des déformations horizontales qui ont permis de vérifier un certain nombre de points relatifs à la prévision d'affaissement. Les méthodes empiriques permettent une prévision de l'affaissement. La méthode de NCB est plus proche de la réalité que la méthode de Proust pour des panneaux sous-critiques. Nous également vérifié que l'affaissement est stabilisé douze mois après l'arrêt de l'exploitation.

Nous avons également démontré, grâce aux mesures de déplacements horizontaux du château d'eau que la déformation horizontale dépend de la rigidité de la structure. La prévision de déformation doit en tenir compte. Les déformations horizontales du château d'eau sont faibles correspondant à une structure plus rigide que le sol.

Cette analyse montre clairement que la prévision de l'affaissement et ses paramètres (immédiat ou résiduel) doit être basée sur le retour d'expérience. La rigidité de la structure modifie la distribution des mouvements.

7 Références

- Aissaoui K. 1999 : Amélioration de la prévision des affaissements dans les mines à l'aide des approches empiriques, numériques et analytiques Thèse INPL, Ecole des Mines de Nancy, 242 p.
- Al Heib M., Linkov A.M., Zoubkov V.V. 2001 : On numerical modeling of subsidence induced by mining. Proceedings of the ISRM Regional Symposium EUROCK 2001. Espoo/FINLAND. 4-7 June 2001 pp. 795-799
- Al Heib M. 1993 : Les nouvelles méthodes de modélisation numériques et le volume d'influence des exploitations minières en conditions complexes ; Thèse de l'INPL 338 p ;
- Arcamone J. (1980) : Méthodologie d'étude des affaissements miniers en exploitation totale ou partielle. Thèse Docteur-Ingénieur, INPL – Ecole des Mines de Nancy.
- NCB (1975) : Subsidence engineer's Hand book. National Coal Board, London 111p.
- Piguet J.P. et Wojtkowiak F. 2001 : Affaissements et déformations au-dessus des exploitations minières : Mécaniques et évolution dans le temps. Mines et Carrières -Industrie Minérale, juin 2001.
- Proust A. (1964) : Etude sur les affaissements miniers dans le bassin du Nord et du Pas-de Calais. Revue de l'Industrie Minérale, Juin-Juillet 1964, 46 n° 6 et 7, 68.