

INTERACTION EXCAVATION PROFONDE-STRUCTURE : ASPECTS NUMERIQUES DANS LES CAS BI- ET TRI-DIMENSIONNELS

DEEP EXCAVATION STRUCTURE INTERACTION : NUMERICAL APPROACH IN BOTH TWO AND THREE DIMENSIONAL CASES

Fadi HAGE CHEHADE¹, Walid CHEHADE¹, Hussein MROUEH², Isam SHAHROUR²
1 Université Libanaise, Centre de modélisation – PRASE – EDST – Beyrouth, IUT (Saïda) – Liban
2 LGCGE, Université de Lille 1-Sciences et Technologies, France

RÉSUMÉ – Le développement en zones urbaines nécessite généralement la réalisation d'excavations profondes à proximité de structures existants en surface. Ce problème constitue un cas complexe d'interaction géomatériaux-structure. Dans ce papier, on présente une étude numérique de cette interaction et on effectue une comparaison entre les résultats obtenus dans les cas 2D et 3D.

ABSTRACT – The development in urban areas typically requires the necessity of deep excavations near existing structures on the surface. This problem represents a complex study of soil-structure interaction. In this paper, we present a numerical study of this interaction and we perform a comparison between the numerical results obtained in both two and three dimensional cases.

1. Introduction

Le développement en zones urbaines conduit généralement à la réalisation de nouvelles constructions comportant plusieurs sous sols. Ainsi, leur réalisation nécessite des excavations profondes. Pour des raisons d'encombrement ces excavations se trouvent à proximité des ouvrages et structures en service en surface. L'intégrité et la stabilité de ces ouvrages est un enjeu primordial pendant les différentes phases des travaux de nouvelles constructions (excavation, construction...)

Il s'agit d'un problème complexe de géotechnique urbaine avec une forte interaction sol-structure. Toute étude de ce problème doit intégrer correctement plusieurs aspects tels que le comportement non linéaire des géomatériaux, la présence de sols médiocres dans les couches superficielles de terrain, de nombreuses interactions (soutènements, sols, structures), les séquences des travaux, les conditions de contact sol-structure, l'aspect tridimensionnel...

L'intérêt accordé aux effets d'excavation en zones urbaines a suscité de nombreux travaux de recherche incluant des mesures sur des cas réels, des expérimentations spécifiques et de la modélisation numérique. Par ailleurs, des observations ont permis de déterminer les profils de déplacement de la paroi et du déplacement du sol en surface pour des différents types de sol [Peck (1969), Clough and O'Rourke (1990), Ou et al (1993), Moorman (2004)]. Les méthodes numériques telles que la méthode des éléments finis sont utilisées pour caractériser le mouvement du sol, de la paroi et de comparer les résultats obtenus avec des mesures expérimentales [Mestat et Arafati (1998) Addenbrooke et al. (2000), Marcu

et Popa (2004), Bourgeois et al. (2004)]. Peu de travaux numériques dans la littérature ont tenté d'aborder le problème global d'interaction excavation – ouvrages avoisinants.

Dans l'espace bidimensionnel, l'étude de l'effet d'excavation sur les fondations superficielles [Hage Chehade et al. (2005)] ainsi que l'influence d'une excavation sur le comportement d'une structure ont été réalisées dans des travaux antérieurs [Hage Chehade et al. (2008)]. Dans ce papier, nous effectuons une comparaison entre des résultats donnés respectivement par des modélisations bidimensionnelle et tridimensionnelle de ce problème. On montre l'effet d'une excavation sur la structure en surface pour différentes positions de la structure par rapport à l'excavation, ainsi que l'effet de la rigidité des soutènements provisoires. Malheureusement, faute de mesures expérimentales obtenues sur des cas réels, on se contente dans ce papier de se limiter à une modélisation numérique par une approche globale de l'étude de l'interaction excavation-soutènement-sol-structure. Généralement une modélisation tridimensionnelle demande des moyens informatiques importants et nécessite un temps de calcul important. On cherche à fournir les conditions dans lesquelles une modélisation bidimensionnelle fournit les résultats recherchés avec une précision acceptable ce qui permet d'éviter de faire des études tridimensionnelles.

2. Analyse de l'interaction excavation-sol-structure

2.1. Hypothèses retenues

Le modèle retenu concerne une excavation soutenue d'une hauteur (H) égale à 10 m, de largeur (B) égale à 20 m à proximité d'une structure de type portique (figure 1). Le modèle adopté est composé de deux couches de sol, incluant dans la partie supérieure une couche de sol de qualité médiocre (de hauteur égale à 12 m), puis une couche de sol plus raide dans la partie inférieure. Le comportement mécanique des sols est décrit par le modèle élastique parfaitement plastique de Mohr-Coulomb. Le module de Young de la couche superficielle du terrain (de 0 à 12 m de profondeur) est supposé varier linéairement avec la profondeur. Les caractéristiques mécaniques sont données dans le tableau I.

La paroi a une longueur $L_p = 15$ m (figure 1) avec un ancrage de 3m dans la couche de sol rigide. Elle est modélisée par des éléments poutres ayant une rigidité axiale $EA = 1,7 \cdot 10^7$ kN et une rigidité à la flexion $EI = 3,542 \cdot 10^5$ kN m².

Une rangée de 3 butons est disposée le long des parois pour assurer le maintien latéral et limiter les déformations. Les butons sont disposés (tous les trois mètres) selon la profondeur et la hauteur de l'excavation, la première rangée de butons étant située à un mètre en dessous la surface libre. La rigidité de référence (EA) des butons est égale à $2 \cdot 10^6$ kN.

La structure considérée est représentée par un portique de 5m de largeur et 4m de hauteur ayant des fondations superficielles de 2 m de largeur. Le portique est soumis à une force uniformément répartie sur la travée d'une valeur égale à 14,5 kN/m. Cela revient à considérer une pression de contact sur le sol de l'ordre de 50 kPa/m transmis par chaque fondation du système.

Des analyses par éléments finis ont montré une forte influence de la profondeur totale du domaine sur les mouvements de terrain du fond de fouille (Bourgeois et al 2004). Ainsi pour limiter cet impact, La hauteur du domaine est fixée à 25 m et sa largeur est égale à 120 m. Dans la modélisation tridimensionnelle, nous adoptons

une profondeur du modèle équivalent à 5 fois l'espacement entre les butons selon la profondeur (suivant la direction z : direction perpendiculaire au plan de la figure 1).

Tableau I. Paramètres mécaniques des sols

Sol	E (MPa)	ν	φ (°)	Ψ (°)	c (kN/m ²)	γ (kN/m ³)
Sol compressible	De 9 à 20	0,333	25	0	0,01	20
Sol rigide	72	0,35	36	0	25	20

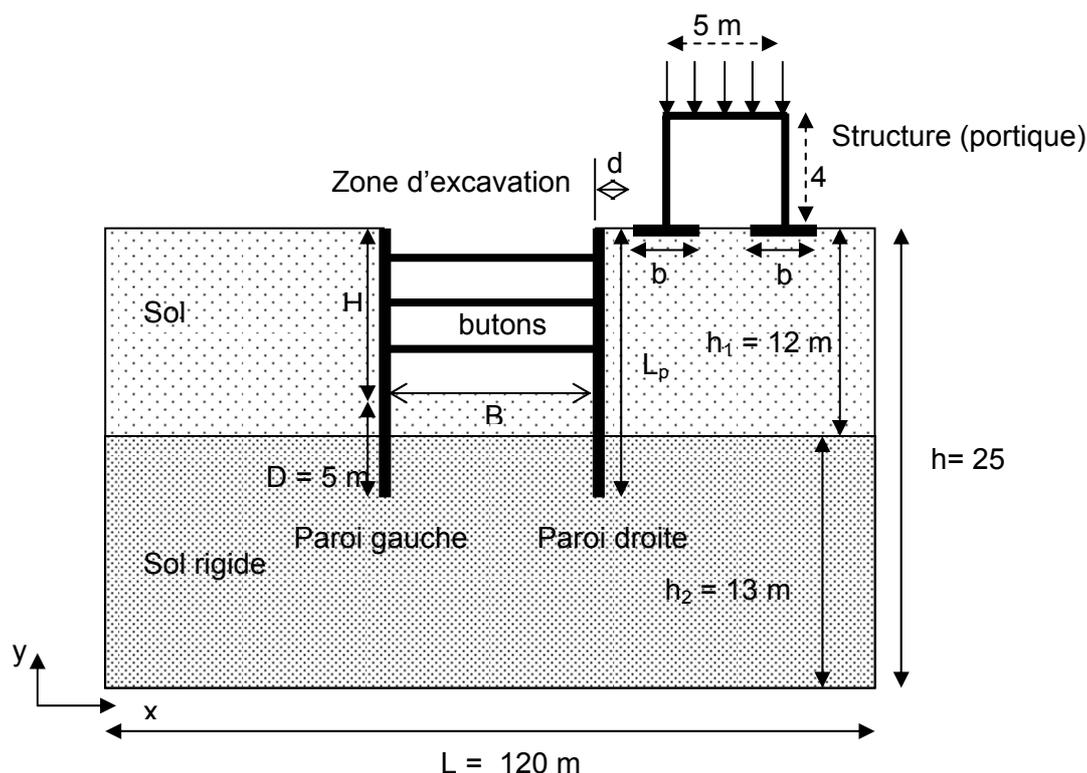


Figure 1. Modèle retenu pour l'étude de l'interaction excavation-structure.

2.2. Modèle numérique

La modélisation numérique est effectuée en conditions bidimensionnelles de déformations planes en utilisant le logiciel PLAXIS et dans le cas tridimensionnel avec le module PLAXIS3DT [Vermeer and Brinkgreve, (1998)]. Le maillage retenu comporte 1000 éléments triangulaires à 6 nœuds dans le cas bidimensionnel et environ 7000 éléments dans le cas tridimensionnel (figure 2.). Des éléments d'interface le long de la surface de contact sol-paroi de soutènement sont considérés. Leur comportement est régi par le critère de Mohr-Coulomb avec des paramètres fournis en tableau 2.

Le déroulement du calcul se fait suivant les étapes suivantes :

- (i) Application de la force uniformément répartie sur la structure (préchargement du terrain) avant excavation dans le cas où elle existe,

- (ii) Mise en place des parois de soutènement par activation des éléments de poutres, (La perturbation de l'état des contraintes initiales dans le terrain par la mise en place des parois n'est pas prise en compte dans ce travail),
- (iii) Phases d'excavation par suppressions successives des couches de sol d'un mètre d'épaisseur, et activation des butons le cas échéant.

Tableau I. Paramètres de l'interface paroi-sol

interface	φ (°)	Ψ (°)	c (kN/m ²)
Paroi-sol compressible	12	0	0
Paroi-sol rigide	20	0	12

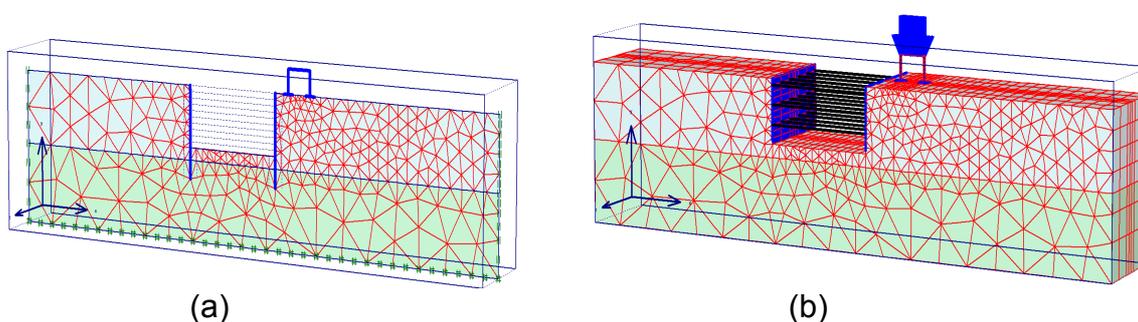


Figure 2. Maillages retenus : (a) maillage bidimensionnel et (b) maillage tridimensionnel

2.3. Comparaison entre la modélisation bidimensionnelle et tridimensionnelle de l'interaction excavation-structure

2.3.1 Etude en champ libre (sans structure en surface)

Cette étude porte sur l'étude de l'effet de l'excavation sur le sol environnant en champ libre (sans structure en surface). On cherche à caractériser le mouvement du sol en surface et celui de la paroi. En plus, on a testé la sensibilité des résultats dans le cas tridimensionnel par rapport à l'étendue du domaine suivant z et par rapport à la taille du maillage (fin ou grossier). Les résultats obtenus sont montrés sur les figures 3.a et 3.b. La cuvette du déplacement horizontal est qualitativement similaire à celle publiée dans la littérature [Moorman, (2004)]. Le tassement en surface (figure 3-a) est affecté par l'excavation sur une distance égale à une demi-largeur d'excavation derrière la paroi de soutènement. Au-delà de cette distance, on note une forte atténuation des tassements induits. On note également une forte influence de la dimension du domaine suivant z. Avec l'augmentation de cette dimension, les résultats tendent à s'approcher vers ceux donnés par le calcul en 2D. L'effet de la taille du maillage sur les résultats obtenus est négligeable. On note un écart assez important sur la valeur du tassement maximal entre les calculs 2D et 3D : il passe de 50% à 32% lorsque la taille du domaine suivant z augmente de 3.5m à 24m. Le déplacement horizontal maximal de la paroi se situe en profondeur a cause de l'activation des butons. L'écart entre les calculs 2D et 3D sur le déplacement horizontal maximal passe de 13% à 5% lorsque la taille du domaine suivant z augmente de 3.5m à 24m.

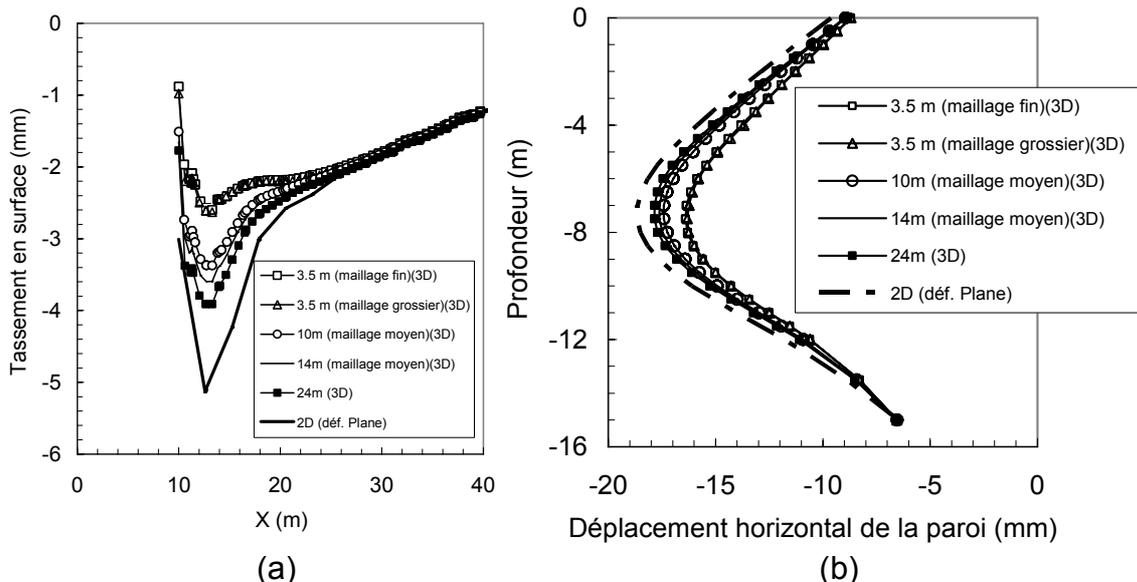


Figure 3. Allures du tassement en surface (a) et du déplacement horizontal de la paroi en fin d'excavation.

2.3.2. Effet de la position de la structure par rapport aux bords du domaine

On a étudié la sensibilité des résultats tridimensionnels par rapport à la position de la structure par rapport aux bords du domaine suivant z. Trois configurations ont été traitées dans lesquelles la structure est située directement au bord, à 1 m du bord et au milieu du domaine (suivant la direction z). Les figures 4-a et 4-b montre que le tassement induit de la fondation amont rapportée à la largeur de la fondation et le tassement différentiel entre les deux fondations sont peu influencés par la position de la structure vis-à-vis des bords du domaine. D'autre part l'écart entre les calculs 2D et 3D est très important et il s'accroît avec l'excavation : pour les tassements (vertical et différentiel), il passe de 20% au début de l'excavation à environ 50% en fin d'excavation. D'autre part on peut constater que le maximum du tassement différentiel n'est pas à la fin de l'excavation (après 6 m d'excavation).

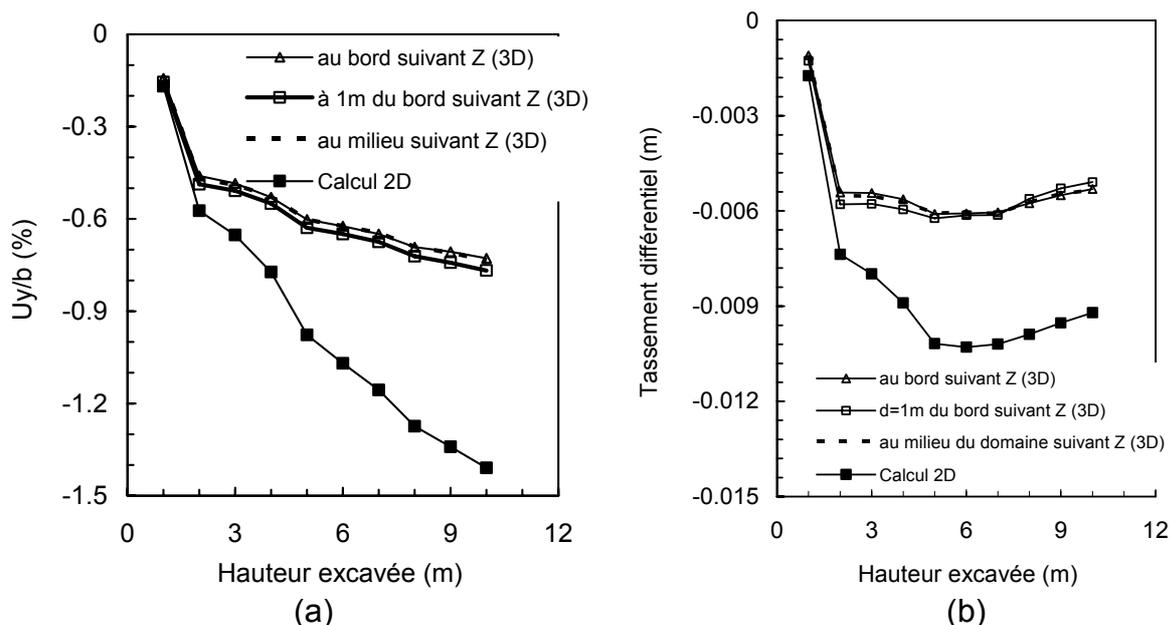


Figure 4. Evolution au cours de l'excavation du tassement vertical de la fondation amont (a) et du tassement différentiel entre les deux fondations de la structure (b).

La variation du moment maximal en travée de la structure au cours de l'excavation est illustrée en figure 5. Les résultats de la modélisation tridimensionnelle pour les différentes positions de la structure par rapport aux bords du domaine montrent un écart de 30 % entre une structure au bord et une structure à 1 m du bord. D'autre part on peut noter un écart de 50% entre les calculs 2D et 3D.

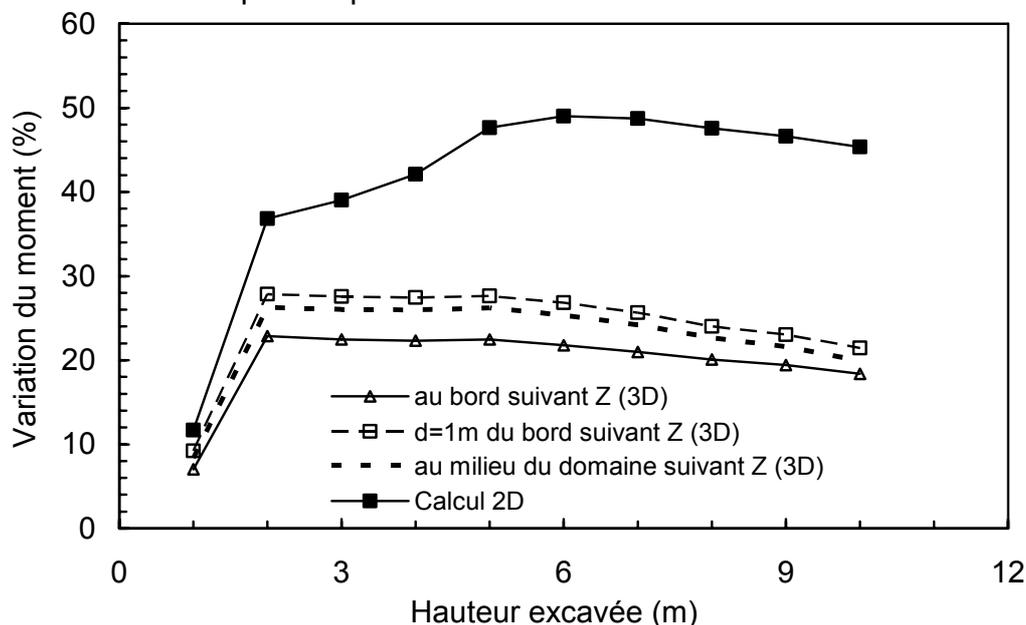


Figure 5. Variation du moment dans la structure induit par l'excavation.

2.3.2. Effet de la position de la structure par rapport aux bords du domaine

L'effet de l'éloignement de la structure à l'excavation a été étudié en prenant trois positions de la structure où la distance d séparant le bord de la fondation amont de l'excavation était respectivement de 1m, 2m et 6m. La comparaison entre les deux modélisations a porté sur le tassement U_y , rapporté à la largeur de la fondation, sous le centre de la fondation amont (la plus proche de l'excavation), le tassement différentiel entre les deux fondations et la variation induit par l'excavation du moment maximal en travée. On peut remarquer que la modélisation bidimensionnelle prévoit des tassements (fondation amont et différentiel) presque le double de la modélisation tridimensionnelle et ceci pour les différentes positions considérées pour la structure. Au niveau de la variation du moment maximal dans la structure induit par l'excavation, on a les mêmes constatations citées sur le tassement différentiel. L'approche bidimensionnelle donne une variation du moment dans la structure induit par l'excavation plus que le double de celle obtenue par l'approche tridimensionnelle (figure 8.).

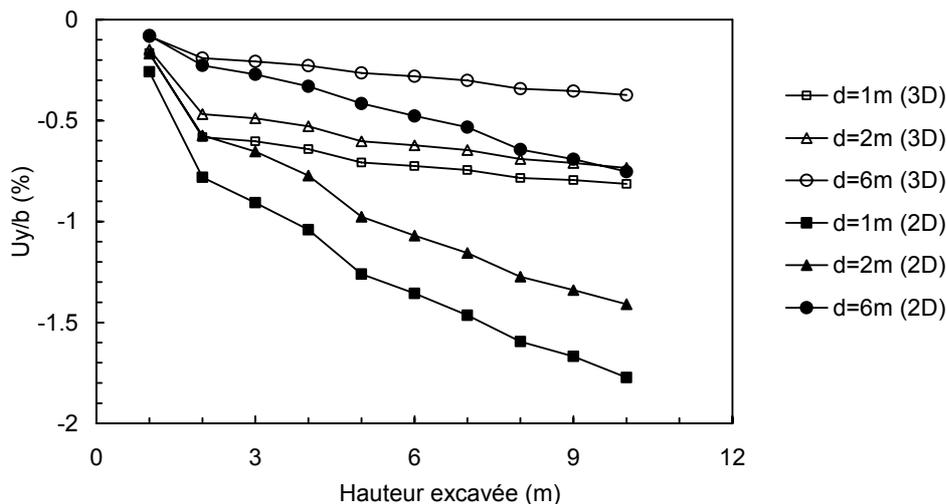


Figure 6. Tassement au centre de la fondation amont rapporté à la largeur de la fondation pour différentes positions de la structure.

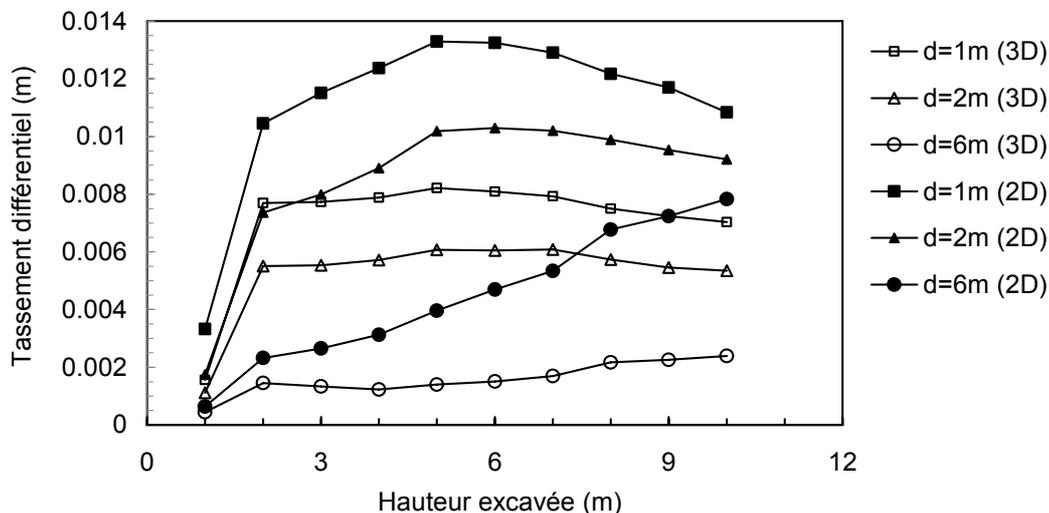


Figure 7. Tassement différentiel entre les 2 fondations pour différentes positions de la structure.

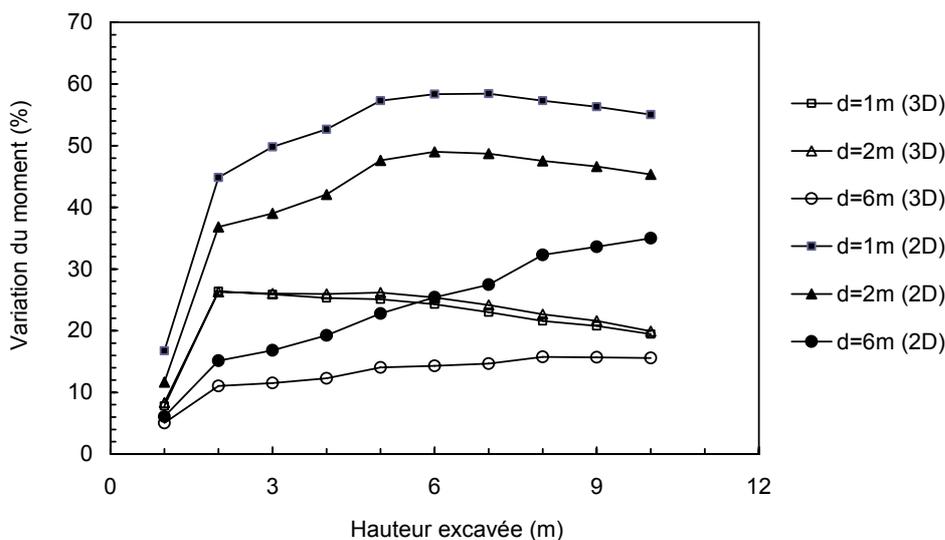


Figure 8. Variation du moment dans la structure induit par l'excavation différentes positions de la structure.

3. Conclusions

Dans ce papier on a présenté une modélisation numérique de l'interaction excavation-paroi de soutènement-sol-structure par une approche globale. Faute de mesures expérimentales obtenues sur des ouvrages réels instrumentés, on a présentée une comparaison entre les résultats obtenus dans les cas bi- et tridimensionnel. Comme un calcul 3D demande des moyens informatiques performants et nécessite un temps très important surtout dans le cas où le comportement du sol est non-linéaire, on a tenté de trouver dans quelles conditions une modélisation bidimensionnelle donnera des résultats satisfaisants. L'interaction en champ libre a été réalisée dans un premier temps. La forme de la cuvette du tassement en surface est en accord qualitatif avec celle donnée dans la littérature. En suite l'étude a été effectuée en présence d'une structure en surface. On a fait varier successivement dans le cas tridimensionnel la position de la structure par rapport aux bords du domaine et par rapport à l'excavation. L'écart obtenu (tassement des fondations et variation du moment maximal en travée dans la structure) entre les résultats de la modélisation bidimensionnelle et celle de la modélisation tridimensionnelle est très important et peut atteindre 100%. D'où la nécessité de faire un calcul tridimensionnel de ce problème surtout dans le cas où les structures en surface reposent sur des fondations isolées.

4. Références bibliographiques

- Addenbrooke T.I., Potts D.M., Dabee B. (2000) Displacement flexibility for multipropped retaining wall design. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126 (8), 718-726.
- Bourgeois E., Mestat Ph., Nguyen P.D., Marten S., Delattre L. (2004) Retours d'expérience sur la modélisation numérique des parois moulées par éléments finis. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur*, Lille.
- Clough G.W., O'Rourke T.D. (1990) Construction-induced movements of in situ walls. *Proceeding, Design and Performance of Earth Retainings Structure*, ASCE Special Conference, Ithaca, New York, 439-470.
- Marcu A., Popa H. (2004) La surveillance du comportement d'une structure de soutènement et des bâtiments avoisinants dans la ville de Bucarest. *Int. Conf. on Geotechnical Design*, Beyrouth, 141-146.
- Hage Chehade F., Barake M., Chehade W., Mroueh H., Shahrour I. (2005) Etude numérique de l'interaction excavation – fondations superficielles. *Symposium International sur les Géotechniques dans les Villes*, Lille Villeneuve d'Ascq, France.
- Hage Chehade F., Chehade W., Mroueh H., Shahrour I. (2008) Réponse d'une structure en surface adjacente à une excavation profonde : approche numérique. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur (JNGG'08)*, Nantes, 18-20 juin 2008, France.
- Moorman C. (2004) Analysis of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on a new world wide database. *Soils and Foundations*, Japanese Geotechnical Society, 44(1), 87-98, February 2004,)
- Ou C.-Y., Liao J.-T., Cheng W. L. (1993) Building response and ground movements induced by a deep excavation. *Geotechnique* 50(3), 209-220.
- Vermeer P.A., Brinkgreve R.B.J. (1998) PLAXIS Finite element code for soil and rock analyses. version 7, Rotterdam : Balkema.