

# mouvements de surface lors de travaux souterrains

Rapport général de

**M. Dejean**

Ingénieur au Cerchar

Les trois publications qui nous sont présentées sur le thème des mouvements de surface lors de travaux souterrains sont assez bien représentatives des préoccupations actuelles des spécialistes sur ce sujet. Dans ce rapport, nous allons traiter plus particulièrement des mécanismes de comportement des terrains lorsqu'ils s'affaissent et du comportement des structures soumises à affaissement. L'objectif de cette analyse des mécanismes est d'élaborer une méthodologie de traitement des problèmes d'affaissement. Avant de préciser ce que nous entendons par « mécanismes » et de faire le point sur les préoccupations du moment sur ce sujet, il est utile de rappeler très brièvement les résultats acquis en la matière.

Le problème des affaissements de surface sous l'effet d'exploitations souterraines est certainement celui qui a fait le plus l'objet d'études expérimentales et théoriques en matière de mécanique des roches appliquée à la mine, en raison de la préoccupation constante du mineur qui est de conduire l'exploitation sans provoquer de dégâts à la surface.

Deux formes d'exploitations doivent être distinguées :

— celles où on exploite au maximum le gisement, en laissant les terrains sus-jacents s'affaisser;

— celles où on n'effondre pas les terrains sus-jacents, c'est-à-dire les méthodes où on abandonne du gisement sous la forme de piliers pour empêcher les affaissements.

Dans le premier cas on peut espérer limiter les affaissements en remplissant les vides par des remblais, mais outre le coût élevé de cette manière de procéder, son efficacité peut souvent paraître très limitée, car on réduit les affaissements sans en changer réellement l'ordre de grandeur.

Dans le second cas, les affaissements de surface seront négligeables, car réduits au tassement des piliers, tant que ces piliers resteront en place. Et le vrai problème a toujours été dans ce cas de dimensionner l'exploitation pour assurer une stabilité infinie dans le temps des terrains sus-jacents.

Avant d'examiner les différents mécanismes qui régissent les mouvements des terrains, conduisant aux affaissements et aux dégâts de surface, et la méthode d'étude qui en découle, il est nécessaire de faire le point sur les connaissances actuelles en la matière, en suivant le cheminement qui a conduit à ces connaissances.

## **1 Forme des mouvements de surface lors de travaux souterrains, et conséquences sur les structures**

### **1.1 Les mouvements de surface provoqués par des travaux souterrains**

Pour simplifier l'exposé, comme précédemment, nous distinguerons deux formes d'exploitation :

— les exploitations où on laisse les terrains s'affaisser (dépilage le plus complet possible),

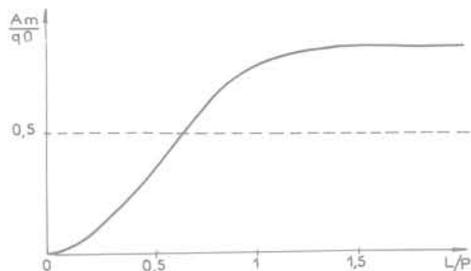
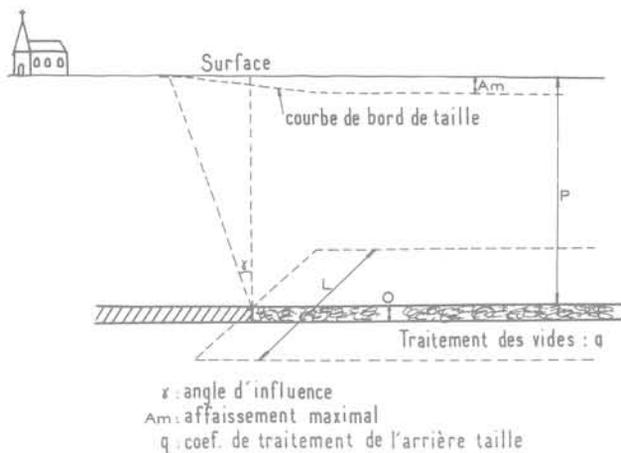
— les exploitations par chambres et piliers, où on abandonne du gisement pour empêcher les affaissements.

Une exploitation totale n'est a priori concevable que dans la mesure où les mouvements induits à la surface par les travaux souterrains sont sans conséquence, les zones à protéger étant bien délimitées.

Le problème à résoudre est alors de déterminer la forme et l'influence à la surface d'une exploitation souterraine, et de préciser la liaison entre mouvements de surface et dégâts.

Les études qui ont été menées sur ces sujets ont d'abord eu pour objectif d'élaborer des modèles de prévision des mouvements dans lesquels l'accent a été mis sur les caractéristiques géométriques des travaux souterrains au détriment souvent des caractéristiques géologiques et géomécaniques des terrains de recouvrement [1] [2]\*.

\* Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.



EXEMPLE DE COURBE LIANT L'AFFAISSEMENT MAXI OBSERVÉ À L'OUVERTURE EXPLOITÉE, AU TRAITEMENT DE L'ARRIÈRE TAILLE, À LA LARGEUR ET LA PROFONDEUR DU PANNEAU EXPLOITÉ. CETTE COURBE VARIE AVEC LES SITES ET LE NOMBRE DE COUCHES EXPLOITÉES.

Fig. 1 Eléments de prévision des affaissements

Cette approche du problème a conduit à des résultats remarquables qui ont mis en évidence l'influence de l'épaisseur exploitée  $O$ , du traitement des vides (par remblayage éventuel)  $q$ , de la « largeur » exploitée  $L$  et de la profondeur  $P$  sur l'amplitude de l'affaissement maximum observé in fine. Ces études ont permis de préciser la répartition des affaissements à la surface par la courbe de bord de taille, comme représenté sur la figure 1. Ces études ont également permis de préciser la répartition des affaissements dans le temps.

Toutes ces observations ont montré que les différents paramètres varient avec les sites d'exploitation. C'est en particulier le cas de l'angle d'influence qui permet de déterminer la position en surface de la zone où les travaux souterrains cessent d'avoir une influence. De même, il a été établi que la forme de la liaison entre la hauteur exploitée et l'affaissement maximal mesuré en surface dépend des sites, tout comme la rapidité de stabilisation des mouvements. Ces différences traduisent, à l'évidence, des mécanismes d'affaissement sensiblement différents, mais l'identification de ces mécanismes et la compréhension de leurs différences demandent qu'une synthèse soit faite avec les phénomènes de mouvements de terrains qui accompagnent les exploitations par chambres et piliers.

Les exploitations par chambres et piliers sont conçues le plus souvent avec pour objectif de préserver l'intégrité des terrains situés entre le niveau exploité et la surface.

Le premier contrôle des terrains qu'il faut assurer se situe au niveau du chantier, et il faut signaler ici l'intérêt de la communication de Sinou et al. qui nous

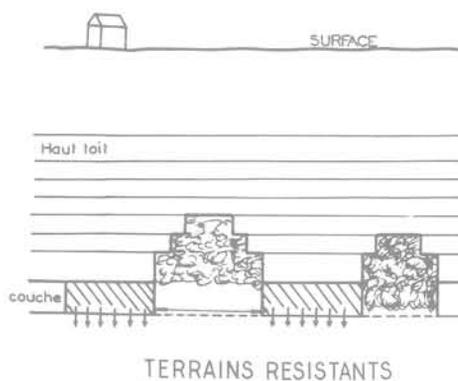
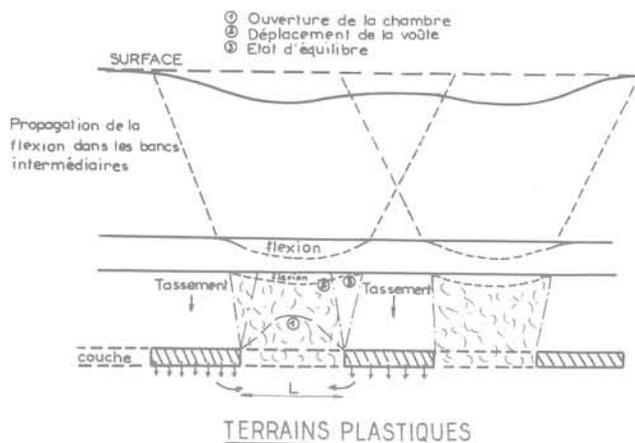


Fig. 2 Cas d'exploitation partielle

présentent une panoplie complète d'appareils de mesure in situ permettant le suivi et l'étude des chantiers dans les exploitations par chambres et piliers du type des mines de fer de Lorraine.

Il est assez paradoxal qu'une méthode sûre de protection de la surface dans ce type d'exploitation, qui est la méthode d'exploitation partielle par piliers et bandes exploitées, repose sur un effet de foudroyage; cette méthode est connue depuis bien longtemps, puisque l'on trouve trace de travaux miniers conduits dans la région de Sheffield au siècle dernier par une méthode de bandes étroites (quelques dizaines de mètres) séparées par des piliers larges (quelques dizaines de mètres également) qui ne se sont jamais effondrés [3]. Elle est toujours utilisée, sous le nom de méthode des îlots dans les mines de fer, qui fait l'objet de la communication de Tincelin et al, ou sous le nom d'exploitation partielle dans les autres exploitations conduites par méthode de longues tailles. Dans tous les cas, le découpage est caractérisé par une alternance de bandes exploitées, de largeur limitée pour que l'effondrement du toit soit limité en extension, et de piliers larges, d'élanement très faible, et dont la stabilité est assurée à très long terme par le confinement que provoque le foudroyage partiel du toit des bandes exploitées (fig. 2).

Les effets à la surface de ce type d'exploitation sont toujours faibles : dans les expériences rapportées par Tincelin dans sa communication, les affaissements sont nuis ou de l'ordre de quelques centimètres; dans les cas étudiés par Orchard [4] Wardell et Arcamone [5] ils sont de plusieurs décimètres.

## 1.2 Les dégâts de surface

Les dégâts provoqués par les mouvements de la surface ne sont pas toujours simplement liés à l'amplitude des affaissements et les exemples abondent d'immeubles ou d'ouvrages d'infrastructure qui ont subi des affaissements d'ordre de grandeur décimétrique, voire métrique sans subir de dommage. En effet, l'affaissement lui-même, dans sa composante verticale, n'a d'effet que sur les écoulements d'eau, et affecte donc a priori rivières et canaux. Les structures construites sont sensibles à la déformation du sol, qu'elle soit verticale, sous la forme de tassements différentiels des appuis, ou qu'elle soit horizontale, se traduisant alors par des efforts latéraux sur les appuis. Des règles empiriques ont été proposées pour évaluer l'amplitude des déformations accompagnant les affaissements et le risque encouru par les constructions en fonction de ces déformations. L'ensemble des courbes présenté sur la figure 3 représente la liaison entre dégâts attendus, la largeur des constructions et les déformations horizontales au droit des fondations. L'expérience montre que ces règles doivent être adaptées à la nature du sol, et aux constructions elles-mêmes :

— dans des sols constitués de bancs rocheux relativement épais et résistants, ces déformations n'apparaissent jamais de manière régulière dans les terrains, mais au contraire se localisent au droit des discontinuités naturelles dans ces bancs;

— la présence de joints de dilatation rapprochés dans les constructions longues, ou la construction d'ouvrages d'art sous la forme de structures isostatiques sur lesquelles on peut corriger des déplacements d'appuis, permet de tolérer des affaissements miniers considérables sur des constructions importantes, pourvu que les mécanismes de comportement des terrains et des constructions aient été bien identifiés au départ.

## 2 Mécanismes d'affaissements et de dégâts aux structures à la surface

La confrontation de l'ensemble des résultats précédents permet de proposer des mécanismes de mouvement des terrains à la surface dont la connaissance permettra ensuite de proposer une méthodologie de traitement des problèmes de protection de la surface en présence d'exploitations souterraines.

### 2.1 Mécanisme dans les terrains

Différents auteurs (Proust [6] Wardell [3]) ont étudié la manière dont se développe l'affaissement en fonction de l'avancement du front de défilage. Les courbes ont été réalisées à partir des mesures faites au-dessus d'exploitations dans des sites différents (fig. 4).

On note trois phases :

- une phase en plateau au cours de laquelle l'affaissement évolue lentement,
- une phase d'accélération des déplacements,
- une phase de ralentissement tendant vers un équilibre.

Au cours de la première phase, l'affaissement est très inférieur à l'épaisseur exploitée et la formation de la voûte qui se crée autour de la zone exploitée n'aurait pas évolué si les fronts n'avaient pas avancé au-delà

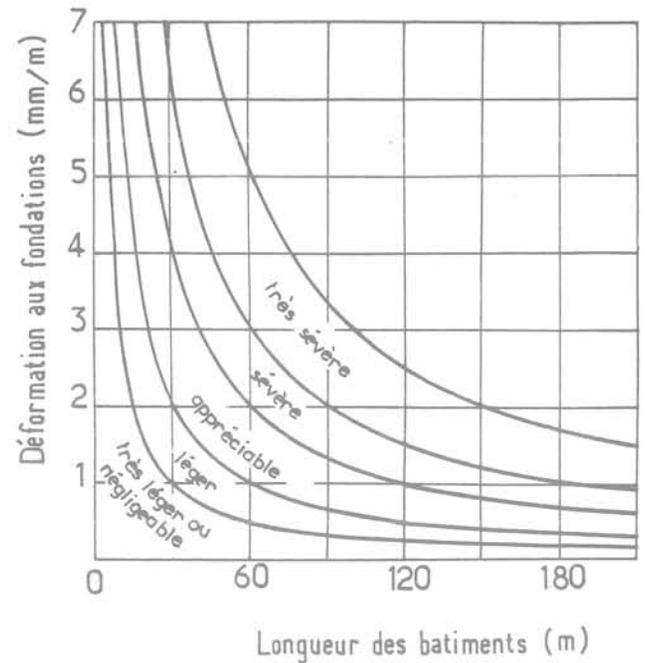


Fig. 3 Courbes des dégâts à la surface

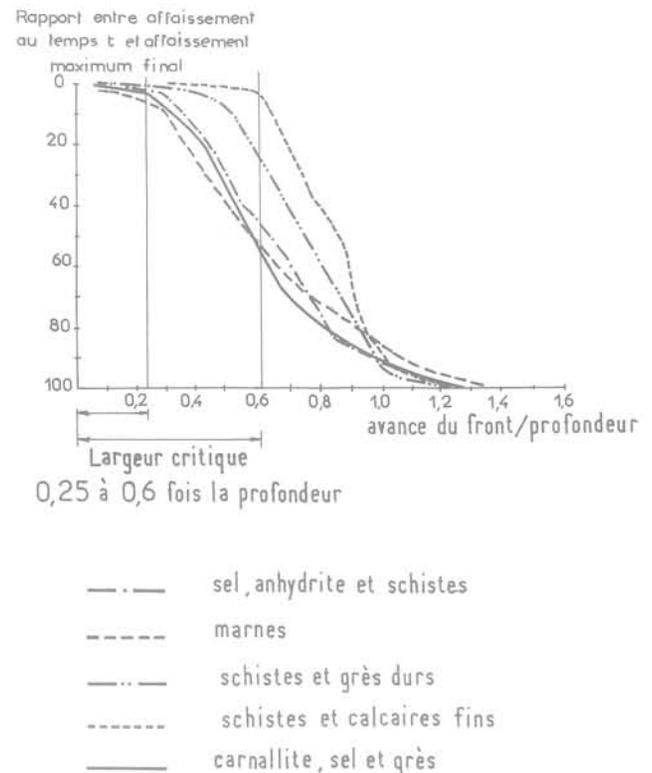


Fig. 4 Comparaison de différentes courbes d'affaissement en fonction de l'avance du front

d'une largeur que nous appellerons « largeur critique », au-delà de laquelle les affaissements touchent la surface.

Aussi longtemps que la largeur critique n'est pas atteinte, les pressions des terrains sus-jacents se portent sur les appuis périphériques. La largeur critique ainsi définie correspond à la portée maximale d'une voûte stable dans le haut toit. Elle dépend donc étroitement de la nature de ce haut toit. Pour les terrains résistants, comme ceux étudiés par Tincelin, cette largeur peut atteindre voire dépasser la moitié de

la profondeur. Ainsi, si la largeur exploitée reste bien inférieure à cette largeur critique, un régime d'affaissement correspondant à l'effondrement des terrains ne s'établira pas à la surface. Mais cela ne signifie pas nécessairement qu'il n'y aura *aucun* affaissement. En effet, dans cette situation, pour qu'il n'y ait aucun affaissement, deux conditions doivent être remplies.

Il faut que les appuis de part et d'autre de la zone exploitée ne subissent pas d'écrasement notable. Cela suppose d'abord qu'ils soient stables, et lorsque l'on juxtapose de telles zones exploitées séparées par des piliers, on trouve là le problème de dimensionnement des piliers larges pour ceux-ci restent *indéfiniment* stables. Il faut signaler ici les progrès considérables qui ont été réalisés par la combinaison de l'expérimentation in situ et du calcul dans ce dimensionnement.

Il faut par ailleurs que la voûte du haut toit ne subisse pas de flexion appréciable. Les petits affaissements que l'on observe de manière inéluctable dans le cas d'exploitations de ce type dans le charbon, peuvent être dus à ce type de flexion, plutôt qu'à l'enfoncement des piliers dans les épontes, comme le montre une étude statistique d'Arcamone [5] sur des cas d'exploitation partielle dans du charbon : ce n'est qu'en présence de haut toit raide que l'on peut dimensionner des largeurs de bandes exploitées de telle sorte qu'aucun affaissement ne se produise (fig. 6).

Au cours de la phase d'accélération des déplacements, il y a rupture du haut toit, et le mouvement se transmet rapidement jusqu'à la surface en laissant des zones ouvertes entre les bancs de raideur différente. Les résultats de mesures effectuées sur des extensomètres dans des sondages situés au-dessus d'exploitations en cours confirment cette hypothèse. On peut constater sur la figure 5 que les différents bancs ne s'affaissent pas tous de la même quantité. Des mesures réalisées par le Cerchar dans le gisement de phosphate du Sehib ont montré en outre que les décollements entre bancs se produisent plutôt lorsqu'un banc dur et épais surmonte un banc tendre et fin.

Cette analyse du mécanisme des affaissements, comme la plupart de celles qui ont été conduites jusqu'à présent, s'attache à l'identification de l'effet direct du vide souterrain. Mais les mouvements du sol peuvent être provoqués également par les effets indirects des affaissements miniers, en particulier par le déplacement des nappes souterraines qu'ils peuvent provoquer, qui peuvent être responsables de dissolutions et de tassements de différentes natures, et par la modification des caractéristiques de cohésion des sols que peuvent provoquer en particulier les déformations horizontales à la surface.

La communication de Viallanaix est particulièrement intéressante sur le premier point, car on peut penser que l'essentiel des phénomènes d'affaissement observés à la surface, et dont les conséquences en zone urbaine sont particulièrement graves, proviennent du rabattement de nappe qui a été réalisé par les travaux souterrains.

La modification des propriétés mécaniques des sols sous l'effet des affaissements miniers est un phénomène bien connu des mineurs qui ont pu voir des terrils, ou bien des flancs de mine à ciel ouvert déstabilisés par des exploitations sous-jacentes. Le Cerchar a acquis sur ce sujet une bonne expérience depuis 5 ans, et a résolu des problèmes de dimensionnement de pentes artificielles soumises à des affaissements miniers, mais c'est un sujet sur lequel il reste encore beaucoup à faire.

## 2.2 Mécanisme des effets des affaissements sur les structures

Depuis déjà de nombreuses années, Wardell et d'autres ont montré que les déplacements différentiels horizontaux sont les principaux responsables des dégâts.

On s'est longtemps contenté de considérer uniquement la déformation du sol, et de relier par des moyens empiriques ces déformations aux dégâts. Mais au cours des dernières années, certaines expérimentations sont allées plus loin en essayant de définir des longueurs de structures évitant les dégâts en fonction des propriétés de la structure et du sol. On peut considérer que la voie est ouverte à de telles études, mais les investissements qu'elles demandent sont souvent importantes.

La prise en compte des caractéristiques mécaniques des structures dans la prévision des dégâts dus aux mouvements du sol pose des problèmes difficiles en raison essentiellement des difficultés de dialogue entre les techniciens des affaissements, et les techniciens de la construction des structures.

Rappelons seulement que l'utilisation systématique et sans grandes précautions des abaques qui ne prennent en compte que la longueur et la déformation des bâtiments conduira souvent à des prévisions tout à fait erronées.

## 3 Conclusions

L'analyse des mécanismes d'affaissements et de dégâts aux structures permet de proposer une méthodologie de dimensionnement et de traitement des travaux souterrains en vue de maîtriser les phénomènes de surface.

La première phase consiste à déterminer les tolérances en matière d'affaissement et de déformation des structures à protéger à la surface. Cette phase est essentielle et demande une bonne connaissance de l'état des constructions et des liaisons avec le sol.

La deuxième phase consiste à choisir le mode de calcul des mouvements de surface qui pourra être utilisé, en fonction de la nature des terrains qui constituent le haut toit de l'exploitation, et de la méthode d'exploitation utilisée. Cela est grandement facilité si des mesures d'affaissements ont déjà été réalisées sur un site voisin et comparable lors d'exploitations antérieures.

La troisième phase consiste à évaluer le mode de répartition des mouvements de surface en fonction du modèle défini à la phase précédente, et en tenant compte de la nature des terrains de surface (plastique ou résistant).

La quatrième phase consiste, lorsque cela est possible, à calibrer l'outil ainsi défini à l'aide de mesures d'affaissement et de mouvements à la surface sous l'influence de travaux souterrains par une expérimentation préalable.

La cinquième phase consiste à rechercher un dimensionnement de l'exploitation (position pour une exploitation totale, dimensionnement des panneaux et des piliers pour une exploitation partielle) qui, compte tenu du modèle élaboré et calibré aux hases précédentes, permettent de satisfaire a priori aux tolérances définies à la première phase.

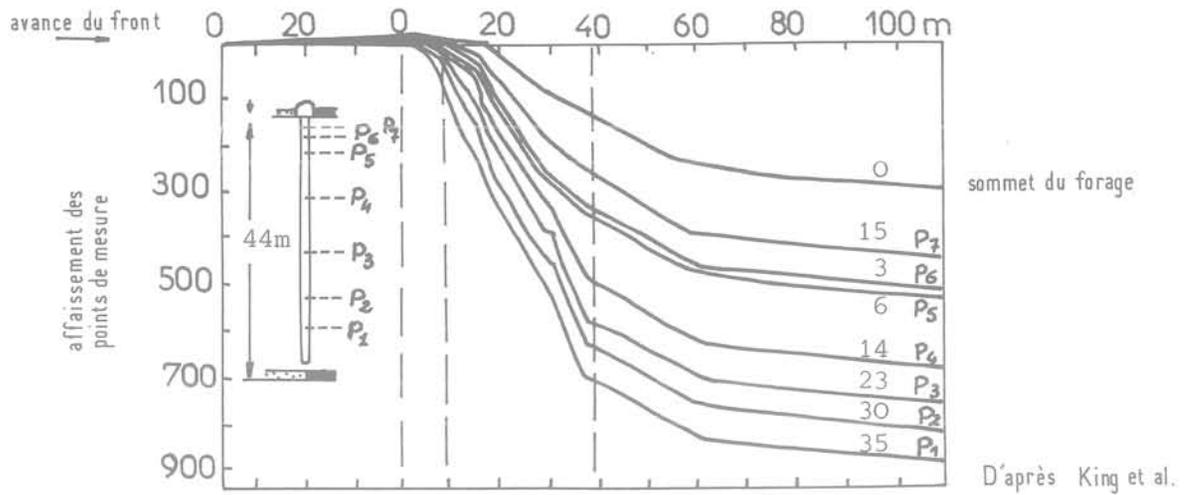


Fig. 5 Résultats des mesures d'extensométrie au-dessus d'un défilage

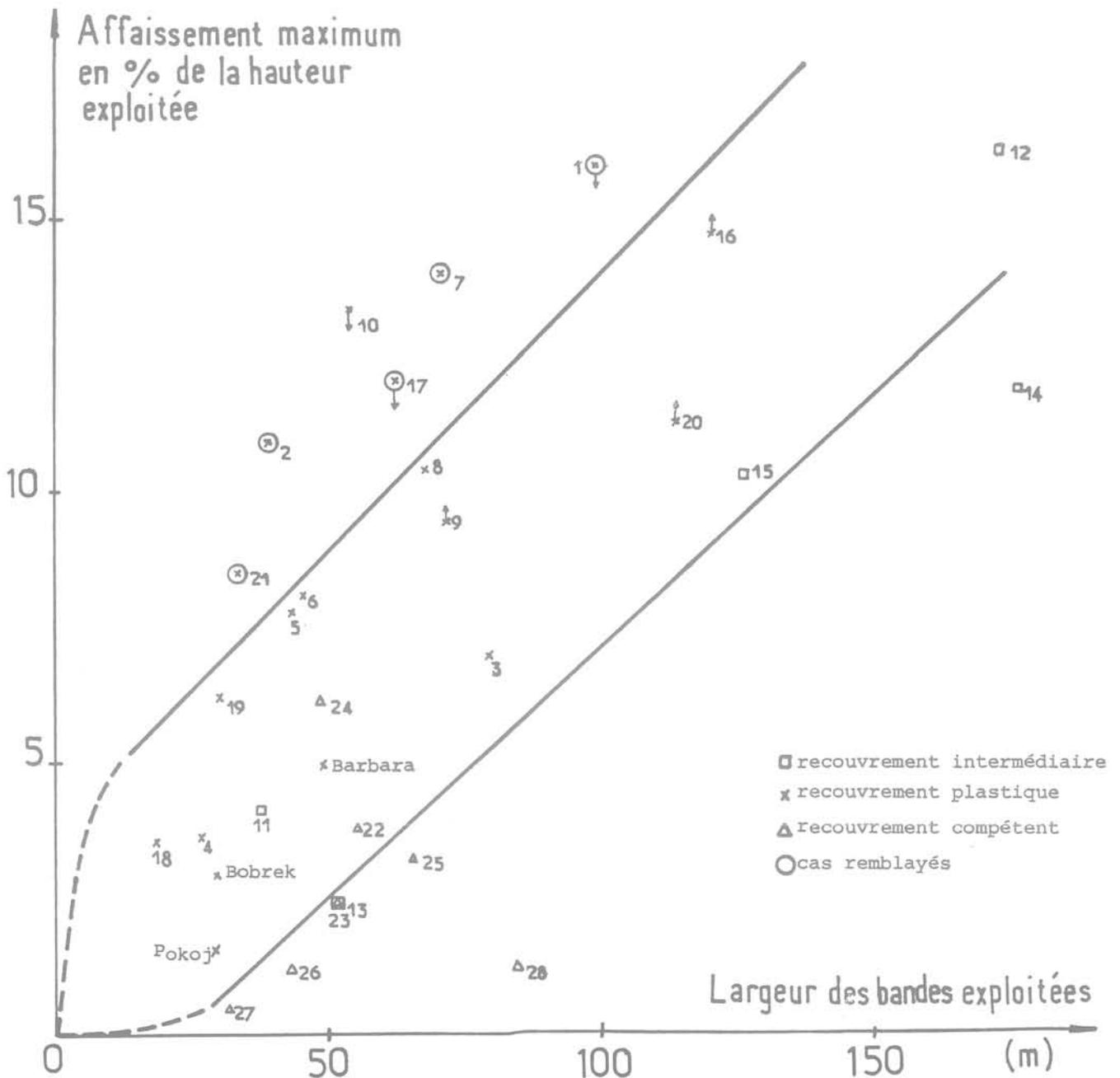


Fig. 6 Evolution de l'affaissement maxi en fonction de la largeur des bandes

Une sixième phase consiste à contrôler, par des mesures de mouvements de terrain (affaissements, déformations à la surface et éventuellement au fond) le comportement réel des terrains et des structures, de manière à tirer profit de l'expérience et éventuellement à intervenir sur les travaux pour respecter les tolérances.

Chacune de ces phases pose encore des problèmes et demande que des expérimentations soient réalisées pour améliorer les outils et les techniques. C'est bien ce qu'ont contribué à faire, par leur orientation expérimentale, les trois communications qui nous sont proposées aujourd'hui.

### Références bibliographiques

[1] Niemczyk, « Bergschadenkunde ». Glükauf, Essen.

[2] Kratsch, « Bergschadenkunde ». Editions Springer, Berlin.

[3] Wardell, Webster, « Some surface observations and their relationship to movement underground. Leeds, 1957.

[4] Orchard, Allen, « Longwall partial extraction systems ». Mining Engineer, col 129, 1969-1970.

[5] Arcamone, « Méthodologie d'étude des affaissements miniers en exploitation totale et partielle ». Thèse, INPL, Nancy, 1980.

[6] Proust, « Les affaissements miniers dans le Bassin du Nord et du Pas-de-Calais », mai-juin 1964.