

# Effondrement de cavités souterraines et interaction avec les ouvrages en surface : approche expérimentale sur modèle analogique bidimensionnel

Matthieu Caudron, Philippe Mathieu, Fabrice Emeriault, Marwan Al Heib

## ► To cite this version:

Matthieu Caudron, Philippe Mathieu, Fabrice Emeriault, Marwan Al Heib. Effondrement de cavités souterraines et interaction avec les ouvrages en surface : approche expérimentale sur modèle analogique bidimensionnel. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, 2004, Lille, France. pp.435-442. ineris-00145382

**HAL Id: ineris-00145382**

**<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00145382>**

Submitted on 10 May 2007

**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.

# Effondrement de cavités souterraines et interaction avec les ouvrages en surface : approche expérimentale sur modèle analogique bidimensionnel

Matthieu CAUDRON<sup>(1)</sup>, Philippe MATHIEU<sup>(1)</sup>, Fabrice EMERIAULT<sup>(1)</sup>, Marwan AL HEIB<sup>(2)</sup>

(1) : URGC-Géotechnique, INSA de Lyon, France

(2) : INERIS-LAEGO, Ecole des Mines, 54042 NANCY Cedex

## Résumé

L'étude concerne les mouvements de terrains et leurs conséquences sur les structures. Elle aborde ce sujet par des expériences en laboratoire utilisant un matériau analogique en modèle réduit. A travers le cas d'un effondrement isolé et la simulation d'un front de taille en présence d'un bâti en surface, nous discuterons de la nécessité de considérer l'interaction sol-structure et de l'utilisation d'une approche de type PECK pour évaluer les tassements de surface.

## 1. Introduction

Les affaissements de terrains de grande ampleur résultent de l'effondrement de cavités souterraines issues de l'activité industrielle humaine ou formées naturellement par la circulation d'eau dans des massifs de roches solubles. Leur impact sur le bâti en surface est généralement très important comme l'attestent les exemples récents des affaissements d'Aboué (1996), de Moutiers (1997) et de Roncourt (1999) en endommageant plus de cinq cents bâtiments et ouvrages (Deck, 2002) ou le fontis sur le chantier METEOR en 2003. Il est donc nécessaire de prévoir les mouvements de sol en surface résultant de ces phénomènes et de déterminer l'influence que peut avoir la présence d'une ou plusieurs structures sur leurs amplitudes.

La pratique actuelle en matière de prévision des effets sur les structures consiste à déterminer les mouvements provoqués par l'effondrement de la cavité en l'absence de structure puis d'utiliser ces résultats pour vérifier la capacité de la structure à résister au phénomène. Les approches empiriques ou numériques sont utilisées pour déterminer l'amplitude de l'affaissement et des mouvements (AL HEIB & al, 2003). Il s'avère que cette approche peut sous-estimer ou surestimer largement les sollicitations engendrées, ce qui dans les deux cas a des impacts négatifs (risque subsistant pour la structure dans un cas, surcoût du projet dans l'autre cas).

## 2. Le modèle physique

### 2.1 Dispositif expérimental

La problématique de l'interaction sol-structure est abordée par une étude expérimentale de laboratoire utilisant le matériau de SCHNEEBELI. Un massif de sol de grandes dimensions permet de représenter des situations classiques d'affaissement avec un facteur d'échelle de l'ordre de 1/10 à 1/50 (Al ABRAM, 1998). Une maquette de bâtiment mise en place à la surface de ce massif, bien que nécessairement très simplifiée et ne respectant pas complètement les règles de similitude en terme de rigidité par exemple, permet néanmoins de faire une évaluation qualitative de l'impact de la présence d'une structure en surface. Les différentes expériences réalisées sont analysées du point de vue des déplacements induits dans le massif de sol et la structure durant le développement de l'affaissement. Le traitement de la série d'images numériques prises au cours de l'expérience se fait par une technique de corrélation directe.

Le matériau analogique bidimensionnel de SCHNEEBELI (un empilement de rouleaux cylindriques en acier inoxydable de 3, 4 et 5mm de diamètre avec une équirépartition en masse) permet de représenter un sol pulvérulent de manière fiable et pratique à mettre en oeuvre. Le poids volumique du matériau mis en place est en moyenne de 65kN/m<sup>3</sup> soit environ trois fois plus dense qu'un sol granulaire. Il présente un angle de frottement d'environ 24° et une cohésion nulle.

Le bâti expérimental utilisé présente les dimensions suivantes : 2m de largeur pour 1m de hauteur maximum, ce qui représente environ 200 000 rouleaux.

## 2.2 Représentation physique de l'effondrement

Deux séries d'essais ont été réalisés de manière à représenter les deux grands types d'effondrement de cavités souterraines. La première s'attache à la modélisation d'un effondrement isolé (principe du fontis avec ou non une propagation de la cloche de remontée jusqu'à la surface). Le deuxième représente la progression du front de taille d'une exploitation par exemple, la zone de tassement se déplace dans ce cas. Nous envisageons aussi la configuration d'une excavation sous une zone bâtie. Le premier essai de la deuxième modélisation se fait sans structure en surface afin de disposer d'un essai de base puis avec structure pour observer l'influence du bâti.

### 2.2.1 Cas de l'effondrement localisé

La première expérience est la modélisation d'un effondrement localisé, qui peut être de type fontis si l'on a une remontée de cloche d'effondrement. Dans le cas d'effondrement d'anciennes mines, il s'avère que l'ordre de grandeur des cavités rectangulaires est de 8m de large, 2m de hauteur avec 8m de couverture.

Avec le facteur d'échelle retenu ( $1/40^\circ$ ), ceci conduit à une cavité de 5cm de haut pour 20cm de large (figure 1). Les raisons qui ont motivées ce choix sont présentées en 4.1.

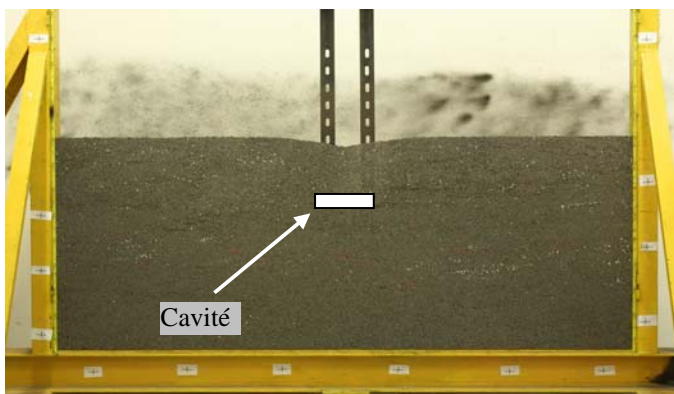


Figure 1: Photo de l'effondrement isolé

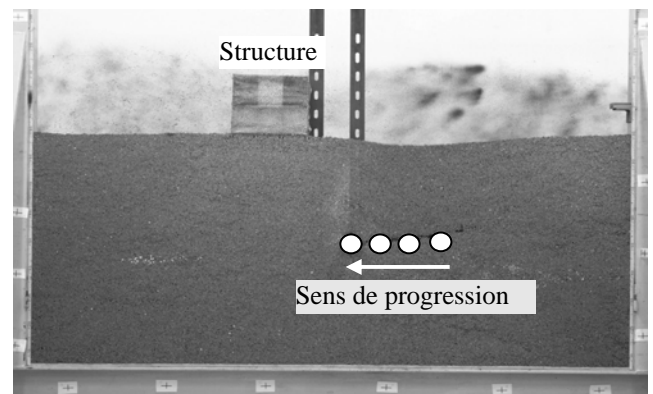


Figure 2: Photo de l'effondrement de galerie

### 2.2.2 Cas de l'effondrement progressif de galerie

Dans ces essais, on représente un front de taille qui progresse horizontalement vers un bâtiment, la disposition des différents éléments (cavité, structure) est représentée sur la Figure 2. Deux types d'essais différents sont réalisés : un essai en champ libre ou "greenfield" et un essai en présence d'une structure. La cavité est créée par enfoncements successifs d'un cylindre de 5cm de diamètre, ce qui correspond à l'effondrement d'une cavité de 2m de haut. 25 étapes sont nécessaires pour reproduire l'effondrement total de la galerie. Chaque étape est photographiée avec un appareil photo numérique (APN).

La maquette du bâtiment (3 travées, 2 niveaux) est simplifiée du point de vue des règles de similitudes : si celle-ci est à priori plus raide qu'une structure réelle, les conditions de fondation sont cependant les plus proches de la réalité (coefficient de sécurité proche de l'ELS et frottement sol-structure égal à l'angle de frottement du sol, profondeur d'encastrement de 2cm, soit 80cm dans la réalité).

### 2.3 Méthodologie d'exploitation des résultats

L'exploitation des résultats se fera grâce à la photographie numérique. Chaque étape d'un essai est photographiée à l'aide d'un APN de 3 millions de pixels. Les images sont ensuite stockées sur un ordinateur. Nous utilisons un logiciel de corrélation d'images numériques : SIFASOFT (développé par F. MORESTIN & TOUCHAL-MGUIL,1997) pour obtenir le champ de déformations. Le principe de fonctionnement est le suivant :

- Transformation des photos en niveau de gris (256 niveaux).
- Maillage des images en utilisant des motifs et un pas de maillage (tous deux définis par l'utilisateur)
- Calcul des composantes de la déformation pour chaque motif du maillage pour un couple de photos traitée. L'ensemble des déformations des motifs forme le champ de déformations du massif de sol.
- La précision de la mesure est de l'ordre du  $1/100^{\circ}$  de pixel, soit environ  $4\mu\text{m}$  dans notre cas. Cela est bien inférieur à la précision permise par l'APN qui est de  $0.05\text{mm}$ .

Ainsi nous pouvons reconstituer l'évolution des déformations étape par étape, à partir du début de l'expérience, ce qui nous permet de suivre les paramètres suivants : la surface du massif de sol, les déformations à certaines profondeurs dans le massif et les caractéristiques géométriques de la cuvette de tassement (tassement maximal, largeur de la cuvette,...).

### 3. Mouvements dans le massif de sol

#### 3.1 Modélisation d'un effondrement localisé

La figure 4 présente l'évolution de la surface de tassement en fonction de chaque étape.

L'amplitude maximale est de  $35\text{mm}$  environ, soit  $70\%$  de la hauteur de la cavité. Le volume des cuvettes obtenues sont très proches des volumes des cavités effondrées. On observe une diminution inférieure en générale à  $5\%$ .

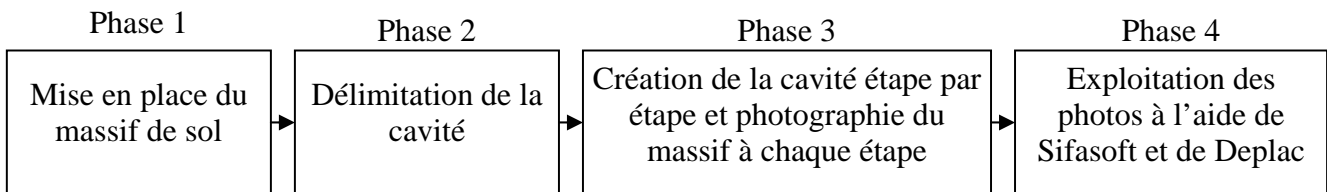


Figure 3: Les différentes phases d'une expérimentation et de l'exploitation des résultats

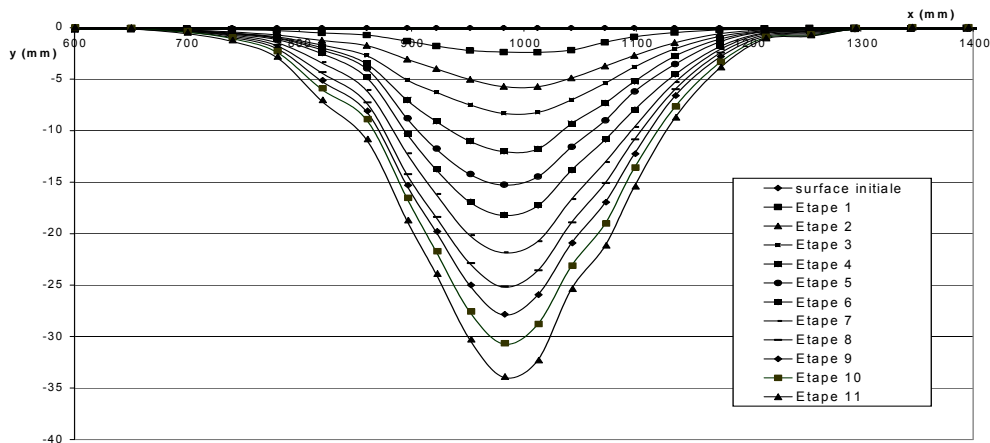


Figure 4: Evolution de la cuvette de tassement pour l'effondrement localisé

### 3.2 Modélisation d'un effondrement de galerie

Nous comparons ici les différences que l'on peut remarquer entre les essais réalisés sans structure en surface et ceux avec. Des différences importantes apparaissent entre les différentes courbes, le tassement maximum augmente de 53% et ne se situe plus au même endroit. Les cuvettes sont moins régulières dans le deuxième cas (figure 5a et 5b).

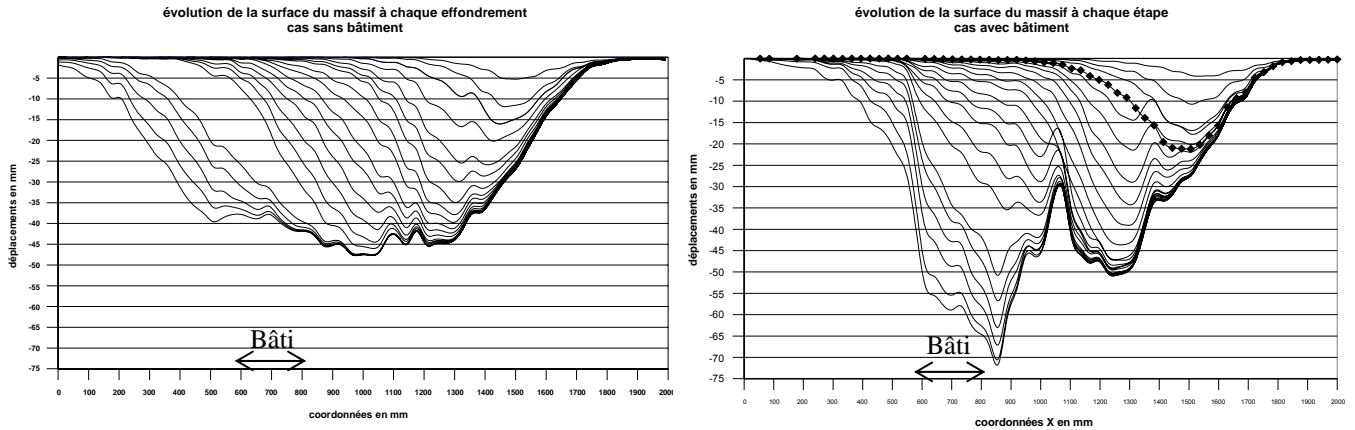


Figure 5a & b: Evolution des tassements pour l'effondrement de galerie

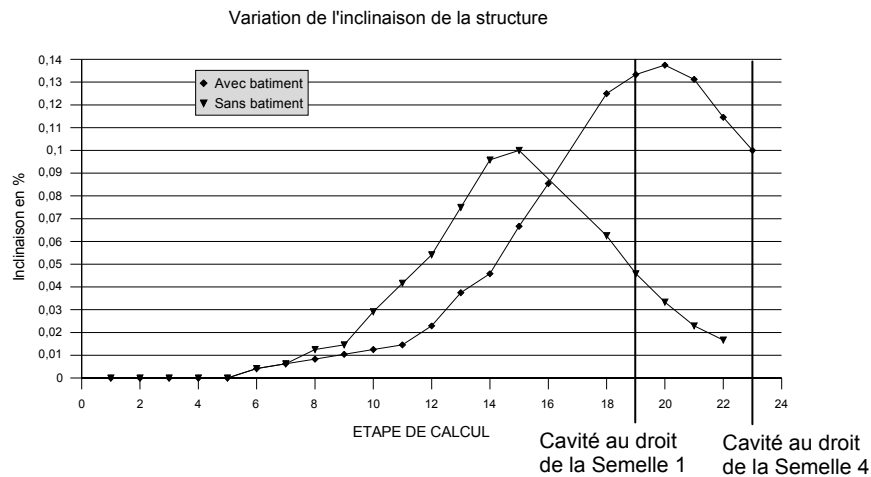


Figure 6: Evolution de l'inclinaison d'un bâtiment pour les deux essais d'effondrement de galerie

Observons les déplacements des semelles de la structure entre les deux essais. Pour cela, on représente l'évolution de l'inclinaison de la structure étape par étape (Figure 6).

On observe tout d'abord un retard entre les deux courbes : pour les premières étapes, l'essai avec bâti est moins perturbant que celui en champ libre. Par contre, une fois que la cavité se rapproche suffisamment de la structure (principalement pour les étapes sous celle-ci), l'essai en greenfield sous-estime les tassements et l'inclinaison. De plus, les valeurs finales des mouvements de la structure ne sont pas identiques dans les deux essais. L'essai sans bâti en surface présente une inclinaison finale proche de 0, alors qu'une valeur résiduelle importante, environ 10%, est observée pour l'autre essai.

## 4. Approche empirique de PECK

Dans cette partie, nous allons discuter de la possibilité d'utiliser l'approche de PECK pour des cavités non circulaires ainsi que de l'influence des tassements antérieurs sur la forme de la cuvette de tassement.

### 4.1 Rappel-justification du facteur d'échelle

PECK (1969) a proposé d'estimer les tassements induits par le creusement de tunnels de section circulaire par :

$$S(x) = S_{\max} e^{\frac{-x^2}{2i^2}} \quad (1)$$

Le paramètre  $i$  traduisant la largeur de la cuvette de tassement peut être approximée par diverses relations empiriques prenant en compte le diamètre  $D$ , la couverture  $C$  et la nature des terrains (Tableau I).

Tableau I : Formules empiriques pour déterminer  $i$  (d'après DOLZHENKO, 2002)

Auteurs	Expression proposée	Type de sol concerné	Valeur de $i$ calculée
Atkinson & Potts [1997]	$i = 0.25(1.5C + D)$	sables denses avec surcharge	3.65m
Oteo & Sagaseta [1982]	$i = 0.525H + 0.42R$	sols granulaires	5.67m
Dyer et al. [1986]	$i = 0.29H$	sable lâche à peu dense	2.60m
Al Abram [1998]	$i = 0.15H + 0.5D$	sol analogique	3.60m

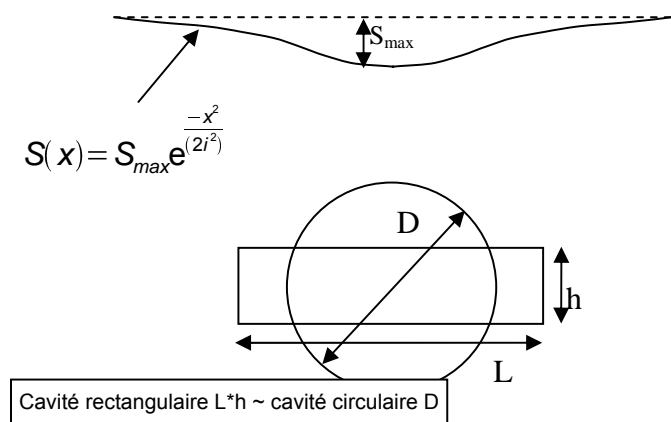


Figure 7: Détermination de la cavité circulaire équivalente

Des relations équivalentes pour  $S_{\max}$ , tassement maximal au centre de la cuvette, existent mais correspondent à des pertes de volume de l'ordre de 5 à 10%.

Même si les cavités représentées expérimentalement sont rectangulaires (hauteur  $h=2\text{m}$ , largeur  $L=8\text{m}$ ), il est possible d'utiliser l'approche de PECK, en première approximation, en supposant une cavité équivalente circulaire, de même centre de gravité et de même surface (Figure 7).

Le tableau I montre que la largeur  $5i$  de la cuvette est de l'ordre de 28m dans le cas le plus défavorable. On a donc choisi pour les expérimentations en modèle réduit un facteur d'échelle de  $1/40^{\text{ème}}$ .

Les essais ont montré que d'une part la perte de volume est de l'ordre de 95% et que l'expression d'OTEO & SAGASETA (1982) fournit la meilleure approximation de  $i$  mesurée expérimentalement ( $5i \approx 70\text{cm}$ ).

## 4.2 Application à des cavités de forme non-circulaire

Nous avons vu dans la partie précédente que l'approche de PECK fournit des résultats satisfaisants pour une cavité rectangulaire présentant un élancement de 4. Nous allons donc chercher à déterminer l'élancement limite pour cette approche, les autres paramètres, recouvrement et hauteur de la cavité étant gardés constants.

Les cavités sont créées sur la base de l'enfoncement d'un certain nombre de cylindres de 50mm de diamètre, ce qui permet de maîtriser parfaitement l'élancement. Des essais ont été menés pour des élancements allant de 1 jusque 25, ce qui correspond au numéro des étapes représentées.

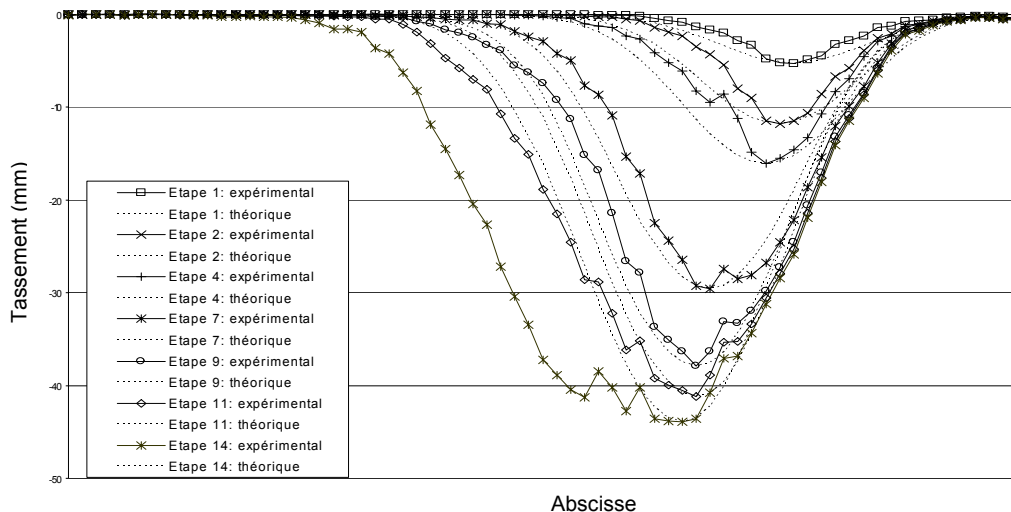


Figure 8: Comparatif des cuvettes théoriques et expérimentales pour quelques élancements

Il apparaît que les courbes théoriques suivent assez bien les cuvettes expérimentales jusqu'à un facteur d'élancement de 9 : ce qui correspond à une cavité d'environ 5cm de haut par 45cm de long (voir figure 8). On peut aussi remarquer des écarts assez importants entre les deux courbes pour les cavités de faible élancement. Cela semble être dû à une mauvaise détermination du paramètre  $i$ . En effet les cuvettes théoriques sont plus larges que celles expérimentales et c'est le paramètre  $i$  qui influence cette caractéristique.

## 4.3 Application à des incréments de sollicitations

Le but est de déterminer s'il est possible d'appliquer la formule de PECK à chaque étape de notre effondrement progressif de galerie : la cuvette d'affaissement obtenue après les 25 étapes n'est-elle que l'addition de 25 cuvettes "identiques" régies par la loi de PECK?

Nous traçons les 25 cuvettes incrémentales pour l'essai sans bâti et les recentrons en un même point. Il apparaît que la plupart de ces courbes se situent dans un fuseau assez étroit aussi bien en profondeur de cuvette qu'en largeur de celle-ci (Figure 9). Il apparaît donc que chaque étape peut être traitée de manière identique quelque soit sa position dans l'essai. Il n'y a donc pas influence de l'histoire des tassements antérieurs sur les étapes suivantes. Les phénomènes antérieurs ayant eu lieu à proximité n'ont pas ou peu d'influence sur la cuvette additionnelle résultant d'une nouvelle étape d'affaissement.

Appliquons maintenant la même procédure à l'essai avec une structure en surface (figure 11 et 12) et à l'essai de tassement localisé (figure 10).

Si l'on ne tient pas compte de quelques étapes qui ne sont pas semblables aux autres pour une raison indéterminée (influence trop grande de la structure sur les tassements, erreur de mesure), il apparaît que la cuvette incrémentale moyenne est fort semblable à celle obtenue dans le cas sans structure en surface. Il semblerait donc que l'on ait généralement une grande invariance dans les tassements obtenus et cela quelque soit les sollicitations antérieures ou la



présence d'un bâti à proximité de la zone concernée. Cependant il ne faut pas oublier que les courbes finales obtenues dans les deux cas sont très différentes. Ces différences sont principalement dues à quelques étapes qui produisent des tassements très différents de ce que prévoit PECK.

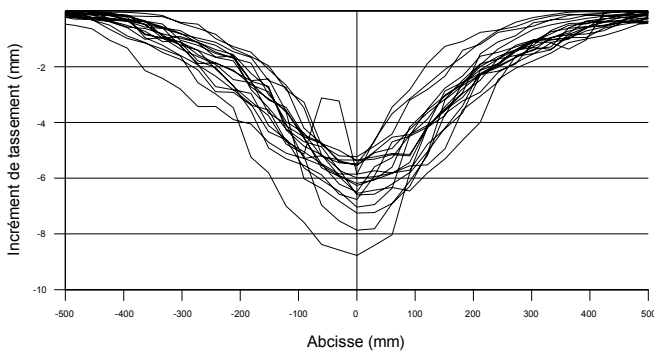


Figure 9: Tassements incrémentaux pour l'effondrement de galerie sans bâtiment

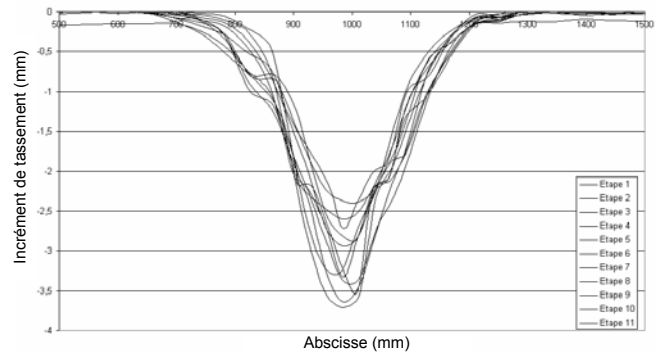


Figure 10: Tassements incrémentaux pour l'effondrement localisé

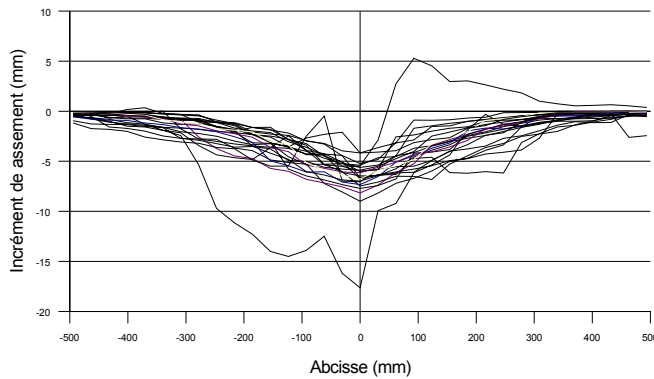


Figure 11: Tassements incrémentaux pour l'effondrement de galerie avec bâtiment

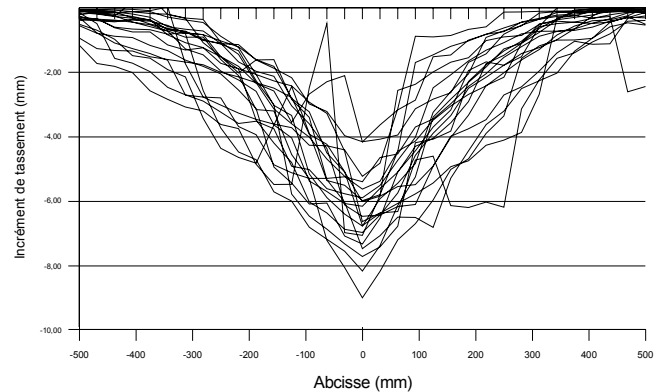


Figure 12: Tassements incrémentaux modifiés pour le front de taille proche d'une structure

Il nous faut maintenant trouver un moyen d'estimer de manière fiable l'amplitude  $S_{max}$  des tassements. Il est observé dans les essais que pour le matériau de SCHNEEBELI, le volume de la cuvette est très proche du volume effondré (moins de 5% d'écart en général). Or le volume d'une cuvette de PECK est régi par :

$$V = 2,51 \times S_{max} \times i \quad (2)$$

En se basant sur la formule d'OTEO & SAGASETA (tableau I) qui fournit une approximation correcte de  $i$ , nous pouvons en déduire  $S_{max}$ . En appliquant cette démarche aux incréments de tassement pour le cas de l'effondrement de galerie sans structure, on obtient une valeur de  $i$  estimée à 153mm. La valeur de  $S_{max}$  calculée est alors de 6,45mm. La valeur moyenne observée lors des essais (cf. Figure 9) est de 6,3mm. L'écart est très faible ce qui prouve l'adéquation de la méthode. Cependant celle-ci nécessite de connaître au préalable le volume de la cavité effondrée et de pouvoir calculer de manière fiable  $i$ .



## 5. Conclusions

On peut retenir de cette étude :

- Le dispositif expérimental permet de représenter les différents phénomènes d'effondrement (pour une cavité isolée, pour le front de taille d'une exploitation).
- La pertinence de la méthode d'analyse utilisant la corrélation d'images numériques.
- Dans le cas de tassements en *greenfield*, l'approche de PECK fournit des résultats intéressants pour un effondrement localisé, mais aussi pour un effondrement progressif au niveau de chaque incrément de tassement.
- Et surtout, nous avons montré que la présence d'une structure en surface change fondamentalement les résultats, si pour un grand nombre d'incrément, l'approche de PECK est valable, elle n'est pas du tout adaptée à la description de quelques étapes qui sont la cause principale des différences avec le cas *greenfield*.

## Bibliographie

- AL ABRAM I. (1997) Etude sur modèle réduit bidimensionnel du champ de déplacement induit par le creusement d'un tunnel à faible profondeur. Interaction avec les ouvrages existants, Thèse Génie Civil, INSA de Lyon, 268p.
- AL HEIB M. & al (2003) Paramètres d'affaissement pour la hiérarchisation des zones à risque dans le bassin ferrifère lorrain, Actes du colloque "Après-mine 2003", Nancy, 5-7 février 2003
- DECK O. (2002) Etude des conséquences des affaissements miniers sur le bâti. Propositions pour une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité du bâti, Thèse Génie Civil, INPL de Nancy, 241p.
- DOLZHENKO N. (2002) Etude expérimentale et numérique de modèle réduit bidimensionnel du creusement d'un tunnel. Développement d'une loi de comportement spécifique, Thèse Génie Civil, INSA de Lyon, 300p.
- PECK (1969) Deep excavations and tunnelling in soft ground. In. : Proceeding of the 7<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics Foundation Engineering. Mexico: State-of-the-Art, Vol.3, pp225-290.
- TOUCHAL-MGUIL (1997) Une technique de corrélation directe d'images numériques; Proposition d'un critère de striction, Thèse de Docteur en Mécanique, INSA de Lyon.
- TOUCHAL S., MORESTIN F., BRUNET M. (1997) Mise au point d'une nouvelle méthode de mesure de champs de déformations par corrélation directe d'images numériques, European Journal of Mechanical Engineering, BSME N°4, Vol.42 pp197-204.