

MODELISATION DU SOULEVEMENT DU TERRAIN PAR UNE INJECTION – APPLICATION AUX EXCAVATIONS

NUMERICAL MODELLING OF DISPLACEMENT GROUTING – APPLICATION TO EXCAVATIONS

Sébastien BURLON¹ et Hussein MROUEH²

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 – Cet article traite de la modélisation numérique des injections de compensation. Tout d'abord sont présentés les principaux phénomènes liés à une injection. Dans le cas des injections de compaction, le mécanisme de soulèvement est étudié pour mettre en évidence le mode de transmission des déformations. L'efficacité d'une injection de compaction est alors analysée dans le cadre d'une excavation.

ABSTRACT – This paper deals with numerical modelling of displacement grouting. Firstly, the main phenomena associated with compensation grouting are presented. In the case of compaction grouting, the heave mechanism is studied to explain the strain transmission mode. The compaction grouting efficiency is also analysed in the case of excavations.

1. Introduction

La technique des injections de compensation est de plus en plus utilisée lors de travaux en zone urbaine de par les possibilités qu'elle offre en terme de maîtrise des mouvements du sol notamment pour corriger les tassements induits par la réalisation d'excavations ou de tunnels. Les travaux réalisés lors de la construction de la Jubilee Line en sont un exemple révélateur.

Cette technique nécessite toutefois une instrumentation de chantier relativement fine pour suivre en temps réel les effets de l'injection dans le sol car les méthodes d'estimation des mouvements du sol induits par des injections sont encore peu validées.

Cet article comporte tout d'abord une présentation des différents phénomènes physiques inhérents à l'injection d'un coulis dans un sol. Ensuite, uniquement dans le cadre des injections de compaction, une synthèse des méthodes de calcul analytiques et numériques est présentée. Une procédure numérique est alors proposée et comparée à l'une des méthodes analytiques présentée. Le mécanisme de soulèvement du terrain initié par l'expansion d'une cavité en profondeur est alors étudié. Les caractéristiques de ce mécanisme sont identifiées à partir d'une étude relative à l'influence de la valeur de l'angle de dilatance. Les possibilités de correction des tassements en arrière d'un écran de soutènement avec cette technique sont alors analysées.

2. Phénomènes caractéristiques d'une injection de compensation

Les coulis utilisés lors des injections sont classés en trois catégories : les solutions, les suspensions et les mortiers. Suivant le coulis d'injection utilisé et les caractéristiques du terrain en place, trois principaux types de phénomène peuvent être décrits : l'écoulement du coulis au sein d'un milieu poreux, la filtration du coulis par le milieu poreux et le claquage du massif de sol. L'écoulement du coulis est similaire à celui de l'eau dans le sol à la différence près que la viscosité du coulis varie au cours du processus d'injection. La filtration du coulis par le milieu poreux provient de la taille trop réduite des pores du milieu poreux qui ne permettent pas le passage du coulis. Le claquage du sol lors d'une injection est dû à l'augmentation de la pression d'injection. Des fissures apparaissent alors dans des plans orthogonaux à celui de la plus petite contrainte principale (Cambefort, 1967).

Ces différents phénomènes obligent à distinguer deux principaux types d'injection : les injections de fracturation et les injections de compaction. Pour les premières, le coulis est moins visqueux et la pression d'injection est plus élevée.

3. Modélisation des injections de compaction

3.1. Synthèse des différentes approches

Les deux principales méthodes analytiques ont été développées par Sagaseta (Sagaseta, 1987) et Verruijt (Verruijt, 1996). Le travail initial a été effectué par Sagaseta qui a élaboré dans le cadre d'un massif de sol homogène, élastique, incompressible ($\nu=0.5$) et semi-infini une méthode permettant d'estimer les tassements induits par le creusement d'un tunnel. Ce travail a ensuite été poursuivi par Verruijt en supposant cette fois-ci le massif compressible ($\nu \neq 0.5$). Le fait de supposer le massif compressible permet d'obtenir de manière surprenante des déplacements plus importants en surface. Gonzalez et Sagaseta (2001) ont, à leur tour, poursuivi ce travail en intégrant un paramètre d'ajustement permettant de prendre en compte des conditions de drainage partielles et des zones de sol plastiques plus ou moins étendues.

Deux types d'approche numérique existent : la première consiste à imposer une déformation volumique aux zones du maillage réservées aux injections (Nicolini et Nova, 2000, Kovacevic et al., 2000, Schweiger et al., 2004), tandis que la seconde est basée sur l'application de contraintes dans ces zones ou entre ces zones et le sol alentour moyennant ou non l'utilisation d'éléments d'interface (Addenbrooke et al., 2001, Wisser et al., 2001).

3.3 Approche proposée

Compte-tenu de la complexité des phénomènes mis en jeu, on se propose pour la suite de cette communication de s'intéresser uniquement aux injections de compensation pour lesquelles le coulis injecté forme des bulbes (injection de compaction). Dans ce cas, les mouvements proviennent essentiellement de la pression du coulis injecté ou du déplacement provoqué par l'expansion du bulbe constitué de coulis.

L'approche proposée en déformation plane est basée sur la modélisation du processus d'injection à partir de contraintes depuis une cavité d'injection circulaire de 5 cm de rayon dont le déconfinement a été préalablement pris en compte. Les

contraintes sont appliquées de telle sorte que le système soit toujours dans un état quasi-statique (contrôle de la vitesse des nœuds au niveau de la cavité d'injection). Le maillage utilisé à proximité de la cavité d'injection est présenté sur la figure 1. Les calculs sont réalisés par la méthode des différences finies (Itasca, 2002). Le coefficient de pression des terres au repos K_0 vaut 1.

Dans un premier temps, une comparaison à partir de l'exemple présenté sur la figure 2 est réalisée entre cette méthode numérique et la méthode analytique proposée par Verruijt (1996).

Le soulèvement s_v (figure 3) est identique pour les deux méthodes pour l'ensemble des profondeurs d'injection prises en compte. Le volume de terrain soulevé V_s (figure 4) diffère notablement pour toutes les profondeurs considérées sans véritable autre explication que celle de l'étendue du maillage et des conditions aux limites. Il est remarquable de noter que pour un matériau élastique la relation entre le volume injecté V_i le volume de sol soulevé V_s est indépendant de la profondeur d'injection. Le soulèvement s_v augmente bien quant à lui avec la diminution de la profondeur d'injection.

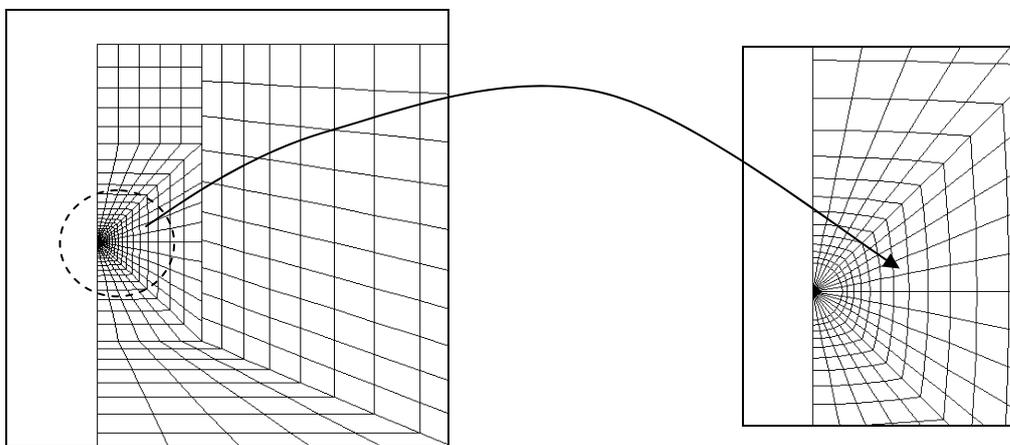


Figure 1. Détail du maillage mis en œuvre autour de la cavité d'injection.

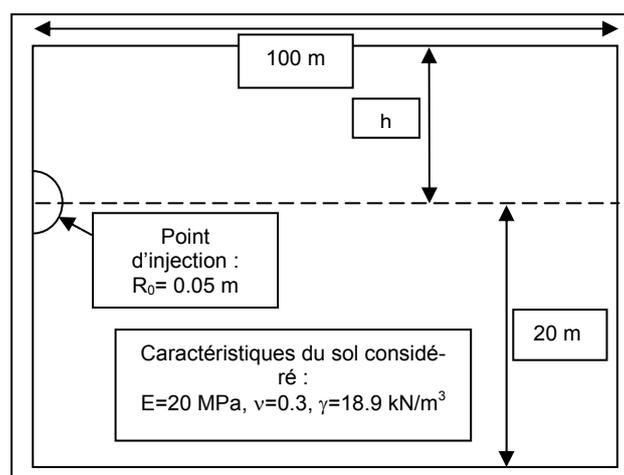


Figure 2. Exemple traité.

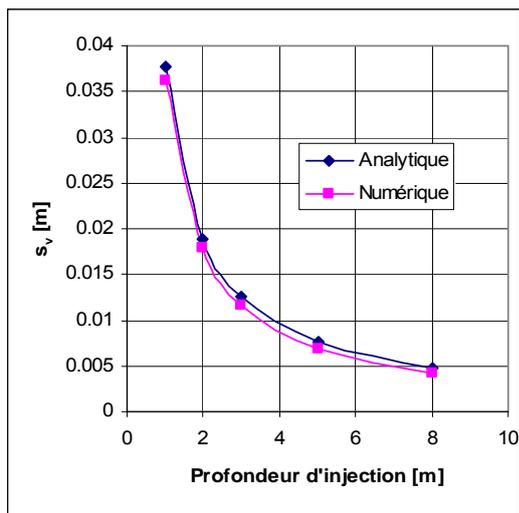


Figure 3. Soulèvement du terrain au droit du point d'injection.

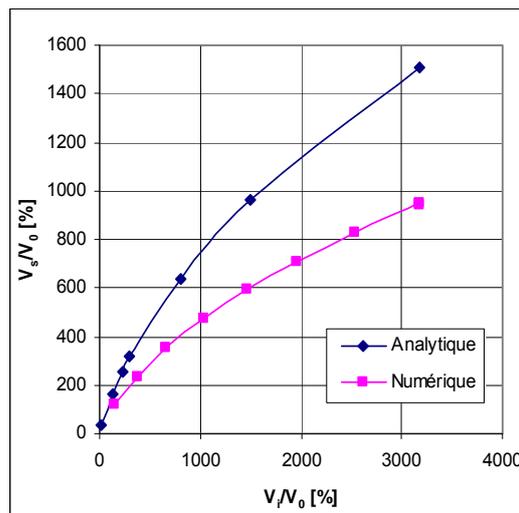


Figure 4. Volume de terrain soulevé pour h=3 m.

4. Etude du mécanisme de soulèvement

4.1. Analyse préliminaire

L'étude proposée concerne une injection réalisée à 3 m de profondeur pour les caractéristiques suivantes : $\gamma=18.9 \text{ kN/m}^3$, $E=20 \text{ MPa}$, $\nu=0.2$, $c=26 \text{ kPa}$, $\varphi=25^\circ$ et $\psi=10^\circ$. Les figures 5 et 6 présentent respectivement les chemins de contraintes calculés au cours du processus d'injection à différentes profondeurs ainsi que les variations de déformations volumiques.

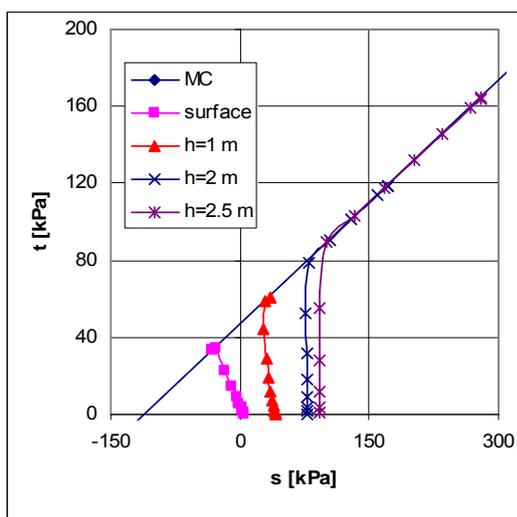


Figure 5. Chemins de contraintes à différentes profondeurs.

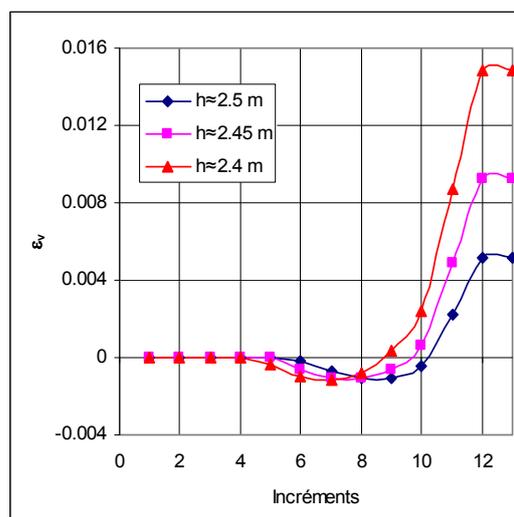


Figure 6. Variations de la déformation volumique.

Tant que le sol est dans un état élastique Il apparaît que le mécanisme de déformation mis en jeu est essentiellement déviatorique. Il s'apparente à celui mis en jeu

lors d'un essai pressiométrique. L'apparition de la plasticité permet de générer une augmentation de la contrainte moyenne. Celle-ci se développant depuis la cavité d'injection les éléments de sol entrent successivement en plasticité à mesure que l'on s'éloigne de la cavité d'injection. Ce mécanisme induit des déformations volumiques qui influencent la transmission des déformations vers la surface. Les principales caractéristiques de ce mode de transmission vont être à présent analysées à partir de l'étude de la valeur de l'angle de dilatance.

4.2. Influence de la dilatance

L'étude proposée comporte une comparaison de trois calculs où la valeur de l'angle de dilatance vaut 0, 5 et 10°.

Des différences importantes apparaissent sur les déplacements et les déformations (figures 7 à 10). La diminution de la dilatance favorise le développement de déformations déviatoriques et accroît donc l'expansion de la cavité d'injection (figure 7). On note à l'inverse que pour un volume d'injection V_i donné, le volume soulevé V_s et le soulèvement maximal s_v augmentent avec la dilatance (figures 8 et 9). Pour une pression d'injection donnée l'augmentation de la dilatance n'a aucune influence sur la valeur du volume de sol soulevé V_s (figure 10). La relation entre la pression d'injection p_i et le volume soulevé V_s dépend de la dilatance uniquement par le fait que lorsque celle-ci augmente le processus d'injection peut être poursuivi plus longtemps car la cavité s'expande moins facilement.

L'augmentation de la dilatance induit donc une diminution de l'augmentation volumique de la cavité mais favorise la transmission des mouvements en surface. L'explication réside sans doute dans le mode de déformation du sol situé entre le point d'injection et la surface. La diminution de la dilatance accroît la contraction des éléments dans le sens vertical et leur extension dans le sens horizontal. Cette observation est a posteriori évidente puisque dans le cas d'une valeur de dilatance nulle, les déformations plastiques volumiques sont nulles (la contraction des éléments dans une direction est opposée à l'extension des éléments dans une direction perpendiculaire). Par contre, comme la contrainte moyenne augmente, la partie élastique du domaine induit une contraction volumique des éléments du maillage (figure 6). Le mécanisme de dilatance diminue la contraction des éléments dans le sens vertical et accroît leur extension dans le sens horizontal ce qui de manière intuitive explique une meilleure transmission des déformations vers la surface. L'extension des éléments dans la direction horizontale et leur faible contraction dans le sens vertical provoquerait une meilleure réaction du massif par une augmentation du confinement.

L'augmentation du coefficient de pression des terres au repos K_0 ou du module d'Young avec la contrainte moyenne favorise aussi le soulèvement du sol et confirme que l'augmentation du confinement du sol favorise la transmission des déformations vers la surface (Burlon, 2007).

5. Application aux excavations

Il a déjà été précisé que la technique des injections de compensation est souvent utilisée lors de la réalisation de tunnels. A titre d'exemple, un calcul, a été réalisé pour analyser l'influence d'une injection réalisée à 3 mètres de profondeur dans 5

cavités distinctes après qu'une excavation a été réalisée (figure 11). Différentes hauteurs d'excavation ont été considérées : 4, 8 et 12 m.

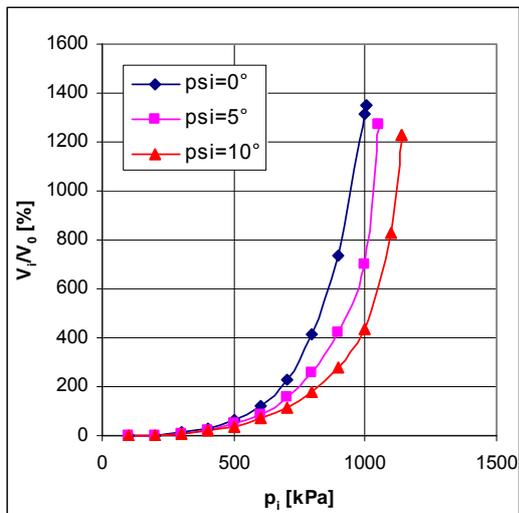


Figure 7. Variation du volume injecté en fonction de la pression d'injection.

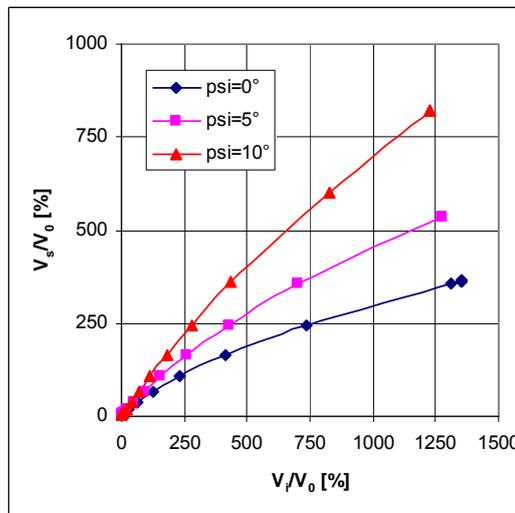


Figure 8. Variation du volume soulevé en fonction du volume injecté.

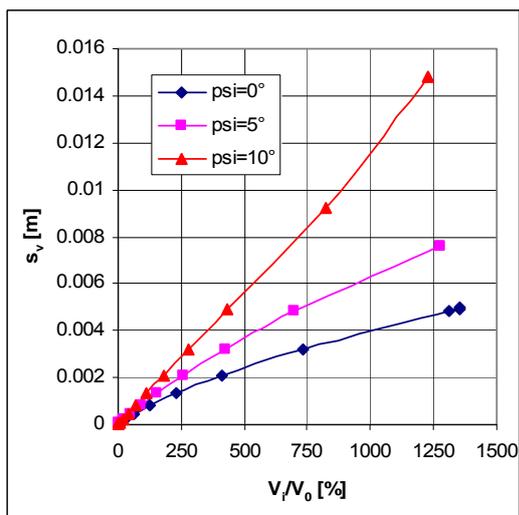


Figure 9. Variation du volume soulevé en fonction du volume injecté.

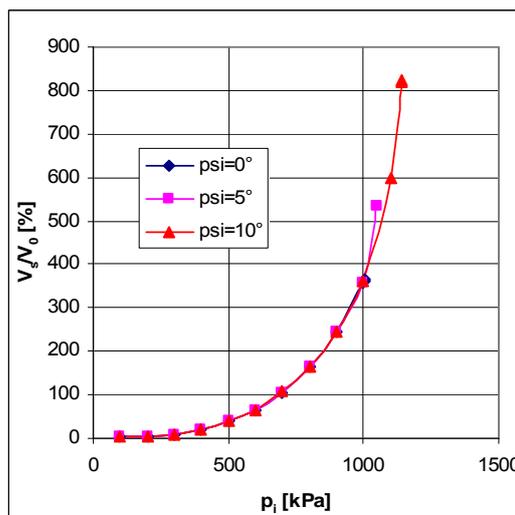


Figure 10. Variation du volume soulevé en fonction de la pression d'injection.

L'injection induit un mouvement de l'écran vers la fouille qui est d'autant plus important que la profondeur d'excavation est grande. Le mouvement de l'écran vers la fouille n'est pas linéaire ce qui témoigne de la plasticité qui s'est développée à l'arrière de l'écran durant l'excavation.

Le soulèvement du terrain en arrière de l'écran diminue lorsque la hauteur libre de l'excavation augmente. Ce calcul montre que l'efficacité de l'injection diminue quand la hauteur d'excavation augmente. Cette constatation s'explique par l'état de contraintes dans le sol à la fois en arrière et en avant de l'écran. Pour de faibles hauteurs d'excavation, la plasticité tant dans la zone de poussée que de butée s'est très peu développée si bien que les mouvements du sol induits par l'expansion de la ca-

tivité se répercutent plus facilement en surface (les contraintes horizontales importantes favorisent le soulèvement du sol) et que l'écran est moins sensible (car plus fiché) à ces mouvements de sol. Quand la hauteur d'excavation augmente, la plasticité se développe en arrière et en avant de l'écran si bien que les mouvements induits par l'expansion de la cavité se répercutent moins facilement en surface (les contraintes horizontales faibles permettent un soulèvement du sol moindre) et que l'écran est plus sensible (car moins fiché) à ces mouvements de sol. L'écran a donc tendance à se déplacer vers la fouille ce qui entraîne une augmentation de la plasticité à l'arrière de l'écran et favorise encore moins la transmission des déformations de la cavité vers la surface.

6. Conclusions

Cet article a traité de la modélisation numérique des injections de compaction et du mécanisme de soulèvement du sol induit. Deux mécanismes interagissent : le premier est lié à l'expansion de la cavité qui augmente lorsque la résistance du sol au cisaillement diminue et le second est lié à la capacité du sol à transmettre les déformations du sol vers la surface qui augmente quant à lui lorsque la rigidité apparente du sol augmente. Ces deux mécanismes mettent en évidence la complexité du phénomène de soulèvement du terrain engendré par des injections de compensation. Dans le cas de l'application d'injections de compensation à la correction des tassements en arrière d'un soutènement, il apparaît sur cet exemple que ce mécanisme est très défavorable à toute correction des déplacements verticaux du sol.

7. Références bibliographiques

- Addenbrooke T.I. (1994) A flexibility number for the displacement controlled design of multi-propped retaining walls, *Ground Engineering*, 27, 41-45.
- Burlon S. (2007), Modélisation numérique des mouvements du sol induits par des excavations et des injections de compensation, Thèse de Doctorat, USTL.
- Cambefort, H. (1967) Injection des sols – Tome I : Principes et méthodes, EYROLLES.
- Gonzalez C., Sagaseta C. (2001) Patterns of soil deformations around tunnels. Application to the extension of Madrid Metro, *Computers and Geotechnics*, 28, 445-468.
- Kovasevic N., Potts D.M., Vaughan P.R. (2000) The effect of the development of undrained pore pressure on the efficiency of compaction grouting, *Geotechnique*, 50, 683-688.
- Itasca Consulting Group, Manuel d'utilisation de Flac3D, 2002.
- Nicolini E., Nova R. (2000) Modelling of a tunnel excavation in a non-cohesive soil improved with cement mix injections, *Computers and Geotechnics*, 27, 249-272.
- Sagaseta C. (1987) Analysis of undrained soil deformation due to ground loss, *Geotechnique*, 37, 301-320.
- Schweiger H.F., Kumerer C., Otterbein R., Falk E. (2004) Numerical modelling of settlement compensation by means of fracture grouting, *Soils and foundation*, 44, 71-86.
- Verruijt A., Booker J.R. (1996) Surface settlement due to deformation of a tunnel in an elastic half plane, *Geotechnique*, 46, 753-756.
- Wisser C., Augarde C.E., Burd H.J. (2001) Three-dimensional finite element modelling of compensation grouting, *Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Deai et al., Balkema, Rotterdam.

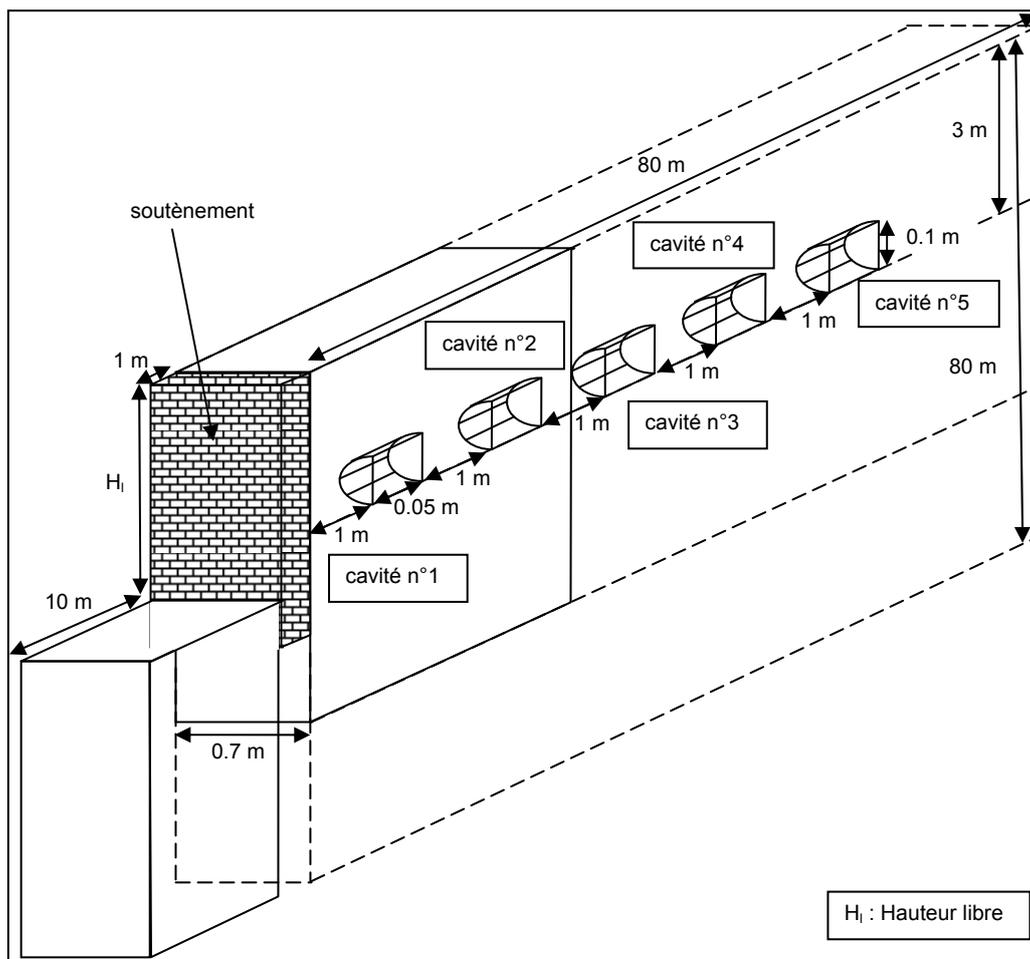


Figure 11. Schéma de principe de l'étude tridimensionnelle d'une injection (pas d'échelle).

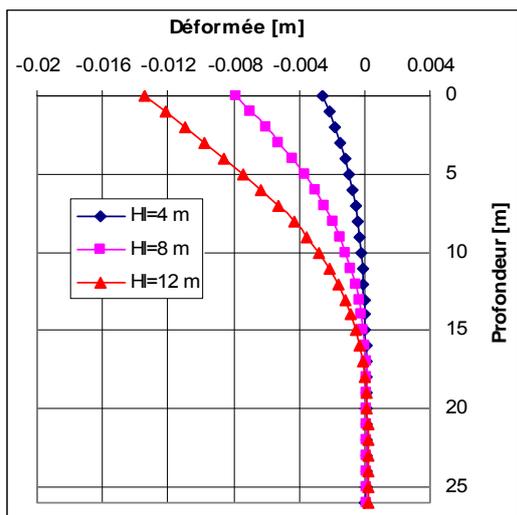


Figure 12. Déformée du soutènement après injection pour différentes profondeurs d'excavations H_i .

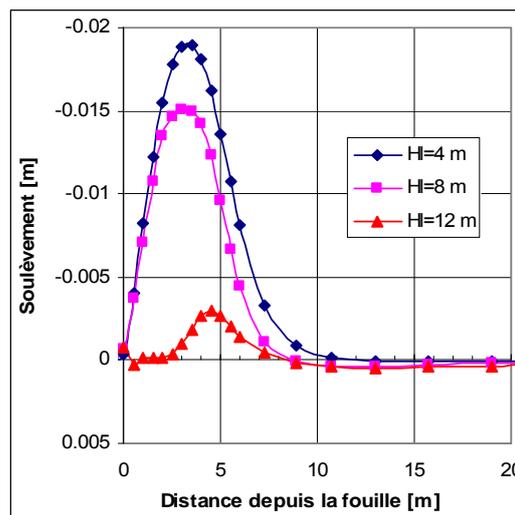


Figure 13. Soulèvement du terrain après injection pour différentes profondeurs d'excavations H_i .