Mouvements de terrain et déformations d'un bâtiment consécutif à un fontis : approche expérimentale et numérique

Matthieu Caudron

▶ **To cite this version:**

Matthieu Caudron. Mouvements de terrain et déformations d'un bâtiment consécutif à un fontis : approche expérimentale et numérique. 2007, non paginé. ineris-00150377

HAL Id: ineris-00150377

https://ineris.hal.science/ineris-00150377

Submitted on 30 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.

Mouvements de terrain et déformations d'un bâtiment consécutif à un fontis : approche expérimentale et numérique

Matthieu CAUDRON[1]

[1] INERIS. Parc technologique ALATA, 60550 Verneuil en Halatte.
matthieu.caudron@ineris.fr

RESUME. De nombreuses régions, en France et à l'étranger, sont soumises à l'aléa mouvement de terrain. La détermination du risque encouru (croisement de l'aléa et des enjeux) est actuellement réalisée de la manière suivante : les mouvements de terrain sont déterminés par un ou plusieurs outils sans prendre en compte la présence d'une ou plusieurs structures en surface. Ces mouvements sont alors appliqués aux constructions afin d'étudier leur comportement et leur stabilité. Cependant, cette démarche ne prend pas en compte les phénomènes d'interaction sol-structure qui se produisent lorsqu'un bâti est soumis à des mouvements de terrain. L'objectif de l'article est donc de mettre en évidence l'importance de ces phénomènes et la nécessité de les prendre en compte, les résultats obtenus pourraient sinon se révéler non sécuritaires. Deux axes de recherche sont utilisés pour atteindre cet objectif : un modèle réduit physique qui permet la constitution d'une base de résultats expérimentaux et une approche numérique couplant deux approches complémentaires en milieu continu et en éléments distincts.

MOTS-CLÉS : interaction sol-structure, modèle physique réduit, modèle numérique, mouvement de terrain

ABSTRACT. Many geographic areas, in France or in other countries, are concerned by ground movements. The determination of the associated risk is usually performed in a simplified manner: ground movements are estimated by the use of one or more tools without taking into account the building. These movements are then imposed to the structures in order to study their behaviour and stability. However, this approach doesn't consider the soil-structure interactions which happen when a building is stressed by ground movements. This paper is focused on the soil-structure interaction and is aimed at showing the necessity to take them into account. Two main axes of research are used to reach this objective: a small-scale physical model allows the creation of an experimental database and a numerical approach coupling two complementary methods using both continuum and distinct elements.

KEYWORDS: soil-structure interaction, small-scale physical model, numerical simulation, soil movement

1. INTRODUCTION

Un grand nombre de cavités souterraines naturelles ou de vides anthropiques sont recensés sur l'ensemble du territoire français. Du fait du caractère inéluctable de leur dégradation, ces cavités seront probablement amenées à s'effondrer. Elles sont dès lors une source de danger et doivent induire une contrainte forte au niveau des aménagements et du développement urbain (Pacyna et al. 2005).

Les fontis représentent l'une des formes possibles de ces aléas. Le cadre de cette étude se limite à ce type de phénomène, souvent rencontré pour des cavités à faible profondeur (<50m). Nous nous intéressons plus particulièrement aux phénomènes d'interactions sol-structure qui se produisent lors de la remontée d'une cloche de fontis à proximité d'un bâti en surface. La ruine de la cavité est considérée comme inéluctable. On cherche à caractériser la nature et l'intensité des conséquences sur les constructions sous l'influence de mouvements de terrain. Alors que le passage de l'aléa au risque est

actuellement réalisé de manière implicite, cet article propose une approche explicite permettant la détermination du risque en tenant compte de l'interaction sol-structure, dont l'importance sera étudiée.

Cela a déjà été réalisé dans des domaines différents (Vaillant et al. 2005, Deck et al. 2006). Des études ont été menées sur le rôle et l'importance de l'interaction sol-structure lors du creusement d'un tunnel à proximité de constructions en surface (Augarde et al. 1998) et dans le cadre du génie parasismique (Burland 1995, Tamari & Towhata 2003). Lorsqu'un fontis remonte jusqu'en surface, il se manifeste soit par une cuvette présentant une pente très marquée, soit par un effondrement franc des terrains selon une forme cylindrique. Les approches utilisées précédemment, majoritairement à base de formulation en milieu continu, ne sont alors plus envisageables car inadaptées au phénomène étudié. Notre objectif est l'étude des conséquences des mouvements de terrain sur les bâtis grâce au développement d'un outil numérique adéquat.

La méthodologie utilisée se base sur l'emploi initial d'un modèle physique réduit bidimensionnel. Il servira à l'étude du phénomène de fontis puis de l'influence de l'interaction sol-structure. Ensuite un modèle numérique est utilisé. Le comportement obtenu du sol et de la structure lors des simulations effectuées est comparé aux observations faites lors des essais expérimentaux. Cela permet de s'assurer de la pertinence du modèle numérique choisi. Cet outil sera pour finir validé par une application sur le fontis survenu dans le massif de l'Hautil en région parisienne.

2. LA MODELISATION PHYSIQUE

Le modèle réduit expérimental représente, à une échelle 1/40, un massif de sol d'une largeur de 30 m pour une hauteur de recouvrement de 12 m au-dessus de la cavité. Le matériau analogique de Schneebeli (1956) (Dolzhenko & Mathieu 2001) est utilisé pour représenter le matériau "sol" : assemblage de rouleaux d'acier de 3, 4 et 5mm de diamètre. Cependant l'emploi d'un matériau cohérent est un pré requis pour représenter le banc résistant nécessaire à la création de la cavité. Une solution de colle aqueuse est utilisée pour obtenir une version cohérente du matériau. Des essais biaxiaux sont réalisés pour obtenir les caractéristiques recherchées (angle de frottement et cohésion).

Figure 1 : Vue du bâti expérimental

Matériau	ρ (kg/m^3)	E (MPa)	φ (°)	c (kPa)
pulvérulent	2200	50-100	~26	0
cohérent	2200	50-100	28-30	80

Tableau I : Caractéristiques des matériaux recherchés

Le recouvrement est constitué d'un banc cohérent d'épaisseur équivalente à 2 m situé au toit de la cavité. Il est lui-même surmonté d'une couche de matériau pulvérulent de 10 m d'épaisseur équivalente. Les caractéristiques des deux matériaux sont présentées dans le tableau I (compte tenu des lois de similitude; de plus le module de raideur varie avec le confinement). La cavité, d'une hauteur équivalente à 2 m, est créée progressivement jusqu'à une largeur maximale correspondant à 10 m en 5 étapes (figure 1). L'appareillage utilisé est inspiré des études menées par Nakai (Nakai et al. 1997, Sung et al. 2006) sur les mouvements de terrain relatif au creusement de tunnel.

La structure utilisée pour l'étude de l'interaction sol-structure est de type "poutre-poteau" en acier. Le chargement considéré, uniformément réparti sur les éléments poutres, correspond à 10 kPa, assimilable aux charges permanentes et charges de service. La raideur (ES et EI_z avec E le module d'Young, S la section et I_z le moment d'inertie) des éléments de structure respecte la mise à l'échelle : le comportement obtenu est purement élastique.

3. LA MODELISATION NUMERIQUE

3.1. OBJECTIFS DU COUPLAGE

La méthode numérique retenue est fondée sur l'utilisation conjointe de deux codes de calcul complémentaires. La modélisation est différenciée en l'adaptant au mieux pour un problème donné. La Méthode des Eléments Discrets (mécanique des milieux discontinus) est utilisée pour représenter le massif de sol constituant le toit de la cavité, zone où apparaîtront des fractures et des chutes de blocs. Le reste du massif de sol, (siège de faibles déformations) et le modèle de bâti seront modélisés par un code de calcul basé sur la mécanique des milieux continus, moins consommateur de puissance de calcul. PFC^{2D} et FLAC^{2D} sont retenus pour la réalisation de ce modèle couplé.

Le couplage est réalisé par le moyen d'éléments frontières dans FLAC^{2D} et de particules asservies dans PFC^{2D} qui permettent l'échange des vecteurs vitesses et des forces de manière à satisfaire les conditions de continuité des champs de déformations et de contraintes (Caudron et al. 2007). Le principe du couplage est de satisfaire aux conditions de continuité des champs de contraintes et de déformations au niveau de l'interface des deux codes, tout en bénéficiant des avantages de chacun.

3.2. PRISE EN COMPTE DE L'INTERACTION SOL-STRUCTURE

La structure est modélisée au sein de FLAC^{2D}. Cependant, l'interfaçage entre éléments de structure FLAC^{2D} et particules PFC^{2D} n'est pas possible à l'heure actuelle par l'intermédiaire des procédures de couplage Itasca dans les deux programmes. Il a donc été choisi "d'enrober" les semelles de la structure dans des éléments volumiques FLAC^{2D}, eux-mêmes interfacés avec les particules PFC^{2D}. Ces zones présentent une densité de maillage faible (2x2 mailles), due à la nécessité de conserver une taille d'élément supérieure à plusieurs fois la taille moyenne d'une particule PFC^{2D} (4mm de diamètre).

3.3. CALAGE DES PARAMETRES DE CONTACT INTERPARTICULAIRE DANS PFC^{2D}

Le comportement d'un assemblage de particules PFC^{2D} est dépendant des propriétés de contact interparticulaire des éléments et de l'état initial du massif. Il n'existe pas de relation directe avec les caractéristiques macroscopiques équivalentes. La relation est réalisée par des essais biaxiaux (courbes déviatoriques q-ϵ_1 et volumiques ϵ_v-ϵ_1). Les paramètres régissant les lois de contact des particules sont les raideurs des particules, le frottement intergranulaire et les valeurs seuils d'effort en traction et en cisaillement pour le matériau cohérent.

Deux opérations de calage sont nécessaires, la première pour le matériau pulvérulent, la seconde pour le matériau frottant cohérent. Les caractéristiques mécaniques sont globalement bien reproduites pour les deux matériaux (figure 2). Le comportement volumique présente une différence importante à l'origine qui s'estompe vers la fin de l'essai. Le matériau de Schneebeli est plus rapidement dilatant alors que l'assemblage de particules PFC^{2D} passe par une phase initiale de contractance (inhérente à la

formulation du code de calcul) avant de présenter un comportement dilatant (figure 3). Les angles de dilatance obtenus sont sensiblement équivalents.

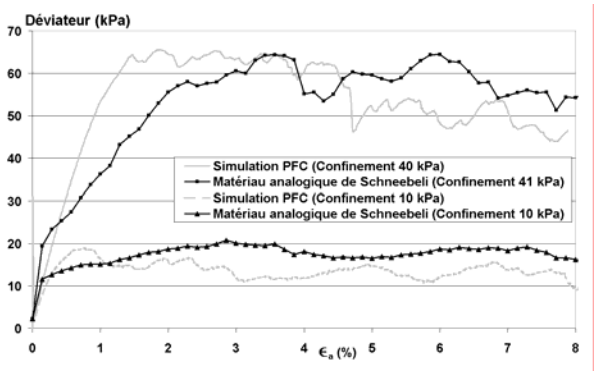

Figure 2 : Courbes de contrainte déviatorique–déformation axiale (matériau frottant)

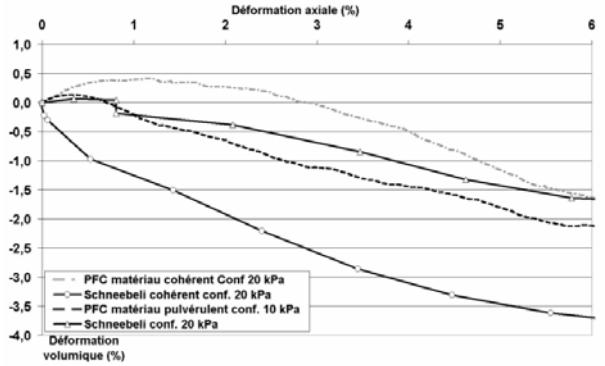

Figure 3 : Courbes de déformation volumique-déformation axiale (pour les deux matériaux)

4. COMPARAISON DES RESULTATS

4.1. PRESENTATION D'UNE APPROCHE EMPIRIQUE : ESTIMATION DES MOUVEMENTS EN SURFACE

Les approches empiriques de Peck (1969) pour les mouvements verticaux et de Lake et al. (1992) pour les mouvements horizontaux sont utilisées pour la prévision des mouvements de terrain en surface consécutifs à l'excavation d'un tunnel circulaire :

$$S(x) = S_{max} \times e^{\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right)} \text{ (Peck 1969) et } V(x) = S(x)\frac{x}{Z_0} \text{ (Lake et al. 1992)}$$

avec S_{max} l'affaissement maximal en surface, i la distance au point d'inflexion, Z_0 la distance entre la surface et l'axe du tunnel, x l'abscisse dont l'origine est située à la verticale de l'axe du tunnel, $S(x)$ et $V(x)$ respectivement le déplacement vertical et horizontal à l'abscisse x.

Caudron et al. (2006) ont montré qu'avec quelques modifications, ces deux expressions peuvent permettre la prédiction des déplacements en surface tant que les courbes de mouvements restent continues. Ceci est le cas lorsque la partie supérieure du recouvrement est constituée de matériau granulaires. Ces deux approches ont été calées (par l'intermédiaire des paramètres S_{max} et i) pour être représentatives des résultats expérimentaux en condition de terrain vierge.

4.2. EN TERRAIN VIERGE

Les premiers essais et simulations sont réalisés en condition de terrain vierge : sans structure en surface. Les déplacements en surface (figures 4 et 5) prennent dans les deux cas la forme d'une cuvette d'affaissement continue. Les courbes d'affaissements obtenues sont très semblables en terme de forme et d'amplitude. Seule une partie réduite au centre de la cuvette présente des différences : les simulations numériques donnent un affaissement maximum supérieur de 30% à la valeur correspondante issue des essais expérimentaux. L'origine de ce phénomène a été discutée dans Caudron et al. (2007) : le comportement du couplage FLAC^{2D}-PFC^{2D} montre ici certaines de ces limites. La frontière entre les deux codes de calcul doit en effet être positionnée en zone de très faibles déformations pour minimiser son influence sur le résultat. Les déplacements horizontaux présentent

une différence importante entre les deux résultats. La modélisation numérique sous-estime leur amplitude de près de 66% sur la totalité de la courbe. Cette différence est largement due au choix du positionnement de la frontière FLAC^{2D}-PFC^{2D}. Une courbe empirique est tracée sur chacun des deux graphes. Elles sont représentatives du comportement moyen des essais expérimentaux en condition de terrain vierge (7 essais au total).

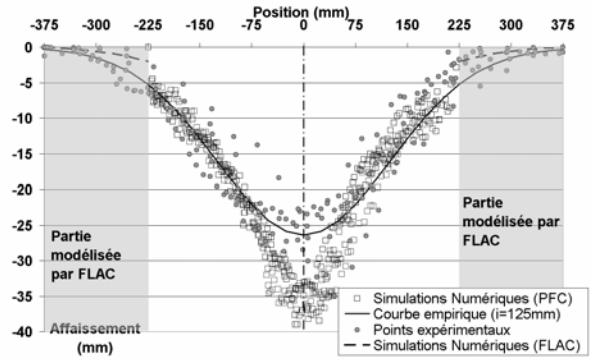

Figure 4 : Déplacement vertical sans structure

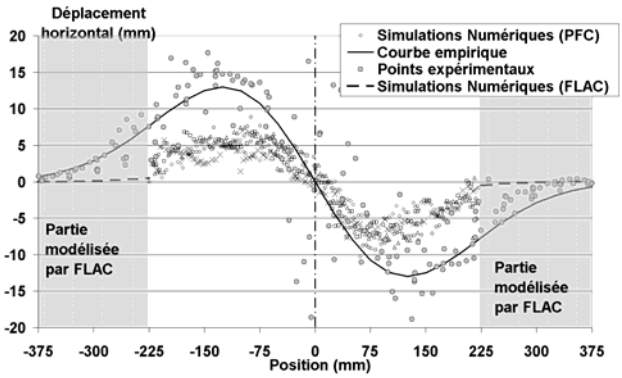

Figure 5 : Déplacement horizontal sans structure

4.3. *EN PRESENCE DE LA STRUCTURE*

Les caractéristiques du massif de sol sont identiques à celles utilisées lors des essais et simulations en condition de terrain vierge. Une seule position de la structure est testée : la fondation de droite est alignée sur l'axe de la cavité. Les déplacements verticaux sont très peu influencés par la présence de la structure. Les déplacements horizontaux en surface (terrain et semelles de la structure) (figures 6 et 7), présentent l'influence de la structure par rapport aux déplacements obtenus en terrain vierge.

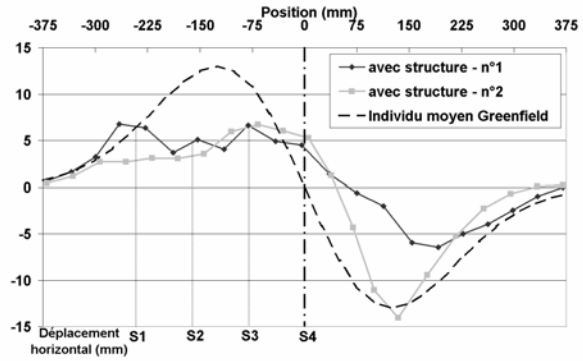

Figure 6 : Déplacement horizontal avec structure (modèle réduit physique)

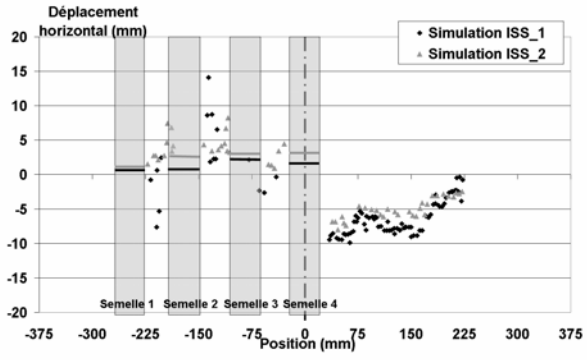

Figure 7 : Déplacement horizontal avec structure (modèle numérique)

4.4. *DEFORMATIONS AU SEIN DE LA STRUCTURE*

Les déformations au sein de la structure sont déterminées pour les quatre cas (expérimental-numérique, terrain vierge-avec structure) au niveau de la position des jauges de déformation (figure 8). Les mouvements de sol en terrain vierge sont appliqués à la structure pour évaluer l'influence de l'interaction sol-structure (figure 9 et 10).

La référence prise est le comportement de la structure dans l'approche découplée (ISS négligé). Les déformations obtenues lors des essais ou simulations en présence de la structure en surface sont alors

tracées de manière comparative. Des différences variables d'une jauge à l'autre (augmentation, réduction voire même signe opposé) sont observables et ne permettent pas de mettre en évidence une relation systématique. Il est donc important de prendre en compte l'interaction sol-structure lors d'une telle étude. Pour les simulations numériques, certaines différences peuvent être imputables à l'enrobage des semelles utilisé comme artifice de couplage.

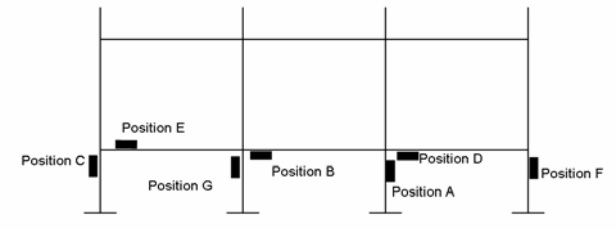

Figure 8 : Position des jauges sur la structure

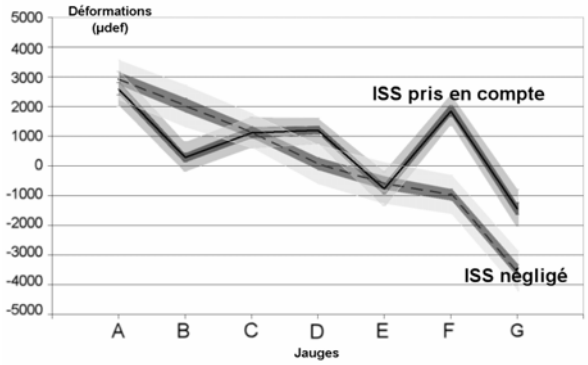

Figure 9 : Déformations dans la structure (modèle physique réduit)

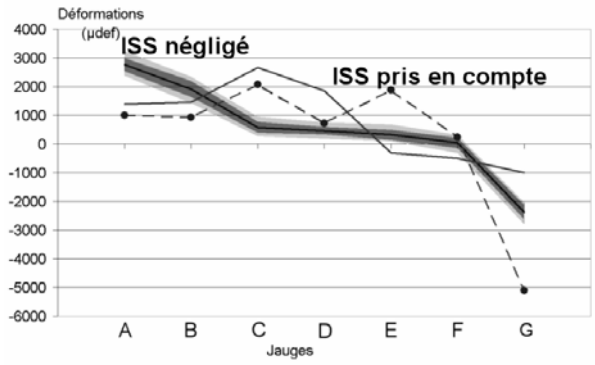

Figure 10 : Déformations dans la structure (modèle numérique)

5. APPLICATION AU FONTIS DE CHANTELOUP-LES-VIGNES (1991)

Il est choisi de confirmer la pertinence du modèle numérique et de l'approche empirique utilisés à travers l'application à un fontis connu. Au 19^{e}s et jusqu'en 1979, des carrières de gypse ont été exploitées dans le massif de l'Hautil (ouest parisien), sous un recouvrement constitué d'un horizon marneux (20 m) lui-même surmonté d'un horizon sableux (45 m). Les vides subsistants dans l'horizon gypseux sont aujourd'hui à l'origine d'apparitions épisodiques de fontis. En 1991, la commune de Chanteloup-les-Vignes, dans le massif de l'Hautil, a été le théâtre d'un fontis important (30m de diamètre pour 15m de profondeur). Les simulations sont focalisées sur la rupture de la dernière planche de marne en dessous de l'horizon sableux. On présuppose que la cloche de fontis a déjà traversé la quasi-totalité de l'épaisseur marneuse.

Deux simulations numériques à l'aide du modèle couplé sont menées en utilisant les caractéristiques mécaniques déterminées précédemment (différentes des caractéristiques réelles). La première (figure 11) tente de reproduire le phénomène observé dans la réalité : apparition d'un entonnoir présentant un angle de talus naturel égal à l'angle de frottement du matériau. La seconde (figure 12) est conçue pour permettre la validation de l'approche empirique utilisée. Le volume de la cavité a été déterminé tel qu'une cuvette d'affaissement présentant un affaissement maximal de l'ordre de 2,6 m apparaisse en surface.

Lors la première simulation, le compromis réalisé au niveau de la position de la frontière FLAC^{2D}-PFC^{2D} pour limiter le temps de calcul nécessaire perturbe le résultat. L'angle de talus naturel est néanmoins de 26°, soit identique à l'angle de frottement du matériau utilisé. Pour la seconde simulation (figures 13 et 14), la concordance est bonne avec l'approche empirique. L'affaissement maximal est légèrement inférieur : 2,4 m simulé pour 2,55 m estimé. Les déplacements horizontaux présentent des différences : la courbe de la simulation est asymétrique, ce qui est dû à la variabilité intrinsèque à PFC. Les valeurs extrêmes sont supérieures à celles estimées par l'approche empirique (+25% au maximum). Les résultats obtenus sont satisfaisants et ouvrent des perspectives intéressantes.

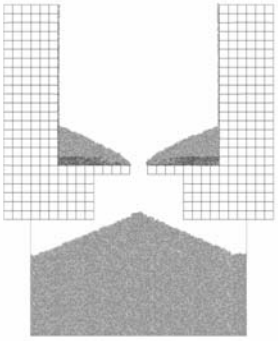

Figure 11 : Simulation n°1 – Etat final

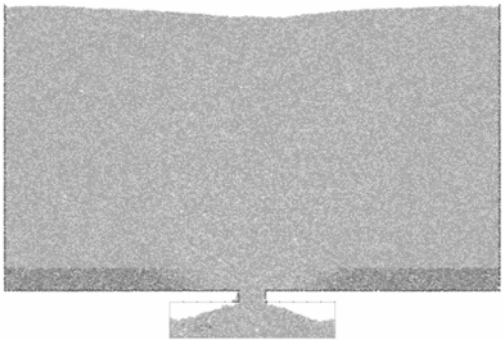

Figure 12 : Simulation n°2 – Etat final

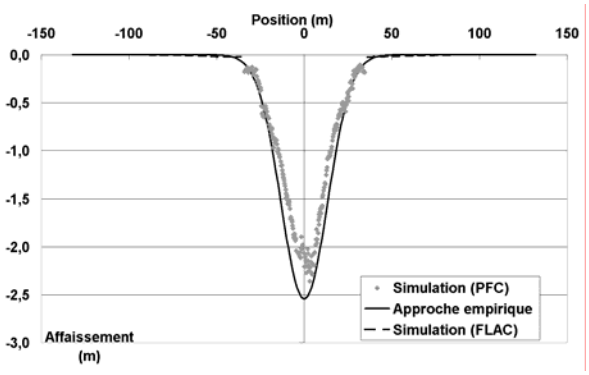

Figure 13 : Simulation n°2 – Déplacements verticaux

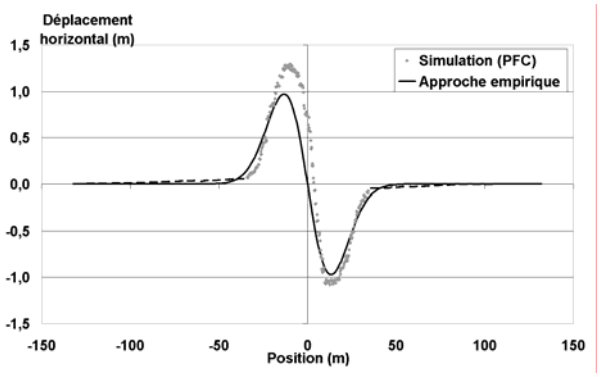

Figure 14 : Simulation n°2 – Déplacements horizontaux

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Deux outils complémentaires ont été utilisés pour l'étude de l'interaction sol-structure lors de mouvements de terrain. Un modèle réduit expérimental utilisant le matériau analogique de Schneebeli et une variante cohérente a permis de reproduire le phénomène de fontis puis de caractériser l'interaction sol-structure. Par la suite, un modèle numérique couplé MMC/MED a été mis au point pour permettre la réalisation d'études paramétriques de manière plus souple ou moins onéreuse qu'avec le modèle expérimental. Cependant les simplifications conceptuelles utilisées introduisent des perturbations dans les résultats, particulièrement lors des simulations en présence de la structure. Néanmoins, les résultats obtenus sont globalement satisfaisants. Le comportement de la structure soumise aux déplacements en terrain vierge est différent de celui prenant en compte l'interaction sol-structure. Il n'est pas possible d'adopter des relations simples pour en tenir compte. L'application au fontis de Chanteloup-les-Vignes a permis l'obtention de résultats encourageant pour l'avenir.

Des améliorations portant sur le modèle réduit physique et sur le modèle numérique sont envisagées (modification du panel d'instrumentation, amélioration du couplage élément de structure FLAC/particules PFC, …). Parallèlement des études paramétriques (position de la structure, nature du recouvrement, dimensions de la cavité) seront réalisées. L'utilisation de nouvelles possibilités de modélisation avec la Méthode des Eléments Distincts sera étudiée (particulièrement avec l'approche Adaptative Continuum-DisContinuum (ACDC) de PFC (Cordis, 2004)). A plus long terme, des perspectives de test de solutions de protection des structures sont envisagées.

Bibliographie

Augarde, C., Burd, H. & Houlsby, G. 1998. Some experiences of modelling tunnelling in soft gound using three-dimensional elements in A. Cividini (ed.), *Proceeding of the fourth European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, Udine. Wien:Springer-Verlag, 603-613.

Burland J. 1995. Invited Special Lecture: Assessment of risk of damage to buildings due to tunneling and excavation. *1st Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering*, Tokyo, Vol 3; 1189-1201

Caudron M., Emeriault F., Kastner R. & Al Heib M. 2006. Sinkhole and soil-structure interactions: Development of an experimental model. *ICPMG, Hong-Kong*, 04-06 Aug. 2006, pp 1261-1267.

Caudron M., Emeriault F. & Al Heib M. 2007. Modélisation numérique de l'interaction sol-structure lors du phénomène de fontis. *Revue française de Géotechnique*. A paraître.

CORDIS 2004. .Seismic validation of 3d thermo-mechanical models for the prediction of the rock damage around radioactive waste packages in geological repositories. Report No. FIKW-2001-00200, European Community Euratom Program.

Deck, O.; Al Heib, M.; Homand, F. & Wojtkowiak, F. 2006. Synthèse des méthodes de prévision des conséquences des affaissements miniers sur le bâti. Application au cas du bassin ferrifère lorrain. *Les techniques de l'industrie minérale*, 2006, 29, 83-10

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.

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.

Nakai, T.; Xu, L. & Yamazaki, H. 1997. 3D and 2D model tests and numerical analyses of settlements and earth pressures due to tunnel excavation, *Soils & Foundations*, 1997, 37, pp 31-42.

Pacyna, D.; Thimus, J. & Welter, P. 2005. Les carrières souterraines abandonnées en Belgique : impacts sur les infrastructures publiques et privées, *Journées Scientifiques du LCPC : Evaluation et gestion des risques liés aux carrières souterraines abandonnées*, mai 2005, pp 182-194

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.

Sung, E., Shahin, H., Nakai, T., Hinokio, M. & Makoto, Y. 2006. Ground behavior due to tunnel excavation with existing foundation. *Soils & Foundations*, 2:189-207.

Tamari Y. & Towhata, I. 2003. Seismic soil-structure interaction of cross sections of flexible underground structures subjected to soil liquefaction. *Soils & Foundations*, vol.43, 2:69-87.

Vaillant J-M.; Mroueh H.; Shahrour I. 2005. Prise en compte de l`interaction sol-fondations-structures dans le calcul d`une structure flexible sur sol meuble. *Revue Européenne de Génie Civil (REGC)*, Vol.9 No. 4, (2005). 497 – 508.