



**HAL**  
open science

## Simulation expérimentale de mouvements de terrain et conséquences sur les ouvrages de surface

Nicolas Thelier, Matthieu Caudron, Marwan Al Heib

► **To cite this version:**

Nicolas Thelier, Matthieu Caudron, Marwan Al Heib. Simulation expérimentale de mouvements de terrain et conséquences sur les ouvrages de surface. 28. Rencontres universitaires de génie civil "Ouvrages en service et développement durable", Jun 2010, Bourboule, France. pp.195-205. ineris-00973577

**HAL Id: ineris-00973577**

**<https://ineris.hal.science/ineris-00973577>**

Submitted on 4 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.

# Simulation expérimentale de mouvements de terrain et conséquences sur les ouvrages de surface

**Thelier N.<sup>1</sup>, Caudron M.<sup>1</sup> & Al Heib M.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> INERIS, Parc Technologique ALATA, 60550 Verneuil-en-Halatte, FRANCE  
matthieu.caudron@ineris.fr

*RÉSUMÉ. L'impact de mouvements de terrain sur le bâti de surface est étudié à l'aide d'un modèle physique réduit tridimensionnel de grandes dimensions, en tenant compte de l'interaction sol/structure. Une étude paramétrique de l'effet de la position du bâtiment a permis d'une part de confirmer l'importance de ce phénomène ; d'autre part, de prévoir les déplacements du bâtiment en fonction de son emplacement.*

*ABSTRACT. The impact of ground movement on the surface building is studied by mean of a large small-scale three-dimensional physical model, taking into account the soil/structure interaction. A parametric study regarding to the influence of building position shows the importance of soil/structure interaction, on the one hand; and allows estimating the building displacements relatively to the position.*

*MOTS-CLÉS : affaissement de terrain, interaction sol-structure, modèle physique.*

*KEY WORDS: subsidence, soil-structure interaction, physical model.*

## 1. Introduction

Les mouvements de terrains sont les manifestations du déplacement gravitaire de terrains induits par des sollicitations naturelles (fonte des neiges, pluviométrie anormalement forte, séisme, etc.) ou anthropiques (terrassement, vibration, déboisement, exploitation de matériaux ou de nappes aquifères, etc.). Ces mouvements peuvent être à l'origine de dégradations de bâti et d'infrastructures, voire de leur destruction et donc impacter les développements économiques et sociaux.

Les cavités souterraines naturelles ou anthropiques sont à l'origine d'affaissements et de fontis. Une cuvette d'affaissement se décompose en un mouvement vertical  $S_v$  du sol (appelé affaissement A), et des mouvements horizontaux  $S_h$ . La cuvette d'affaissement est caractérisée en chaque point par la pente  $\alpha$ , la courbure R et les déformations horizontales  $\varepsilon_h$  (en compression et en extension). Les effets en surface peuvent se développer en dehors de l'aplomb des vides souterrains (figure 1), dans des zones limitées par l'angle d'influence.

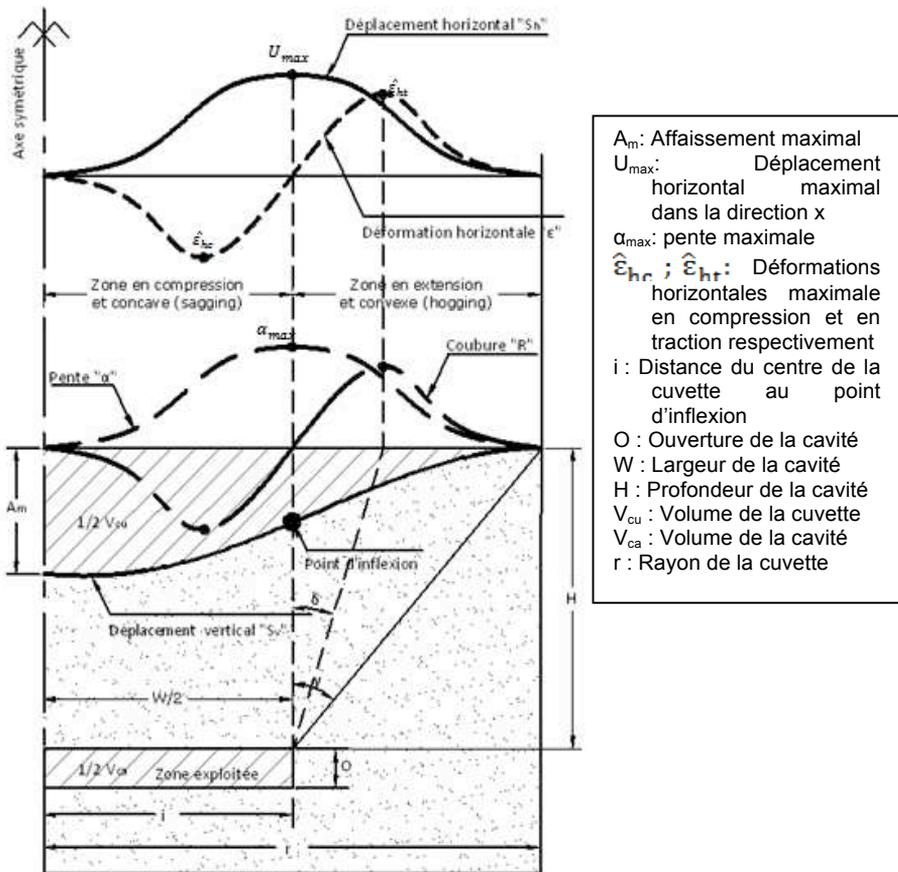
Cet article est consacré à l'étude du phénomène d'interaction sol/structure grâce à la modélisation physique.

Une première partie sera consacrée à la présentation des caractéristiques du modèle physique réduit tridimensionnel et à la réalisation d'une maquette permettant de représenter une structure simple correspondant à une maison individuelle. Puis, une étude paramétrique sera réalisée à l'aide d'une campagne expérimentale comprenant 12 essais permettant de juger de l'influence des positions respectives de l'affaissement et de la structure sur le phénomène d'interaction sol/structure. La dernière partie présentera les résultats de ces essais et l'interprétation de ceux-ci relativement aux comportements du sol et de la structure.

## 2. Modèle physique

La conception générale du modèle physique réduit, ses limitations et contraintes ainsi que les données fondamentales ont été largement présentés par Caudron et al., (2008). Les lois de similitude sont rigoureusement appliquées dans la conception du modèle physique réduit. Les essais ont été réalisés sous la gravité terrestre correspondant au poids propre du sol et de la structure.

Les dimensions du modèle physique réduit sont de 2 m de largeur, 3 m de longueur et 1 m de hauteur et peut ainsi contenir approximativement 10 tonnes de sol. Les dimensions du modèle physique ont été déterminées afin de reproduire les différents types de mouvements de terrain (affaissement et fontis) et de structures en surface avec une plage de facteurs d'échelle qui s'étend de  $1/10^{\text{ème}}$  à  $1/50^{\text{ème}}$ . Ces facteurs d'échelle géométrique sont raisonnablement utilisables pour le géomatériau considéré (sable de Fontainebleau dont les grains sont très fins compris entre 0,1 à 0,4 mm). Seuls les mouvements de terrain en surface et leurs conséquences sur les structures sont investigués. L'effondrement de la cavité n'est pas modélisé. Pour

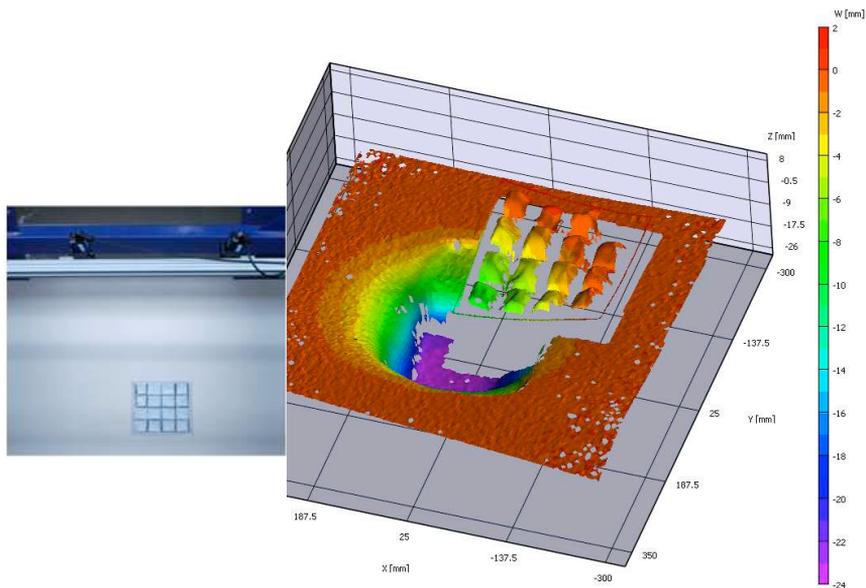


**Figure 1.** Principales caractéristiques des mouvements de surface de sol induits par une cavité souterraine (Deck, 2002)

reproduire les mouvements de terrains, nous utilisons un système de vérins électromécaniques dont la vitesse et le déplacement vertical sont contrôlables, la capacité maximale du modèle physique est de 48 vérins (un seul utilisé).

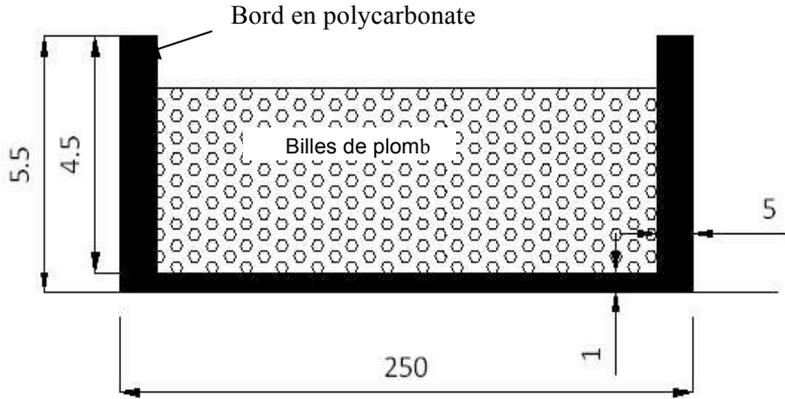
Une technique appelée Direct Image Correlation (DIC) a été choisie pour mesurer les déplacements en 3D et les déformations de la surface du sol. Deux caméras numériques de haute résolution dont la position relative est très précisément connue, permettent de tracer la surface 3D du sol observé pour chaque couple d'images acquis, puis pour différents couples d'images et de déterminer le champ de

déplacements et de déformations entre les instants d'acquisition (figure 2). Cette technique permet de plus une incertitude de mesure sensiblement inférieure au dixième de millimètre pour une surface « discrète » telle que celle formée par le sable de Fontainebleau.



**Figure 2.** Instrumentation du modèle physique : (gauche) Les deux caméras capturant la surface du sol et la maquette de structure ; (droite) Exemple de déplacements verticaux du sol et de la structure calculés par le logiciel VIC3D

La maquette de structure observable sur la figure 2 est une dalle carrée présentant un léger rebord (figure 3) qui peut être remplie de billes de plomb assurant la surcharge de la maquette pour obtenir une contrainte verticale équivalente au prototype. Les bords de la maquette visible par les caméras, permettent de suivre les déplacements de la structure par la technique DIC et d'assurer la résistance structurelle de la maquette.



**Figure 3.** Géométrie de la maquette de structure (en mm) (échelle verticale exagérée)

La maquette de la structure représente une maison individuelle de base carrée (10x10 m), constituée de voiles en maçonnerie et planchers en béton armé, avec deux niveaux (R+1) et des fondations sur semelles filantes sans sous-sol avec un facteur d'échelle géométrique de  $1/40^{ème}$ . Les caractéristiques de la maquette doivent ainsi être déterminées afin que les rigidités axiale ES et en flexion EI respectent les lois de similitude et le facteur d'échelle correspondant (avec E le module de Young du matériau utilisé, S et I la section et le moment d'inertie de la maquette). Une première version de maquette considère cependant une géométrie simplifiée du prototype : la maison individuelle a été remplacée par un radier en béton armé. Pourtant le comportement du radier est trop rigide. Il est donc rendu plus souple et on exacerbe ainsi son comportement vis-à-vis d'un mouvement de terrains. Par conséquent, les écarts, vis-à-vis du comportement axial et du comportement en flexion, entre la maquette et le prototype sont respectivement de -50% et de -40%. Les caractéristiques principales de la maquette sont présentées dans le tableau I.

**Tableau 1.** Grandeurs principales de la maquette de structure

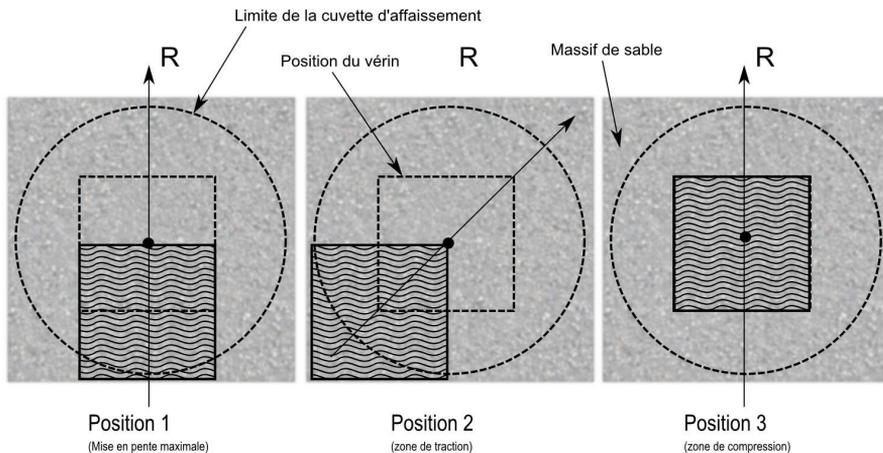
Grandeurs Physiques	Facteur d'échelle	Prototype	Maquette
Longueur (m)	1/40	10	0,25
Largeur (m)	1/40	10	0,25
Epaisseur (m)	1/40	0,25	0,00625
E (Mpa)	1/40	30000	750
E.I (Nm <sup>2</sup> )	1/40 <sup>5</sup>	3,9 10 <sup>8</sup>	3,1
E.S (MN)	1/40 <sup>3</sup>	75 000	1,17

### 3. Etude paramétrique

Le seul paramètre étudié ici est la position de maquette de structure par rapport à la cavité (vérin). Cette étude paramétrique s'intéresse à l'influence de la structure sur les caractéristiques de mouvements de terrains, d'une part et aux sollicitations de la structure induites par les mouvements de terrains, d'autre part.

La cuvette d'affaissement présente une zone de déformation horizontale en compression et une autre en extension (figure 1). L'étendue de ces zones dépend des largeur et profondeur de la cavité. Des observations expérimentales, la cuvette est plus ou moins 2,5 fois plus large que la cavité. Trois positions différentes ont été choisies et étudiées (figure 4) :

- la structure dans la zone de pente maximale de la cuvette d'affaissement (position 1) ;
- la structure dans la zone de traction (position 2) ;
- la structure au centre de la cuvette entre les points d'inflexion ; elle se situe donc entièrement dans la zone de compression (position 3).



**Figure 4.** Illustration des 3 positions du modèle de structure par rapport à la position du vérin

Pour les positions n°1 et n°3 toute la maquette est contenue dans la cuvette, au contraire de la position n°2 où une partie de la structure repose sur une zone de sol non perturbée.

Notons que l'interaction de la maquette avec le sable passe uniquement par un contact (sol-structure) frottant. La maquette est posée directement sur la surface du sable, elle n'est pas encastrée dans le sol. Le tableau II présente un plan d'expérience pour l'étude paramétrique de trois différentes positions de la maquette.

Quatre essais identiques ont été réalisés pour chaque position afin d'assurer la répétitivité des mesures.

**Tableau 2.** *Présentation des paramètres communs aux différents essais.*

	Nb. d'essais	$H$ (mm)	$W$ (mm)	$O$ (mm)	$v$ (mm/s)
position 1	4	300	250 x 250	30	0,15
position 2					
position 3					

$H$  : hauteur de recouvrement du sable ;  $W$  : largeur ou longueur du vérin ;  $O$  : Ouverture du vérin ;  $v$  : Vitesse de déplacement du vérin

#### 4.1 Déplacements de sol en terrain vierge

L'évaluation de l'interaction sol-structure passe par la comparaison de la cuvette d'affaissement obtenue en présence de la structure avec la cuvette en terrain vierge (sans structure en surface). L'influence de la maquette sera visible à travers les variations des déplacements du sol dans les deux cas.

Caudron et al. (2004) ont montré que la cuvette en terrain vierge peut être estimée par l'approche de Peck (1969), développée pour les tunnels. L'hypothèse principale est basée sur la continuité de la cuvette d'affaissement. Cette approche ne prend en compte que les mouvements continus. La cuvette d'affaissement obtenu par le modèle physique réduit est également comparée avec l'approche de Peck (figure 5). Les profils d'affaissement ( $S_v$ ) et de déplacement horizontal ( $S_h$ ) de Peck (1969) dans le sens transversal peuvent s'écrire comme les suivants :

$$S_v(x) = A_{\max} \times e^{-\frac{x^2}{2i^2}} ; \quad S_h(x) = -\frac{x}{H} S_v(x) \quad [1] \text{ et } [2]$$

avec  $x$  la position par rapport à l'axe de cavité,  $H$  la profondeur de la cavité (ici  $H = 300\text{mm}$ ), et  $i$  la distance au point d'inflexion. La valeur de cette dernière sera déterminée à partir d'équation analytique d'Atkinson & Potts (1977), utilisée dans le cas de sable dense et s'écrit :

$$i = 0,25 (1,5H + D) \quad [3]$$

où  $D$  est le diamètre du tunnel. Caudron et al. (2004) ont montré qu'il est possible d'utiliser la relation (3) en supposant une cavité équivalente circulaire de diamètre  $D_{eq}$ , de même centre de gravité et de même surface, même si la cavité est rectangulaire (pour un élancement inférieur à 4).  $D$  sera donc remplacé par  $D_{eq}$  dans la détermination des valeurs de  $i$ .

## 4.2. Essais en présence de la structure

Le déplacement du sol peut être exprimé en suivant un axe R (figure 4) selon la direction radiale en considérant que la cuvette est circulaire. Cet axe passe par les centres de la cuvette et du vérin. La position 3 est centrée dans l'axe du vérin, toutes les directions sont identiquement concernées par les mouvements ; l'axe R est donc choisi arbitrairement selon la verticale sur la figure 4.

### 4.2.1. Effet de la position de la structure vis-à-vis de déplacements du sol

Les mouvements du sol sans et avec la structure pour les trois positions sont présentés dans la figure 5. Seul un essai en présence de la structure pour chaque position parmi les quatre essais identiques est présenté, les autres essais donnant un résultat très similaire. De plus, la figure 5 montre les déplacements suivant la direction la plus influencée par la présence de la structure (différente pour chaque position étudiée). Plusieurs observations peuvent être faites :

La présence de la structure modifie la forme de la cuvette, particulièrement quand la structure se situe en zone de pente maximale (position 1).

L'affaissement maximal est légèrement plus faible lorsque la structure est centrée sur la cavité. La structure semble à atténuer les mouvements du sol de surface vers le centre de la cavité, et aussi agrandit la taille de la cuvette.

Le déplacement horizontal est réduit par la présence de la structure en position 2 et 3. Il apparaît illogique que le déplacement horizontal du sol pour la position 1 soit plus important que celui en terrain vierge. Cela peut être expliqué, d'une part, par la mise en pente de la structure (position 1) permettant un glissement supplémentaire ; d'autre part par le frottement de l'interface sol/structure (sable/polycarbonate) qui est très faible car la structure n'est pas encastrée dans le sol. Enfin, le sol peut se déplacer lorsqu'on retire la maquette pour observer la cuvette d'affaissement.

La pente semble la plus importante dans la position 1.

De manière générale, l'influence de la position de la structure est clairement manifestée et dépend largement de son emplacement (dans la zone de compression ou de traction). La structure semble réduire les amplitudes. Cette conclusion rejoint les observations faites par plusieurs auteurs vis-à-vis de l'interaction sol/structure (Caudron et al. 2008 ; Standing 2008 ; Potts & Addenbrooke 1997 ; Burland 1995).

### 4.2.2. Effet de la position de la structure vis-à-vis de ses déplacements

Le tableau 3 présente pour chacune des 3 positions de la structure les valeurs moyennes (pour les 4 essais) des déplacements verticaux et horizontaux, des déformations et la pente de la structure, en comparant avec ceux de terrain vierge et en respectant les mêmes directions que le mouvement de sol présenté précédemment.

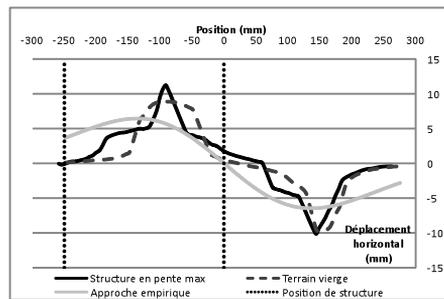
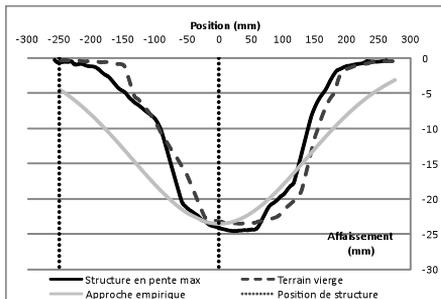
La maquette de structure pour les trois positions se déplace avec un champ de déplacement globalement constant, à la manière d'un corps rigide.

La structure en zone de pente maximale se déplace horizontalement et se met en pente plus élevée d'environ 1 à 2% (en valeur absolue) que les deux autres positions. La structure en zone de compression s'affaisse le plus mais subit une mise en pente inférieure : 4,9%. Ces différentes observations sont conformes à ce qui pouvait être physiquement attendu de chaque position.

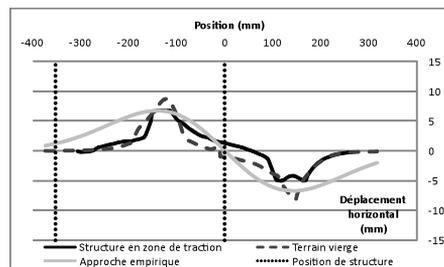
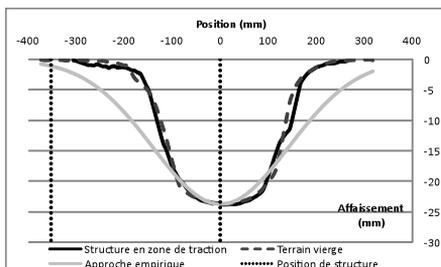
**Tableau 3.** Sollicitations de la structure pour les 3 positions et le terrain vierge

Sollicitations	Terrain vierge	Structure (position 1)	Structure (position 2)	Structure (position 3)
$S_{h,max}$ (mm)	9,6	5,8	1,9	3,9
$\epsilon_{h,max}$ (%)	10,5	0,04	0,08	-0,02
$A_m$ (mm)	23,8	17	9,8	18,6
$\alpha_{max}$ (%)	10,4	7,1	6,4	4,9

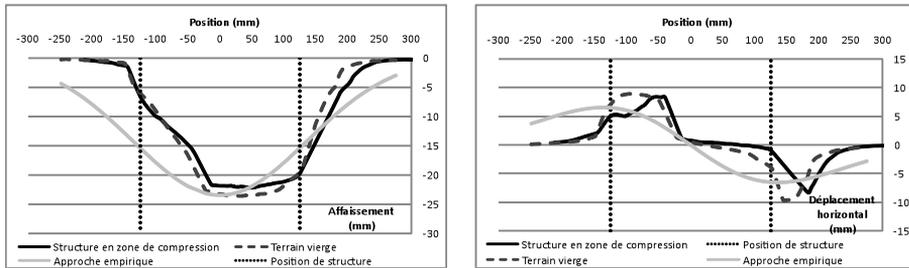
Les déplacements de la structure en position 2 sont les plus faibles car la surface de la maquette concernée par la cuvette est réduite. Sa déformation horizontale, cependant, est la plus importante. Suivant la direction R, la structure se soulève de la partie arrière et perd son appui en partie avant, la déformation se développe fortement pour la zone restant en contact au sol. Une rotation de 4° peut être également observée dans cette configuration.



*Déplacements vertical et horizontal du terrain - Position 1 (pente maximale)*



*Déplacements vertical et horizontal du terrain - Position 2 (zone de traction)*



*Déplacements vertical et horizontal du terrain - Position 3 (zone de compression)*

**Figure 5.** *Comparaison des mouvements de terrains de différentes positions (coupes selon l'axe R tracé pour chaque position en figure 4)*

La structure ne subit qu'une partie très faible de la déformation horizontale de moins de 0,1%. Les structures se situant en zone de traction et en pente maximale subissent la déformation de traction tandis que la structure en zone de compression subit la déformation de compression.

Quelque soit la position de la structure, sa mise en pente correspond à des valeurs inférieures à celles du sol en condition de terrain vierge.

#### 4. Conclusions

L'évaluation de l'impact de mouvements de terrains sur les structures nécessite de prendre en compte la structure elle-même. La modélisation physique réduite employée a permis de mettre en évidence l'importance de ce concept. L'influence de la structure se traduit par la modification de la forme et des caractéristiques de la cuvette d'affaissement. La structure réduit clairement les déplacements de sol et donc tempère les dommages résultants. L'impact de l'affaissement sur la structure dépend également de sa position par rapport à la cuvette d'affaissement. La participation des différents modes de sollicitation (déformation horizontale, mise ou pente ou courbure) varie en effet selon la position de la structure. Ces premiers résultats ne répondent pas à toutes les questions, il serait intéressant de développer cette étude en utilisant différents types de structures (taille, rigidité), ainsi que d'autres géométries pour la cuvette d'affaissement.

#### 5. Références

- [ATK 77] ATKINSON J.H., POTTS,D.M., (1977) Subsidence above shallow tunnels in soft ground, Jnl. Geot. Eng. Div., ASCE, vol: GT4, 307 - 325
- [BUR 95] BURLAND J.B. (1995) Assessment of risk of damage to buildings due to tunneling and excavations. Invited special lecture, in: Proc. 1<sup>st</sup> Int. Conf. Earthquake Geotechnical Engineering. IS-Tokyo. 1189-1201
- [CAU 08] CAUDRON M., EMERIAULT, F., AL HEIB M. (2008) Collapses of Underground Cavities and Soil-Structure Interactions: Influences of the Position of the Structure Relative to the Cavity. Proc. 12<sup>th</sup> Int. Conf. of IACMAG, India, 2008, 1300-1307

- [CAU 04] CAUDRON M., MATHIEU P., EMERIAULT F., AL HEIB M. (2004) Effondrement de cavités souterraines et interaction avec les ouvrage en surface. JNGG 2004, 435-442.
- [DEC 02] DECK O. (2002) Etude des conséquences des affaissements miniers sur le bâti. Proposition pour une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité du bâti. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine INPL.
- [PEC 69] PECK R. B. (1969) Deep excavation and tunneling in soft ground. Proc. 4th Int. Conf. of Soil Mechanics, Mexico, State-of-art, 225-290
- [POT 97] POTTS D.M., ADDENBROOKE, T.I., (1997) A structure's influence on tunneling induced ground movements. Proc. Inst. Civ. Eng. Geotech. Eng. 125 (2). 109-125
- [STA 08] STANDING J. (2008) Impact of underground works on existing infrastructure. Post-Mining'08, Nancy (France). Invited Lecture