ANALYSE NUMERIQUE DE LA MISE EN PLACE D'UNE PAROI MOULEE

NUMERICAL ANALYSIS DIAPHRAGM WALL INSTALLATION

Sébastien BURLON[1] et Hussein MROUEH[2]
1 Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Lille, 59482 Haubourdin, France
2 Laboratoire de Mécanique de Lille, UMR 8107, USTL, 59655 VILLENEUVE D'ASCQ, France

RÉSUMÉ – Cette communication présente l'influence du processus de mise en place de la paroi moulée sur les mouvements de sols calculés lors d'une excavation. Les différentes méthodes de modélisation sont tout d'abord présentées (méthodes WIP et WIM). Ensuite quelques résultats en deux puis en trois dimensions sont analysés pour différentes valeurs du coefficient de pression des terres au repos K_0 et différents nombres et longueurs de panneaux.

ABSTRACT – This paper deals with the influence of the diaphragm wall installation on the soil movements during the excavation. Several numerical methods are presented (methods WIP and WIM). After, some results with two then three dimensions calculations are analysed for differents values of the earth pressure coefficient at rest and several numbers and lengths of panels.

1. Introduction

Le coefficient de pression des terres au repos K_0 est un paramètre essentiel de la modélisation numérique des excavations puisqu'il intervient dans la définition des forces de déconfinement qui sont appliquées sur les bords libres de la fouille. En général, il est estimé à partir de la formule de Jaky : $K_0=1-\sin\varphi$ avec φ l'angle de frottement du sol en place. Son estimation à partir de mesures in situ est possible mais relativement complexe d'autant plus que la valeur obtenue peut être modifiée par la construction de l'ouvrage géotechnique étudié. C'est le cas pour les parois moulées où la réalisation de l'écran nécessite d'excaver le terrain sous boue bentonitique afin de pouvoir couler le béton constituant la paroi. Cette phase de mise en place bien que généralement négligée dans les calculs perturbe le terrain et modifie a priori l'état de contraintes du sol en place. Actuellement, la puissance des ordinateurs permet de modéliser ce processus de réalisation (Gourvennec et Powrie, 1999, Ng et Yan, 1999, Frih, 2005, Schäfer et Triantafyllidis, 2006). Ce type de calcul revient en fait à modifier l'état de contrainte autour du soutènement et à définir une nouvelle contrainte horizontale qui va influer sur la cinématique de l'excavation.

Cette communication propose d'analyser l'influence de cette modification de l'état de contraintes sur les mouvements du sol induits par l'excavation qui suit la réalisation de l'écran. Au préalable sont présentés différents types de modélisation : celles de type WIP (« Wished In Place ») où la réalisation de l'écran n'est pas prise en compte et à l'inverse celles de type WIM (« Wall Installation Modelled ») où le processus de réalisation de l'écran est modélisé.

2. Principes de modélisation WIP et WIM

2.1. Modélisations de type WIP

Les modélisations de type WIP sont relativement classiques. Elles consistent à réaliser l'état initial des contraintes en présence du soutènement et donc à négliger l'influence de la mise en place de celui-ci sur le champ de contraintes proche de l'écran. Selon les logiciels de calcul, cela se traduit :

- Par la définition directe d'un état initial des contraintes en fonction de la masse volumique des différents matériaux dont celle du soutènement, de la position d'une éventuelle nappe hydrostatique et du coefficient de pression des terres au repos défini pour chaque matériau.
- Par une phase de génération des contraintes géostatiques en appliquant des forces volumiques en fonction de la masse volumique des différents matériaux dont celle du soutènement, de la position d'une éventuelle nappe hydrostatique et du coefficient de Poisson ν de chaque matériau.

La suite du calcul consiste à désactiver par phases les éléments massifs constituant le sol à excaver de manière à atteindre la profondeur voulue pour la fouille.

2.2. Modélisation de type WIM

Les modélisations WIM sont caractérisées par une phase supplémentaire de réalisation du soutènement. On peut décomposer ces modèles en trois phases :

- La première consiste à générer sans le soutènement l'état initial des contraintes dans le sol en place de manière directe ou appliquant des forces volumiques.
- La seconde consiste à modéliser la réalisation du soutènement.
- La troisième consiste à désactiver par phases les éléments massifs constituant le sol à excaver de manière à atteindre la profondeur voulue pour la fouille.

La seconde phase peut être décomposée en trois étapes :

- Etape n°1 : désactivation en une phase des éléments massifs situés à l'emplacement du soutènement et activation sur les bords libres de contraintes simulant l'action de la bentonite. La contrainte appliquée est définie par :

$$\sigma(z) = \gamma_b z \qquad (1)$$

Avec : γ_b=11 kN/m^3 la masse volumique de la bentonite.
Cette donnée varie suivant les auteurs mais restent généralement comprise entre 10.1 kN/m^3 (Ng et Yan, 1999) et 12 kN/m^3 (Gourvennec et Powrie, 1999). Pour cette étude, une valeur de 11 kN/m^3 est retenue.

- Etape n°2 : augmentation de la contrainte appliquée de manière à reproduire l'action du béton liquide. La contrainte appliquée est définie par une relation bilinéaire car les mesures réalisées ont montré que la pression induite par le béton liquide n'est pas hydrostatique (Lings et al., 1994, d'après Frih, 2005) :

$$\sigma(z) = \gamma_c z \quad \text{si } z<h_c \qquad (2)$$

$$\sigma(z) = \gamma_b z + (\gamma_c - \gamma_b) z \quad \text{si } z>h_c \qquad (3)$$

Avec : γ_c=23 kN/m^3 masse volumique du béton frais et h_c la hauteur critique telle qu'elle est définie dans la littérature. On considère dans la suite que la hauteur critique est égale au tiers de la hauteur du soutènement.

- Etape n°3 : Annulation des contraintes appliquées et activation d'éléments massifs modélisant le soutènement (E=20 GPa, ν=0.2, γ=25 kN/m^3). Le soutènement est donc supposé avoir un comportement purement élastique et le module d'Young choisi représente une valeur intermédiaire entre le comportement à court et à long terme du béton.

Cette procédure est mise en œuvre sur des modèles en deux dimensions ou WIM2D (figure 1) et en trois dimensions ou WIM3D (figure 2). En général, sur les modèles en trois dimensions, le nombre n des panneaux considérés varie entre 3 et 9. La longueur l des panneaux varie suivant les modélisations mais reste souvent comprise en 2 et 8 m ce qui correspond aux longueurs habituellement rencontrées sur les chantiers. Pour les panneaux situés aux extrémités gauche et droite du modèle, la longueur des panneaux est divisée par 2 pour des raisons de symétrie. La longueur du tronçon d'écran à modéliser et donc, le nombre de panneaux à considérer, leur longueur ainsi que le nombre d'éléments composant chaque panneau doivent être fixés par le modélisateur qui garde le souci d'avoir à la fois des temps et une précision de calcul relativement acceptables.

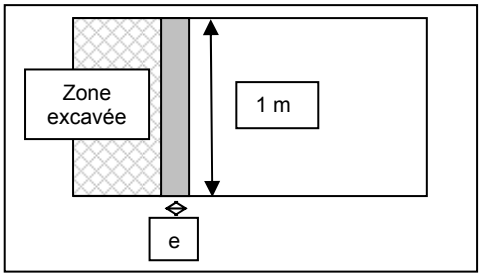

Figure 1. Modélisation WIM2D fréquemment adoptée (vue en plan).

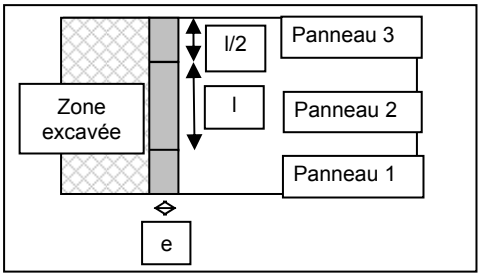

Figure 2. Modélisation WIM3D fréquemment adoptée (n=3) (vue en plan).

3. Présentation de l'exemple de référence – Premiers résultats

3.1. Présentation de l'exemple

L'étude est réalisée en deux dimensions sur un modèle dont les données géométriques et géotechniques proviennent des excavations réalisées au début des années 90 à Villeneuve d'Ascq et à Roubaix lors de la construction du métro (figure 3). L'excavation modélisée est décomposée en 6 phases (phase 1 à 6) au cours desquelles le terrain est excavé par couche de 2 m de hauteur. La profondeur totale de l'excavation est de 12 m. La paroi moulée permettant l'excavation mesure 26 m de long et 1 m d'épaisseur. Aucun buton n'est mis en place afin de simplifier l'étude. Il est nécessaire de préciser qu'un tel soutènement ne serait pas réalisé dans la pratique.

Le modèle utilisé pour le sol est de type élastique parfaitement plastique. Le module d'Young augmente linéairement avec la profondeur selon la relation définie sur la figure 3 et le critère de rupture utilisé est de type Mohr-Coulomb avec une règle d'écoulement non associée. Le soutènement est modélisé par une seule couche d'éléments massifs et est supposé avoir un comportement élastique linéaire (figure 3). Aucun élément d'interface n'a été considéré entre les éléments massifs modéli-

sant le sol en place et le soutènement. Les effets de la réalisation de l'écran sur le sol en place sont négligés. Le maillage mis en œuvre est présenté sur la figure 4. L'état initial est défini par un coefficient de pression des terres au repos K_0 égal à 1. Les calculs sont réalisés par la méthode des différences finies (Itasca, 2002).

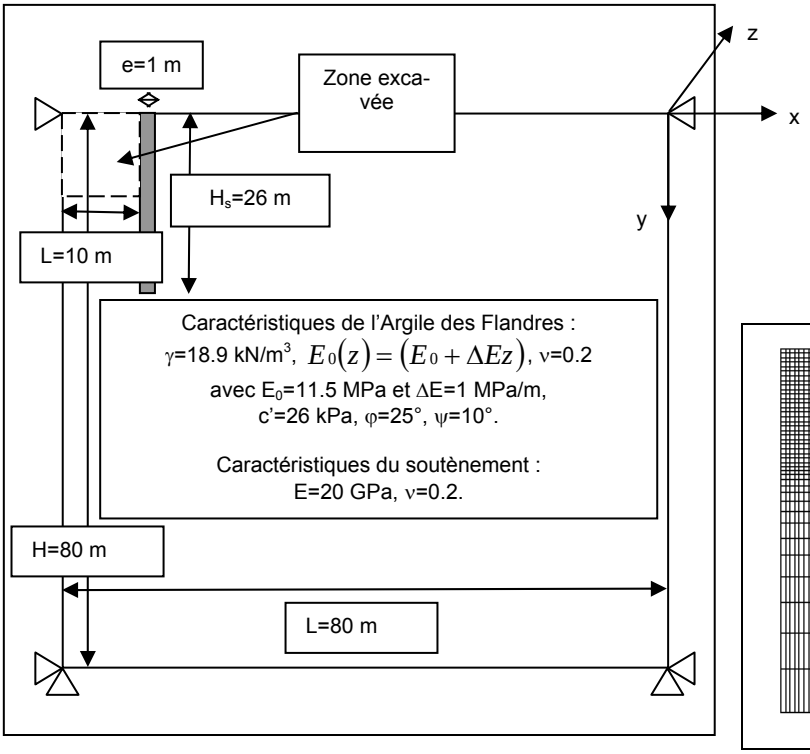

Figure 3. Données géométriques et géotechniques.

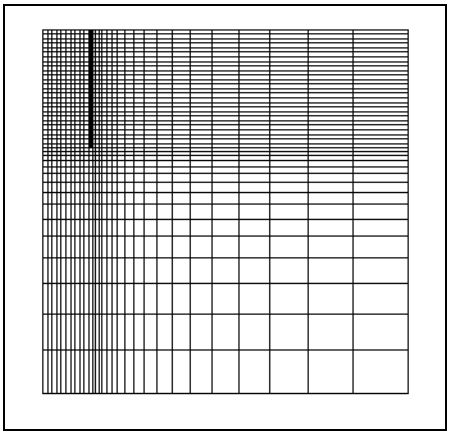

Figure 4. Maillage mis en oeuvre.

3.2. Premiers résultats en 2D

3.2.1. Comparaison entre les modèles WIP et WIM

La prise en compte du processus de réalisation de l'écran modifie l'état de contraintes notamment en arrière du soutènement ce qui influe directement sur le champ de déplacements calculés comme le montrent les figures 5 et 6. Sur ce cas particulier, le calcul de type WIM fournit une déformée de l'écran plus importante et une cuvette de tassement plus prononcée ce qui témoigne d'un plus grand développement de la plasticité.

3.2.2. Influence du coefficient de pression des terres au repos K_0

Les calculs de type WIM permettent en fait de définir un état de contraintes différent de celui obtenu à partir d'un calcul de type WIP. Il est toutefois nécessaire de vérifier avant de poursuivre l'analyse des résultats la sensibilité de la méthode WIM vis-à-vis du coefficient de pression des terres au repos K_0. La figure 7 présente le rapport entre la contrainte horizontale obtenue après la modélisation du processus de mise en place de l'écran et la contrainte verticale initiale juste en arrière de l'écran pour différentes valeurs du coefficient de pression des terres au repos. Il apparaît que le champ de contrainte horizontale est indépendant du coefficient de pression de terres au repos et dépend uniquement des masses volumiques de bentonite et de béton liquide considérées. Cette observation se traduit pour les calculs de type WIM

en deux dimensions par un champ de déplacements indépendant du coefficient de pression des terres initial. Elle montre donc les limites des calculs de type WIM en deux dimensions et oblige à tester les potentialités d'un calcul de type WIM en trois dimensions.

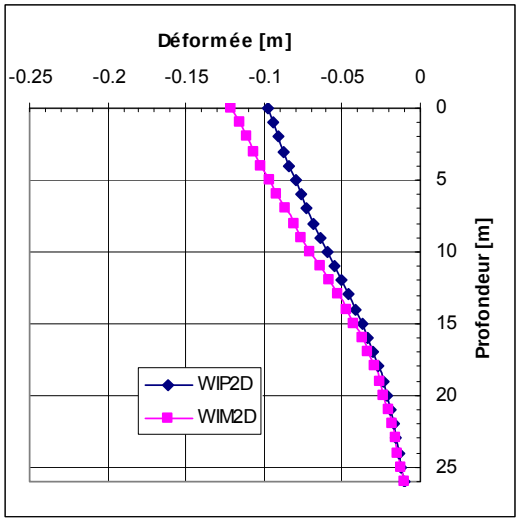

Figure 5. Comparaison des déformées entre les modèles WIP2D et WIM2D pour K_0=1.

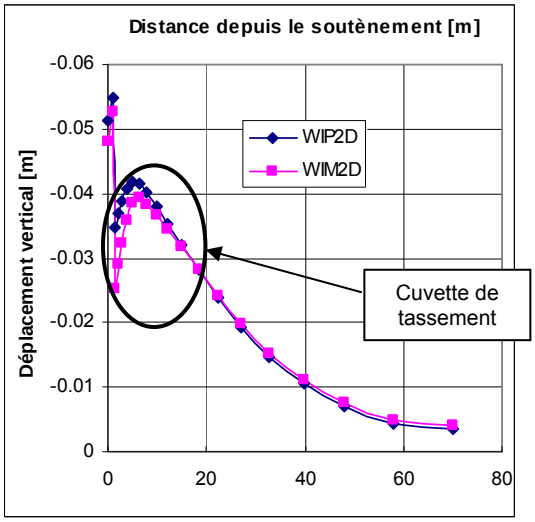

Figure 6. Comparaison des déplacements verticaux du sol entre les modèles WIP2D et WIM2D pour K_0=1.

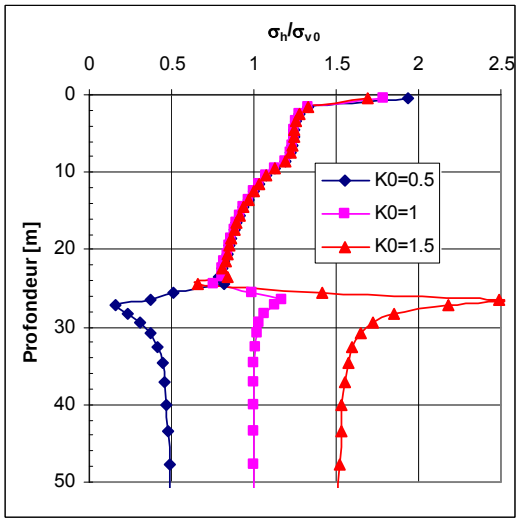

Figure 7. Comparaison des rapports σ_h/σ_{v0} à la fin de la réalisation de l'écran pour différentes valeurs du coefficient de pression des terres au repos.

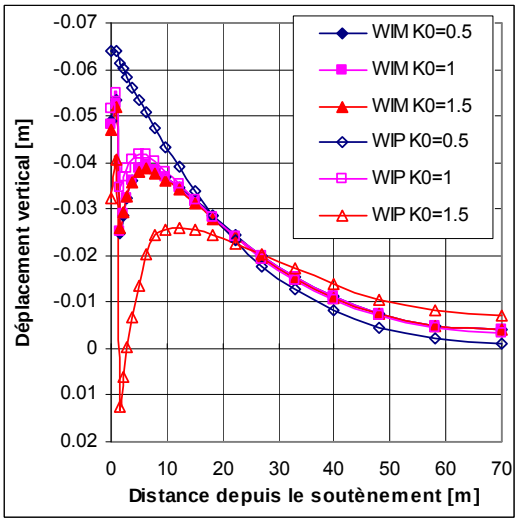

Figure 8. Comparaison des déplacements verticaux obtenues par les méthodes WIP et WIM pour différentes valeurs du coefficient de pression des terres au repos.

4. Calculs en trois dimensions

4.1. Présentation du phasage

On se propose d'examiner pour des coefficients de pression des terres au repos égal à 1 et 1.5 le cas de la réalisation de 5 panneaux de paroi moulée avec le maillage présenté sur la figure 9 et selon le phasage indiqué sur la figure 10. Seule la moitié des panneaux situés aux extrémités gauche et droite du modèle est modélisée pour des raisons de symétrie. Trois longueurs de panneaux ont été considérées : 3, 5 et 7 m.

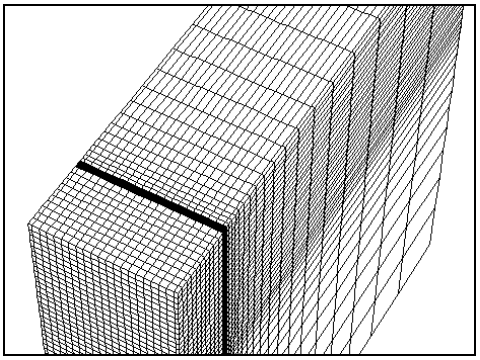

Figure 9. Maillage tridimensionnel utilisé

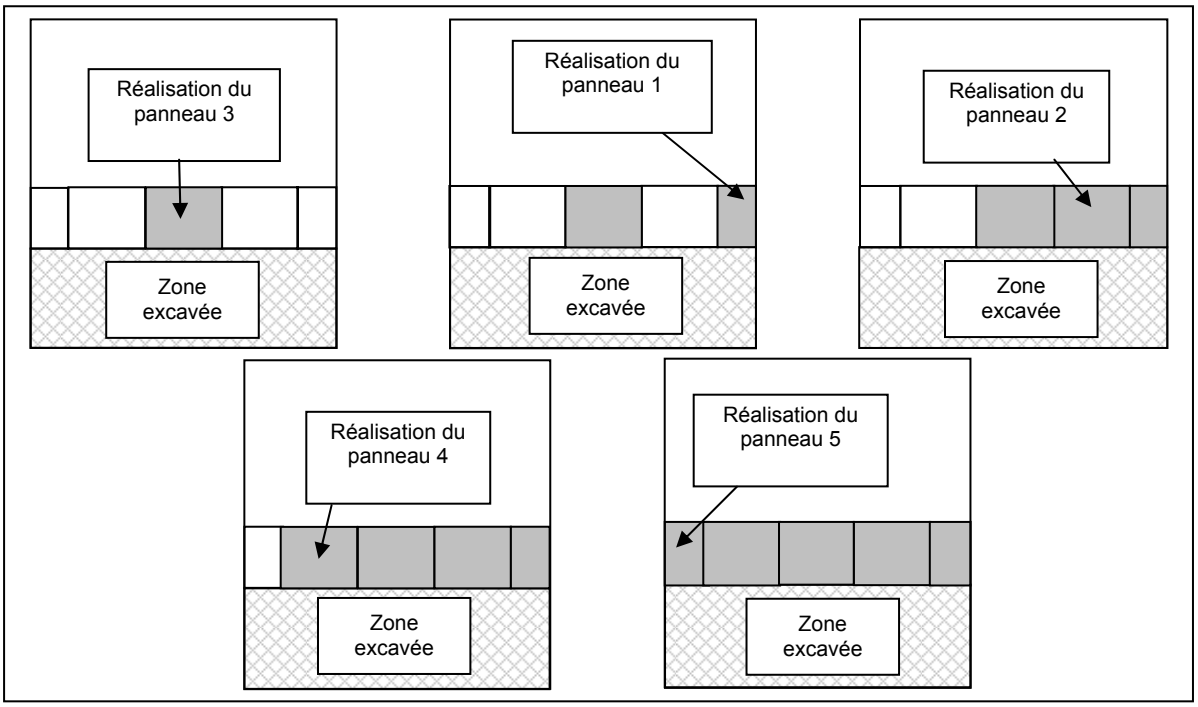

Figure 10. Ordre de réalisation des panneaux.

4.2. Résultats obtenus

Les figures 11 et 12 montrent après la réalisation de l'écran les variations du champ de contraintes horizontales à différentes profondeurs. Comme dans le cas en deux dimensions, il apparaît que la contrainte horizontale a tendance à augmenter dans la partie supérieure du soutènement et à diminuer dans la partie inférieure. L'influence des effets de voûte ainsi que de l'ordre de réalisation apparaît aussi clairement.

Les figures 13 à 16 présentent les résultats obtenus pour les deux valeurs de K_0 retenues. Pour la déformée du soutènement, il apparaît sur cet exemple que le cal-

cul tridimensionnel fournit des résultats proches de la solution d'un calcul de type WIP2D. Dans tous les cas, l'augmentation de la longueur des panneaux donnent une solution que se rapproche de celle fournie par un calcul WIM2D ce qui témoigne de la cohérence des calculs. Pour les déplacements verticaux du sol en arrière de l'écran, on note des tendances différentes : pour K_0=1, les solutions obtenues sont proches de celles fournies par un calcul de type WIM2D tandis que pour K_0=1.5 elles sont proches de celles fournies par un calcul de type WIP2D. Cet exemple montre donc d'une part l'importance du champ de contrainte horizontale dans la cinématique de l'excavation et d'autre part la complexité de l'estimation des mouvements qui comme le suggère cet exemple n'obéit pas à des règles simples.

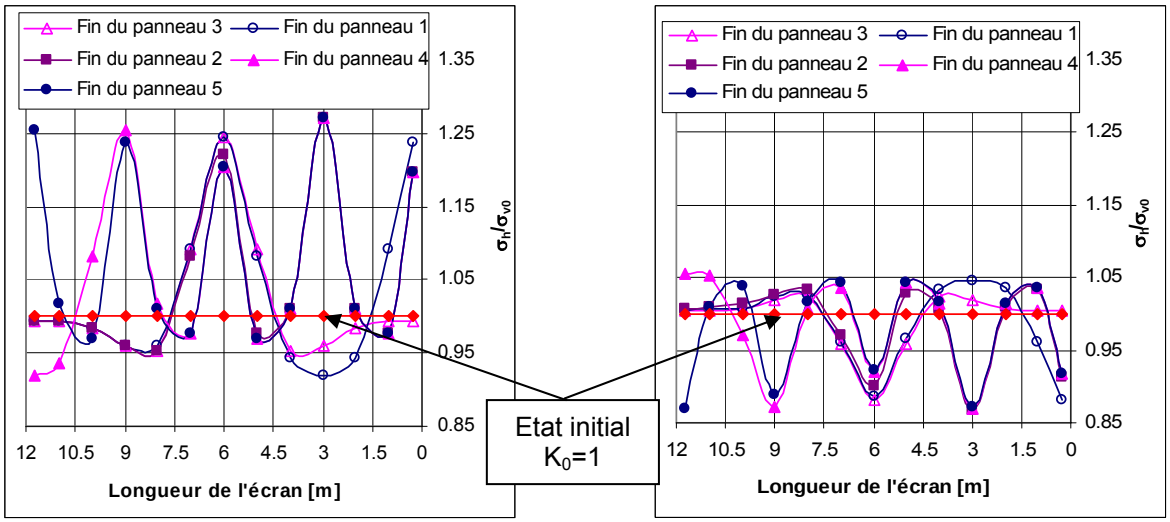

Figure 11. Variation du rapport σ_h/σ_{v0} à 6.5 m de profondeur.

Figure 12. Variation du rapport σ_h/σ_{v0} à 16.5 m de profondeur

5. Conclusions

Cette communication a traité de la comparaison entre les méthodes numériques WIP et WIM permettant de modéliser les mouvements de sol induits par des excavations. En deux dimensions, il apparaît que la méthode WIM présente certains biais puisque le champ de contraintes horizontales ne dépend que de la masse volumique de la boue bentonitique considérée. Les calculs tridimensionnels ont permis de mettre en évidence les effets de voûte qui ont lieu lors de la réalisation par phases des différents panneaux de paroi moulée et l'impact de ceux-ci sur le champ de contraintes horizontales. La poursuite des calculs à partir de ce nouvel état initial montrent que les mouvements de sol induits par l'excavation sont relativement complexes et qu'il est loin d'être simple de dégager des conclusions sur l'opportunité d'utiliser une méthode précise.

6. Références bibliographiques

Frih Bengabbou N.M. (2005) Contribution à l'étude expérimentale et numérique de l'interface sol–béton en vue de l'application aux parois moulées, Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

Gourvennec S. M. et Powrie W. (1999) Three-dimensional finite-element analysis of diaphragm wall installation, Geotechnique, 49, 801-823.
Itasca Consulting Group, Manuel d'utilisation de Flac3D, 2002.
Ng C.W.W. et Yan R.W.M. (1999) Three dimensional modelling of a diaphragm wall construction sequence, Geotechnique, 49, 825-834.
Schäfer R. et Triantafyllidis T. (2006) The influence of the construction process on the deformation behaviour of diaphragm walls in soft clayey ground, International journal for numerical methods in engineering, 28, 563-576.

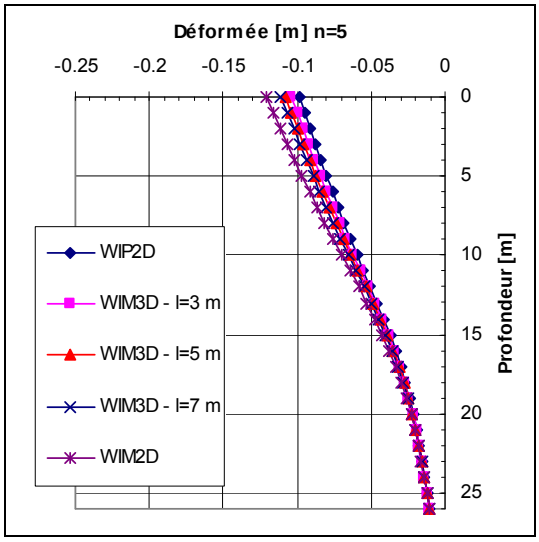

Figure 13. Comparaison des déformées pour K_0=1.

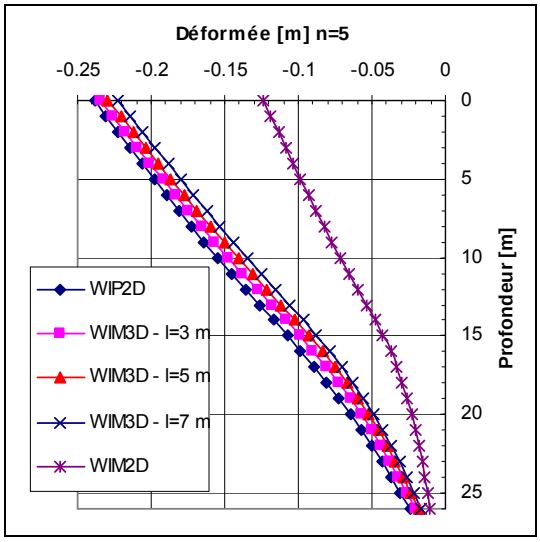

Figure 14. Comparaison des déformées pour K_0=1.5.

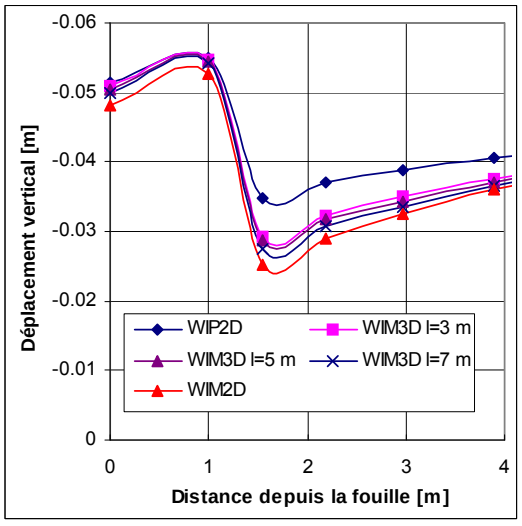

Figure 15. Comparaison des déplacements verticaux en arrière de l'écran pour K_0=1.

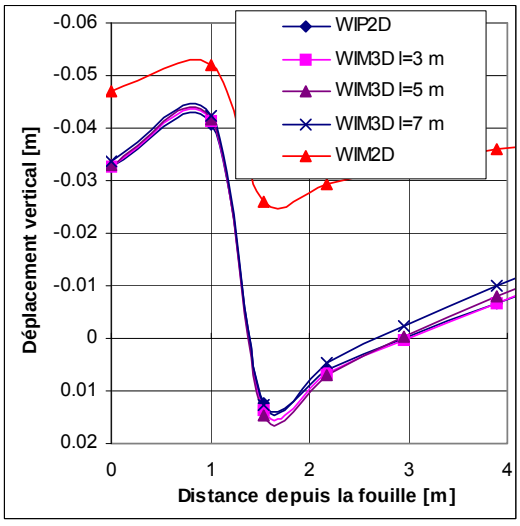

Figure 16. Comparaison des déplacements verticaux en arrière de l'écran pour K_0=1.5.