

Apport de la modélisation expérimentale et numérique à la compréhension du phénomène d'interaction et numérique sol-structure lors d'un fontis

Matthieu Caudron, Fabrice Emeriault, Marwan Al Heib

▶ **To cite this version:**

Matthieu Caudron, Fabrice Emeriault, Marwan Al Heib. Apport de la modélisation expérimentale et numérique à la compréhension du phénomène d'interaction et numérique sol-structure lors d'un fontis. 14. European Conference on soil mechanics and geotechnical engineering, Sep 2007, Madrid, Espagne. pp.943-948. ineris-00976197

HAL Id: ineris-00976197

https://ineris.hal.science/ineris-00976197

Submitted on 9 Apr 2014

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

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

Apport de la modélisation expérimentale et numérique à la compréhension du phénomène d'interaction sol-structure lors d'un fontis

Contribution of the experimental and numerical modeling to the understanding of the soil-structure interaction during the event of a sinkhole

M. CAUDRON
INERIS, Verneuil-en-Halatte, FRANCE

F. EMERIAULT
LGCIE-INSA de Lyon, FRANCE

M. AL HEIB
INERIS-LAEGO, Nancy, FRANCE

ABSTRACT

This article is focused on the study of soil-structure interaction during the occurrence of a sinkhole by the use of a small-scale experimental model and a coupled numerical approach. The experimental model uses a 2D analogical soil and a building model. Tests in greenfield conditions and with the building allow determining the soil-structure interaction phenomenon. Computer simulations are validated with the results from the experimental tests in order to run parametrical studies in a further development.

RESUME

Cet article présente une étude de l'interaction sol-structure durant la formation d'un fontis à l'aide d'un modèle physique puis d'une modélisation numérique couplée. Le modèle réduit expérimental utilise un matériau analogique bidimensionnel et une maquette de structure. Des essais en terrain vierge puis en présence de la structure permettent de caractériser la nature de l'interaction sol-structure. Les simulations numériques sont validées sur les résultats des essais expérimentaux en vue de mener des études paramétriques ultérieures.

Mots-clés: fontis, interaction sol-structure, modèle réduit expérimental, modélisation numérique

Keywords: sinkhole, soil-structure interaction, small-scale physical model, numerical modeling

1 INTRODUCTION

Les fontis sont causés par l'effondrement de cavités souterraines anthropiques ou naturelles. La nature brutale de ce phénomène peut être très préjudiciable pour les structures et infrastructures en surface ainsi que pour la population. Les phénomènes d'interaction sol-structure qui entrent alors en jeu sont encore mal identifiés (Abbass, 2004).



Figure 1. Modèle physique réduit de laboratoire

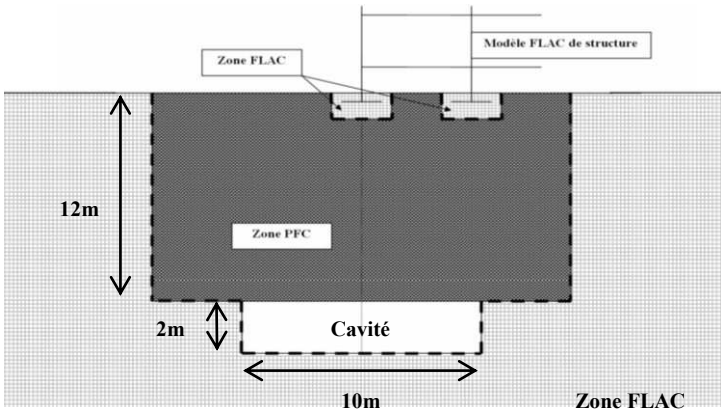


Figure 2. Schéma de principe du modèle numérique couplé FLAC^{2D}-PFC^{2D}

Une double approche, basée sur l'utilisation conjointe d'un modèle physique et d'un modèle numérique, permet d'étudier la nature de l'interaction sol-structure. Le respect partiel des règles de similitudes inhérentes à toute utilisation d'un modèle réduit n'autorise que des comparaisons d'ordre qualitatives entre les résultats des essais expérimentaux en terrain vierge puis en présence de la structure. De plus, le modèle faisant appel à un couplage de deux logiciels (FLAC^{2D} et PFC^{2D}) basés sur des méthodes

numériques différentes (différences finies et éléments distincts), une comparaison pertinente peut être faite entre simulations numériques et résultats d'une campagne expérimentale menée sur un modèle réduit de laboratoire (cf. Figures 1 et 2). Pour plus de détails sur cette expérimentation, le lecteur pourra se référer à Caudron *et al.* (2006a).

2 LE CAS D'ETUDE

Le modèle réduit expérimental représente un massif de sol comportant une cavité. Le recouvrement de celle-ci est constitué de deux couches différentes. Un banc résistant de 2 m d'épaisseur constitue le toit de la cavité. Il est surmonté par 10 m de matériau granulaire frottant (Tableau 1).

La cavité de 2 m de hauteur est créée en 5 étapes jusqu'à une largeur maximale de 10 m. La structure placée en surface est de type "poutres-poteaux" en acier (Tableau 2). Le chargement appliqué suit les règles de l'art (réglementation française).

Tableau 1. Caractéristiques des sols réels et modélisés (Module d'Young dépendant du confinement)

	Densité	*E (MPa)*	*φ (°)*	*c (kPa)*
Sol pulvérulent (réel)	2,2	50-100	22-24	0
Sol pulvérulent (modèle)	2,2	50-100	24	0
Sol cohérent (réel)	2,2	50-100	27-30	~100
Sol cohérent (modèle)	2,2	50-100	25-30	65-150

Tableau 2. Caractéristiques géométriques de la structure

Largeur de semelle	1,65 m
Longueur des poutres	3,2 m
Hauteur d'un étage (poteau)	2,7 m
Vide sanitaire	1,2 m
Section (m²/ml)	0,051 m²
Inertie (m^4/ml)	60,8 10^{-4} m^4
Nombre de travées	3

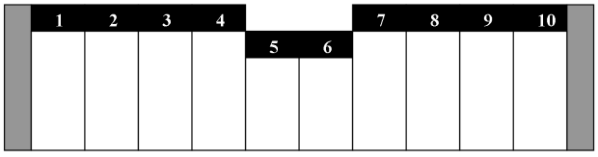


Figure 3. Schéma du mécanisme de création de la cavité.

3 LA MODELISATION PHYSIQUE

La campagne expérimentale a été mise au point de façon à respecter autant que possible les lois de similitudes entre modèle réduit et vraie grandeur. Les essais étant effectués sous gravité normale et avec un modèle analogique de sol présentant un poids volumique de 65 kN/m^3, le facteur d'échelle géométrique de 1/40 (minimum permettant d'avoir une dimension de modèle totale de l'ordre du mètre) implique de prendre pour toutes les quantités faisant intervenir les contraintes un facteur de 3/40.

3.1 *Le modèle expérimental*

Le modèle physique est composé d'un bâti expérimental en forme de U comportant en son centre un mécanisme permettant la création de manière maîtrisée et reproductible d'une cavité de dimensions variables (Figure 1). Le massif de sol utilisé présente une largeur de 750 mm pour une hauteur de recouvrement au-dessus de la cavité de 500 mm maximum (soit 30 m de large pour 20 m d'épaisseur à pleine échelle).

Le dispositif de création de la cavité comporte dix parties mobiles permettant de moduler les dimensions de la cavité : 25 mm à 250 mm de large et 25 mm à 100 mm d'ouverture (Figure 3). Ces parties mobiles sont équipées chacune d'un capteur de force, permettant de suivre l'évolution des reports de charges lors de la création de la cavité.

3.2 *Le matériau sol*

Deux matériaux analogiques sont utilisés dans le modèle physique. Le premier est le matériau de Schneebeli constitué d'un mélange de rouleaux métalliques de trois diamètres différents : 3, 4 et 5 mm, de longueur 60 mm (Dolzhenko *et al.*, 2001).

Pour être capable de créer une cavité stable au sein du massif, un banc de matériau cohérent est nécessaire. Celui-ci est obtenu par trempage du matériau de Schneebeli dans une solution de colle aqueuse et séchage à l'air libre après mise en place sur le banc expérimental (Caudron *et al.*, 2006a).

Les caractéristiques mécaniques des deux matériaux sont présentées dans le tableau 1.

3.3 *Le modèle de structure*

Il représente un bâtiment d'habitation de faibles dimensions de type maison individuelle. Ce type de bâtiment est en effet majoritairement concerné par les aléas liés aux mines et autres cavités souterraines (exemple de l'affaissement minier de Roncourt selon Deck *et al.*, 2003).

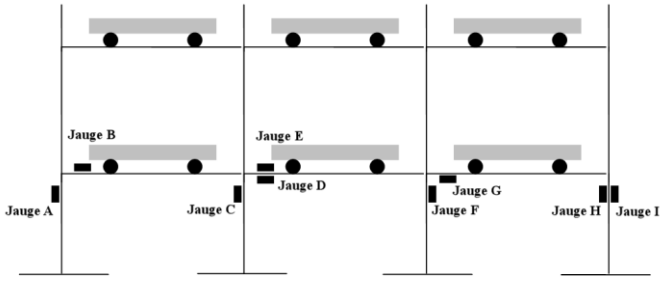


Figure 4. Coupe schématique de la maquette de structure (position des jauges de déformation et du chargement amovible)

La figure 4 présente une coupe schématique de la géométrie utilisée. Les sections utilisées permettent d'obtenir une raideur relative structure-sol comparable à celle observées à pleine échelle. Le chargement de la structure est réalisé par des masses amovibles.

3.4 *Instrumentation*

Une technique d'imagerie numérique est utilisée pour calculer le champ de déplacement au sein du massif de sol pour les différentes étapes d'un essai. White et al. (2003) a clairement montré les avantages d'une telle méthode par rapport à la photogrammétrie. Le logiciel utilisé, Icasoft, a été développé dans le Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Solides (INSA de Lyon). La précision permise est proche de 1/100 pixel en condition idéale. Cependant, les conditions de réalisation des essais ainsi que le matériel utilisé limite cette précision à 1/20 pixel, ce qui correspond dans notre cas à 20 µm pour un couple de photos (soit 0.8 mm en pleine échelle).

La maquette de structure est instrumentée par des capteurs de déplacement vertical au niveau des quatre semelles. Des jauges de déformation sont de plus positionnées sur la structure (cf. Figure 4). Leur emplacement a été choisi comme étant susceptible de subir les déformations les plus importantes.

4 LE MODELE NUMERIQUE COUPLE

Le modèle numérique utilisé tire parti des possibilités de couplage présentes entre les logiciels FLAC^{2D} et PFC^{2D}. Cela permet de différencier le maillage en l'adaptant au mieux au problème posé.

La Méthode des Eléments Distincts (MED) sur laquelle est basé le logiciel PFC^{2D} (Itasca, 2005) considère le sol comme un ensemble de particules circulaires indéformables possédant chacune ses caractéristiques propres, ce qui lui confère la possibilité de mieux représenter le comportement réel d'un sol au toit d'une cavité effondrée qu'une approche de type milieu continu. On peut ainsi représenter le massif de sol constituant le toit de la cavité, zone où se produiront les déplacements les plus importants, sans avoir à prédéfinir de directions de fissuration ou de rupture.

Le reste du massif de sol (où n'apparaîtront que de faibles déplacements et déformations) et le modèle de bâtiment sont simulés par une approche de milieu continu à l'aide du logiciel FLAC^{2D} (basé sur une approche en Différences Finies) en utilisant respectivement des éléments volumiques et des éléments de structures.

Le modèle numérique résultant est présenté sur la figure 2. Caudron *et al.* (2006b) décrit de manière plus détaillée le fonctionnement précis du couplage, en particulier la méthodologie utilisée pour créer progressivement une cavité de hauteur fixée et de largeur croissante (reproduisant ainsi la procédure expérimentale de création de cavité à l'aide du dispositif de la figure 3). Sont également abordées les difficultés rencontrées au niveau des frontières entre le maillage FLAC^{2D} et les zones PFC^{2D} lors des modifications successives de ces frontières.

Le couplage numérique direct entre éléments poutres (représentant la structure) et éléments PFC^{2D} n'étant pas possible à l'heure actuelle, il a été choisi "d'enrober" les semelles de la structure dans des zones FLAC^{2D} qui peuvent interagir avec les particules PFC^{2D} (Figure 2).

5 RESULTATS

Deux configurations différentes sont utilisées : la première en condition de terrain vierge, la seconde en présence de la maquette de structure. Plusieurs essais par configuration sont réalisés. Les autres caractéristiques des essais sont identiques pour ces deux configurations : dimensions de la cavité, épaisseur et constitution du recouvrement.

L'analyse des résultats s'intéressera tout particulièrement aux mouvements du sol en surface. En particulier, on comparera les tassements s_x observés (x : position par rapport au centre de la cavité) avec ceux donnés par une approche empirique, dérivée de celle de Peck (1969), utilisée pour le creusement de tunnel circulaire et les déplacements horizontaux v_x avec l'approche proposée par Lake *et al.* (1992) :

$$s_x = s_{\max} \times e^{\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right)} \qquad \text{et} \qquad v_x = s_x \frac{x}{Z_0}$$

avec s_{max} : tassement maximal, i : distance au point d'inflexion et Z_0 : distance entre le centre de la cavité et la surface.

5.1 *Terrain vierge*

Sept essais identiques sur modèle physique ont été menés dans cette configuration de manière à déterminer le comportement du recouvrement lors de la création de la cavité puis de sa rupture et d'évaluer la variabilité inhérente à ce type de modélisation. L'affaissement maximal moyen est de 26.6 mm, ce qui est légèrement supérieur à la moitié de l'ouverture de la cavité. Le foisonnement moyen observé est compris entre 1,03 et 1,05, ce qui est normal compte tenu de l'importance de la couche de matériau granulaire dans la configuration utilisée.

Les figures 5 et 6 montent que la variabilité des déplacements correspond sensiblement à la taille moyenne des particules du matériau de Schneebeli, soit 4 mm. La pente et la déformation horizontale déterminées à partir de ces mêmes déplacements en surface présentent une variabilité importante.

La pente maximale observée où sera positionnée la structure utilisée par la suite, est voisine de 12.3% en valeur absolue, valeur largement supérieure à la pente maximale mesurée couramment lors d'affaissements miniers (5% d'après Deck *et al.* 2003). La déformation horizontale est trop perturbée par la taille des éléments du matériau pour être utilisée, par contre la courbe des déplacements horizontaux issue de l'approche de Peck permet d'estimer les valeurs extrêmes : 8% et -17%.

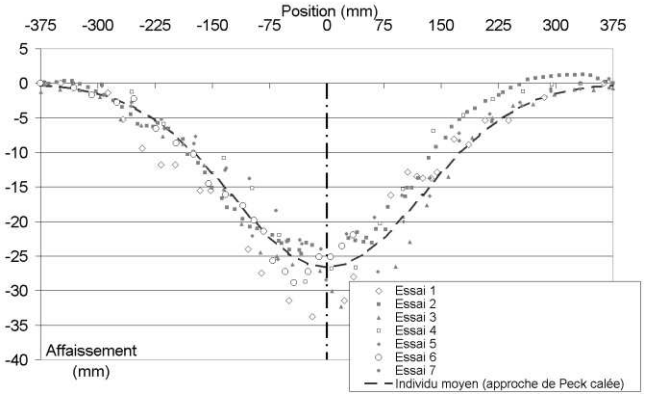


Figure 5. Déplacements verticaux en surface pour les essais expérimentaux

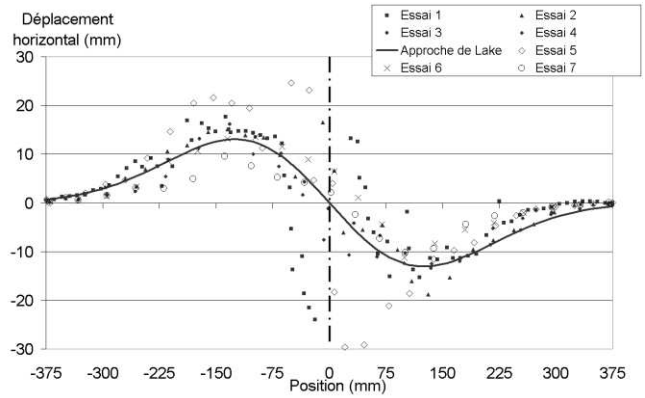


Figure 6. Déplacements horizontaux en surface pour les essais expérimentaux

Cinq simulations numériques utilisant une configuration identique mais un assemblage initial différent des particules constitutives du massif ont également été effectuées. Pour chacune, la rupture apparaît lors de la dernière étape de création de la cavité : le banc cohérent cède et des blocs s'effondrent dans la cavité. La géométrie des blocs et la localisation des fractures varient entre les différentes simulations.

La variabilité des affaissements observés lors de la ruine de la cavité est identique à celle obtenue pour le modèle physique (Figure 7). En revanche celle des déplacements horizontaux est plus faible, voisine de ±2 mm (Figure 8).

La concordance avec les résultats expérimentaux est globalement bonne pour les déplacements verticaux, bien que les valeurs obtenues au niveau de la zone centrale de la cuvette soit sensiblement plus importante avec un écart de 25 à 30%, portant l'affaissement maximal simulé à 34 mm en moyenne.

Les déplacements horizontaux sont par contre plus faibles pour les simulations numériques (jusqu'à 65% de différence). La cause est le comportement de la partie $FLAC^{2D}$ du modèle. Le module d'Young du modèle élastique utilisé est trop important et sous-estime largement les déformations en surface. La discontinuité observée sur les déplacements horizontaux entre les parties modélisées par $FLAC^{2D}$ et par PFC^{2D} en est le témoin.

La pente maximale simulée est de 17% en moyenne, ce qui est plus important que la valeur obtenue par les essais expérimentaux mais concorde avec l'augmentation de l'affaissement maximal.

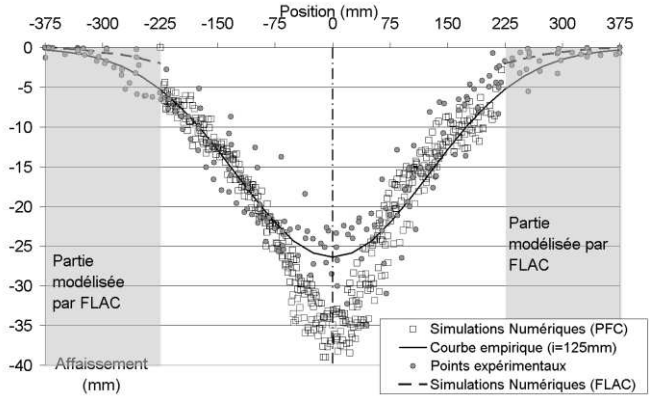


Figure 7. Déplacements verticaux en surface pour les essais sur le modèle expérimental et les simulations numériques

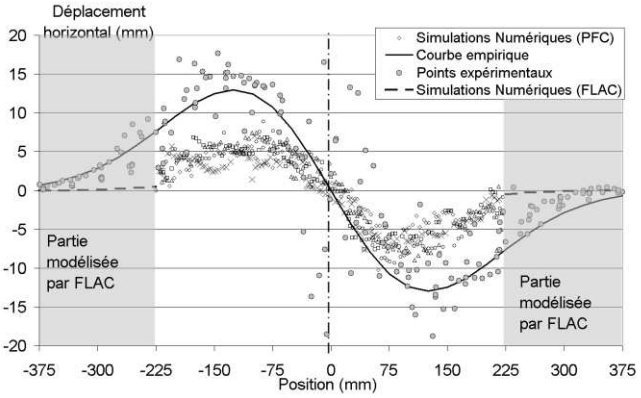


Figure 8. Déplacements horizontaux en surface pour les essais expérimentaux et les simulations numériques

5.2 *Interaction sol-structure*

5.2.1 *Mouvements du sol*

Les essais et simulations réalisés en présence d'une structure ont les mêmes caractéristiques de base que les essais en terrain vierge. Seul l'emploi du bâtiment en surface (dont la semelle droite est à l'aplomb de l'axe de la cavité - Figure 2) les différencie.

Deux essais ont été réalisés dans cette configuration avec le modèle réduit expérimental. Les résultats des deux essais sont très voisins, seule une légère différence est observée au niveau des déplacements horizontaux (Figures 9 et 10).

L'affaissement maximal tend à augmenter : environ 35 mm contre 26,7 mm en terrain vierge. La pente observée augmente de même avec un maximum entre 13% et 14%, contre 12,3% auparavant.

Les déplacements horizontaux au niveau de la structure sont largement diminués : diminution d'environ 50% par rapport aux résultats en terrain vierge. On retrouve cette observation sur la déformation horizontale avec une réduction d'environ 75%.

Deux nouvelles simulations avec le modèle numérique sont réalisées, en utilisant une procédure identique à celle suivie expérimentalement.

Les deux simulations donnent des résultats assez différents (Figures 11 et 12). Les déplacements des semelles de la structure sont concordants, bien que les mouvements des terrains en surface diffèrent sensiblement, particulièrement sur la partie droite des courbes de déplacements verticaux. L'origine de cette différence est le mode de rupture non-symétrique du banc raide. Le volume de matériau chuté dans la cavité diffère donc, de même que le volume de la cuvette d'affaissement en surface.

L'affaissement maximal observé est de 22 mm sur les semelles, ce qui présente une réduction importante par rapport au résultat obtenu en terrain vierge.

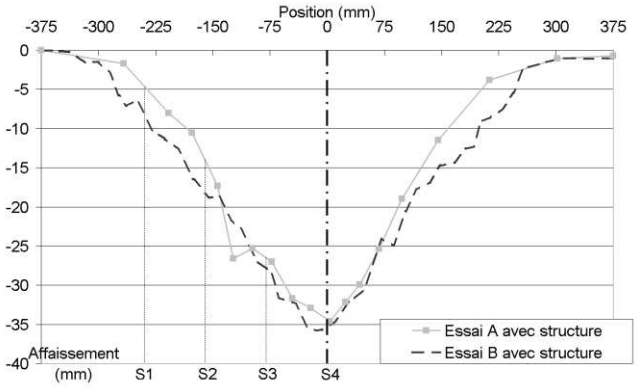


Figure 9. Déplacements verticaux en surface pour les deux essais expérimentaux en présence de la structure.

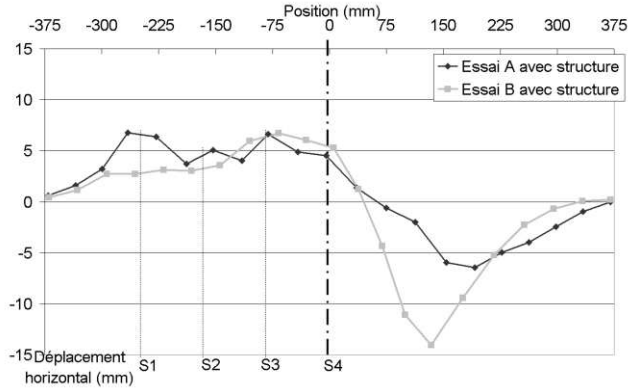


Figure 10. Déplacements horizontaux en surface pour les deux essais expérimentaux en présence de la structure

Ceci est associé à une pente maximale simulée de 11%, soit une diminution par rapport aux simulations en terrain vierge. Cela est causé par le comportement de la partie FLAC^{2D} du modèle. Les déformations horizontales obtenues représentent le tiers de celles obtenues en terrain vierge. On obtient donc une variation terrain vierge–ISS comparable aux essais expérimentaux.

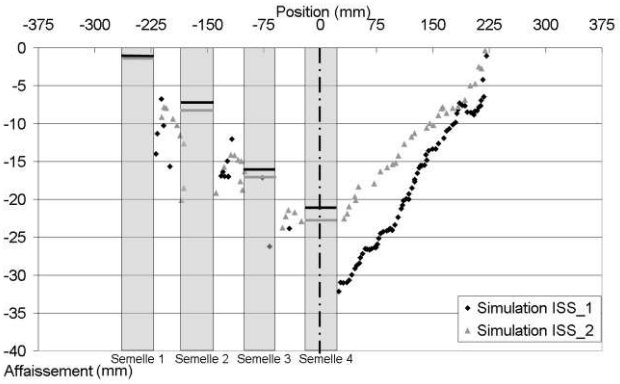


Figure 11. Déplacements verticaux de la surface et des semelles pour les 2 simulations numériques avec structure.

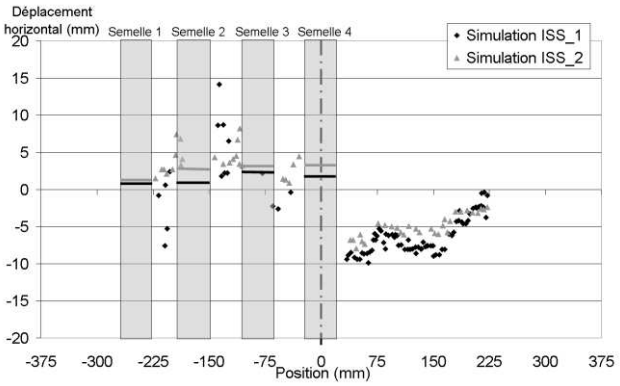


Figure 12. Déplacements horizontaux de la surface et des semelles pour les 2 simulations numériques avec structure.

5.2.2 *Déformations au sein de la structure*

Les figures 13 et 14 comparent les déformations au niveau de la structure obtenues en lui appliquant les déplacements correspondant au cas terrain vierge par rapport aux déformations obtenues lors des essais ou des simulations en présence de la structure.

Sont représentés les fuseaux de déformations correspondant aux deux modèles pour les deux configurations différentes. Chaque fuseau est identifié par sa valeur moyenne, ses valeurs extrêmes (barres horizontales) et la plage centrale définie par la valeur moyenne plus ou moins l'écart-type. Expérimentalement, on observe de manière générale une diminution des déformations lorsque la structure est prise en compte, voire même une inversion du signe des déformations pour les jauges H et I.

Selon ces premières comparaisons, il semble justifié de prendre en compte l'interaction sol-structure et donc de ne pas découpler l'étude en une partie sol et une partie structure.

A l'inverse, numériquement, la prise en compte d'un bâti en surface mène de manière générale à une stagnation voire une augmentation des déformations

au sein de celui-ci. Ceci est plus particulièrement obtenu pour les jauges A, H et I.

De manière générale, on observe une cohérence moyenne entre les résultats issus des essais expérimentaux et des simulations numériques. La jauge A qui est située sur le poteau supportant la semelle gauche de la structure montre que, lors des simulations numériques, la semelle n°1 joue le rôle d'un encastrement, ce qui est confirmé par ses faibles déplacements. De manière analogue à ce qui est observé lors des simulations en terrain vierge, le module d'Young du sol et la raideur d'interface entre l'élément de structure représentant la semelle ont été surévalués, limitant les déformations à ce niveau. La structure se retrouve partiellement en porte-à-faux.

D'autres jauges présentent des différences de valeurs entre les résultats des deux approches. Il n'est pas possible de se prononcer sur l'origine de ces différences, si ce n'est que le faible nombre d'essais et de simulations en présence d'une structure en surface est l'une des raisons.

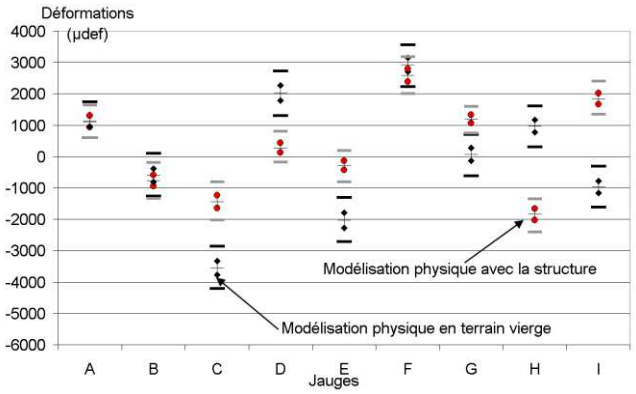


Figure 13. Comparaison des déformations au sein de la structure pour les essais expérimentaux

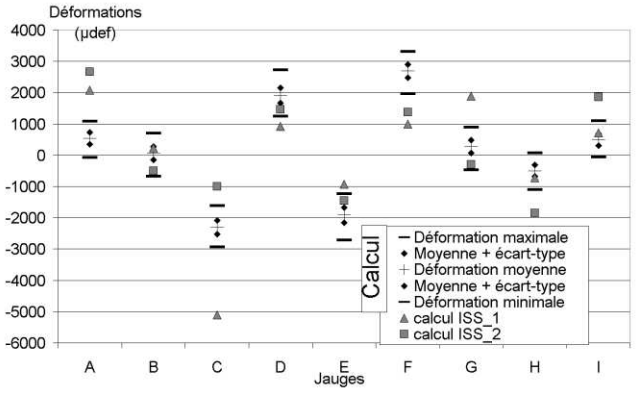


Figure 14. Comparaison des déformations au sein de la structure pour les simulations numériques

6 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le phénomène d'interaction sol-structure lors de l'apparition d'un fontis a été étudié par le moyen d'un modèle réduit physique et d'un modèle numérique couplé. Les résultats des deux modèles convergent vers le fait qu'il n'est pas souhaitable de découpler la partie sol de la partie structure lors d'une telle étude. La prise en compte de l'interaction sol-structure permet en effet d'observer une redistribution des déformations dans la structure. Les déformations résultantes traduisent une sous-évaluation des déformations subies en certains endroits, ce qui peut menacer la pérennité du bâtiment.

Les axes de développements futurs s'orientent à court terme vers la réalisation de nouveaux essais et simulations en présence du bâtiment afin de confirmer (ou d'infirmer) les résultats obtenus. Cette étape requiert une amélioration du modèle numérique couplé au niveau de la partie FLAC^{2D}.

A moyen terme, la réalisation d'études paramétriques permettant de caractériser l'influence de différents paramètres tels la position de la structure, l'épaisseur et la constitution du recouvrement est envisagée.

REMERCIEMENT

Les auteurs remercient le Ministère de l'Environnement et du Développement Durable pour le financement partiel de l'INERIS et de son projet de recherche DRS02.

BIBLIOGRAPHIE

Abbass-Fayad, A. 2004. Modélisation numérique et analytique de la montée de cloche des carriers à faible profondeur. Etude de l'interaction sol-structure due aux mouvements de terrain induits par des fontis. Thèse INPL.

Caudron M., Emeriault F., Kastner R. & Al Heib M. 2006a. Sinkhole and soil-structure interactions: Development of an experimental model. *Int. Conf. on Physical Modeling in Geotechnics, Hong-Kong*, 04-06 Aug. 2006, pp 1261-1267.

Caudron M., Emeriault F. & Al Heib M. 2006b. Numerical modeling of the soil-structure interaction during sinkholes. *Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Gratz*, 06-08 September 2006, pp 267-273.

Deck O., Al Heib M., and Homand F. 2003. Taking the soil-structure interaction into account in assessing the loading of a structure in a mining area. *Engineering Structure* 25:435-448.

Dolzhenko, N. & Mathieu P. 2001. Experimental modeling of urban underground works. Displacement measurement in a two-dimensional tunneling experiment. *Regional Conference on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Shangai, 2001*: 351-359.

ITASCA Consulting Group 2005. PFC^{2D} 3.1 Manual provided with the PFC^{2D} code.

Lake L.M., Rankin W.J. and Hawley J; 1992. Prediction and effects of ground movements caused by tunnelling in soft ground beneath urban areas. *CIRIA funders report CP/5* 129p.

Peck, R. 1969. Deep excavations and tunnelling in soft ground, *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics Foundation Engineering*, Mexico, 3:225-290.

White D., Take W. and Bolton M. 2003. Soil de formation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry. *Geotechnique*, 53:619-631.