



HAL
open science

Modélisation numérique de l'interaction sol-structure lors du phénomène de fontis

Matthieu Caudron, Fabrice Emeriault, Marwan Al Heib

► **To cite this version:**

Matthieu Caudron, Fabrice Emeriault, Marwan Al Heib. Modélisation numérique de l'interaction sol-structure lors du phénomène de fontis. Risques géotechniques et environnement liés à l'aménagement, 2006, Lyon, France. pp.II_73-80. ineris-00145233

HAL Id: ineris-00145233

<https://ineris.hal.science/ineris-00145233>

Submitted on 9 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.

MODÉLISATION NUMÉRIQUE DE L'INTERACTION SOL-STRUCTURE LORS DU PHÉNOMÈNE DE FONTIS

Matthieu CAUDRON¹ et ², Fabrice EMERIAULT¹, Marwan AL HEIB²

1 URGC, INSA de Lyon, France

2 INERIS, Ecole des Mines – Parc de Saurupt, 54042 NANCY Cedex

RESUME - Cet article présente une modélisation du phénomène d'interaction sol-structure durant la formation d'un fontis par une approche numérique couplée. L'approche utilise un modèle numérique bidimensionnel couplant un code de calcul aux Différences Finies avec un code de calcul utilisant les Eléments Distincts (FLAC et PFC d'Itasca Consulting Group) afin de tirer au mieux partie des performances des deux logiciels.

1. Introduction

Les fontis sont causés par des cavités souterraines d'origine anthropiques ou naturelles. La nature extrêmement 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. Il apparaît que l'approche communément utilisée qui consiste à déterminer les mouvements du sol en condition de terrain vierge puis à les appliquer à une structure en surface, n'est pas satisfaisante.

Le modèle numérique présenté dans la suite permet de prendre en compte de manière explicite l'interaction sol-structure. Ainsi par comparaison entre des résultats obtenus en condition de terrain vierge puis en présence d'un modèle de bâtiment, il met clairement en évidence l'influence des interactions sol-structure lors du phénomène de fontis.

De plus, le modèle faisant appel à un couplage de deux logiciels (FLAC^{2D} et PFC^{2D}) basés sur des méthodes numériques différentes, une comparaison pertinente peut être faite entre simulations numériques et résultats d'une campagne expérimentale menée sur un modèle réduit de laboratoire (cf. Figure 1 et 2). Pour plus de détails sur cette expérimentation, le lecteur pourra se référer à Caudron et al. (2006b).

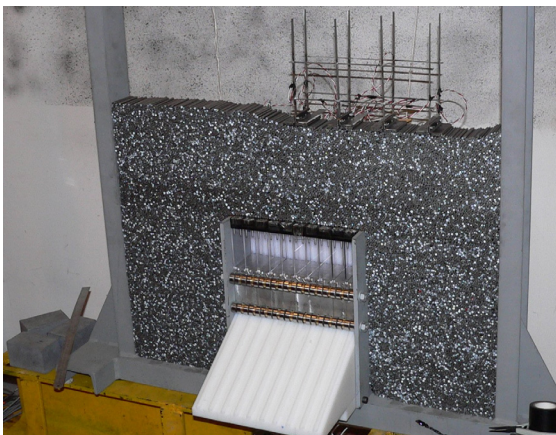


Figure 1. Modèle réduit de laboratoire.

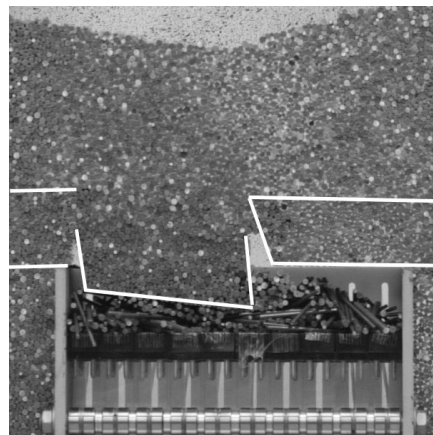


Figure 2. Exemple de rupture obtenue (cas de terrain vierge)

2. Le cas d'étude

Le modèle réduit expérimental représente, à une échelle 1/40ème, un massif de sol d'une largeur de 30 m et de 8 m de hauteur de recouvrement au dessus d'une cavité. Ce recouvrement est constitué de deux couches différentes. Un banc raide de 2m d'épaisseur constitue le toit de la cavité (dans le modèle expérimental, ce matériau est représenté par des

rouleaux de Schneebeli rendus cohérents par ajout de colle aqueuse [Caudron et al. 2006b]). Il est surmonté par 6m de matériau granulaire frottant (représenté par le matériau de Schneebeli standard). Les caractéristiques des deux matériaux sont présentées dans le tableau I.

La cavité de 2 m de hauteur est créée progressivement jusqu'à une largeur maximale de 10m en 5 étapes. Les 2 m centraux sont ouverts par déplacement de parties mobiles en perturbant le moins possible le massif de sol. Puis à chaque étape supplémentaire, 1m de part et d'autre sont ouverts de la même manière, l'ensemble est résumé dans le tableau II.

La structure placée en surface est de type "poutres-poteaux" en acier. Ses caractéristiques géométriques sont détaillés dans le tableau III. Le chargement appliqué suit les règles de l'art.

Tableau I. Caractéristiques des sols réels

	Densité	E (MPa)	φ (°)	c (kPa)
Sol pulvérulent	2.2	50-100	22-24	0
Sol cohérent	2.2	50-100	27-30	~100

Tableau II. Etapes de création de la cavité

Création de la cavité	Largeur	Hauteur
Etape 1	2m	2m
Etape 2	4m	2m
Etape 3	6m	2m
Etape 4	8m	2m
Etape 5	10m	2m

Tableau III : Caractéristiques géométriques de la structure

Largeur de semelle	1.65m
Longueur des poutres	3.2m
Hauteur d'un étage	2.7m
Vide sanitaire	1.2m
Section (m ² /ml)	0.051m ²
Inertie (m ⁴ /ml)	60.8 10 ⁻⁴ m ⁴
Nombre de travées	3

Tableau IV : Valeurs des paramètres micro de PFC

Paramètre	Matériau Pulvérulent	Matériau Cohérent
k_n (MN/m)	16.0	16.0
k_s (MN/m)	8.0	8.0
fric	0.50	0.45
Densité	7.85	7.85
c_n et c_s (N)	0	1000

3. Le modèle couplé

3.1 But du couplage

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 pour un problème donné. Nous pouvons ainsi utiliser les Eléments Distincts pour représenter le massif de sol constituant le toit de la cavité, zone où se produiront les déplacements les plus importants tandis que le reste du massif de sol (où n'apparaîtront que de faibles déplacements et déformations) ainsi que le modèle de bâtiment seront maillées par FLAC^{2D} (basé sur une approche en Différences Finies) en utilisant respectivement des éléments volumiques et des éléments de structures. La figure 3 représente schématiquement le raisonnement utilisé.

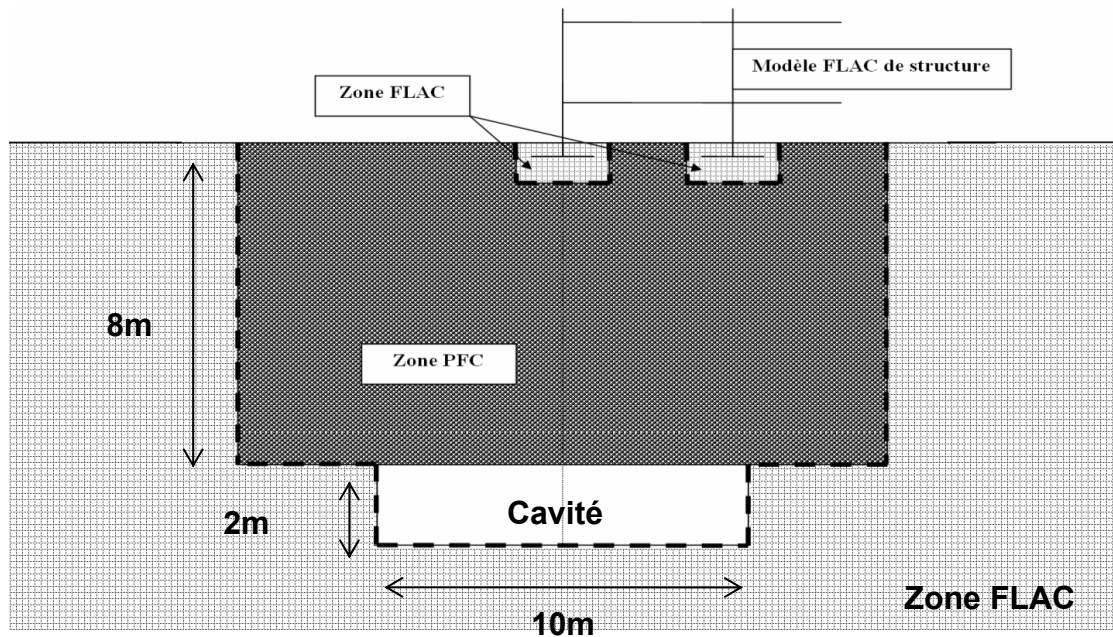


Figure 3 : Schéma de principe du modèle numérique couplé $FLAC^{2D}$ – PFC^{2D} .

3.2 Présentation de $FLAC$ et PFC

$FLAC^{2D}$ est un logiciel de modélisation numérique utilisant la méthode des Différences Finies appliquée à un milieu continu. Il est extrêmement souple en terme d'utilisation et ne présente pas de problème particulier pour l'utilisation qui en est faite.

PFC^{2D} est également commercialisé par la société Itasca. L'originalité de son approche provient du fait qu'il utilise la Méthode des Eléments Distincts (MED) [Itasca Consulting Group, 2005]. Il considère ainsi 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 qu'une approche de type milieu continu. Cependant cette approche présente deux inconvénients ou limitations majeurs :

- Le temps processeur requis pour modéliser un même problème est beaucoup plus important que pour les logiciels utilisant une approche en milieu continu.
- Le comportement global d'un ensemble de particules est la résultante de l'ensemble des propriétés des particules. Le comportement macroscopique est étroitement lié aux propriétés micro des particules. Une délicate phase de détermination ou de calage des paramètres est donc nécessaire car il n'existe pas de relations directes entre les propriétés micro et les caractéristiques macroscopiques usuelles des sols: ϕ , c , E , ψ ...

Le calage des différents paramètres micro des particules est réalisé par le biais d'essais biaxiaux. Les paramètres sont ajustés jusqu'à obtenir le comportement du sol souhaité présenté dans le tableau I.

Enfin, chacun des deux logiciels peut "communiquer" avec une autre application développée par Itasca à travers une connection réseau. Cela permet d'envisager des modélisations où une région d'un modèle est maillée par un code et une autre par un autre code échangeant des informations nécessaires pour assurer le bon déroulement du processus.

3.3 Fonctionnement du couplage

Le maillage $FLAC^{2D}$ désiré est créé, de même pour l'assemblage de particules PFC^{2D} et un ensemble de procédures va échanger entre les deux codes les informations nécessaires au niveau des frontières communes. Plus particulièrement, PFC^{2D} transmet à $FLAC^{2D}$ les forces qu'appliquent les particules sur les arêtes de $FLAC^{2D}$ concernées et $FLAC^{2D}$ renverra les vecteurs vitesses d'un certain nombre de particules asservies car en contact avec les frontières de $FLAC^{2D}$.

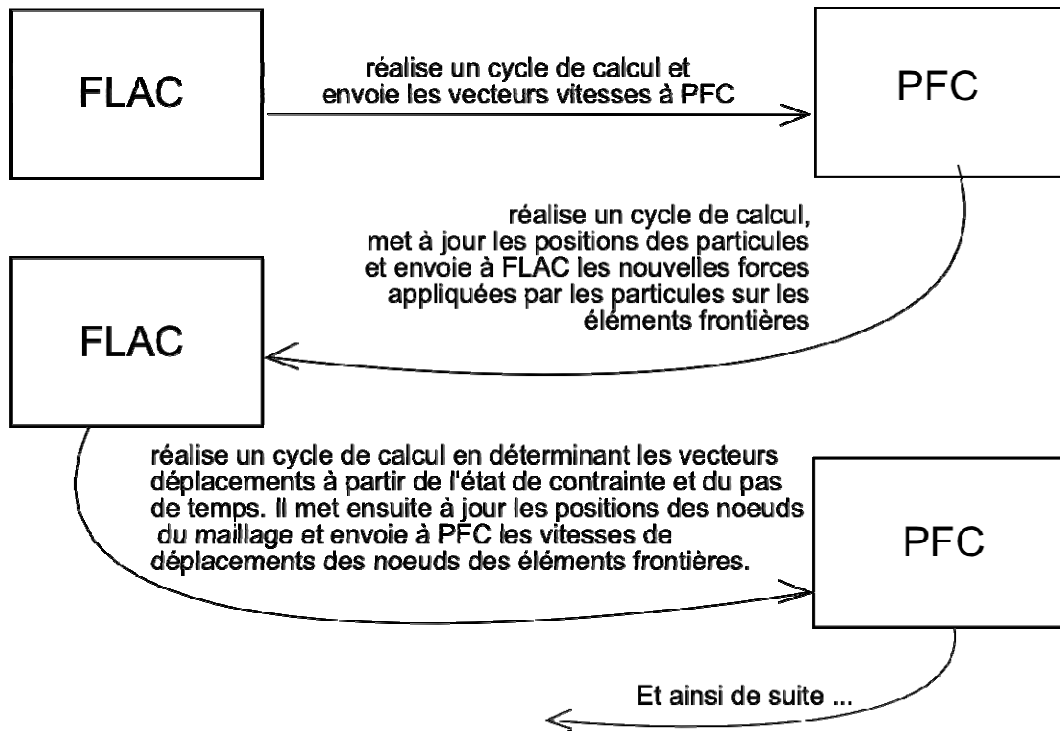


Figure 4. Illustration des principes du couplage entre $FLAC^{2D}$ et PFC^{2D}

Ce schéma est valable pour un cas simple où il n'y a pas de perte ou d'apparition de contact entre des particules et des éléments frontières. Or dans un modèle représentant la formation d'un fontis, il est nécessaire de pouvoir déterminer les pertes de contact lors de la création de la cavité puis les créations de contact lors de la rupture du toit de la cavité et de la chute des particules à l'intérieur de celle-ci. Pour ce faire, il a été mis au point une deuxième procédure qui englobe le précédent schéma de fonctionnement.

Il est nécessaire de déterminer tous les x cycles de calcul si il y a apparition de nouveaux contacts entre des particules et des arêtes frontières. Ce nombre de cycle maximal est déterminé à partir de la vitesse maximale des particules à un instant donné. Il sera tel qu'une particule ne pourra pas se déplacer de manière trop importante durant ces x cycles avant de redéterminer les particules en contact avec des éléments frontières. La distance limite est prise égale au rayon de la plus petite particule ($R_{min} = 3mm$ dans notre cas). La procédure suivante est ainsi appliquée:

1. L'utilisateur spécifie un nombre total de cycles de calcul à réaliser X .
2. Une fonction Fish détermine la vitesse maximale V_{max} sur l'ensemble des particules. Le programme détermine alors le nombre maximum de cycle qui peuvent être réalisés en toute sécurité avec $x = R_{min} / V_{max}$
3. Le modèle couplé réalise ces y cycles de calcul en utilisant le schéma de couplage détaillé précédemment, y étant le plus faible des deux nombres x et X
4. PFC libère les particules asservies, reçoit de nouveau la liste des éléments frontières de FLAC et détermine une liste de nouvelles particules asservies.
5. On recommence à l'étape 2 en remplaçant X par $X-y$, jusqu'à ce que le nombre de cycles de calcul effectif soit égal au nombre de cycle demandé par l'utilisateur.

Si l'on souhaite modifier le maillage $FLAC^{2D}$ ou la géométrie de la frontière entre $FLAC^{2D}$ et PFC^{2D} (dans notre cas particulier pour créer la cavité à l'origine du fontis), on suit la même procédure en effectuant les modifications et la mise à jour entre les étapes 3 et 4.

Dans le cas d'une structure en surface, celle-ci est modélisée par $FLAC^{2D}$. En effet, l'interfaçage entre modèles de structure et éléments PFC^{2D} n'étant pas possible directement par l'intermédiaire des procédures de couplage Itasca, il a été choisi "d'enrober" les semelles dans des zones $FLAC^{2D}$ qui peuvent interagir avec les particules PFC^{2D} . Des zones de petites

dimensions "flottantes" sont donc créées et rendues solidaires des semelles de la structure localisées dans la région représentée par PFC^{2D} (Figure 3).

4. Calage des paramètres

Le calage des paramètres micro de PFC^{2D} est basé sur les résultats de plusieurs essais biaxiaux (courbes $q - \varepsilon_1$ et $\varepsilon_v - \varepsilon_1$). Les différents paramètres régissant le comportement local des particules sont les suivants:

- k_n et k_s , raideurs normales et tangentielles du contact entre deux particules,
- Fric, le coefficient de frottement intergranulaire,
- Les paramètres c_n et c_s , limites de résistance normale et tangentielle du contact de type "Contact Bond" utilisé pour représenter la cohésion d'un sol dur ou d'une roche [Potyondy & Cundall, 2004].

Deux hypothèses simplificatrices ($k_n / k_s = 2$ et $c_n / c_s = 1$) permettent de ramener le problème au calage de trois paramètres indépendants. Une première série d'essais permet de déterminer le meilleur jeu de paramètres pour le sol pulvérulent, une deuxième est nécessaire pour le matériau cohérent (tableau V et figure 5). Des différences sont observables entre le comportement du matériau expérimental et le modèle numérique obtenu. Le modèle numérique est, en début d'essai, légèrement plus raide que les résultats expérimentaux. Le comportement volumique présente lui une différence importante à l'origine qui s'estompe vers la fin de l'essai. En effet, le matériau de Schneebeli est directement dilatant alors que l'assemblage de particules PFC^{2D} passe par une phase initiale de contractance avant de présenter un comportement dilatant. Cependant les angles de dilataance obtenus sont sensiblement équivalents.

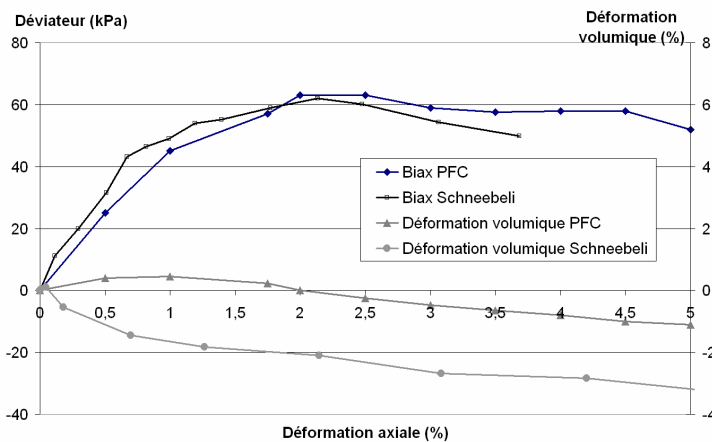


Figure 5. Tracé du déviateur et de la déformation volumique en fonction de ε_x pour un essai.

Caractéristiques	Sol pulvérulent	Sol cohérent
E (MPa)	50-100	50-100
Φ (°)	24	25-30
c (kPa)	~0	65-150
Ψ (°)	6-7	8-9
$\Psi_{rupture}$ (°)	6-7	6-7

Tableau V. Synthèse des caractéristiques mécaniques des matériaux sous PFC.

5. Résultats des deux simulations

Deux essais d'effondrement de cavité ont pu être simulés. Le premier se déroule en condition de terrain vierge, c'est à dire en l'absence de structure, et sert de référence. Le second cas prend en compte la présence de la structure afin de déterminer l'importance du phénomène d'interaction sol-structure sur la formation de ce fontis. Les résultats qui seront plus particulièrement analysés, sont l'amplitude maximale de déplacement en surface et sa localisation, la forme de la cuvette d'affaissement, la pente sous la localisation de la structure. Ces différents indicateurs sont en effet caractéristiques des sollicitations appliquées à un bâtiment en surface lors de mouvements de sol et permettent de définir le niveau d'endommagement plausible [Deck, 2002].

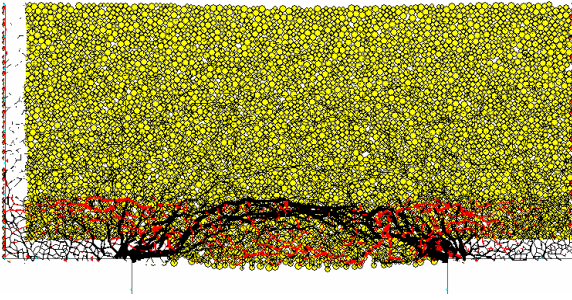


Figure 6 : Répartition des contraintes dans le massif de sol (compression = noir, traction = rouge).

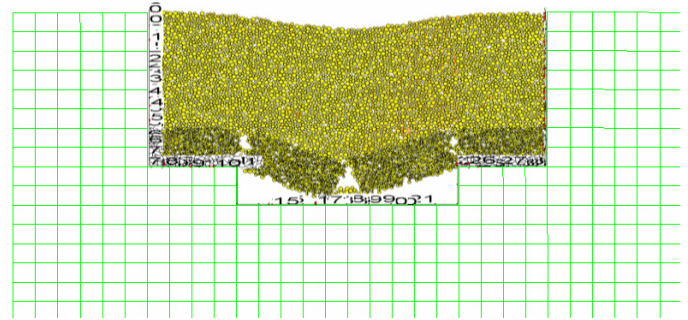


Figure 7 : Etat du modèle post-rupture.

La cavité est créée en 5 étapes, puis le banc raide est fragilisé localement au niveau du centre du toit de la cavité pour provoquer la rupture. L'altération appliquée est une réduction progressive de la contrainte limite du liaisonnement entre les particules dans le but d'initier une fracturation qui se propage à travers le banc de matériau cohérent. Lorsque la fissuration atteint un stade critique, la rupture se déclenche de manière très brutale.

La figure 6 illustre la répartition des contraintes dans le massif de sol lorsque la cavité a été complètement créée. Le report des charges en direction des parois verticales de la cavité est très net, ainsi que la présence de contraintes de traction dans le banc raide, en zone inférieure de la partie centrale de la cavité, en zone supérieure à l'aplomb des parois latérales de la cavité. La figure 7 montre l'état du modèle après rupture de la cavité. Il apparaît qu'un certain volume de vide subsiste, ceci étant dû au réarrangement des blocs lors de leur chute. Une cuvette d'affaissement en surface est clairement identifiable. Elle est reportée sur la figure 8.

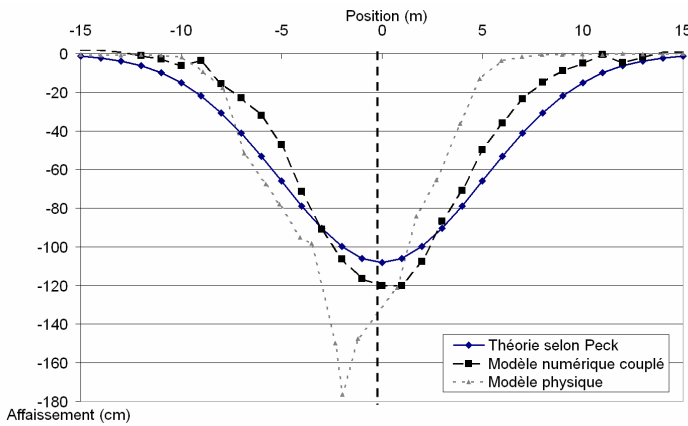


Figure 8 : Cuvettes d'affaissement - modèle numérique et approche de Peck modifiée.

Caractéristique	Modèle numérique	Valeur empirique
S_{max}	120cm	108cm
i	~4m	~5m
Pente maximale	24%	13%

Tableau VI : Présentation des résultats quantitatifs des affaissements en surface.

La courbe "théorique" présentée sur cette même figure correspond à l'utilisation d'une version modifiée de l'approche empirique de Peck proposée par Caudron et al. [2004] dans le cas de cavités de forme rectangulaire. Elle prend en compte une estimation du foisonnement pour une constitution des bancs de recouvrement connue.

Le volume de la cuvette est déterminé à partir du volume de la cavité affecté d'un facteur traduisant la propension au foisonnement.

$$V_{cuvette} = \frac{2}{3} V_{cavité} \quad (\text{Equation 1})$$

Puis le rayon équivalent R_{eq} est déterminé à partir du volume de la cuvette, ce qui permet de déterminer i puis S_{max} .

$$i = 0.42R_{eq} + 0.525H \quad (\text{Equation 2})$$

$$S_{\max} = \frac{V_{\text{cuvette}}}{2.51 \times i} \quad (\text{Equation 3})$$

La comparaison est globalement satisfaisante, tant au niveau de l'affaissement maximal que de la pente maximale située au niveau du point d'inflexion. Le tableau VI présente les principaux résultats quantitatifs issus de cet essai.

L'amplitude maximale obtenue numériquement est légèrement plus importante de 11% environ alors que la cuvette d'affaissement est moins large. La différence enregistrée sur i , la distance au point d'inflexion, est de l'ordre de 20%. L'écart relevé le plus important porte sur la pente maximale observée qui varie dans une proportion du simple au double par rapport à ce qui était prévu par l'approche théorique.

Ces écarts sont principalement dus à une perte de volume au niveau de la cavité plus faible que prévu par le retour d'expérience qui permettait d'estimer celle-ci aux environs des deux tiers du volume total de la cavité. Le volume de la cuvette obtenue par le modèle numérique est en effet d'environ 58% du volume de la cavité.

Cependant la concordance avec la courbe expérimentale est relativement bonne, surtout si l'on tient compte de la différence de rupture observée expérimentalement où seule la partie gauche du banc raide avait cédé (Figure 2).

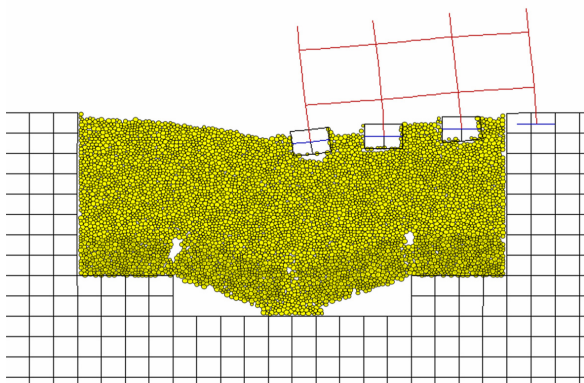


Figure 9. Modèle couplé prenant en compte la présence d'une structure.

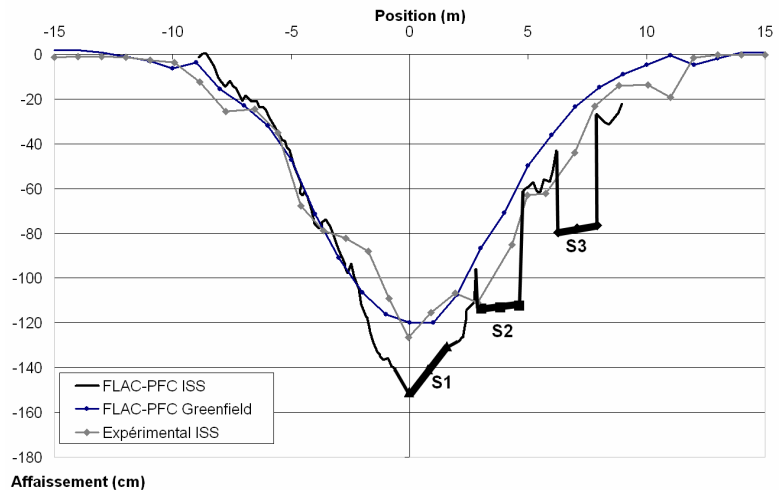


Figure 10. Cuvette d'affaissement obtenue avec la structure.

La simulation numérique prenant en compte une structure en surface est illustrée sur la figure 9. La rupture obtenue est similaire à celle observée en condition de terrain vierge. La rupture des deux parties en encorbellement du banc raide survient peu après la dégradation. Celles-ci chutent dans la cavité et le sol pulvérulent en surface suit leur mouvement. Les fondations de la structure se trouvent alors sollicitées. L'état stable final qui est atteint présente deux vides importants qui subsistent au niveau de la cavité, quelques vides de moindre ampleur au niveau des zones de rupture dans le banc raide et un décollement important de la semelle gauche de la structure qui ne prend appui que sur quelques rouleaux à la fin de la simulation.

La figure 10 montre la surface obtenue après stabilisation de la rupture. Les trois semelles placées dans le massif de particules y figurent aussi. La semelle 1 est soumise à une forte rotation, tandis que les deux autres sont faiblement inclinées selon la pente de la cuvette. Le tableau VII fournit les résultats sous forme quantitative : paramètres géométriques de la cuvette et déplacement de la structure. Il apparaît que si la forme de la cuvette varie peu, le volume obtenu lors de la simulation numérique est sensiblement inférieur à celui observé pour l'essai expérimental correspondant : 54% contre 64% du volume de la cavité initiale.

Qualitativement, au niveau des efforts engendrés au sein de la structure, il apparaît que ce sont les deux poteaux de gauche qui concentrent les efforts maximaux et notamment leur partie basse, entre la semelle et le premier niveau. Des valeurs de moment de l'ordre de 13kN.m y

sont observées. De plus, le signe des moments obtenus indique que les deux semelles ont eu tendance à se rapprocher durant l'essai, ce que l'on peut confirmer en comparant les vecteurs déplacement horizontaux par exemple: Pour ce qui concerne les éléments de structure horizontaux, c'est dans la travée centrale de la poutre inférieure que le moment fléchissant est le plus important (plus exactement au niveau de la jonction avec le poteau 3).

On retrouve des résultats similaires à ceux qui ont été obtenus expérimentalement, où l'on avait constaté que les efforts les plus importants étaient localisés dans les poteaux 1 et 2 et dans la travée S₁-S₂ de la poutre basse.

Tableau VII. Résultats quantitatifs de l'essai avec structure.

Caractéristiques	Modèle numérique en terrain vierge	Modèle numérique ISS	Essai Expérimental ISS
S _{max}	120cm	151cm	127cm
i	~4m	~4m	~4,5m
% du volume de la cavité	58%	54%	64%
Pente maximale	24%	~34%	~35%
Pente max. sur la structure	~15,3%	~11%	~18%
Localisation (travée)	S ₂ -S ₃	S ₂ -S ₃	S ₂ -S ₃

6. Conclusion

L'utilisation d'un modèle numérique couplé FLAC^{2D}-PFC^{2D} permet de représenter de manière globalement satisfaisante le phénomène d'interaction sol-structure lors de la formation d'un fontis. Certains points restent cependant à améliorer. C'est le cas du volume final de la cuvette obtenue qui est inférieur à ce qui est fourni par le modèle réduit expérimental. La sollicitation transmise à la structure par le biais des mouvements des particules est complexe mais permet de retrouver des résultats concordant avec les observations issues d'expériences de laboratoire.

Ainsi validé, le modèle numérique permet d'explorer par des études paramétriques les rôles respectifs de chaque paramètre du problème (géométrie de la cavité et positionnement par rapport à la structure, caractéristiques du massif de sol, caractéristiques et géométrie de la structure) dans l'interaction sol-structure mobilisée par l'effondrement de la cavité.

BIBLIOGRAPHIE

- Caudron M., Mathieu P., Emeriault F. et Al Heib M., 2004. Effondrement de cavités souterraines et interaction avec les ouvrages en surface : approche expérimentale sur modèle analogique bidimensionnel, *Journées Nationales de la Géotechnique et de la Géologie pour l'Ingénieur, Lille*, juin 2004, 435-442.
- Caudron M., Emeriault F., Kastner R. et Al Heib M., 2006a. Collapses of underground cavities and soil-structure interactions: Experimental and numerical models. *First Euro Mediterranean Symposium on Advances in Geomaterials and Structures, Hammamet (Tunisia)*, 03-05 may 2006.
- Caudron M., Emeriault F., Kastner R. et Al Heib M., 2006b. Sinkhole and soil-structure interactions: Development of an experimental model. *International Conference on Physical Modeling in Geotechnics, Hong-Kong*, 04-06 août 2006.
- 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.
- Itasca Consulting Group, 2005. PFC^{2D} Manuals (Particles Flow Code in 2 Dimensions), Version 3.10, ICG, Minneapolis, Minnesota.
- Potyondy D.O., Cundall P.A. 2004. A bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 41:1329-1364.