



# Amélioration de la prévision des affaissements dans les mines à l'aide des approches empiriques, numériques et analytiques

Khemies Aissaoui, Jack-Pierre Piguet, Marwan Al Heib, Yves Derrien

## ► To cite this version:

Khemies Aissaoui, Jack-Pierre Piguet, Marwan Al Heib, Yves Derrien. Amélioration de la prévision des affaissements dans les mines à l'aide des approches empiriques, numériques et analytiques. 8. Congrès International de l'Association for Engineering Geology and the Environment, Sep 1998, Vancouver, Canada. pp.3633-3640, 1998. <ineris-00976142>

**HAL Id: ineris-00976142**

**<https://hal-ineris.ccsd.cnrs.fr/ineris-00976142>**

Submitted on 9 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.

# Amélioration de la prévision des affaissements dans les mines à l'aide des approches empiriques, numériques et analytiques

K. Aissaoui & J.P. Piguet

*Laboratoire Environnement, Géomécanique, Ouvrages (LAEGO), Nancy, France*

M. Alheib

*INERIS, Nancy, France*

Y. Derrien

*Houillères de Bassin du Centre et du Midi (HBCM), France*

**RESUME :** Cet article présente l'amélioration d'une méthode empirique pour le calcul prévisionnel des affaissements miniers dite méthode des abaques proposée dans *Subsidence Engineers Handbook (SEH)*. L'objectif est d'intégrer dans la méthode de prévision certains paramètres techniques et géologiques, qui n'ont pas été pris en compte. Ces paramètres sont principalement la simulation de l'aire exploitée et le pendage des veines. Nous présentons, dans un premier temps, le résultat d'une étude de plusieurs cas théoriques afin de dégager des règles simples de simulation de l'aire exploitée pour une meilleure prévision, utilisables par l'exploitant. Dans un second temps, nous présentons les résultats des analyses numérique et analytique du paramètre pendage. Cette méthode est également automatisée dans un logiciel (*SUBSID*). Les deux paramètres étudiés sont intégrés dans le logiciel. Enfin, nous présentons la validation de cette méthode sur plusieurs bases de mesure de nivellement des Houillères de Bassin du Centre et du Midi (HBCM) en France.

## 1 INTRODUCTION

Les mouvements de surface sous l'influence des exploitations minières (phénomène d'affaissement minier) et les désordres qui en résultent ont fait l'objet d'une abondante littérature technique. Plusieurs méthodes ont été développées en vue de prévoir ces mouvements, sur des bases empiriques, numériques et analytiques ([2] et [3]). La complexité du phénomène d'affaissement minier fait que les méthodes analytiques et numériques ne permettent pas une bonne prévision du phénomène. C'est pour cette raison que les exploitants préfèrent les méthodes basées sur l'expérience (empiriques) qui paraissent mieux justifiées quand certaines caractéristiques géologiques (pendage, failles etc...) ne sont pas précisément connues. Parmi ces méthodes, la plus utilisée en France, notamment dans le Nord de la France, a été proposée par Proust [4]. La méthode proposée dans *Subsidence Engineers Handbook* [3] pour les mines britanniques est basée sur l'utilisation d'une part des abaques anglaises du National Coal Board (NCB) permettant le calcul du profil d'affaissement et, d'autre part de la courbe empirique permettant le calcul de l'affaissement maximum ( $S_m$ ) au centre de la surface exploitée.

Cette méthode est utilisée aux Houillères de Bassin du Centre et du Midi (HBCM) dans le cadre de l'exploitation d'une mine de charbon située au Sud de la France. Elle a donné en général une bonne

estimation des affaissements. Cependant cette méthode présente quelques limites :

- la géométrie prise en compte est très simple et ne correspond pas à la réalité de l'exploitation ;
- le pendage des veines exploitées n'est pas pris en compte ;
- aussi l'influence de la géologie, en particulier les failles d'une zone à l'autre du gisement, n'est pas prise en compte.

## 2 DEFINITIONS

Lorsque ont lieu les mouvements dus aux exploitations souterraines, on observe un déplacement des points du sol suivant la verticale, c'est l'affaissement proprement dit et, un déplacement dans le plan horizontal (figure 1). 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 (figure 1).

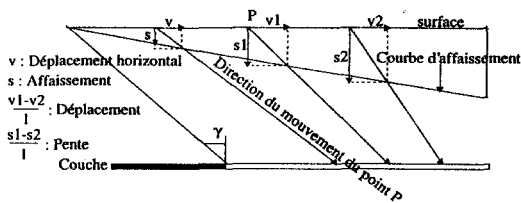


Figure 1 : Relation affaissement déplacement [1].

### 3 PRINCIPE D'UTILISATION DE LA METHODE DES ABAQUES

#### 3.1 Définition

Le principe de la méthode consiste, dans un premier temps, à décomposer fidèlement l'aire exploitée au moyen de blocs (i.e. 1 ou plusieurs panneaux) rectangulaires ou trapézoïdaux (voir figure 2).

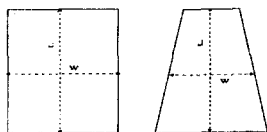


Figure 2 : Les deux formes possibles d'un bloc,  
w : largeur du bloc ;  
L : longueur du bloc.

#### 3.2 Utilisation pratique

Pour chaque bloc on calcule son affaissement maximum  $S_m$  et son profil d'affaissement à partir des figures 3 et 4.

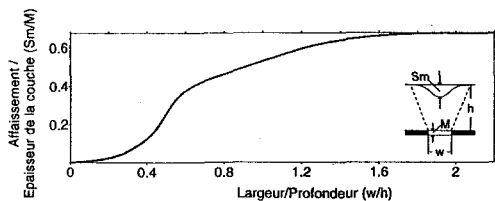


Figure 3 : Courbe de prévision de l'affaissement maximum en fonction du rapport largeur/profondeur.

La courbe de la figure 3 permet de déterminer l'affaissement maximum  $S_m$  au stade final du mouvement, en surface et à l'aplomb du centre du bloc. Elle résulte d'une compilation de données géométriques :

- M : représente l'épaisseur moyenne de la couche exploitée sur la surface du bloc ;
- h : la profondeur au centre du bloc ou la profondeur moyenne des quatre coins du bloc.

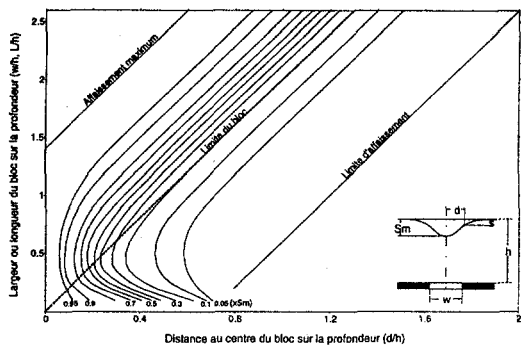


Figure 4 : Abaque pour la prévision des profils d'affaissements d'après le NCB [3].

La figure 4 représente l'abaque permettant de calculer le profil d'affaissement en fonction de l'affaissement maximum  $S_m$ . Cet abaque est adapté seulement pour des exploitations en plateure (couche horizontale) dont la cuvette d'affaissement est symétrique.

### 4 ETUDE DE CAS SIMPLES POUR LA SIMULATION DE L'AIRES EXPLOITEE

Pour étudier l'influence de la décomposition de l'aire exploitée en blocs permettant une meilleure prévision des affaissements, nous avons défini un cas simple d'exploitation en plateure et nous avons comparé les résultats des prévisions d'affaissement de plusieurs décompositions.

Nous avons schématisé le cas d'une exploitation d'extension 1400 x 2200m (figure 5). Nous avons calculé les affaissements en 9 points se trouvant à l'intérieur (le point central n°9 donne l'affaissement maximum) et à l'extérieur de la surface exploitée.

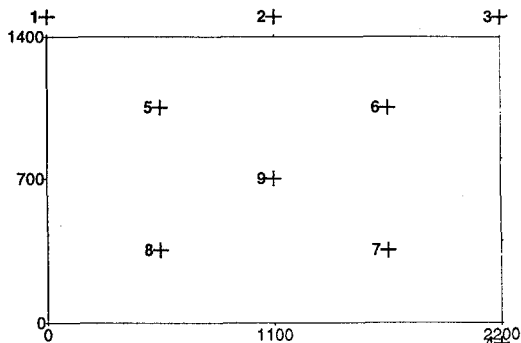


Figure 5 : Surface exploitée avec l'ensemble des points étudiés.

Dans cette étude nous avons pris quatre décompositions différentes (voir figure 6) dont les caractéristiques des blocs sont représentées dans le tableau 1.

Cas	w(m)	L(m)	h(m)	M(m)	w/h	L/h
a	1400	2200	900	2.85	1.55	2.44
b	1100	1400	900	2.85	1.22	1.55
c	440	700	900	2.85	0.49	0.77
d	440	467	900	2.85	0.49	0.52

Tableau 1 : Caractéristiques des blocs des différentes décompositions adoptées.

La décomposition évolue d'un cas grossier (a) où un unique bloc représente l'aire exploitée, à un cas plus fin (d) où 15 blocs représentent l'aire exploitée:

- quand on passe de la décomposition (a) à la décomposition (b) c'est la largeur w des blocs qui diminue;
- de la décomposition (c) à décomposition (d) la largeur reste constante alors que la longueur L des blocs diminue.

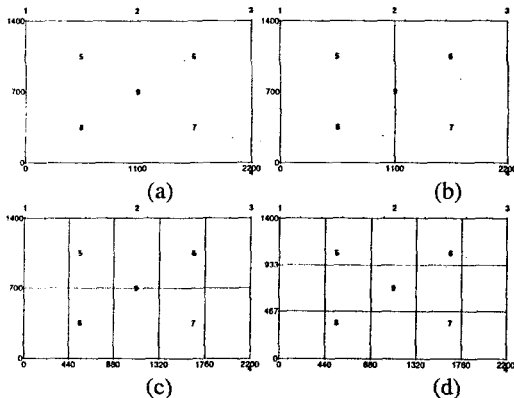


Figure 6 : Différentes décompositions successives adoptées (a, b, c et d).

#### 4.1 Résultats

Nous constatons que pour tous les points qui sont à l'intérieur ou à l'extérieur de la surface exploitée, les affaissements des points diminuent à mesure que la décomposition devient fine (figures 7 et 8), sauf pour le cas de la décomposition (d) par rapport à (c). Les écarts d'affaissement entre les décompositions (a), (b) et (c) sont dus en grande partie à l'abaque de prévision de l'affaissement maximum  $S_m$  qui n'est pas linéaire. En ce qui concerne les décompositions (d) et (c), les écarts d'affaissement sont dus

principalement au fait que le nombre de blocs a augmenté dans la décomposition d. L'affaissement maximum  $S_m$  au centre de ces derniers est resté pratiquement le même que celui donné par la décomposition (c) puisque les blocs des deux décompositions partagent la même largeur.

Nous constatons aussi que pour la décomposition (a), les affaissements des points situés à l'extérieur de la surface exploitée sont de l'ordre de 10 à 20 % de l'affaissement maximum  $S_m$  donné par le point 9.

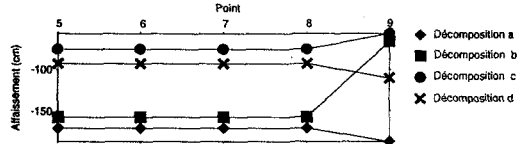


Figure 7 : Comparaison entre les différentes décompositions (points intérieurs)

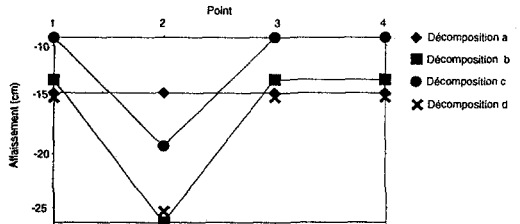


Figure 8 : Comparaison entre les différentes décompositions (points extérieurs)

#### 4.2 Conclusion

Deux points sont à tirer de cette étude :

- les écarts importants des affaissements entre les quatre décompositions étudiées montrent que la méthode des abaques pour la prévision des affaissements n'est pas additive.
- 20 % de l'affaissement maximum  $S_m$  se produit à l'extérieur du bloc décomposé.

Pour le cas étudié, la décomposition (a) est la seule qui permet de représenter fidèlement l'aire exploitée, tout en évitant les erreurs dues à l'additivité. Elle considère l'aire exploitée comme un seul bloc de forme rectangulaire. Lorsque l'on est en présence d'une aire exploitée qui ne peut être décomposée aussi simplement, il est nécessaire autant que possible, de la représenter par des grands blocs de dimensions homogènes afin d'éviter les erreurs dues à l'additivité.

## 5 POSITION DU POINT DE CALCUL ET DECOMPOSITION DE L'AIRE EXPLOITEE

Pour étudier le rapport entre la position du point de calcul et la décomposition de l'aire exploitée, nous avons traité une partie de l'exploitation des HBCM, dans un premier temps sur deux bases aériennes (i.e. groupe de points d'observation en surface) fictives (bases 1 et 2) et dans un second temps, sur une base de mesure de nivellement réelle (base Bouc Bel Air). Le plan de cette partie d'exploitation ainsi que les bases étudiées sont montrés dans la figure 9

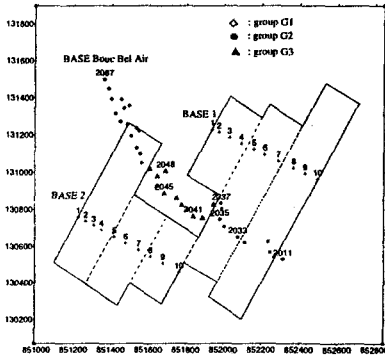


Figure 9 : Géométrie réelle de la mine étudiée.

Deux décompositions sont adoptées pour simuler l'aire exploitée (voir figures 10 et 11). Elles sont constituées de grands blocs rectangulaires représentant fidèlement l'aire exploitée.

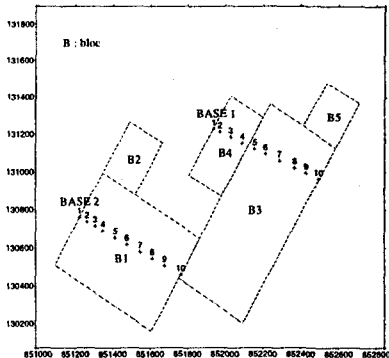


Figure 10 : Décomposition 1

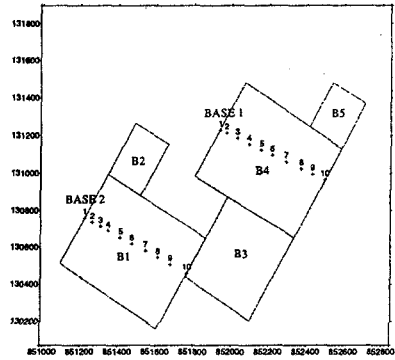


Figure 11 : Décomposition 2.

### 5.1 Etude de la base 1

Dans la décomposition 2 tous les points de la base 1 sont à l'intérieur d'un seul bloc (B4) alors que dans la décomposition 1 les points sont repartis entre deux blocs (B3 et B4). Et, en accord avec ce que nous avons déjà observé dans l'étude de cas simple (§4) entre les décompositions (a) et (b), les affaissements donnés par la décomposition 1 sont beaucoup plus faibles que ceux donnés par la décomposition 2 (figure 12).

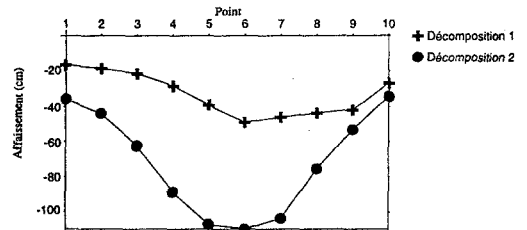


Figure 12 : Comparaison des affaissements des décompositions 1 et 2 par rapport à la base 1.

### 5.2 Etude de la base 2

Les résultats d'affaissement sont tout à fait similaires (figure 13). Le choix de l'une ou de l'autre des deux décompositions conduit au même résultat. Ce résultat paraît logique si on considère que 80% de l'affaissement maximum  $S_m$  réside à l'intérieur du bloc décomposé.

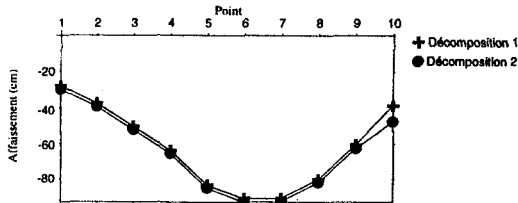


Figure 13 : Comparaison des affaissements des décompositions 1 et 2 par rapport à la base 2.

### 5.3 Validation du choix des décompositions 1 et 2 par rapport à la base Bouc Bel Air (base de mesure réelle).

Les résultats d'affaissement des deux décompositions au niveau de la base Bouc Bel Air sont donnés dans la figure 14.

La prévision des affaissements au niveau de la base Bouc Bel Air nous permet de distinguer trois groupes de points (voir figure 9 et 14) :

- G1 : ce groupe est situé dans la partie où les deux décompositions 1 et 2 sont similaires. Nous constatons que les affaissements des deux décompositions sont pratiquement identiques et très proches des mesures.

- G2 : tous les points de ce groupe sont à l'intérieur de l'aire exploitée. Les affaissements prévisionnels donnés par les deux décompositions sont en général proches des mesures. Nous constatons aussi que les affaissements de la décomposition 2 sont légèrement plus importants que ceux de la décomposition 1, cela est dû au fait qu'au départ, le bloc 3 (B3) dans la décomposition 1 a enveloppé une très grande partie de la surface exploitée. Le fait que ce bloc soit décomposé sur sa longueur entraîne une surestimation des prévisions d'affaissements des points qui s'y situent ainsi que ceux se trouvant à proximité (voir §4.1).

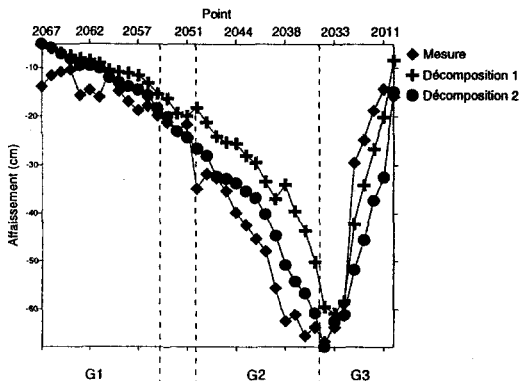


Figure 14 : Comparaison des décompositions 1 et 2 par rapport à la base de mesure Bouc Bel Air.

- G3 : les points de ce groupe appartiennent à une surface non exploitée. Nous constatons, d'une part, que les affaissements donnés par les deux décompositions sous estiment les mesures et, d'autre part, que la décomposition 2 approche mieux les affaissements mesurés car c'est elle qui est constituée de blocs de dimensions homogènes. En ce qui concerne la sous-estimation des affaissements mesurés pour ce groupe, elle est sans doute due au pendage qui n'a pas été pris en compte dans le calcul. L'effet du pendage sera étudié au paragraphe suivant.

## 6 ETUDE DE L'INFLUENCE DU PENDAGE SUR LE CALCUL D'AFFAISSEMENT

### 6.1 Caractéristiques de la cuvette d'affaissement d'une couche inclinée

La figure 15 montre les principaux paramètres caractérisant une cuvette d'affaissement induite par l'exploitation d'une couche inclinée ayant un pendage  $\theta$ . L'affaissement maximum est décalé d'une distance  $d_m$  par rapport à l'aplomb du centre de la zone exploitée.

Ce décalage peut être exprimé par un angle  $\phi$ , appelé angle de déviation de l'affaissement maximum, tel que :

$$\tan(\phi) = d_m / h. \quad (1)$$

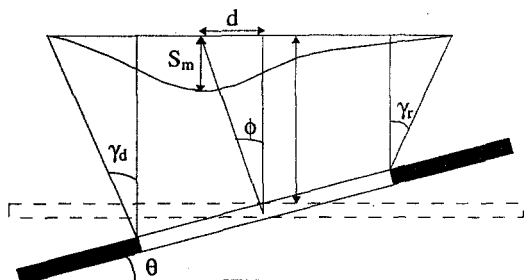


Figure 15 : Principaux paramètres caractérisant une cuvette d'affaissement pour une couche inclinée.

### 6.2 Relation entre le pendage $\theta$ et $\phi$

Il existe une corrélation entre  $\theta$  et  $\phi$  qui dépend essentiellement de la nature des terrains. Par exemple, pour le cas des charbonnages du Royaume Uni (United Kingdom Coal Fields), l'étude empirique conduite par Orchard et al [5] montre que  $\theta = \phi$  tant que  $\theta < 20^\circ$  (voir figure 16). Nous comparerons cette relation à celle adoptée aux HBCM.

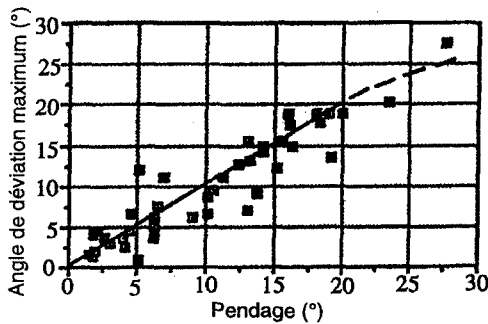


Figure 16 : Relation entre  $\theta$  et  $\phi$  pour les charbonnages du Royaume Uni.[2].

### 6.2.1 Recherche d'une relation entre $\theta$ et $\phi$ pour le cas des HBCM à partir d'une modélisation numérique par élément finis

Pour étudier la corrélation qui existe entre  $\theta$  et  $\phi$  pour le cas des HBCM, nous avons fait appel à la modélisation numérique à l'aide du logiciel CESAR-LCPC [5]. Pour ce faire, nous avons utilisé cinq modèles différents avec un pendage de la couche égal successivement à 0, 8, 10, 15 et 25°, tout en conservant la même profondeur au centre du bloc exploité. Nous avons déterminé ensuite l'affaissement maximum en fonction du pendage. A partir de la relation (1) nous pouvons déduire l'angle de déviation de l'affaissement maximum  $\phi$  correspondant à chaque pendage  $\theta$ .

### 6.2.2 Choix du modèle

Le type de modèle que l'on a adopté est simple dans sa géométrie : la couche de charbon a été présentée avec un toit stratifié, composée de trois bancs principaux, et un mur homogène. La largeur du bloc exploité est prise égale à 200m car, a priori, cette dernière n'influe pas sur l'angle de déviation de l'affaissement maximum  $\phi$  qu'on cherche à déterminer. Pour étudier les déplacements en surface, il s'agit pour nous de modéliser toute la structure surmontant la couche exploitée jusqu'à la surface en tenant compte de la stratigraphie des terrains en place (voir figure 17).

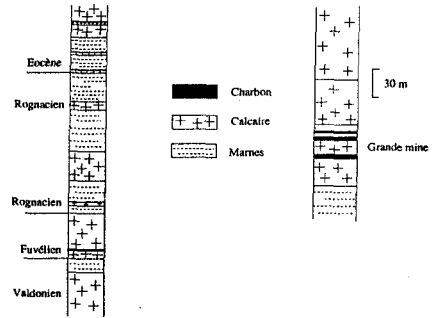


Figure 17 : Log géologique des épontes

### 6.2.3 Chargement et conditions

Pour prendre en compte seulement des déplacements dus à l'excavation, nous avons annulé les déplacements dus au poids des terrains (ce qui revient à ne pas prendre en compte le phénomène de tassement). Tout autour de l'exploitation, nous avons utilisé un chargement en variations de contrainte (contraintes induites par l'excavation). On travaille en déformations planes. Les conditions aux limites adoptées correspondent à des déplacements nuls sur les faces latérales et sur la base du modèle (voir figure 18).

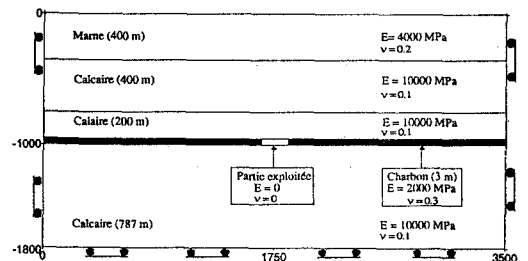


Figure 18 : Schéma représentatif des conditions aux limites adoptées pour le modèle étudié.

### 6.2.4 Résultats

Pour étudier les affaissements en surface nous nous sommes intéressés aux déplacements verticaux à la limite supérieure du modèle. Les résultats des différents modèles sont donnés par la figure 19.

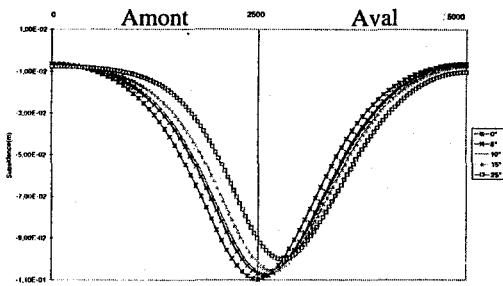


Figure 19 : Cuvettes d'affaissement des différents modèles.

Les caractéristiques de la cuvette d'affaissement ( $S_m$ ,  $d_m$ ,  $\theta$ ,  $\phi$ ) de chaque modèle sont données par le tableau 2.

	Mod 1	Mod 2	Mod 3	Mod 4	Mod 5
$\theta$ (deg)	0	8	10	15	25
$\phi$ (deg)	0	3.57	5	6.42	11.31
$s_m$ (cm)	11.00	10.75	10.70	10.58	10.00
$d$ (m)	0	62.5	87.5	112.5	200

Tableau 2 : Caractéristiques de la cuvette d'affaissement pour différents pendages

Nous constatons d'après les résultats du premier modèle ( $\theta=0$ ) que la forme de la cuvette d'affaissement est symétrique et le point d'affaissement maximum est au centre de l'excavation. Ce résultat reflète bien le cas d'une couche horizontale. Pour les autres modèles, nous constatons que le point d'affaissement maximum n'est plus au centre de l'excavation. Il se déplace progressivement en fonction du pendage vers l'aval de la cuvette (figure 19). La forme de cette dernière est dissymétrique. Ce résultat confirme l'hypothèse admise en pratique (dissymétrie de la cuvette d'affaissement pour des couches inclinées).

La relation entre  $\theta$  et  $\phi$  pour les différents modèles étudiés est donnée dans la figure 20. Nous avons représenté sur l'axe des abscisses les valeurs du pendage  $\theta$  et sur l'axe des ordonnées les valeurs de l'angle de déviation  $\phi$ .

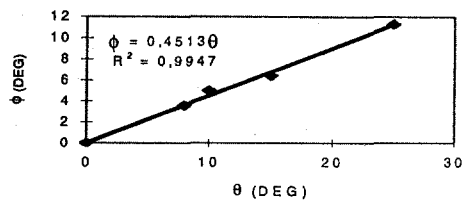


Figure 20 : Relation entre le pendage  $\theta$  et l'angle de déviation  $\phi$  pour le cas des HBCM.

Nous constatons d'après cette relation que la valeur de l'angle de déviation  $\phi$  de l'affaissement maximum  $S_m$  est environ égale à la moitié de la valeur du pendage  $\theta$ . Ce résultat montre que la relation donnée dans Subsidence Engineers HandBook (SEH) pour le cas des houillères britanniques ( $\theta=\phi$ ) n'est, a priori, pas applicable au cas des HBCM.

### 6.3 Prise en compte du pendage dans la méthode des abaques et validation sur le site des HBCM

Le pendage de la veine de la mine (HBCM) est en moyenne égal à  $10^\circ$  (ce qui donne :  $\phi = 5^\circ$ ) avec un azimut N270°E. Ces valeurs sont utilisées dans le calcul prévisionnel. L'affaissement maximum de chaque bloc est décalé dans la direction N270°E d'une distance  $d_m$  donnée par la relation (1). Nous nous intéressons seulement aux points du groupe G3 de la base Bouc Bel Air puisqu'il s'agit des points dont les affaissements sont mal estimés. Pour ce faire, la décomposition 2 (figure 11) est choisie pour la simulation de l'aire exploitée. Les résultats de la prévision sont donnés par la figure 21.

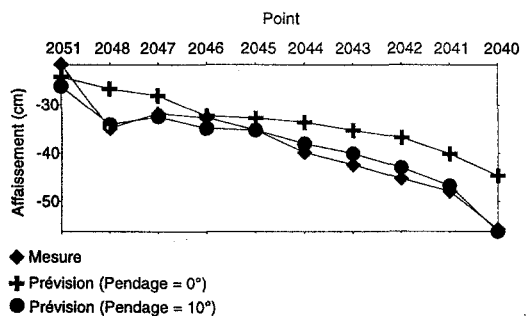


Figure 21 : Comparaison des affaissements prévisionnels avec et sans prise en compte du pendage pour le groupe G3 de la base Bouc Bel Air.

Nous constatons que les prévisions des affaissements des points du groupe G3 sont



nettement améliorées avec la prise en compte du pendage.

[5] CESAR-LCPC (1996)  
Manuel d'utilisation du logiciel CESAR du  
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

## 7 CONCLUSION

L'étude de cas que nous avons menée a montré que le choix de la décomposition de l'aire exploitée est important et est fonction de la position du point de calcul d'affaissement. Cela est dû à la non additivité de la méthode des abaques. Il est important de représenter l'aire exploitée par les plus grands blocs possibles.

Quant à la modélisation numérique, elle a montré que l'angle de déviation de l'affaissement  $\phi$  est d'environ la moitié du pendage  $\theta$  pour le cas des HBCM. La prise en compte du paramètre pendage dans le calcul prévisionnel au niveau des HBCM a beaucoup amélioré les affaissements prévisionnels de la base Bouc Bel Air.

Enfin nous avons montré que la méthode des abaques peut être améliorée mais elle reste une méthode efficace grâce à sa facilité d'utilisation.

L'amélioration de cette méthode permet de mieux maîtriser le phénomène d'affaissement à court terme.

Il reste des cas particuliers qui n'ont pas été abordés dans cet article tel que l'affleurement de faille ou la modification de la topographie. Ces paramètres influencent aussi la prévision de l'affaissement. Néanmoins, l'approche développée dans cet article permet de couvrir la majeure partie des cas.

## 8 BIBLIOGRAPHIE

[1] J. Arcamone (1980)  
Méthodologie d'étude des affaissements miniers en exploitation totale et partielle. Application au cas des Houillères de Provence.  
THESE INPL.

[2] S Lin, B.N. Whittaker and D. J. Reddish (1992)  
Application of asymmetrical influence functions for subsidence prediction of gently inclined seam extractions. j. Rock. Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. Vol. 29, No.5

[3] N Barry, Whittaker and D. J. Reddish (1989)  
Subsidence occurrence, prediction and control.

[4] A. Proust (1964)  
Etude sur les affaissements miniers dans le Bassin du Nord et du Pas de Calais. Revue de l'Industrie Minière.