



**HAL**  
open science

# Affaissements et déformations au-dessus des exploitations minières : mécanismes et évolution dans le temps

Francis Wojtkowiak, Jack-Pierre Piguet

► **To cite this version:**

Francis Wojtkowiak, Jack-Pierre Piguet. Affaissements et déformations au-dessus des exploitations minières : mécanismes et évolution dans le temps. Journée technique CdF, Jun 1998, Hombourg-Haut, France. ineris-00972151

**HAL Id: ineris-00972151**

**<https://ineris.hal.science/ineris-00972151>**

Submitted on 3 Apr 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

*Journée Technique des Charbonnages de France,  
Hombourg-Haut, le 3 Juin 1998*

**AFFAISSEMENTS ET DEFORMATIONS AU-DESSUS  
DES EXPLOITATIONS MINIERES : MECANISMES ET EVOLUTION DANS LE TEMPS**

**Francis WOJTKOWIAK, INERIS**

**Jack-Pierre PIGUET**

Laboratoire Environnement Géomécanique et Ouvrages [LAEGO], Ecole des Mines

## **1 - INTRODUCTION**

---

Toute modification des caractéristiques des vides préexistants dans le sous-sol, qu'elle soit d'origine naturelle ou due à l'activité humaine, est susceptible d'avoir des effets à la surface. Ces effets peuvent prendre des formes phénoménologiques extrêmement différentes selon la nature de ces vides, leur histoire, leur position par rapport à la surface, leur géométrie, leurs relations avec les fluides qui imprègnent les terrains (eau, pétrole), ...

Effondrements brutaux, affaissements plus ou moins lents, tassements ..., tous ces phénomènes n'auront pas les mêmes conséquences pratiques selon leur ampleur, mais aussi selon la vulnérabilité de ce qui se trouve à la surface (habitations, cours d'eau, voies de communication, installations industrielles, terrains agricoles ou déserts). Ces conséquences sont, en outre, modulées par les propriétés des terrains superficiels. Leur plus ou moins grande déformabilité, par exemple, déterminera en partie leur faculté d'adaptation aux déformations.

Pour un même phénomène de base la gamme des conséquences s'étend donc "d'insignifiantes" à "catastrophiques". Afin de délimiter la question, seuls les phénomènes associés aux travaux d'extraction, effectués dans le contexte des mines et carrières souterraines, seront examinés ici. Les subsidences provoquées par l'exploitation du gaz, du pétrole ou des nappes aquifères, les tassements de surface induits par le creusement des tunnels, gares souterraines, ou autres constructions liées au développement de l'urbanisme souterrain, ainsi que les situations associées à des phénomènes naturels (cavités karstiques, extension de cavités de dissolution, retrait/gonflement de sols très argileux en cas de modification de leur teneur en eau, etc...) ne seront donc pas abordés dans cet exposé.

D'autre part, nous concentrerons notre attention sur le cas particulier des exploitations dites totales, pour lesquelles le minerai a été presque intégralement extrait, sur une vaste superficie (chiffrée souvent en km<sup>2</sup>), et très souvent dans plusieurs couches superposées (figure 1).

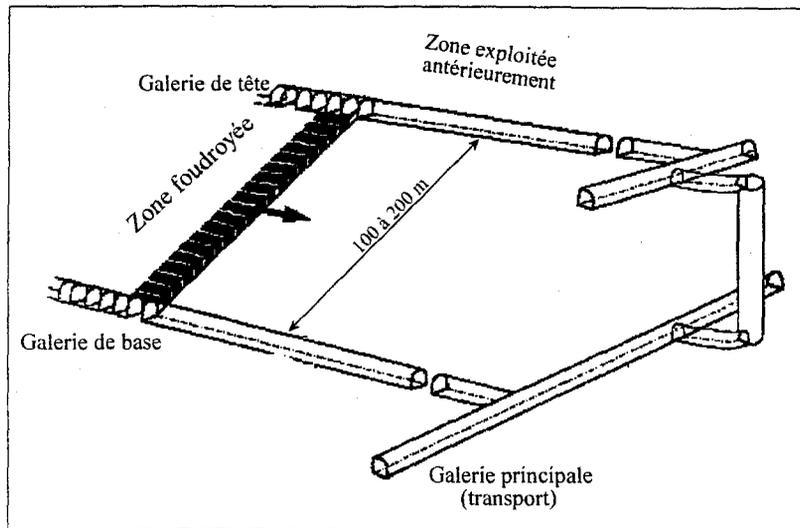


Figure 1 : Exploitation totale par longue taille rabattante foudroyée.

Cette méthode d'extraction est opposée aux exploitations dites partielles, où un pourcentage important de minerai (parfois plus de 50 %) a été délibérément laissé en place sous forme de piliers. Les exploitations par chambres et piliers abandonnés (figure 2), telles que celles rencontrées dans le bassin ferrifère lorrain, font partie de cette catégorie.

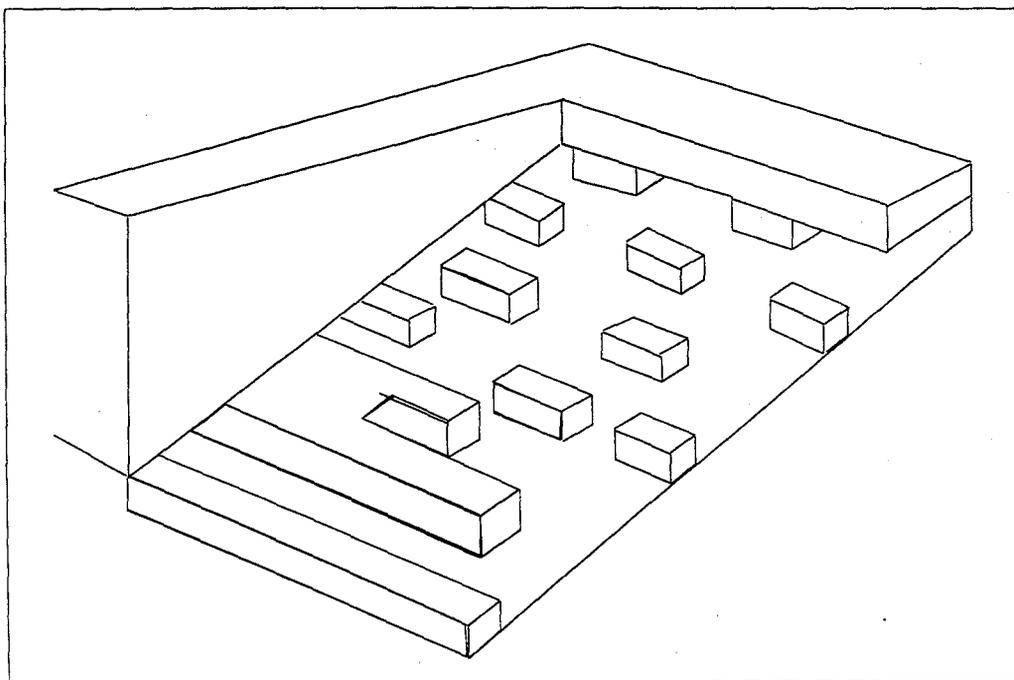


Figure 2 : Exploitation partielle par chambres et piliers abandonnés.

La première forme d'exploitation est celle qui a été et est encore la plus généralement pratiquée dans les bassins houillers français, et a donné lieu aux phénomènes réguliers d'affaissement. La seconde méthode, pratiquée surtout à faible ou moyenne profondeur (typiquement dans les carrières d'extraction de matériaux de construction comme le gypse, la craie, le calcaire ...) est en principe destinée à limiter voire empêcher les affaissements. Mais, en cas de défaillance des piliers, elle peut

être à l'origine des phénomènes d'effondrements brutaux affectant la surface, tels que ceux survenus en 1996 et 1997 à Auboué et à Moutiers (Meurthe-et-Moselle) dans le bassin ferrifère.

Nous analyserons d'abord les phénomènes élémentaires de l'existence et de l'extension des vides souterrains qui interviennent, de façon décisive, dans l'impact à la surface. Ensuite, nous aborderons la question de l'évolution du phénomène d'affaissement pendant l'exploitation et après l'arrêt définitif des travaux miniers.

## 2. LE PHENOMENE ELEMENTAIRE VU DEPUIS LES OUVRAGES SOUTERRAINS : L'ÉBOULEMENT

---

De manière générale, les phénomènes auxquels on s'intéresse ici apparaissent d'abord au niveau des travaux du fond. Dans notre contexte, on peut définir l'éboulement comme la dislocation rapide et la chute des terrains sus-jacents à une cavité. Ce phénomène ne doit pas être envisagé de la même manière selon qu'on le considère à partir des ouvrages souterrains ou du point de vue des conséquences pratiques à la surface.

Au fond, les terrains éboulés autour d'une cavité sont toujours divisés en de nombreux blocs de tailles et de formes variables, et, de ce fait, s'entassent en remplissant un volume plus grand que celui qu'ils occupaient à l'état naturel initial. Le rapport entre ces deux volumes, appelé coefficient de foisonnement et noté  $K$ , joue un rôle déterminant sur les conséquences éventuelles à la surface.

Un calcul simple peut être proposé pour décrire et quantifier ce phénomène. Si on appelle  $W$  la hauteur de la cavité,  $L$  sa largeur et  $h$  la hauteur susceptible de s'ébouler, on écrira que, par "tranche" de cavité métrique dans la 3<sup>ème</sup> dimension :

$$(W + h) \times L = K \times h \times L$$

$$\text{soit } h = \frac{W}{K - 1}$$

Si  $\rho$  représente la densité du terrain en place et  $\rho'$  la densité foisonnée,  $K = \frac{\rho}{\rho'}$ . Mais la mesure précise de  $\rho'$  est malaisée.

Dans les exploitations des charbonnages français, une relation statistique totalement empirique a été établie à partir de nombreuses observations pour estimer  $K$  [MAHMOUD, 1984] tel que :

$$K = 1 + \left( \frac{NB}{Rc} \right)^{1/3}$$

NB étant le nombre de bancs dans les dix premiers mètres du toit, se distinguant entre eux par des contrastes marqués de faciès et de résistance, et  $R_c$  leur résistance moyenne à la compression simple, pondérée par leur épaisseur et exprimée en bar ( $R_c = \sum_{i=1}^{NB} h_i R_{ci}/10$  avec  $\sum h_i = 10$  m).

Pour un terrain massif et assez résistant (par exemple 5 bancs sur 10 m ayant une résistance moyenne de 800 bar) on trouverait  $K = 1,18$ . Pour un terrain finement stratifié (20 bancs de résistance moyenne 100 bar), on trouverait  $K = 1,58$ .

La hauteur  $h$  atteinte par la partie éboulée varie ainsi de 2 à 10 fois la hauteur de la cavité ouverte, pour  $K$  variant respectivement de 1,5 à 1,1. Cette évaluation est confirmée par WHITTAKER et REDDISH [1989] qui indiquent que la hauteur d'une cloche d'éboulement au-dessus des galeries minières est comprise entre 2 et 6 fois leur dimension verticale pour  $K$  variant de 1,5 à 1,2.

Ce phénomène de foisonnement permet aux terrains éboulés de remplir à la fois le volume de la cavité et le volume initial qu'ils occupaient, ce qui a pour effet possible de stopper le mécanisme d'éboulement, les terrains sus-jacents trouvant à ce moment-là un appui sur le tas d'éboulis. Il contribue, par là-même, à limiter la hauteur de cloche d'éboulement à quelques mètres ou dizaines de mètres (par exemple 25 m pour une hauteur de cavité de 2,50 m et  $K = 1,1$ ).

D'autre part, la présence entre la surface et la cavité éboulée d'horizons plus résistants, ou tout simplement capables de conserver une relative continuité géométrique malgré leur mise en flexion, peut aussi suffire à interrompre la propagation de l'éboulement en surface ou à en limiter les effets, à condition que la largeur exploitée ne soit pas trop grande (de quelques mètres à quelques dizaines de mètres là aussi). La probabilité de rencontrer de tels horizons augmente avec l'approfondissement.

C'est pourquoi le scénario d'un éboulement au fond débouchant à la surface et dégénéralant alors en effondrement ne concerne que les cavités à faible profondeur, inférieure à une limite variable selon la nature et la structure des terrains sus-jacents et selon la largeur de la cavité (figure 3). Pour donner un ordre de grandeur, cette limite est en général nettement inférieure à 100 m.

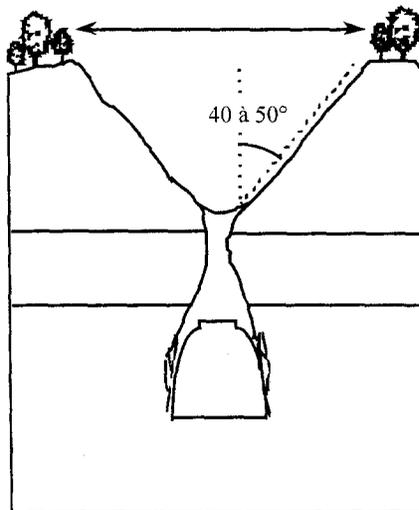


Figure 3 : Exemple d'effondrement de type "fontis".

Dans la plupart des autres cas, l'éboulement au fond a pour conséquence l'apparition d'une cuvette d'affaissement à la surface.

Dans les terrains stratifiés, cette cuvette résulte de la flexion des bancs du recouvrement qui prennent appui sur les éboulis du fond et les tassent. L'amplitude de cette flexion (fréquemment plurimétrique) est évidemment incompatible avec l'hypothèse d'une continuité physique des bancs. Ces derniers sont effectivement prédécoupés par les discontinuités naturelles, et fracturés ou fissurés par les modifications de l'état des contraintes accompagnant l'exploitation. C'est cette fracturation qui donne aux bancs une déformabilité en grand, bien supérieure à celle qui correspondrait aux propriétés élastiques des matériaux qui les constituent, et leur permet de supporter cette flexion sans se déstructurer.

### 3. LE PHENOMENE ELEMENTAIRE VU DEPUIS LA SURFACE : L'AFFAISSEMENT

#### 3.1. Mécanisme de base

Le mouvement d'un point considéré à la surface du sol au dessus d'une cavité souterraine est défini et caractérisé par les déplacements verticaux et horizontaux progressifs ressentis à la surface. L'affaissement proprement dit se distingue des effondrements qui se traduisent par un comportement discontinu dans le temps et dans l'espace (soudaineté de leur apparition et achèvement en quelques minutes ou tout au plus quelques heures, rupture franche à la surface entre la zone effondrée et la zone environnante en place). Naturellement, beaucoup de phénomènes observés se situent à la lisière et sont difficiles à classer.

La "cuvette" d'affaissement est caractérisée par les paramètres suivants (figure 4) :

- la différence de cote du centre de la cuvette par rapport à la cote initiale de la surface. Cet affaissement (déplacement vertical) du centre de la cuvette sera noté  $A$ .
- la largeur de la cuvette : c'est ce paramètre qui permet d'introduire la notion d'angle d'influence, noté  $\gamma$ , défini comme l'angle formé avec la verticale par la droite qui relie un bord de la cavité avec les premiers points de la surface subissant un déplacement négligeable voire nul (quand on s'éloigne de l'aplomb de la cavité).

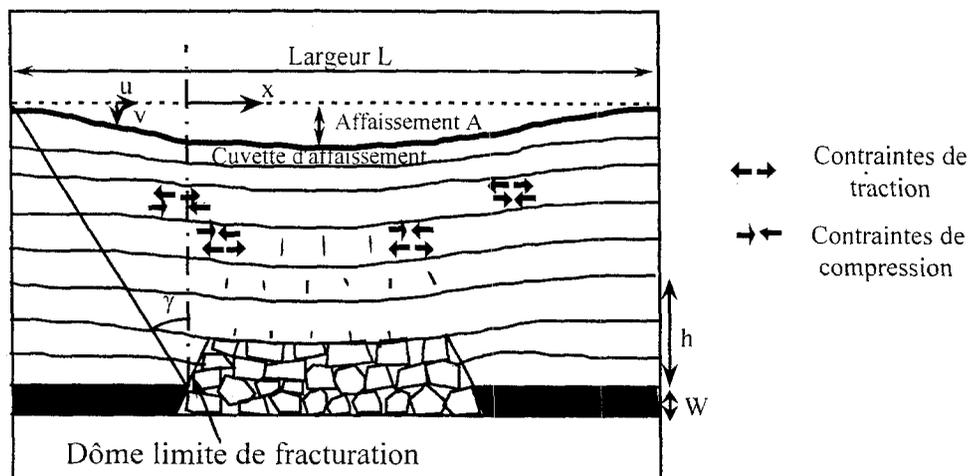


Figure 4 : Mécanisme de base des affaissements de surface.

Le déplacement vertical  $A$  du centre de la cuvette ne peut excéder une valeur qui dépend de plusieurs facteurs, et qu'on appelle affaissement maximum  $A_m$ . Cette valeur est fondamentalement déterminée par le tassement des terrains éboulés, occupant la hauteur de la cavité responsable du phénomène augmentée de la partie du toit éboulée (soit  $W + h$  défini précédemment).

Elle dépend de la déformabilité de ces terrains éboulés et de la charge qui s'exerce sur eux, donc de la profondeur, mais de façon complexe et non linéaire comme il sera expliqué plus loin. A la limite, si le tassement ramenait la densité des terrains éboulés, de hauteur  $h$ , à sa valeur initiale  $\rho$ , l'affaissement  $A_m$  atteindrait au maximum l'ouverture exploitée  $W$  qui constitue donc une borne supérieure de  $A_m$ .

### 3.2. Conséquences du mécanisme de base

En contexte sédimentaire, nous avons vu que les bancs qui composent le recouvrement sont soumis à un régime de flexion dont la flèche est au plus égale à l'affaissement au centre de la cuvette apparaissant en surface.

Cette situation a des conséquences mécaniques, hydrauliques et géométriques importantes :

- chacun des bancs, différencié de ses proches voisins par ses propriétés mécaniques et/ou sa fracturation, est soumis dans sa partie centrale à des contraintes horizontales soit de traction, soit de compression, analogues à celles qui se développent dans une poutre fléchie au-dessous ou au-dessus de la fibre neutre. Des contraintes de ce type apparaissent également au voisinage des encastremements à l'aplomb des bords de la cuvette d'affaissement (figure 4).

De tels états de contrainte agissent sur les fissures ou fractures préexistantes qui traversent les bancs (nous avons vu que ces discontinuités donnaient aux bancs la déformabilité nécessaire pour tolérer des flèches plurimétriques, tout en conservant une continuité apparente à grande échelle). L'ouverture (sous des sollicitations de traction) ou, au contraire, la fermeture (sous les contraintes compressives) de ces fissures ont respectivement tendance à augmenter ou à diminuer localement la perméabilité du massif rocheux fracturé. Les potentialités d'écoulements hydrauliques dans le sens vertical sont ainsi très probablement modifiées, par rapport à l'état initial, mais sans qu'il soit facile de prédire, a priori, quel pourrait être le régime résultant de ces phénomènes complexes et contradictoires,

- les déplacements des points de la surface du sol ont une composante verticale, qui est l'affaissement proprement dit, et une composante horizontale, nulle au centre de la cuvette.

Les ouvrages ou bâtiments construits à la surface sont évidemment sollicités pour accompagner les mouvements des terrains et on sait que les déplacements purement verticaux uniformes sont sans conséquences graves pour les constructions. En revanche, des désordres et dommages peuvent apparaître sur les bords de la cuvette d'affaissement, dus à la mise en pente du sol dans cette zone, à sa courbure et surtout au différentiel de déplacement horizontal entre deux points voisins. Celui-ci s'exprime par la dérivée  $\frac{\partial u}{\partial x}$ ,  $u$  étant la fonction qui décrit l'évolution de la composante horizontale

des déplacements en bordure de cuvette par rapport à une abscisse  $x$  portée sur un axe horizontal, et est appelé déformation horizontale et noté  $\varepsilon_H^1$ .

Les déformations horizontales  $\varepsilon_H$  sont soit des raccourcissements (parfois abusivement appelés compressions) vers l'intérieur de la cuvette d'affaissement, soit des extensions vers l'extérieur de celle-ci par rapport au point d'inflexion.

Il a été montré que ces différentes grandeurs sont proportionnelles à l'affaissement maximal  $A_m$ . Ainsi on utilise classiquement les relations suivantes :

- \* déplacement horizontal maximal :  $u_m = k_1 A_m$   
avec  $k_1$  de l'ordre de 0,4 pour les charbonnages français ;
- \* pente maximale :  $P_m = K_2 \times A_m/H$   
H étant la profondeur du gisement exploité, et  $K_2$  de l'ordre de 2 pour les charbonnages français ;
- \* extension (ou raccourcissement) maximum :  $\varepsilon_m = K_3 \times A_m/H$ , avec  $K_3$  de l'ordre de 0,75 mais pouvant atteindre 2 pour des vides de petites dimensions.

Les dommages consécutifs aux extensions ou raccourcissements sont, en outre, en relation avec la longueur  $L$  des ouvrages qui les subissent. Le degré de gravité des dégâts aux constructions selon les valeurs de  $\varepsilon_H$  et  $L$  est donné à titre indicatif par des abaques du type de la figure 5 établis par les charbonnages du Royaume Uni.

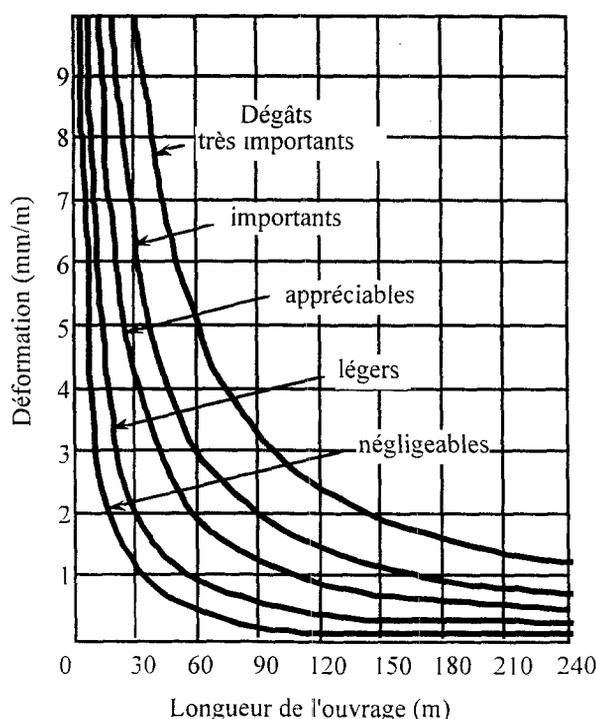


Figure 5 : Caractérisation des dégâts résultant des déformations horizontales.

<sup>1</sup> On admet parfois que la composante horizontale du déplacement est proportionnelle à la dérivée de la composante verticale par rapport à  $x$  (proportionnelle donc à la pente de la cuvette d'affaissement en tout point). Dans cette hypothèse la déformation horizontale  $\varepsilon_H$  est proportionnelle à la dérivée seconde de l'affaissement.

### 3.3 - Influence de quelques facteurs

Les paramètres décrits précédemment, et qui caractérisent le mécanisme de base et ses conséquences, sont influencés par de nombreux facteurs naturels ou liés aux méthodes d'exploitation. Nous examinerons successivement les plus importants d'entre eux, sachant qu'ils peuvent être l'objet de fortes interactions (par exemple entre la profondeur et la largeur exploitée).

#### 3.3.1) Influence du ratio "profondeur sur largeur de la cavité exploitée"

A une profondeur donnée, il existe une largeur de cavité, qualifiée de "critique", pour laquelle un point de la surface et un seul subit l'affaissement maximal  $A_m$ . Au-delà de cette largeur critique, la cuvette présente un fond plat, constitué par tous les points dont l'affaissement vaut  $A_m$ , et la largeur de la cuvette grandit comme la largeur de la cavité (largeur surcritique). En-deçà de la largeur critique, l'affaissement de surface est incomplet (largeur sous-critique) et peut même être inexistant si la cavité est très étroite par rapport à la profondeur (figure 6).

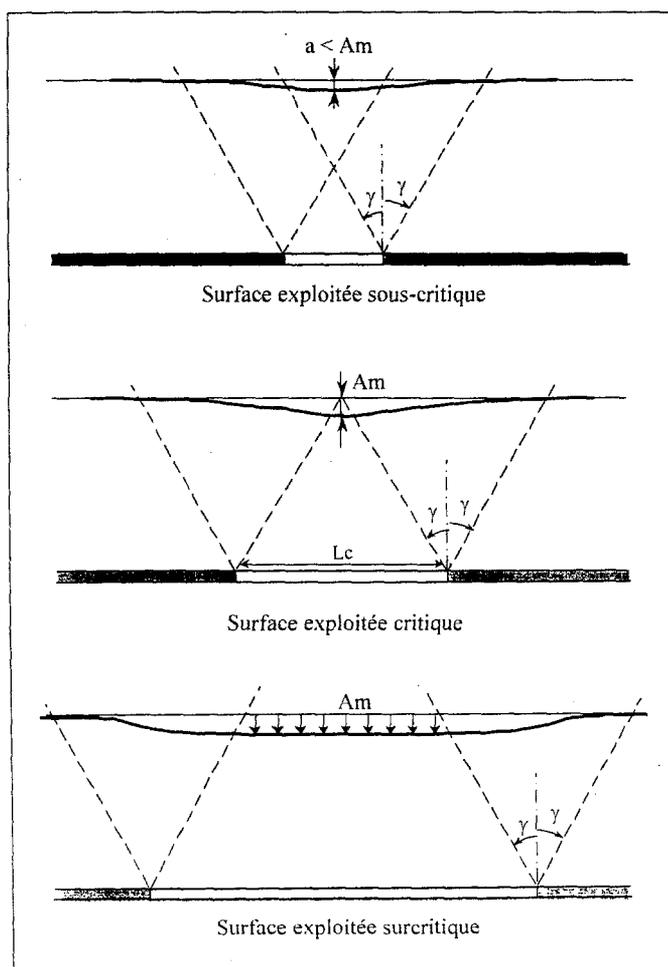


Figure 6 : Influence du ratio largeur exploitée/profondeur.

Il est généralement supposé que la courbe, représentant le bord de cuvette d'affaissement, admet un point d'inflexion situé à l'aplomb du bord de la cavité (ou à son voisinage immédiat) et qu'elle est symétrique par rapport à lui. Dans ce cas, la largeur critique "Lc", pour une profondeur H et un angle d'influence  $\gamma$ , s'écrit :

$$Lc = 2 \times H \times \text{tg} \gamma$$

Dans le bassin du Nord et du Pas de Calais par exemple,  $\gamma$  est en moyenne égal à  $35^\circ$  donc Lc est égale à  $1,4 H$  ( $\text{tg} \gamma = 0,7$ ).

### 3.3.2) Influence de la lithologie du recouvrement

La morphologie du bord de la cuvette d'affaissement est particulièrement sensible à la nature des terrains de recouvrement. En largeur surcritique, cette morphologie est bien caractérisée par deux paramètres :

- l'angle d'influence  $\gamma$ , défini précédemment, et qui est en relation évidente avec la largeur de la cuvette d'affaissement,
- l'amplitude de l'affaissement maximum  $A_m$ .

Des bancs résistants et surtout raides conduisent à des bords de cuvette plus aplatis, donc des angles, mesurés par rapport à la verticale, plus forts et à des valeurs d'affaissement maximal plus petites que dans le cas de recouvrements de faible cohésion, tels que des terrains naturellement peu structurés ou très déconsolidés à la suite de nombreux travaux d'exploitation successifs.

En pratique, les valeurs de l'angle d'influence  $\gamma$  varient de  $13^\circ$  à  $45^\circ$ . La forme de la cuvette et les valeurs des angles d'influence dépendent aussi du pendage de la couche exploitée (figure 7).

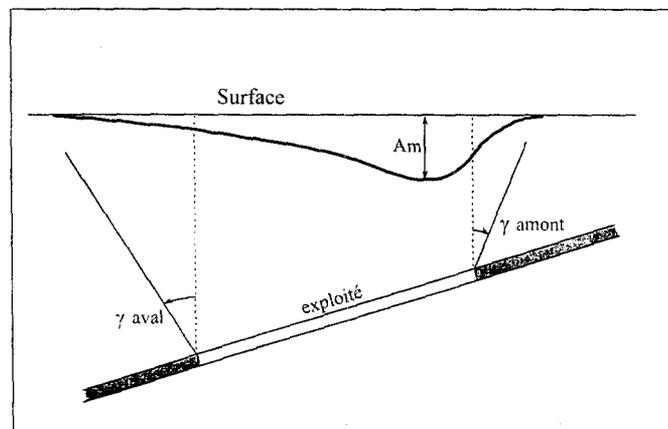


Figure 7 : Influence du pendage sur le profil d'affaissement ( $\gamma_{\text{aval}} > \gamma_{\text{amont}}$ ).

Il est clair que les risques liés aux affaissements miniers sont à évaluer différemment selon qu'ils conduisent à des déformations concentrées et intenses, ou plus faibles mais concernant des secteurs sensibles plus étendus.

### 3.3.3. Influence de la profondeur

La profondeur des exploitations est un facteur essentiel dans le processus d'affaissement. Elle intervient en effet :

- dans la détermination de la largeur critique qui fixe l'affaissement au centre de la cuvette (inférieur ou égal à  $A_m$ ) ;
- dans la détermination de  $A_m$ , dont nous rappelons qu'il est proportionnel au tassement des terrains éboulés.

A faible profondeur (inférieure à 100 ou 200 mètres), le poids du recouvrement est insuffisant pour que ce tassement soit complet et l'ordre de grandeur de  $A_m$  est voisin de la moitié de l'ouverture exploitée  $W$ . Il tend vers  $W$  pour des profondeurs moyennes à grandes (environ 500 m et jusqu'à 1000 m selon les propriétés du recouvrement). A très grande profondeur, (plusieurs milliers de mètres), les chances d'apparition de réajustements et d'équilibrages partiels des bancs ou des blocs du recouvrement augmentent et sont susceptibles, à nouveau, de limiter la valeur de  $A_m$ . La probabilité est aussi plus grande de rencontrer des bancs épais et raides structurants dans le recouvrement. Enfin, de telles exploitations sont rarement surcritiques : tout concourt, dans ce cas, à une réduction de  $A_m$ .

$A_m$  est souvent exprimé sous la forme :  $A_m = k \times W \times q$ .

où  $k$  est le coefficient (inférieur à 1) relatif à l'effet de profondeur, et  $q$  un coefficient qui dépend du mode de traitement des vides créés par l'exploitation (foudroyage, remblayage voire piliers abandonnés...).

### 3.3.4. Mode de traitement des vides

Dans le cas des exploitations totales, le traitement des vides pendant exploitation peut être le foudroyage, c'est-à-dire l'éboulement contrôlé du toit immédiat, ou le remblayage hydraulique ou pneumatique, par voie humide ou sèche.

Le coefficient  $q$ , mentionné ci-avant, permet d'introduire la notion d'ouverture exploitée équivalente  $W^*$  telle que  $W^* = W \times q$ . On estime que :

- $q \cong 0,9$  pour le foudroyage
- $q \cong 0,2$  à  $0,3$  pour le remblayage hydraulique
- $q \cong 0,5$  pour le remblayage pneumatique.

Dans le cas du foudroyage, la valeur 0,9 tient compte du phénomène de remontée du mur de la couche lorsque l'exploitation le décharge brusquement de la contrainte verticale due aux terrains sus-jacents.

#### 4. EVOLUTION DE L'AFFAISSEMENT DANS LE TEMPS, PENDANT ET APRES EXPLOITATION

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons plus particulièrement à l'amplitude et à la durée de l'affaissement constaté en un point de la surface, entre le moment où l'exploitation pénètre dans l'aire d'influence de ce point et celui où elle en sort totalement (figure 8).

Ensuite, nous nous attacherons à décrire l'évolution des affaissements miniers après l'arrêt définitif des exploitations et sur les causes exogènes susceptibles d'induire une reprise d'affaissement.

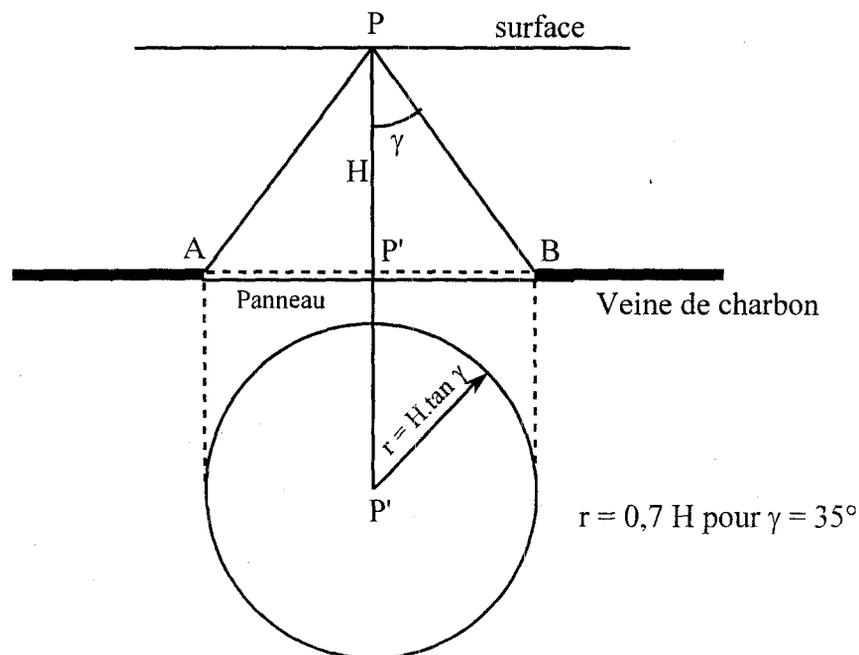


Figure 8 : Délimitation de l'aire qui influence le point P  
(tirée de C. Grard, 1969)

##### 4.1. Les différentes phases de l'affaissement

A partir du moment où une exploitation (taille) pénètre dans l'aire qui influence un point considéré de la surface du sol, l'évolution de l'affaissement de ce point dans le temps est liée :

- à l'avancement du front d'exploitation, qui entraîne une modification de la géométrie de l'exploitation avec un accroissement de ses dimensions ;
- au comportement des terrains sus-jacents qui transmettent les mouvements du fond jusqu'au jour (surface).

La figure 9 illustre deux exemples de courbe d'évolution de l'affaissement dans le temps d'un point de la surface lorsqu'une taille pénètre dans l'aire d'influence relative à ce point (point origine O des deux courbes). Les points A et A' correspondent à la date de sortie de la taille de l'aire d'influence.

Les parties OA et OA' des courbes résultent de la double influence du facteur temps, qui intervient à la fois dans l'augmentation de la surface exploitée et dans la transmission des mouvements du fond au jour. Le retard d'affaissement des terrains de recouvrement par rapport au démarrage des travaux est illustré plus particulièrement par la courbe 2 comparée à la courbe 1. Ce retard peut avoir plusieurs origines parmi lesquelles on peut citer : la plus grande stabilité du chantier avant le foudroyage, la rupture moins rapide et la chute graduelle du bas-toit, la compaction lente du remblayage ou des terrains foudroyés et foisonnés. Les parties AB et A'B' des courbes correspondent uniquement au délai de transmission des mouvements du fond au jour puisqu'aux points A et A', les travaux miniers sont sortis de l'aire qui influence le point considéré.

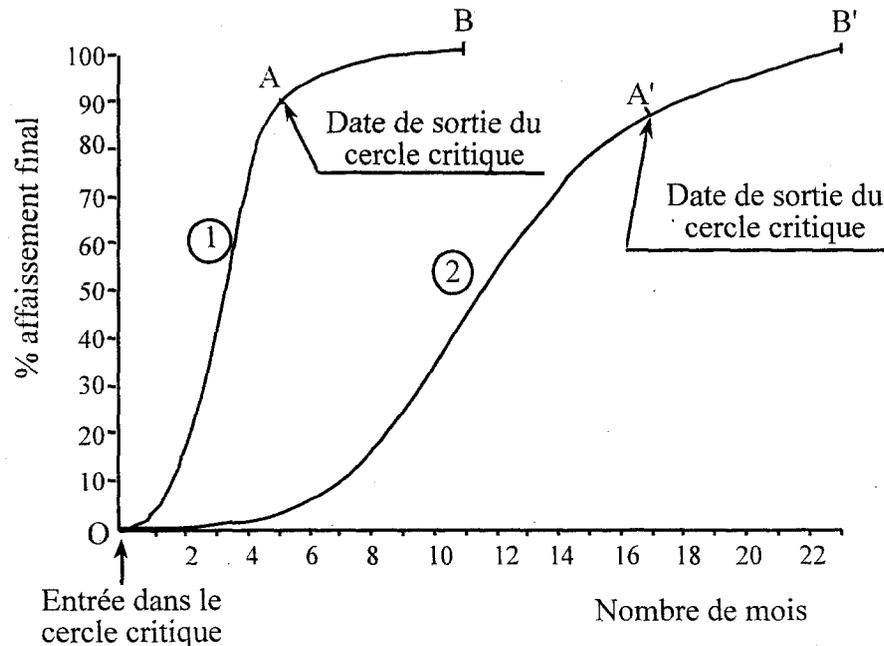


Figure 9 : Exemples de courbe d'évolution de l'affaissement d'un point de la surface en fonction du temps (tirée de Proust, 1964)

Ce délai est dû aux phénomènes affectant le recouvrement et qui dépendent du temps proprement dit, à savoir la transmission des contraintes dans les bancs du haut-toit, leur mise en charge progressive, la formation de vides entre les couches et les cisaillements suivants les plans de stratification et autres discontinuités du massif.

D'une manière générale, et sans hiérarchisation, la durée de l'affaissement d'un point de la surface dépend de :

- la distance de l'aplomb du point considéré par rapport au bord de la taille ;
- l'étendue de la surface déhouillée ;
- la vitesse d'avancement du front d'extraction ;
- les conditions d'exploitation (profondeur, ouverture de la couche, dimensions du panneau, ...) ;
- la méthode d'exploitation et le mode de traitement de l'arrière-taille ;

- l'épaisseur, la nature lithologique, la structure, la fracturation naturelle et la résistance mécanique des terrains de recouvrement ;
- la présence d'anciens travaux miniers dans les terrains sus-jacents.

Notons que dans certains bassins, en raison des dimensions des exploitations et de la nature, à l'origine, peu compétente (plastique) des terrains de recouvrement ou lorsque ceux-ci ont été remaniés par des déhouilllements anciens et multiples, les affaissements suivent de très près les travaux du fond (courbe 1 de la figure 9). Dans le cas de travaux miniers entrepris sous des terrains déjà affaissés par d'anciennes exploitations, G. TISON (1946) parlait de réveil d'affaissement se manifestant quelquefois à la surface du sol en moins d'un mois, par ressauts violents, et de durée plus courte comparativement à une exploitation en terrains vierges.

Il est d'usage de distinguer trois grandes phases dans les courbes d'évolution de l'affaissement d'un point P de la surface en fonction du temps et, par conséquent, de l'importance de l'aire déhouillée.

1. La phase I, dite **phase d'affaissement initial**, qui correspond à la période pendant laquelle le front d'extraction pénètre dans l'aire qui influence un point P et passe à l'aplomb de celui-ci. D'après les observations et mesures effectuées dans les bassins houillers anglais (NCB, 1975) et allemands (KRATZSCH, 1983), l'amplitude de l'affaissement pendant cette phase ne représente que 10 à 15 % de l'affaissement total.
2. La phase II, dite **d'affaissement principal, ou accéléré ou dynamique**, correspond à la période d'affaissement pendant laquelle le front d'extraction s'éloigne du point P jusqu'à ce qu'il sorte de l'aire qui influence ce point. Dans la plupart des bassins houillers européens, plus de 90 % de l'amplitude de l'affaissement final sont alors obtenus au point P.
3. La phase III, dite **d'affaissement résiduel**, qui ne représente que quelques % de l'amplitude de l'affaissement final, et correspond à la part de l'affaissement observé **après** l'arrêt définitif des travaux miniers ou, plus simplement, à partir du moment où le point P n'est plus du tout affecté par une exploitation souterraine quelle qu'elle soit.

La définition de l'affaissement résiduel a été donnée pour la première fois par ORCHARD et ALLEN (1974) : il s'agit de la phase finale de l'affaissement, dépendante du temps, qui se poursuit après l'arrêt définitif des travaux miniers ou lorsque la taille est complètement sortie de l'aire qui influence le point considéré.

Les phases I et II caractérisent ce qui est qualifié par de nombreux auteurs de **phase active** de l'affaissement, pour mieux les distinguer de la phase III plus caractéristique du **comportement rhéologique** des terrains sous-minés.

La figure 10 représente l'affaissement du point P en fonction du temps en reportant en ordonnée l'affaissement subi par ce point à un instant donné, rapporté à son affaissement final et exprimé en pour-cent, et en abscisse, l'avancement du front d'abattage rapporté à la profondeur des travaux. Cette courbe a été établie à partir d'un grand nombre d'observations et de mesures effectuées dans les différents bassins houillers anglais (NCB, 1975) pour des exploitations de largeur critique à sur-critique et situées entre 300 et 600 m de profondeur sous la surface. Cette figure illustre bien les propos précédents. Elle montre clairement que l'affaissement ne se produit pas dès la pénétration de la taille dans l'aire qui influence un point. L'affaissement des terrains de recouvrement est en effet retardé par le fait que l'exploitation reste stable tant qu'elle n'a pas atteint des dimensions suffisantes, à la profondeur considérée, pour provoquer la rupture du bas-toit et le foudroyage des terrains sus-jacents. Lorsque la taille passe à l'aplomb du point P, l'amplitude de l'affaissement de ce point ne représente que 16 % environ de son affaissement total (20 % au maximum dans le cas

d'une exploitation avec remblayage pneumatique). Par contre, lorsque la taille sort de l'aire d'influence du point P, celui-ci a déjà subi près de 97 % de l'affaissement final. En d'autres termes, si ce point n'est plus influencé par la suite par d'autres exploitations souterraines, il continuera à s'affaisser mais cet affaissement résiduel ne représentera que 3 % de l'affaissement total du point P.

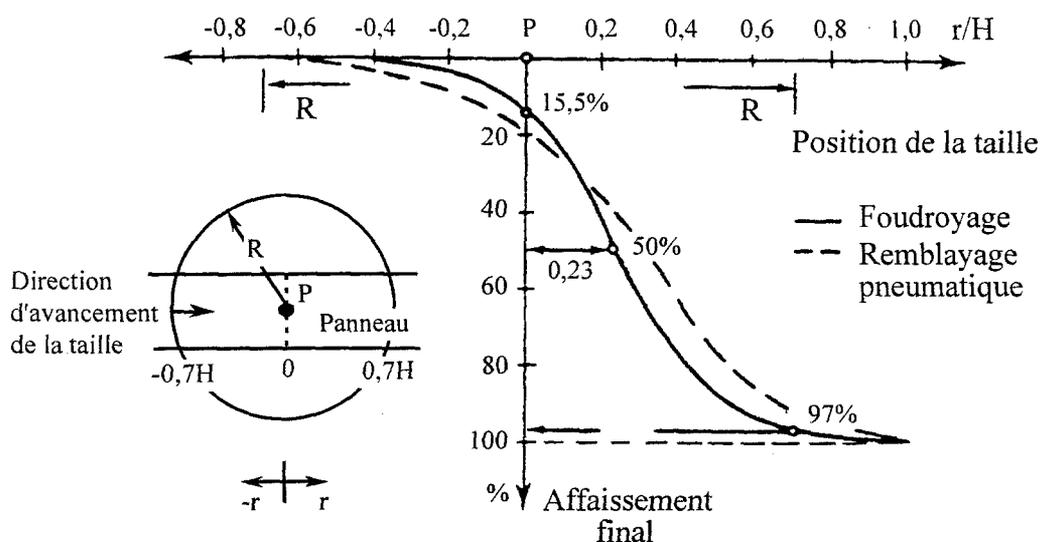


Figure 10 : Courbe d'évolution de l'affaissement du point P, exprimé en pourcentage de l'affaissement final, en fonction de sa distance  $r$  du front d'extraction rapportée profondeur  $H$  des travaux (d'après NCB, 1975, et tirée de Kratzsch, 1983)

#### 4.2. Amplitude et durée de répercussion de l'affaissement résiduel

La durée de la phase d'affaissement résiduel a été étudiée par différents auteurs, mais les estimations fournies par ceux-ci ne reposent que pour une très faible part sur des mesures topométriques et des observations réalisées directement sur le terrain en raison, en particulier, de la longueur de la période d'observation et de la précision requises pour ces mesures.

Nous avons rassemblé, dans le tableau ci-après, les données bibliographiques recueillies et relatives à la durée, et le cas échéant, à l'amplitude de la phase d'affaissement résiduel. Elles ne concernent, bien sûr, que des exploitations par longues tailles foudroyées ou remblayées.

De l'expérience étrangère, et notamment de celle issue des Charbonnages anglais, WHITTAKER et REDDISH (1989) soulignent que la phase d'affaissement résiduel a, dans la majorité des cas, une durée de l'ordre de 12 à 18 mois, mais ils notent aussi, qu'assez souvent, cette durée est moins longue, c'est-à-dire de l'ordre de 3 à 4 mois. A l'inverse, il existe quelques cas isolés résultant de situations géologiques et/ou minières particulières, pour lesquels la durée de l'affaissement résiduel a été beaucoup plus longue et s'est étalée sur une période de 4 à 6 ans. Enfin, ils font remarquer que les effets de l'affaissement résiduel sont maximum immédiatement après l'arrêt définitif de l'exploitation, et que l'amplitude décroît ensuite de manière exponentielle en fonction du temps.

**Amplitude et/ou durée de la phase d'affaissement résiduel comparées éventuellement à celles de l'affaissement global, dans différents bassins houillers français et étrangers**

Situation	Conditions minières	Affaissement résiduel	Référence
Royaume-Uni (plusieurs bassins)	longues tailles, recouvrement plastique	quelques mois à 12 mois pour 5-6 % de l'amplitude totale	Whittaker et Reddish (1989)
Royaume-Uni (Durham Coalfield)	2 exploitations par longues tailles (1 et 2), recouvrement très résistant	1) 6 ans pour 94 mm (9 % de l'amplitude totale), dont 89 mm les 4 premières années. 2) 44 mois pour 33 mm (6,8 % de l'amplitude totale) dont 16 mm les trois premiers mois	Orchard et Allen (1974)
Royaume-Uni (Sud du Pays de Galles)	5 exploitations par longues tailles foudroyées	24 à 54 mois pour 9 mm à 68 mm (36 à 72 mois pour l'affaissement total)	Collins (1974)
Allemagne Occidentale	nombreuses exploitations par longues tailles foudroyées	5 ans, mais 75 % de l'affaissement résiduel sont acquis la 1ère année  6 mois à 5 ans	Fläschenträger (1957)  Kratzsch (1983)
Australie	longues tailles foudroyées	3 mois, pour 200 jours d'affaissement total	Whittaker et Reddish (1989)
Inde	longues tailles : - en terrains vierges,  - en terrains déjà déhouillés.	300 à 500 jours (10 à 30 % de l'affaissement total).  50 à 100 jours (5 à 10 % de l'affaissement total).	Singh et Saxena (1989)  Saxena (1991)
Etats Unis	longues tailles	17 mois pour 130 mm (12 % de l'affaissement total) dont 106 mm le 1er mois	Hasenfus et al. (1988)
France  Nord-Pas-de-Calais Albi-Carmaux	recouvrement plastique, déhouilllements anciens et multiples	3 à 4 ans (99 % de l'affaissement total sont obtenus au bout de 18 mois à 2 ans après l'arrêt des travaux).	Proust (1964) Decherf (1973) Decherf et al (1980) INERIS (1997)
Provence, Lorraine et Blanzky	recouvrement compétent déhouilllements anciens et multiples	2 à 3 ans	Arcamone (1980) INERIS (1997)

En terme d'amplitude, il est largement admis par l'ensemble des auteurs français et étrangers que l'affaissement résiduel ne représente en général que 5 à 7 % (10 % au maximum) de l'amplitude globale de l'affaissement. D'autre part, il s'effectue en grande partie durant les 3 ou 4 premiers mois qui suivent l'arrêt définitif de l'exploitation, de sorte que, au terme de la première année, au moins 75 % de l'amplitude de l'affaissement résiduel sont réalisés. Les suivis des bases de nivellement, effectués encore aujourd'hui pour le compte de Charbonnages de France dans le Nord et par les services techniques des exploitations dans les autres bassins houillers français, confirment l'ensemble des conclusions précédentes. La durée de la phase d'affaissement résiduel excède en effet rarement plus de 2 ans : des durées de répercussion plus longues des affaissements miniers (4 à 5 ans) résultent de situations particulières et constituent des cas isolés. On notera aussi que dans les deux ou trois dernières années des phases d'affaissement résiduel les plus longues, l'amplitude de l'affaissement est négligeable et n'affecte pas les installations et constructions en surface car les déformations horizontales du sol, qui sont les plus préjudiciables aux installations de surface, sont pratiquement nulles.

L'amplitude de l'affaissement résiduel en un point donné de la cuvette d'affaissement est, bien sûr, dépendante de la distance séparant ce point du point situé à l'aplomb du bord de taille. Suivant un profil longitudinal perpendiculaire au front d'abattage (figure 11), l'amplitude de l'affaissement résiduel, rapportée ou non à celle de l'affaissement final, est maximale au voisinage du point d'inflexion de la cuvette d'affaissement, situé à l'aplomb du bord de taille. De part et d'autre de ce point singulier, appelé point de transition ou de demi-affaissement ( $A_m/2$ ), l'amplitude de l'affaissement résiduel décroît de manière significative. C'est également ce point qui s'affaisse le plus rapidement dès l'arrêt de la taille (ORCHARD et ALLEN, 1974). Par contre, YAO et REDDISH (1994) soulignent que, suivant un profil transversal parallèle au front d'abattage, l'amplitude maximale de l'affaissement résiduel est mesurée au centre du panneau. Si cette amplitude est exprimée en pourcentage de l'affaissement final du point considéré, le pourcentage le plus élevé est en revanche constaté en bordure de cuvette d'affaissement. Ces derniers auteurs précisent également que la durée de l'affaissement résiduel croît avec la profondeur des exploitations et/ou lorsque la vitesse d'avancement de la taille diminue.

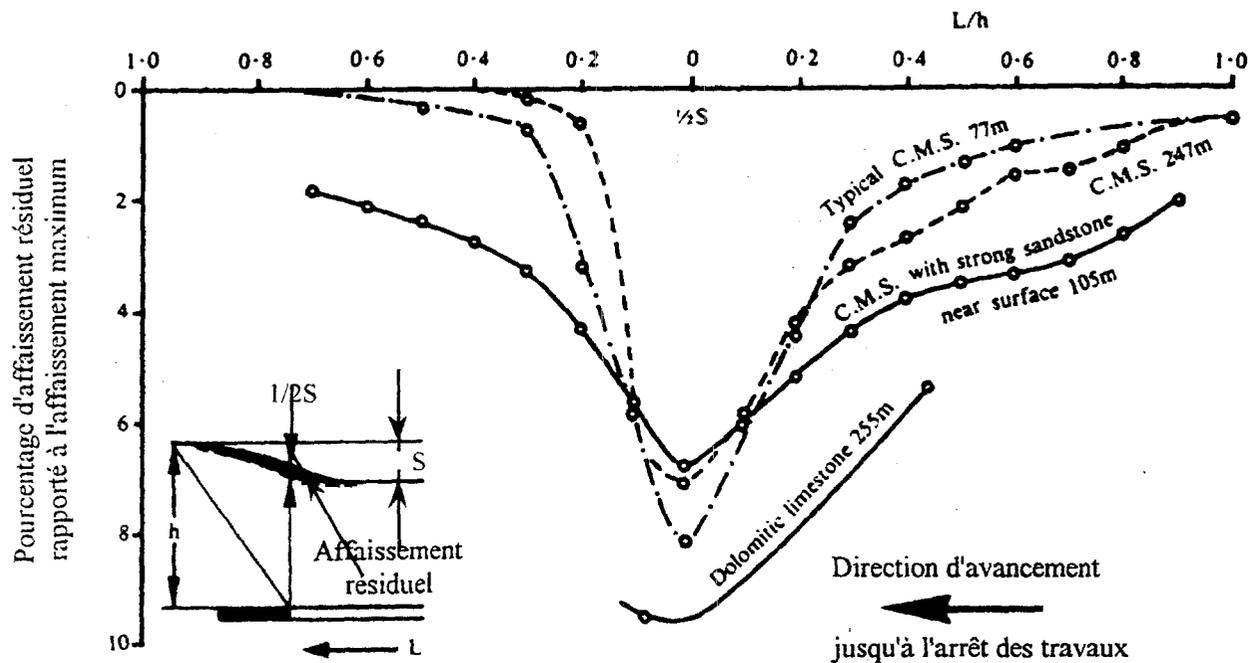


Figure 11 : Comparaison de profils longitudinaux d'affaissement résiduel, pour différentes natures lithologiques de terrains de recouvrement en fonction de la longueur  $L$  du panneau exploité rapportée à la profondeur  $h$ . (d'après 1989) Orchard et Allen, 1974 ; tirée de Whittaker et Reddish,

La nature des terrains de recouvrement, et donc leur comportement mécanique, influence également le phénomène d'affaissement et notamment la durée des différentes phases d'affaissement. Ainsi, pour des recouvrements dits "plastiques" constitués, par exemple, de marnes, argiles, craies, sables, etc, la phase active de l'affaissement est plus rapide, d'amplitude et d'emprise en surface plus importantes, mais la phase résiduelle est plus longue. C'est le cas notamment du bassin du Nord et du Pas-de-Calais où une stabilisation des affaissements résiduels est observée au bout de 4 ou 5 ans. A contrario, plus le recouvrement est rigide (grès, calcaires massifs), plus la transmission des mouvements à la surface est lente avec une amplitude amortie pendant la phase active, alors que la phase d'affaissement résiduel est stabilisée au bout de 2 à 3 ans (cas des bassins houillers de Provence et de Lorraine).

En tenant compte des deux principaux facteurs influençant la durée de l'affaissement résiduel, à savoir la profondeur de l'exploitation et la nature des terrains de recouvrement, YAO et REDDISH (1994) ont établi une équation empirique et les abaques correspondants permettant de déterminer cette durée. La nature du recouvrement est qualifiée ici par le pourcentage de roches dures et résistantes (résistance à la compression simple supérieure à 45 MPa) constituant les terrains sus-jacents. Ceci dit, quelle que soit la nature des terrains sus-jacents, lorsque l'exploitation intéresse des terrains de recouvrement déjà perturbés par d'anciens et multiples déhouillements, les effets en surface des mouvements de terrains qu'elle induit sont pratiquement "instantanés" et la durée de la phase d'affaissement résiduel est, de même, plus rapide et plus courte, de l'ordre de quelques mois.

### **4.3. Causes exogènes de reprise d'affaissement**

Compte tenu de l'amplitude et, par conséquent, de la vitesse d'évolution très faibles de l'affaissement en phase résiduelle, de nombreux auteurs (KNUFINKE, 1994 ; BAUER et al, 1992) ont déjà souligné combien il était difficile d'appréhender et d'interpréter des mouvements verticaux du sol de faible amplitude (d'ordre millimétrique) mis en évidence par des nivellements successifs. En effet, quelle que soit la précision des mesures topométriques réalisées, il s'avère délicat de faire la part des choses entre ce qui est dû à l'affaissement minier résiduel et ce qui est imputable à d'autres causes naturelles, d'origine profonde ou superficielle. N'oublions pas non plus que ces causes naturelles peuvent voir leurs effets accentués, prolongés, voire aggravés par l'activité de l'homme autre que minière (pompages d'eau potable ou industrielle par exemple), ou tout simplement du fait des variations climatiques saisonnières ou de conditions météorologiques exceptionnelles de longue durée (par exemple, le déficit pluviométrique constaté dans certaines régions de France entre les années 1989 et 1994). Ainsi, des mouvements verticaux du sol (tassement mais aussi soulèvement), de même ordre de grandeur que l'amplitude des affaissements résiduels, sont induits par les variations saisonnières ou annuelles de la teneur en eau des terrains superficiels et de la température (effet du gel), le battement naturel du niveau des nappes phréatiques ou leur rabattement par pompage, etc.

Ceci dit, des phénomènes de reprise d'affaissement peuvent se produire sous l'effet de causes exogènes telles que :

- l'ouverture ou la reprise d'exploitations minières souterraines proches,
- l'application de surcharges en surface induites, par la construction de bâtiments importants et lourds,
- la remontée des eaux dans les travaux miniers consécutive à l'arrêt des pompages d'exhaure.

Dans ces trois cas, le phénomène de reprise d'affaissement se traduit, sur les courbes d'évolution de l'affaissement des points considérés en fonction du temps, par une brutale et importante variation de l'amplitude et/ou de la vitesse d'évolution (accélération marquée du phénomène).

La reprise d'affaissement induite par les exploitations minières proches est un phénomène bien connu des exploitants et n'est pas l'objet de notre propos.

Les effets de la remontée des eaux et des surcharges dues à l'urbanisation future des régions sous-minées ne sont à retenir que dans le cas d'exploitations situées à faible profondeur et/ou dans des contextes miniers particuliers. En effet, les surcharges dues à la construction de bâtiments importants peuvent provoquer des phénomènes de tassement différentiel du sol à l'aplomb d'exploitations peu profondes (quelques dizaines de mètres) à condition que celles-ci se trouvent dans la zone d'influence des fondations de ces ouvrages. Ce risque de tassement différentiel concerne donc surtout les ouvrages fondés sur des pieux profonds. De tels ouvrages faisant obligatoirement l'objet d'une reconnaissance géotechnique préalable des terrains de fondation, on peut considérer qu'un risque non identifié de reprise d'affaissement est nul.

La remontée des eaux consécutive à l'arrêt des pompages d'exhaure pourrait, à ce jour, avoir un impact négatif sur la stabilité d'exploitations peu profondes, fortement pentées et remblayées. En effet, dans ces conditions, des fontis sont susceptibles d'apparaître au-dessus des vides créés par le débouillage des remblais. Néanmoins, la remontée des eaux dans les bassins houillers, aujourd'hui noyés, n'a pas provoqué de désordres, ni d'instabilités en surface. C'est notamment le cas des bassins d'Alès et de Saint-Etienne, des parties orientale et occidentale du bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais, ainsi que du secteur de Faulquemont dans le bassin lorrain. Les exploitations partielles, par la méthode des chambres et piliers abandonnés, se sont révélées parfois plus sensibles aux phénomènes induits par la remontée des eaux que les exploitations totales traitées ici (cas du poinçonnement des piliers dans le mur, par exemple ou d'affaiblissement de la résistance des piliers).

## **5. CONCLUSION**

---

Le phénomène d'affaissement pendant l'exploitation et après l'arrêt définitif des travaux miniers a fait l'objet de nombreuses études, tant en France qu'à l'étranger, ce qui a permis de parfaire la connaissance et la compréhension des mécanismes mis en jeu et ainsi d'améliorer les outils de prévision des affaissements miniers à court et à long terme.

L'amplitude de la phase d'affaissement résiduel, observée après l'arrêt définitif de l'exploitation, ne représente que 7 à 10 % de l'affaissement total. D'autre part, une grande partie de l'affaissement résiduel est en général acquise au cours des douze premiers mois qui suivent la fin des travaux. Au-delà de cette période, la phase d'affaissement résiduel peut se poursuivre sur quelques années encore (4 à 5 ans), mais de façon uniforme, lente et régulière, avec une amplitude qui n'excède pas, en moyenne, quelques millimètres par an. Vis-à-vis des infrastructures, des ouvrages d'art, des bâtiments et d'autres constructions, ce ne sont pas tant les affaissements que les déformations du sol qui sont les plus à craindre. Or, les déformations, au cours de cette très lente subsidence uniforme qui caractérise la phase d'affaissement résiduel, sont très petites voire négligeables et donc sans effet sur la stabilité des terrains de surface.

Comme c'est toujours le cas des phénomènes dans lesquels les conditions naturelles jouent un rôle prépondérant, les affaissements et déformations au-dessus des exploitations minières présentent une variabilité qui constitue une difficulté pour leur analyse et surtout pour leur prévision.

L'expérience et la réflexion accumulées depuis que l'exploitation industrielle des matières premières s'est développée (environ deux siècles en Europe Occidentale) conduisent aujourd'hui à un corpus de connaissances cohérent et bien unifié, relatif aux mécanismes et aux concepts fondamentaux ainsi qu'à l'influence des principaux facteurs.

Cet exposé n'a fait qu'introduire le sujet en insistant sur ces schémas de base, volontairement simplificateurs mais bien établis, autour desquels peuvent se développer les éléments d'une complexification qui permet d'approcher progressivement au plus près les diverses réalités rencontrées.

## 6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

ARCAMONE J. (1980).

Méthodologie d'étude des affaissements miniers en exploitations totale et partielle. Application au cas des Houillères de Provence.

Mémoire de thèse de docteur ingénieur, Institut National Polytechnique de Lorraine, Ecole des Mines de Nancy, juin 1980, 100 p.

BAUER R.A, VAN ROOSEDAAL D.J. (1992).

Monitoring problems ; are we really measuring coal mine subsidence. *3rd Subsidence workshop due to underground mining*, Morgantown, USA, 1992, pp. 332-339.

COLLINS B.J. (1977).

Measurement and analysis of residual mining subsidence movements.

In: *Large ground movements and structures*, Pentech Press, London, 3-29.

DECHERF J. (1973).

Durée de répercussion des affaissements miniers. Journée des dégâts miniers organisée par l'INIEX, Liège, 11 avril 1973.

Annales des Mines de Belgique, n° 9, Septembre 1973, 1017-1038.

DECHERF J., A. VANDEWALLE, A. CARON (1980).

Le problème des affaissements miniers dans le bassin du Nord-Pas-de-Calais.

Revue de l'Industrie Minérale, mai 1980, 295-313.

FLÄSCHENTRÄGER H. (1957).

Considerations on ground movement phenomena based on observations made in the left bank Lower Rhine region.

Proc. European Congress on Ground Movement, Leeds, 1957, 58-73.

GRARD C. (1969).

Les affaissements miniers et les moyens permettant de limiter leurs effets à la surface du sol.

Revue de l'Industrie Minérale, 51, n° 1, janvier 1969, 35-70.

HASENFUS G.J., K.L. JOHNSON, D.W.H. SU (1988).

A hydrogeomechanical study of overburden aquifer response to longwall mining.

7th Int. Conf. on Ground Control in Mining, Morgantown, August 1988, 149-162.

HOUILLERES DU BASSIN DE LORRAINE (HBL) - Service des dégâts miniers (1986).

Les dégâts de surface provoqués par les exploitations souterraines de charbon. Mesures préventives et correctives pour minimiser les effets.

Industrie Minérale - Mines et Carrières - Les Techniques, juin 1986, 267-282.

INERIS (1997).

Rapports d'études sur l'analyse des effets en surface des travaux miniers souterrains dans les concessions d'Albi-Carmaux (Tarn) et de Blanzey-Montceau-les-Mines (Saône et Loire) établis dans le cadre de l'établissement des dossiers de demande d'arrêt définitif des travaux dans ces concessions.

KNUFINKE P. (1994).

Zum Phänomen lokaler Höhenänderungen an der Erdoberfläche. *IX ISM Congres*, 18-22 april 1994, Praha. CZECH Republic, pp. 486-490.

KRATZSCH H. (1983).

Mining subsidence engineering.

Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, 1983, XII, 543.

MAHMOUD Y.S.E. (1984). « Analyse de l'influence des différents paramètres d'exploitation et facteurs naturels sur le comportement des terrains dans l'exploitation par longues tailles ». Thèse Docteur-Ingénieur, Laboratoire de Mécanique des terrains, Ecole des mines de Nancy. INPL.

NCB (1975).

Subsidence engineer's handbook. National Coal Board, Mining Department, 1975, 111.

ORCHARD R.J., W.S. ALLEN (1974).

Time dependence in mining subsidence.

Minerals and the Environment, I.M.M., London, 643-659.

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.

SAXENA N.C. (1991)

Subsidence management in Jharia Coalfield, India. A concept.

Proc. of IVth Inter. Symp. on Land Subsidence, may 1991, 181-193.

SINGH K.B., N.C. SAXENA (1989).

Subsidence in Kamptee coalfield.

International Symposium on Land Subsidence, India, 11-15 december 1989, 483-496.

TISON G. (1946).

Les affaissements du sol produits par l'exploitation houillère.

Cours de l'Ecole Technique des Mines de Douai, 39.

WHITTAKER B.N., D.J. REDDISH (1989).

Subsidence: occurrence, prediction and control.

Elsevier, Amsterdam, 1989, 528.

YAO X.L. et D.J. REDDISH (1994).

Analysis of residual subsidence movements in the UK coalfields.

Quarterly Journal of Engineering Geology, 27, 15-23.

