EFFONDREMENT DE CAVITÉS SOUTERRAINES A FAIBLE PROFONDEUR ET DOMMAGES INDUITS AUX OUVRAGES EN SURFACE.

Approche expérimentale sur modèle analogique bidimensionnel.

Matthieu CAUDRON(1), Fabrice EMERIAULT(1) , Marwan AL HEIB(2)
(1) : URGC-Géotechnique, INSA de Lyon, France
(2) : INERIS-LAEGO, Ecole des Mines, 54042 NANCY Cedex

Résumé

Le sous-sol français est riche en matière premières nécessaires aux développement de l'urbanisme et de l'activité industrielle. L'étude concerne les mouvements de terrains induits par l'effondrement de ces cavités et leurs conséquences sur les structures. Elle aborde ce sujet par des expériences en laboratoire utilisant un matériau analogique et une maquette de structure en modèle réduit. A travers des essais d'effondrement localisé (fontis) en terrain vierge ou en présence d'une maquette de structure, nous mettrons en évidence la nécessité de tenir compte de l'interaction sol-structure lors de l'évaluation par l'expert de tels phénomènes.

1 Introduction

Les mouvements de terrain résultent de l'effondrement de cavités souterraines issues de l'activité industrielle humaine (mines ou carrières) ou formées naturellement par la circulation d'eau dans des massifs de roches solubles (calcaire, gypse). Leur impact sur le bâti existant en surface est généralement très important [AL HEIB, 2000] comme en attestent les exemples récents des effondrements dans les mines de fer [DECK & al, 2003] et des carrières de Paris. Il est donc nécessaire de prévoir les mouvements de sol en surface (tassements et déformation horizontale) résultants de ces phénomènes et surtout de déterminer l'influence que peut avoir la présence de structures en surface sur la forme et l'amplitude de ces mouvements [ABBASS, 2004] et [AL HEIB, 2003].

La pratique actuelle en manière de prévision des effets sur les structures consiste à déterminer les déplacements provoqués par les mouvements de terrains (mise en pente, déformation horizontale, etc.) en l'absence de structure puis d'utiliser ces résultats pour vérifier la capacité de la structure à résister au phénomène [VERDEL & DECK, 2004]. Il s'avère que cette approche peut sous-estimer ou surestimer largement les sollicitations engendrées, ce qui dans les deux cas présente des impacts négatifs (risque subsistant pour la structure dans un cas, surcoût de projet dans l'autre cas). La prise en compte de l'interaction sol-structure est un exercice délicat, nécessitant des compétences dans les domaines de la géotechnique et des structures. Cet article correspond aux premiers pas vers une évaluation réaliste de ce phénomène.

Pour mettre en évidence les phénomènes d'interaction sol-structure, l'approche adoptée utilise des essais expérimentaux sur modèles réduits employant le matériau analogique de Schneebeli [SCHNEEBELI, 1956] [KASTNER, 1982] [MASROURI,

1986]. Des essais en terrain vierge puis en présence d'une maquette de structure seront réalisés, puis analysés par une technique d'imagerie numérique.

L'aléa que nous étudions est la formation de fontis, vide franc remontant progressivement ou brutalement jusqu'à la surface. Cependant, nous choisissons dans un premier temps, du fait de la nature pulvérulente du matériau de Schneebeli, de simuler des affaissements de terrain. Dans une étude ultérieure, nous introduirons de la cohésion dans ce modèle de sol afin de pouvoir simuler la création d'un fontis.

2 Le modèle physique

2.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilise un modèle analogique de sol ainsi qu'un modèle réduit de structure pour simuler un cas réel de formation de fontis. Le but est de mettre en évidence les phénomènes d'interaction sol-structure. La cavité que nous simulons présente une largeur de 1.6m pour une ouverture de 3.2m, en présence d'un recouvrement de 3.2m de hauteur.

Le modèle réduit de bâtiment utilisé représente un bâtiment type maison d'habitation R+1 de trois travées employant une structure poutre-poteaux en acier. Les dimensions envisagées sont une longueur de 10m pour le bâtiment (soit environ 3.2m par travée), une hauteur de 2.7m par étage et un vide sanitaire de 1.6m.

2.1.1 Le sol

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^3 soit environ trois fois plus dense qu'un sol granulaire réel. Il présente un angle de frottement interne de 24° et une cohésion nulle.

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

2.1.2 La structure

Une maquette de bâtiment type maison d'habitation 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. Avant d'utiliser la maquette en présence du massif de sol, elle a tout d'abord été testée sur un banc d'essais en utilisant des conditions aux limites et des chargements bien définis. Cela permet de s'assurer de la répétabilité des résultats et du comportement élastique de celle-ci, ce qui correspond à des régles de similitudes relativement simples.

2.1.3 Le facteur d'échelle géométrique et les règles de similitude

Le facteur d'échelle géométrique utilisé pour établir les dimensions à donner à la maquette de structure et à la cavité a été fixé essentiellement de manière à éviter les

effets de bord tout en assurant une faisabilité technique des manipulations. Un facteur d'échelle géométrique de 1/40 a ainsi été retenu.

Le cadre de manipulation et l'utilisation du matériau de Schneebeli (ρ=65kN/m^3) nous imposent deux autres facteurs d'échelle : 1 pour g* (la gravité) et 3 pour ρ* (la masse volumique). Ces facteurs fixent la totalité des facteurs d'échelle pour les autres grandeurs.

Les dimensions de la cavité expérimentale sont donc de 0.04m de large pour 0.08m d'ouverture avec un recouvrement de 0.10m.

2.2 Représentation de l'effondrement

L'effondrement de la cavité est simulé expérimentalement en enlevant en plusieurs étapes une certaine quantité de matériau à un endroit précis. La somme des petites quantités de rouleaux enlevés initialement repérés par une coloration blanche (Cf. Fig. 2) correspond au volume total de la cavité à créer. La prise de photographies numériques à chaque étape permet, après traitement, de suivre la propagation des déplacements dans le massif de sol jusqu'à la surface en fonction du volume de sol enlevé.

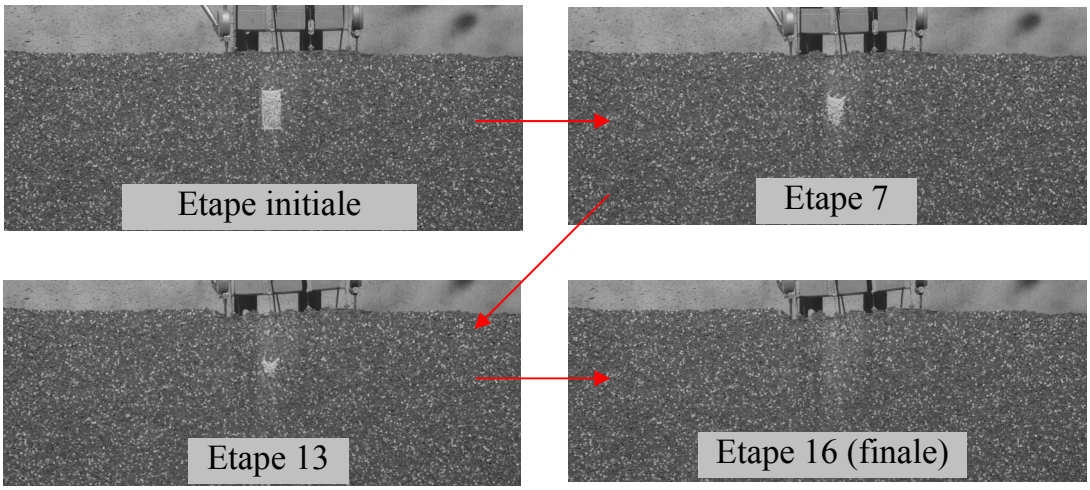


Figure 1 : Succession de photos prises à différentes étapes



Figure 2 : Deux champs de déformation obtenus par imagerie numérique pour un essai en terrain vierge **(plus le gris est clair plus les déformations sont importantes)**.

2.3 Exploitation des résultats

Les différentes expériences réalisées sont analysées du point de vue des déformations induites 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 (logiciel Sifasoft développé par F. MORESTIN au LAMCOS, INSA de Lyon, MGUIL-TOUCHAL & al. [1996]).

L'Appareil Photo Numérique utilisé dispose d'une résolution de 3 millions de pixels. un ordinateur. Le logiciel de corrélation d'images numériques qui permet d'obtenir le champ de déformations fonctionne sur le principe suivant (Fig. 3 et 4):

- 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 traité. L'ensemble des déformations des motifs forme le champ de déformations du massif de sol.
- La précision de la méthode est de l'ordre du 1/100eme de pixel, soit environ 10µm dans notre cas. Cela est bien inférieur à la précision permise par l'APN qui est de 0.05mm.

Ainsi nous pouvons reconstituer l'evolution 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 des tassements en surface (tassement maximal, largeur d'influence,...).

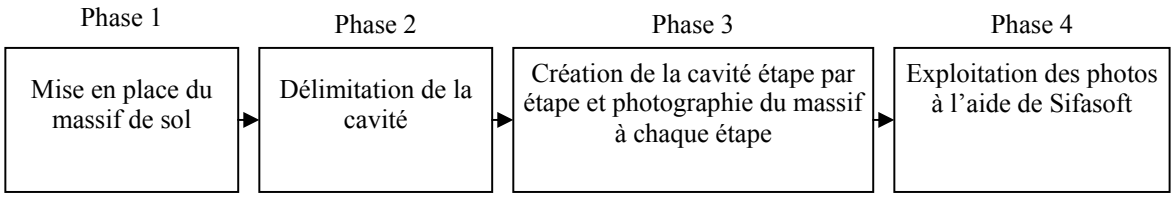
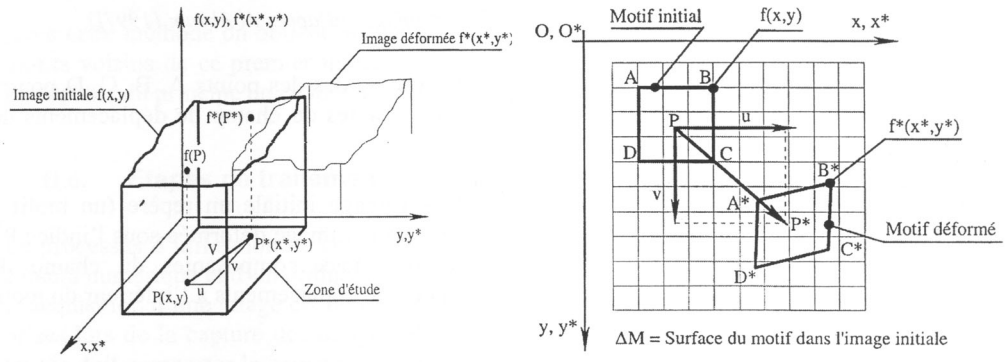


Figure 3 : Les différentes phases d'une expérimentation et de l'exploitation des résultats



Niveau de gris dans l'image initiale et déformée (d'après Mguil [1996])

Déformation d'un motif entre deux images (d'après Mguil [1996])

Figure 4 : Principe de fonctionnement du logiciel de corrélation d'images numériques

3 Essais en terrain vierge

Deux essais sans la présence d'une structure permettent d'une part d'établir une référence telle que communément faite par la pratique actuelle en terme de prévision des effets sur les structures (on considère le massif de sol seul, puis la structure) et d'autre part d'évaluer la répétitivité de la procédure.

Celle-ci étant satisfaisante, seul un essai est représenté dans la suite, en particulier au travers de l'évolution de la forme et de 'amplitude des déplacements en surface. La figure 5 montre l'évolution de la cuvette d'affaissement obtenue pour les 16 étapes.

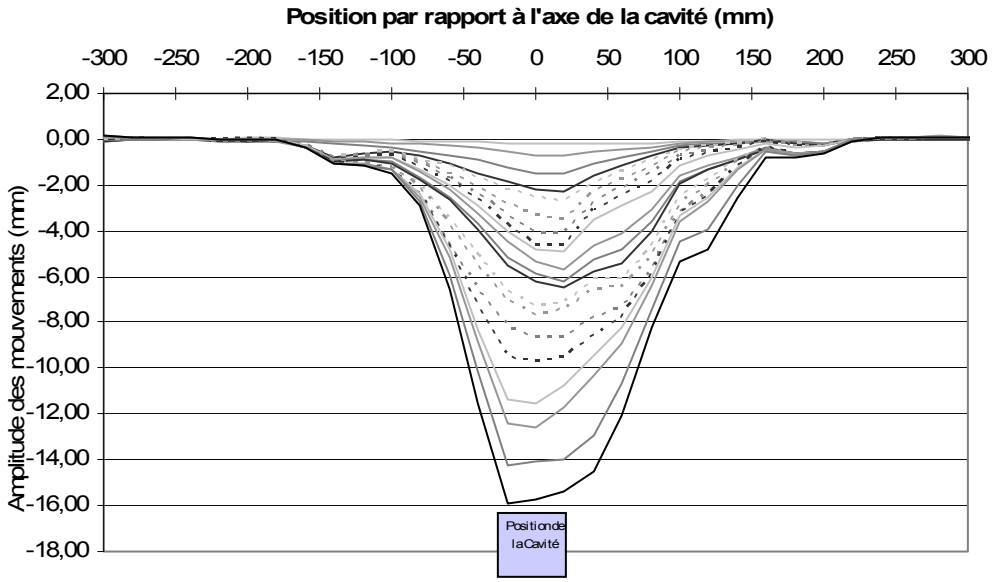
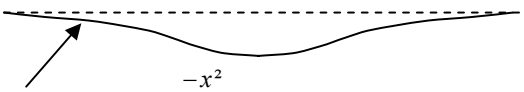


Figure 5 : Evolution de la surface du sol durant un essai en terrain vierge.

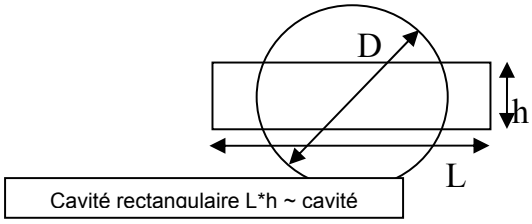
La forme des cuvettes d'affaissement légèrement dissymétrique peut certainement être expliquée par la méthode utilisée pour créer la cavité. En effet, lorsque l'on cherche à enlever des rouleaux, il est difficile de s'assurer que l'on ne privilégie pas un côté de la cavité plutôt qu'un autre.

16 étapes ont été nécessaires pour créer la totalité de la cavité (Fig. 5). CAUDRON & al [2004] ont montré que, pour chaque étape de réalisation d'une cavité dans le massif de sol analogique, la cuvette d'affaissement peut être approximée par une courbe de Gauss (utilisée normalement pour des cavités circulaires) :



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

Formule de Peck [1969]



La figure 6 montre que ce résultat est toujours valable, même si la cavité est ici verticale.

Les différents paramètres caractéristiques S_{max}, i, D et C, (respectivement le tassement maximal, la distance au point d'inflexion, le diamètre équivalent de la cavité et la hauteur de couverture) sont estimés de manière relativement fiable et ont respectivement les valeurs suivantes : 0,0162m, 0,058m, 0,062m et 0,01m,. Les valeurs numériques sont déterminées selon la méthode explicitée par Caudron & al. [2004].

Les surfaces des deux courbes (théorique et expérimentale) diffèrent peu, en effet l'écart relatif est de 1,4% pour les courbes finales. La perte de volume associé est d'environ 75%, ce qui dénote un foisonnement du matériau effondré important.

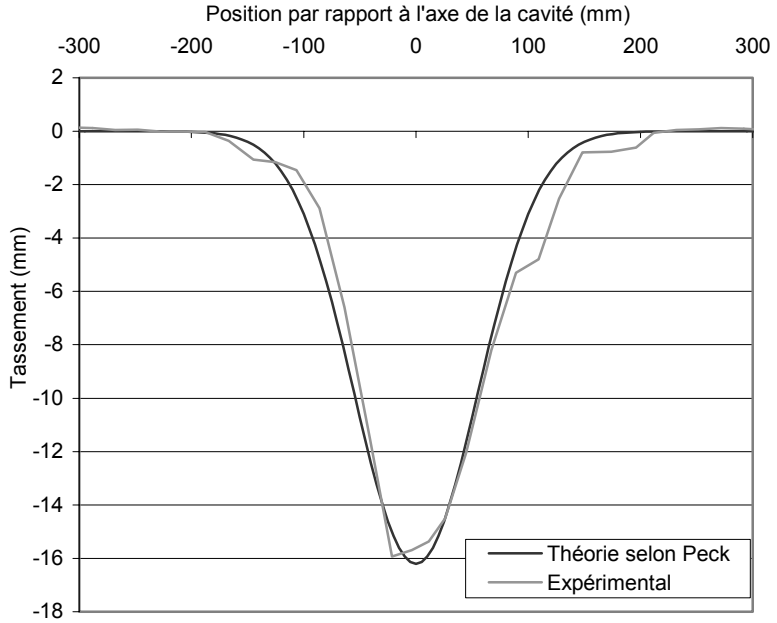


Figure 6 : Comparaison entre les mouvements en surface selon Peck et les résultats expérimentaux

La pente maximale que l'on peut observée sur ces courbes est voisine de 17% au niveau du point d'inflexion. C'est très supérieur à la valeur communément admise de 2% avant la ruine de l'ouvrage [MAGNAN, 2000].

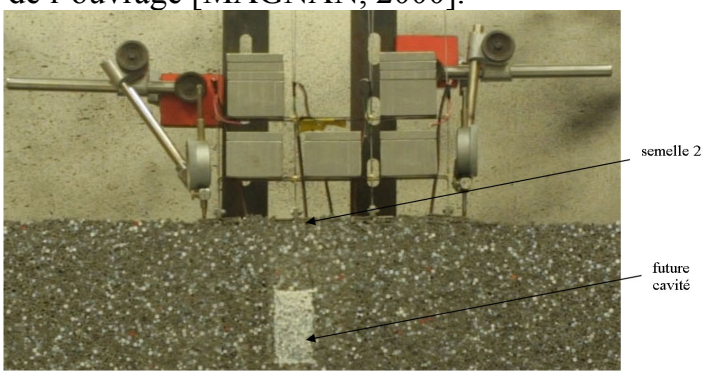


Figure 7 : Etat initial de la structure (avec chargement) avant effondrement de la cavité

4 Essais en présence de la maquette de structure

Le même essai d'affaissement est réalisé avec la maquette de structure présente en surface à l'aplomb de la cavité. Le positionnement de celle-ci est tel que la semelle numérotée 2 est placée sur l'axe de la cavité (Fig. 7).

La même procédure d'effondrement de la cavité est utilisée. En revanche, à la mesure des déformations du massif de sol par imagerie numérique, viennent s'ajouter des mesures de tassements des deux semelles externes (1 et 4) par comparateur ainsi qu'une instrumentation par jauges de déformations des travées et des poteaux de la structure. Cela permet d'avoir un accès aux sollicitations qui se développent dans le modèle durant l'essai.

Deux essais semblables sont réalisés dans cette configuration afin de s'assurer de la répétabilité des résultats obtenus. Aucune différence notable n'apparaît entre les deux essais.

La corrélation d'images numériques fournit les déformations dans le massif de sol : la figure 8 donne l'évolution de la surface du massif de sol durant l'un des essais.

La forme des tassements est fortement perturbée par la présence de la structure en surface durant l'essai. Des bourrelets de sol remontent entre les semelles ainsi qu'aux extrémités de la maquette.

Si l'on calcule le volume des tassements apparus en surface, on obtient une valeur assez éloigné du volume de sol enlevé pour créer la cavité : la perte de volume estimée est de 84%, soit significativement supérieure à celle obtenue lors de l'essai en terrain vierge.

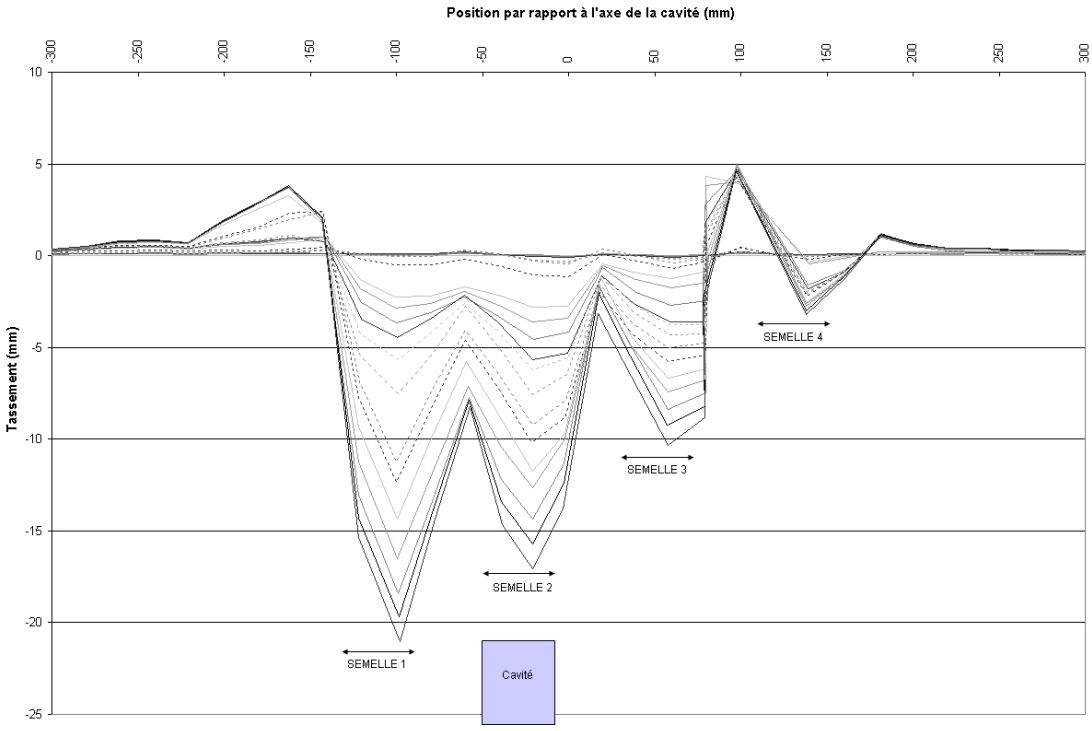


Figure 8 : Evolution des tassements durant la simulation d'un fontis en présence d'une structure en surface.

Le tassement différentiel maximum se situe entre les semelles 3 et 4 pour la dernière étape et correspond à une pente de 8% environ. C'est la moitié du résultat obtenu en appliquant les résultats obtenus sur l'essai en terrain vierge à la structure.

Les deux comparateurs positionnés sur chacune des semelles externes fournissent des déplacements verticaux cohérents avec les valeurs déterminés par l'imagerie numérique (Fig. 9), ce qui prouve la fiabilité de cette dernière technique. Les différences observables sont faibles et peuvent être imputées aux imprécisions de chaque méthode de mesure et à la nature du matériau analogique employé (les rouleaux de Schneebeli) : localement sous une semelle, un rouleau peut se déplacer de manière importante sans que cela ne soit totalement détecté par l'imagerie numérique (hypothèse de milieu continu).

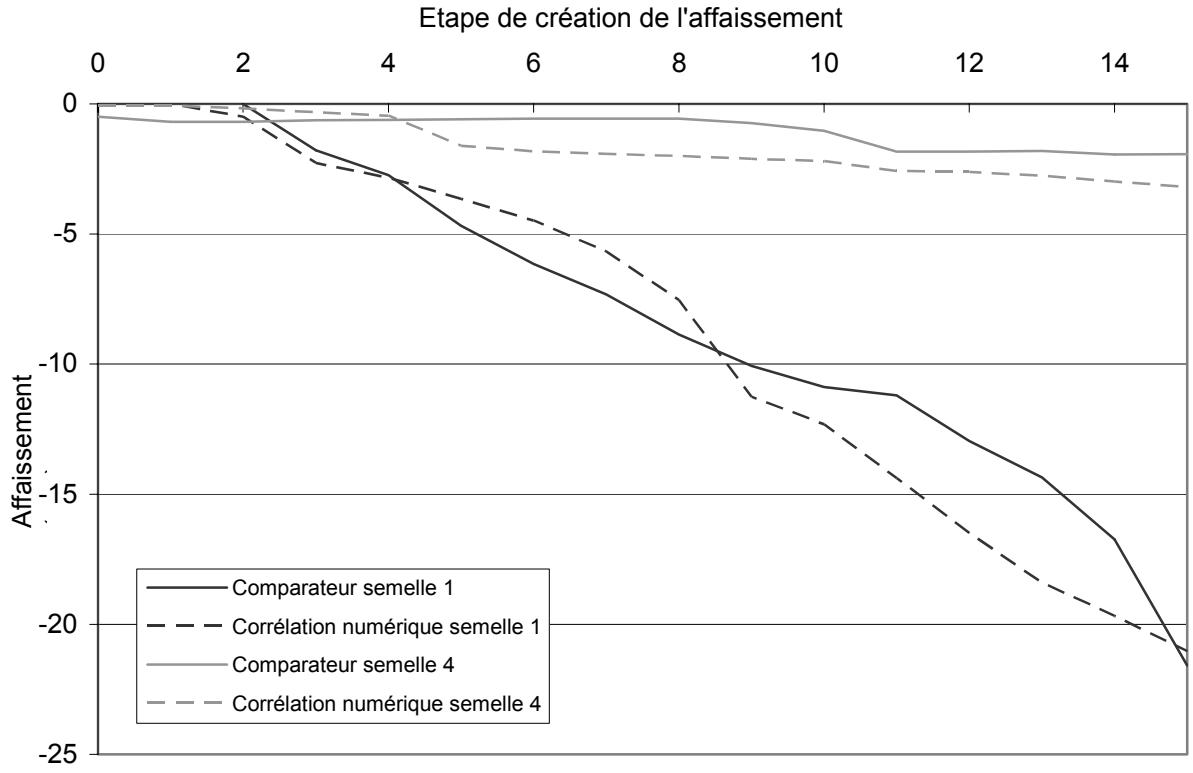


Figure 9 : Comparaison entre les tassements des semelles donnés par les comparateurs et l'imagerie numérique

Il apparaît que les différences par rapport aux essais en terrain vierge sont importantes. La présence d'une structure en surface a complètement modifié la forme des tassements ainsi que leurs amplitudes.

L'amplitude maximale, beaucoup plus importante (+30% environ), n'est de plus pas située au même endroit que dans le cas de l'essai en terrain vierge. C'est la semelle 1 qui subit le plus important tassement, alors que l'axe de la cavité est placé en dessous de l'une des semelles centrales.

La perte de volume enregistrée est voisine de 84%, c'est-à-dire supérieure de 10% à celle observée en terrain vierge :cela peut être du à la présence de la surcharge

engendrée par la structure. Il semble donc que le foisonnement est plus faible lorsqu'une structure est présente en surface.

De plus, à la fin de l'essai, il apparaît que la maquette de structure a plastifiée de manière importante au niveau de la semelle 4 (semelle la plus éloignée de la cavité) : la plage de sollicitations pour laquelle la structure a été caractérisée a donc été dépassée. Il semblerait ainsi que les efforts les plus importants subis par celle-ci n'étaient pas localisés à proximité de la cavité, comme on aurait pu s'y attendre selon la pratique actuelle de prévision des effets sur les structures.

Si l'on résume les différentes observations faites jusqu'à présent, il apparaît que :

- le tassement différentiel le plus important est localisé entre les semelles 2 et 3,
- le tassement maximal se situe sous la semelle 1,
- la sollicitation la plus importante est observée à proximité de la semelle 4,

même si macroscopiquement, le mouvement de la structure est voisin de celui d'un corps rigide.

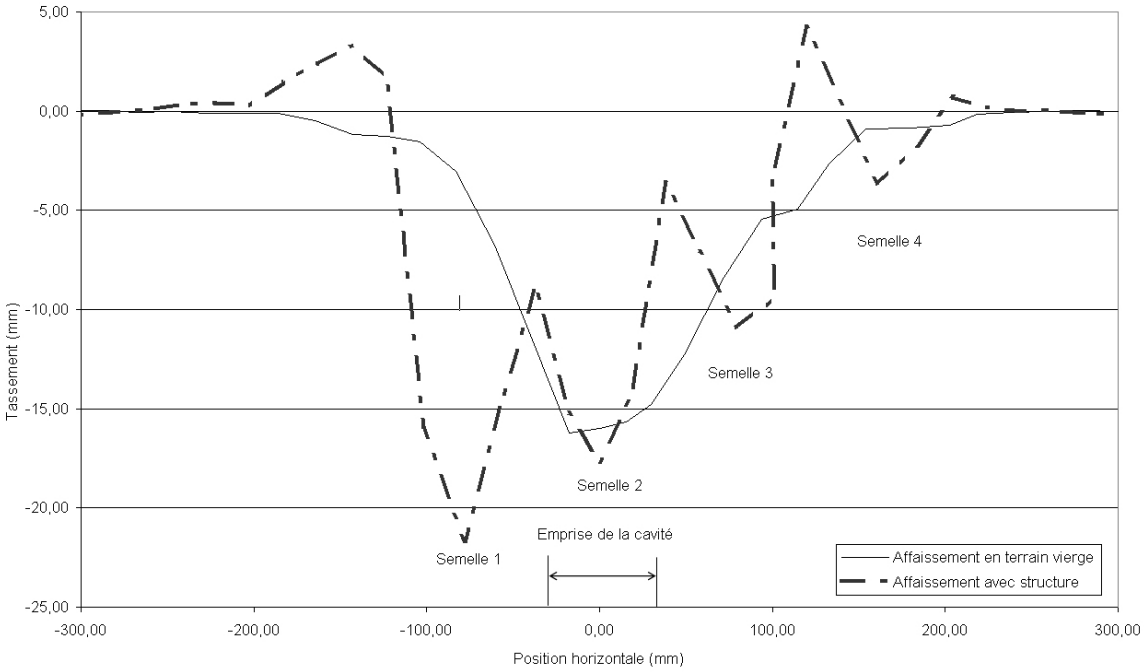


Figure 9 : Comparaison des tassements obtenus entre l'essai en terrain vierge et l'essai en présence d'une structure.

5 Conclusions et Perspectives

En conclusion de cette étude, on peut retenir que les phénomènes d'interaction sol-structure ne peuvent pas être négligés lors d'un affaissement de terrain résultant de l'effondrement d'une cavité relativement proche de la surface.

La pratique actuelle de prévision des effets des mouvements de sols sur les structures qui consiste à séparer l'étude de la stabilité de la cavité de celle de la structure, donne des résultats très différents de la réalité où la présence de la structure modifie profondément la forme et l'amplitude des tassements.

Une campagne expérimentale analogue sera menée dans le cas d'une représentation plus pertinente du phénomène de fontis. Ceci nécessite l'utilisation d'un modèle

cohérent de sol analogique permettant de simuler la rupture du toit d'une cavité.

Le calage d'un modèle numérique (Eléments Finis, Différences Finies ou Méthode des Eléments Distincts) sur ces différentes expérimentations permettra d'étudier l'influence de certains paramètres comme la hauteur de recouvrement, la largeur et l'ouverture de la cavité, sa position par rapport à une structure en surface, ..., sur le niveau de dommage infligé à la structure.

Finalement l'efficacité de diverses méthodes de prévention contre cette catégorie d'aléas pourra ainsi être évaluée.

Bibliographie

ABBASS-FAYAD A. [2004] : *Modélisation numérique et analytique de la montée de cloche des carrières à faible profondeur. Etude de l'interaction sol-structure due aux mouvements du terrain induits par des fontis.* Thèse de Doctorat de Génie Civil, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2004.

Al ABRAM [1998] : *Etude sur modèle réduit bidimensionnel du champ de déplacement induit par le creusement d'un tunnel à faible profondeur. Interaction avec des ouvrages existants.* Thèse de Doctorat en Génie Civil, INSA de Lyon, 268p.

Al HEIB M. [2000] : Effets et conséquences des mouvements du sous-sol sur le bâti. Synthèse des principales méthodes de prévention et de protection. INERIS-DRS-00-25315RN01.

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.

CAUDRON M., MATHIEU Ph., EMERIAULT F. & AL HEIB M. [2004] : Effondrement de cavités souterraines et interaction avec les ouvrages en surface : approche expérimentale sur modèle analogique bidimensionnel. Journée Nationale de Géotechnique et Géologie, LILLE, juin 2004, pp 435-442.

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.

DECK O., AL HEIB M. & HOMAND F. [2003] : Taking the soil-structure interaction into account in assessing the loading of a structure in a mining subsidencec area. Science Direct. Engineering Structures 25 (2003) 435-448.

KASTNER R. [1982] : *Excavations profondes en site urbain.* Thèse de Doctorat de Génie Civil, Institut National des Sciences Appliquées, 1982.

MAGNAN JP. [2000] :Les Techniques de L'Ingénieur, « Déformabilité des sols, Tassements, Consolidation », page 15.

MASROURI F. [1986] : *Comportement des rideaux de soutènement semi-flexibles : Etude théorique et expérimentale.* Thèse de Doctorat de Génie Civil, 1986. 247p.

MGUIL-TOUCHAL, MORESTIN & BRUNET [1996], « Mesure de champ de déplacements et de déformations par corrélation d'images numériques », Colloque National Mécamat'96, Aussois-France, pp. 179-182.

PECK [1969] Deep excavations and tunnelling in soft ground. In. : Proceeding of the 7th International Conference on Soil Mechanics Foundation Engineering. Mexico: State-of-the-Art, Vol.3, pp225-290.

SCHNEEBELI [1956] : « Une mécanique pour les terres sans cohésion », Compte Rendu de l'Académie des Sciences, 243 :2647-2673.

VACHAT JC. [1982] : *Les désordres survenants dans les carrières de la région parisienne.* Mémoire de diplôme d'Ingénieur CNAM, Paris, 1982.

VERDEL T. & DECK O. [2004] : Evaluation des dommages miniers au bâti par méthodes statistiques et réseaux de neurone. . Journée Nationale de Géotechnique et Géologie, LILLE, juin 2004, pp 503-512.