

# **UNE MÉTHODE POUR EVALUER LES TASSEMENTS DES REMBLAIS DES ROUTES DUS A L'ÉLARGISSEMENT DU PROFIL EN TRAVERS**

C. CALIENDO

Département d'Ingénierie Civile, Université de Salerne, Italie

ccaliendo@unisa.it

A. L. SIMONELLI

Département d'Ingénierie, Université du Sannio, Italie

alsimone@unisannio.it

## **RÉSUMÉ**

Une méthode analytique, simple et suffisamment approchée, a été trouvée pour l'estimation de l'étendue des tassements maximums des remblais induits par l'élargissement du profil en travers de la route. A ces fins ont été effectués – avec des approches simplifiées en utilisant les méthodes traditionnelles d'évaluation des tassements - une série de calculs numériques en faisant varier les valeurs des principaux paramètres en jeu tels: l'importance de l'élargissement, la hauteur des remblais, les propriétés de déformation des terrains ou des matériaux constituant les remblais. A travers la mise au point d'un modèle de calcul aux éléments finis, il a été vérifié que les résultats obtenus par les estimations simplifiées sont suffisamment approchés. Ont donc été développées des analyses de régression des résultats obtenus par l'approche simplifiée, en repérant des corrélations qui fournissent directement les valeurs des tassements maximums en fonction de la géométrie du système et des propriétés des matériaux. Ont été ensuite analysées les interventions d'ingénierie aussi bien traditionnelles que novatrices que l'on utilise pour réduire les tassements de consolidation de la surface du sol de fondation et leurs effets sur la fonctionnalité en exercice de l'infrastructure intéressée par l'élargissement. Une solution a donc été déterminée qui semble être la plus efficace, consistant dans la réduction du poids sur la surface du sol de fondation, par l'utilisation de matériau ultra léger pour la construction du remblai approché d'élargissement, tel l'argile expansée. En particulier l'évaluation des tassements de consolidation induits, en démontrant l'efficacité d'une telle solution dans le cas où l'on utilise du gravier concassé ou des pouzzolanes.

## **MOTS CLES**

PROFIL EN TRAVERS / ÉLARGISSEMENT / REMBLAI / TASSEMENTS / TECHNIQUES D'AMÉLIORATION DU SOL

## **1. INTRODUCTION**

Le développement économique et social croissant met de plus en plus en évidence la nécessité d'interventions pour modifier les caractéristiques géométriques de nombreuses branches du réseau routier existant et désormais insuffisant à satisfaire les nouvelles exigences de circulation liées à la forte croissance de la demande de communication.

L'une des plus actuelles interventions d'infrastructure d'ajustement fonctionnel, consiste dans la réalisation d'élargissement du profil en travers de routes pour insérer des voies supplémentaires de circulation et éventuellement des bandes d'arrêt d'urgence autant que des contre-allées. Ce qui entraîne d'importantes problématiques dont en dehors du désagrément causé aux utilisateurs par les travaux en cours, essentiellement la conservation de la configuration de la surface de roulement de façon que pendant les travaux continuent à être assurés des niveaux de sécurité et de confort de marche. La fonctionnalité de la nouvelle typologie d'infrastructure dépendra cependant fortement des paramètres auxquels est liée l'uni de la couche de roulement de la chaussée et donc essentiellement des valeurs des tassements induits par le remblai approché d'élargissement et de leur évolution dans le temps.

L'évaluation de ces tassements n'est pas pour autant un problème à solution facile, que ce soit à cause de l'hétérogénéité éventuelle des terrains que des propriétés de déformation diverses propres aux matériaux de constitution des remblais. C'est pourquoi, il n'existe pas de méthodes de calcul rapide pour les ingénieurs; celles qui sont actuellement disponibles bien que retenues suffisamment fiables vu la grande expérience sur laquelle elles s'appuient, présentent l'inconvénient d'une implémentation plutôt laborieuse avec des temps de calcul élevés.

C'est dans ce contexte que se situe ce travail qui s'est donné l'objectif de fournir une méthode simple et suffisamment approchée pour l'évaluation de l'ampleur des tassements maximums des remblais induits par l'élargissement du profil en travers de la route. Pour atteindre cet objectif, des calculs de tassements ont été effectués avec des approches simplifiées qui implémentent les méthodes traditionnelles (Skempton et Bjerrum pour les terrains argileux et oedométrique pour les terrains pulvérulents). Lors des analyses l'on a fait varier les valeurs des principales caractéristiques géométriques et mécaniques qui entrent en jeu telles: l'ampleur de l'élargissement, la hauteur des remblais, les propriétés de déformation des matériaux du remblai préexistant et de ceux du remblai d'élargissement. Il a donc été mis au point un modèle de calcul aux éléments finis pour lequel a été utilisé un logiciel approprié dans le but de confronter les valeurs des tassements ainsi obtenus avec les valeurs retrouvées par les approches simplifiées. Ensuite ont été effectuées des analyses de régression des tassements maximums, en identifiant des corrélations analytiques qui fournissent directement le tassement en fonction de la géométrie du système et des propriétés des matériaux.

On a, en outre, analysé les interventions qui pourraient se faire pour réduire les effets des tassements de consolidation de la surface du sol de fondation. Une dernière évaluation de tels tassements a donc été effectuée prévoyant l'emploi de matériau ultra léger pour construire le remblai d'élargissement comme l'argile expansée. Enfin l'ampleur de l'efficacité d'une telle solution a été démontrée par la comparaison avec des tassements de consolidation dus au gravier concassé ou aux pouzzolanes.

## 2. PLAN DE L'ÉTUDE

Afin d'atteindre nos objectifs, nous avons tout d'abord examiné les principales méthodes disponibles pour le calcul des tassements, dus d'une part aux déformations des terrains du sous-sol et de l'autre aux matériaux du remblai. Nous avons ensuite mis au point une méthodologie de travail adéquate et nous avons affronté le calcul en évaluant différents cas de figures différenciées d'après la géométrie du profil en travers et les caractéristiques des matériaux constituant le terrain et le remblai.

Notre étude a été effectuée en faisant référence à un profil en travers d'une route à chaussées séparées ayant 2 voies par sens de circulation. Nous avons pensé transformer ce profil en un profil plus ample où, en fonction de l'étendue de l'élargissement prévu, d'autres éléments constituant l'emprise de la route pourraient être insérés. Nous avons considéré un profil initial de 15.50 m et nous avons assigné différents élargissements pour chaque côté (3.75, 5.60, 7.50 et 15.00 m) aboutissant à une largeur totale du profil en travers comprise entre 23.00 et 45.50 m. Quant à la hauteur des remblais nous avons prévu des valeurs de 2, 3, 5 et 10 m.

En ce qui concerne le sous-sol nous avons considéré aussi bien des terrains argileux (normalement consolidés NC et sur consolidés OC) que des terrains pulvérulents. Pour les terrains argileux nous avons supposé que le niveau de la nappe est à la surface du sol de fondation (poids de l'unité de volume  $\gamma_{\text{sat}} = 20 \text{ kN/m}^3$ ), tandis que pour les pulvérulents la nappe est absente ( $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ ). En ce qui concerne les propriétés de déformation, nous avons considéré, par simplicité, des sols de fondation homogènes; notamment pour les terrains argileux normalement consolidés nous avons adopté des valeurs de module œdométrique ( $E_{\text{ed}}$ ) de 5, 6 et 7.5 MPa, tandis que pour les terrains sur consolidés des valeurs de 10, 15 et 20 MPa. Les terrains pulvérulents ont été en revanche caractérisés par des modules œdométriques de 20, 25, 30, 50, 60 et 75 MPa. Le domaine des valeurs choisies est représentatif des conditions que l'on peut généralement retrouver dans les deux types de terrains (argileux ou pulvérulents).

Pour le remblai existant autant que pour le remblai d'élargissement nous avons pensé employer deux types de matériaux communément utilisés dans la pratique: soit un gravier concassé (densité après compactage de  $20 \text{ kN/m}^3$ ) soit un matériau plus léger, tel que les pouzzolanes (densité après compactage égale à  $16 \text{ kN/m}^3$ ). En ce qui concerne le caractère déformable, pour chacun des deux matériaux nous avons considéré deux différentes valeurs de module oedométrique: respectivement 50 et 100 MPa pour le premier matériau et 10 et 30 MPa pour les pouzzolanes.

Nous avons ensuite procédé à l'évaluation de l'entité des tassements sur le sommet des remblais, en articulant notre calcul en deux phases: une première phase d'évaluation des simples tassements de la surface du sol de fondation, induit par le poids du remblai d'élargissement, et une seconde phase d'évaluation des déformations des matériaux constituant les remblais mêmes. Le critère suivi dans le calcul des tassements de la surface du sol de fondation a été celui communément utilisé dans la pratique: estimation en champ élastique de la variation de contrainte due au poids du remblai d'élargissement et consécutive détermination des tassements permanents en utilisant la méthode de calcul choisie. Notamment pour les terrains argileux, le tassement final a été calculé comme la somme du tassement immédiat (qui comme on le sait se vérifie en conditions de non drainage au moment même de l'élargissement) et de celui de consolidation (tassement qui évolue dans le temps, en conditions de drainage, à cause de la dissipation graduelle des pressions interstitielles et de l'accroissement correspondant des contraintes effectives); pour les terrains pulvérulents (pourvus d'un haut coefficient de perméabilité), nous avons calculé directement le tassement final, qui dans la pratique se vérifie en même temps que l'application de la charge. En ce qui concerne les déformations accumulées dans le remblai (dues à son poids) nous avons utilisé une méthode disponible en littérature, dont on parlera par la suite; dans la mesure où ces matériaux sont pulvérulents, les déformations se produisent lors de l'application des charges.

Nous avons par ailleurs effectué des discrétisations aux éléments finis de l'ensemble du terrain-remblai, pour la résolution desquelles nous avons utilisé un code de calcul

adéquat, afin de vérifier que les résultats obtenus avec les approches simplifiées étaient suffisamment précis. A partir de l'examen des déformations des remblais, nous avons repéré comme paramètre représentatif des effets induits, le tassement maximum qui se vérifie généralement en correspondance de la zone de jonction entre le remblai préexistant et le remblai d'élargissement. Nous avons par conséquent effectué des analyses de régressions des tassements maximums en repérant des corrélations analytiques donnant directement le tassement maximum des remblais en fonction de la géométrie du système et des propriétés des matériaux.

Successivement nous avons analysé les interventions pour réduire les effets des tassements de consolidation sur la surface de roulement.

Enfin nous avons effectué une dernière évaluation des tassements de consolidation de la surface du sol de fondation en employant pour le remblai d'élargissement du matériel ultra-léger tel que l'argile expansée (densité après compactage égale à  $4 \text{ kN/m}^3$ ,  $E_{ed} = 10 \text{ MPa}$ ), afin d'évaluer l'efficacité de cette solution par rapport à l'emploi de gravier concassé et de pouzzolane.

### 3. MÉTHODE DE CALCUL

Pour évaluer les tassements de la surface du sol de fondation l'on a surtout calculé l'augmentation de l'état de contrainte induit dans le sous-sol par le poids du remblai d'élargissement. A ces fins le terrain a été assimilé à un milieu semi-infini idéal: continu, élastique linéaire, homogène et isotrope. La distribution des contraintes – créées par une charge verticale de type trapézoïdale (schématisant le remblai) appliquée sur la surface du milieu semi-infini - a été évaluée en utilisant la solution en forme fermée proposée par Gray (Gray, 1936):

$$\sigma_z = p / \pi \cdot [\beta + x \cdot (\alpha / a) - (z/R_2) \cdot (x - b)] \quad (1)$$

$$\sigma_x = p / \pi \cdot [\beta + x \cdot (\alpha / a) + (z/R_2) \cdot (x - b) + (2z/a) \cdot \ln(R_1/R_0)] \quad (2)$$

où pour la signification des paramètres introduits il convient de se reporter à la figure 1.

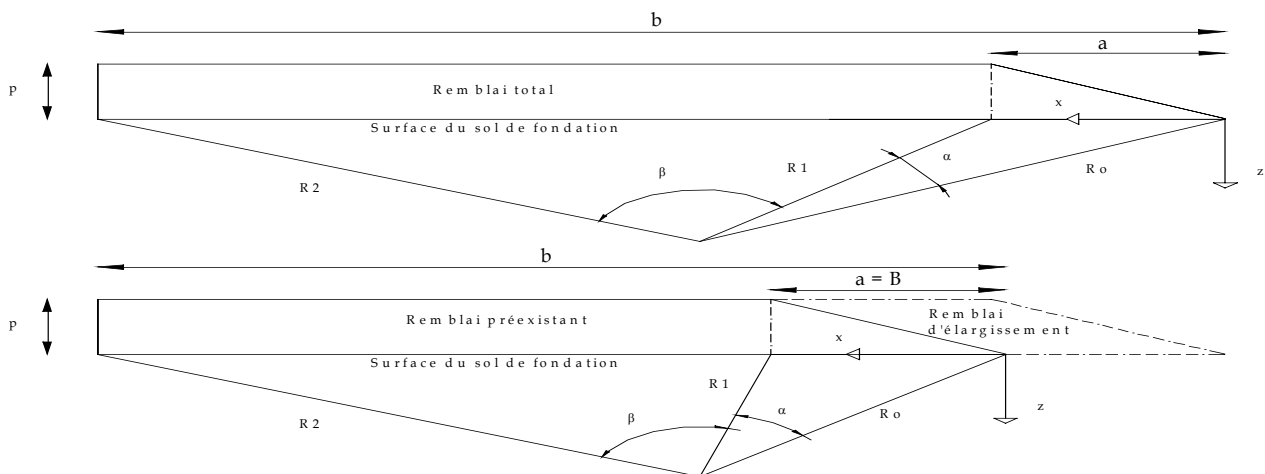


Figure 1 - Section schématique de la charge verticale trapézoïdale et définition des paramètres géométriques qui entrent dans la méthode de Gray pour l'évaluation des contraintes correspondantes dans le terrain.

De telles expressions analytiques montrent que les valeurs des contraintes, dans les hypothèses choisies, ne sont fonction que de la charge appliquée et de la géométrie du

problème et non des propriétés des terrains. L'accroissement de l'état de contrainte induit dans le terrain par le remblai d'élargissement a été obtenu par différence entre l'état de contrainte causé par le remblai total (préexistant + élargissement) et celui dû au seul remblai préexistant. Le calcul a été effectué jusqu'à une profondeur du double de la largeur de l'élargissement. Préalablement à ce calcul il a été tenu compte de l'action due au poids du remblai préexistant jusqu'au moment de l'intervention d'élargissement et de l'amélioration des caractéristiques des terrains qui s'ensuit. Ceci a été fait de manière approchée en introduisant un paramètre  $K_i$ , multiplicateur du module  $E_{ed}$  du terrain homogène (comme défini au paragraphe 2). Ce paramètre est ainsi déterminé:

$$K_i = [(\Delta\sigma_{z(i)} + \sigma'_{z \text{ geost}(i)}) / \sigma'_{z \text{ geost}(i)}] \quad (3)$$

où  $\Delta\sigma_{z(i)}$  est l'accroissement de la contrainte verticale total (qui désormais coïncide avec l'accroissement de la contrainte verticale effective) induit dans le nœud (i) à cause du remblai préexistant et  $\sigma'_{z \text{ geost}(i)}$  est la contrainte géostatique verticale effective existante dans le même nœud (i). Evidemment les valeurs de  $K_i$  sont supérieures à 1 et augmentent les modules oedométriques:  $E_{ed,i} = K_i \bullet E_{ed}$ .

Pour ce qui concerne le calcul des tassements des terrains argileux, la méthode de Skempton et Bjerrum (Skempton et Bjerrum, 1957) a été utilisée. Celle-ci, définie rigoureusement par la verticale dans l'axe de la charge a été utilisée de manière approchée aussi pour divers points de la surface du sol de fondation. La méthode, comme nous le savons, permet d'évaluer le tassement final  $w_f$  somme du tassement immédiat  $w_o$  et de celui de consolidation  $w_c$ . Le calcul du tassement immédiat a été effectué après avoir divisé la couche de terrain déformable en plusieurs couches homogènes en utilisant la relation:

$$w_o = q \bullet B \bullet (I_1/E_{o1} + (I_2 - I_1/E_{o2}) + \dots + (I_i - I_{i-1}/E_{oi}) + \dots) \quad (4)$$

où  $q$  est la charge verticale uniformément distribuée sur la surface du sol de fondation,  $B$  est la dimension caractéristique de la charge,  $I_i$  est un coefficient adimensionnel dépendant de la géométrie du problème (c'est à dire de l'épaisseur de la couche (i) et de la dimension caractéristique de la charge  $B$ ),  $E_{oi}$  est le module élastique dans les conditions de non drainage. Dans le calcul il a été pris des valeurs de  $E_{oi}$  comprises entre 15 et 20 MPa pour les terrains normalement consolidés et entre 25 et 30 MPa pour ceux sur consolidés. De telles valeurs de module, avant d'être utilisées pour l'évaluation des tassements, ont été elles aussi multipliées par le paramètre  $K_i$  ci-dessus pour tenir compte de l'amélioration des propriétés du terrain due au remblai préexistant. En ce qui concerne le tassement de consolidation il a été évalué comme suit:

$$w_c = \sum_i^n (\sigma_{zo,i} / E_{ed,i}) \bullet [A + (\sigma_{xo,i} / \sigma_{zo,i}) \bullet (1-A)] \bullet \Delta Z_i \quad (5)$$

où  $\sigma_{zo,i}$  et  $\sigma_{xo,i}$  sont les contraintes totales verticale et horizontale qui se génèrent dans les nœuds (i) au moment de l'application de la charge (c'est à dire quand est réalisé le remblai d'élargissement),  $E_{ed,i}$  est le module oedométrique dans le nœud (i) ( $E_{ed,i} = K_i \bullet E_{ed}$ ),  $\Delta Z_i$  est l'épaisseur de la couche (i) dont le barycentre est en correspondance avec le nœud (i),  $A$  est le coefficient de Skempton qui diminue en passant des terrains normalement consolidés à ceux sur consolidés (dans le calcul on a choisi respectivement  $A=0.5$  et  $A=0.2$ ).

Pour les terrains pulvérulents il a été choisi d'utiliser pour simplifier la méthode oedométrique (Terzaghi et Peck, 1948), en faisant ainsi l'hypothèse que les éléments de volume se déforment à dilatation latérale empêchée. Pour ces derniers a été directement évalué le tassement final donné par:

$$w_{ed} = \sum_i^n (\Delta\sigma_{z,i} / E_{ed,i}) \bullet \Delta Z_i \quad (6)$$

où  $\Delta\sigma_{z,i}$  est l'accroissement des contraintes verticales totales dans le nœud (i) dû au poids du remblai d'élargissement, tandis que de  $E_{ed,i}$  et de  $\Delta Z_i$  nous avons déjà parlé.

En ce qui concerne l'évaluation des tassement dus seulement aux propriétés de déformation propres aux matériaux de construction du remblai la solution proposée par Clough et Woodward (Clough et Woodward, 1967) a été utilisée:

$$w(z) = I(z/h, h/H) \cdot \gamma \cdot (H^2/E) \quad (7)$$

où le tassement en un point générique du remblai situé à la cote  $z$  de la surface du sol de fondation (supposé indéformable, voir figure 2) est exprimé en fonction du coefficient d'influence  $I$  (à son tour fonction des rapports  $z/h$  et  $h/H$  où  $h$  est la hauteur réelle du remblai et  $H$  sa hauteur maximum possible), du poids par unité de volume  $\gamma$ , du module  $E$  du matériau et de  $H^2$ . Pour l'évaluation des tassements au sommet des remblais la (7) a été utilisée, en faisant évidemment coïncider la cote  $z$  avec les hauteurs ( $h$ ) des remblais.

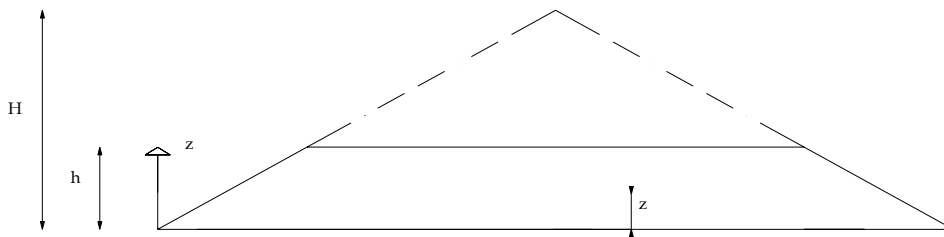


Figure 2 - Définition des paramètres géométriques contenus dans la méthode de Clough et de Woodward pour le calcul des tassements des remblais dus à leur poids.

Pour vérifier les résultats des approches simplifiées, d'utiles indications peuvent être tirées de la comparaison entre les tassements effectivement mesurés in situ et/ou ceux retrouvés en utilisant des méthodes plus rigoureuses: cette dernière semble être l'unique voie à suivre dans les cas où il n'existe pas une expérience affermie sur le comportement effectif des ouvrages intéressés par de nouveaux projets d'intervention, comme ceux d'élargissement des remblais existants. Dans le présent travail il a pourtant été décidé d'effectuer une évaluation des tassements aussi par la méthode aux éléments finis. La génération géométrique du modèle aux éléments finis a été effectuée grâce à un interface graphique opportune. Aux fins de l'évaluation du réseau optimal l'on a fait varier le facteur d'échelle relatif de façon à obtenir des mailles de dimension de plus en plus petites. Le processus a été interrompu quand un dernier rétrécissement de ces mailles n'entraînait pas de variations significatives dans les valeurs des tassements. Le modèle final est constitué par des éléments plans de type triangulaire à 6 nœuds, avec un facteur d'échelle  $F$  de 0.3. Dans l'analyse le comportement du terrain et du matériau qui constitue le remblai a été de toutes façons représenté par un modèle élastique linéaire parfaitement plastique. Leurs propriétés ont été définies à travers un modèle élastique, le coefficient de Poisson, le poids par unité de volume, la perméabilité, la cohésion et l'angle de frottement interne. Le calcul s'est articulé en deux phases: évaluation des tassements dus seulement au remblai préexistant et à ceux causés par le remblai total (préexistant + élargissement), en recherchant ainsi par différence les tassements dus au seul remblai d'élargissement. Dans la figure 3 l'on a reproduit une vue complète du modèle mis au point, avec la définition de la géométrie du problème (à titre d'exemple est reportée celle qui concerne le cas le plus lourd: élargissement  $B$  de 15 m et hauteur  $H$  du remblai de 10 m, pour lesquels a été choisie une profondeur de la couche déformable de 30 m). On a en outre représentée la configuration de la déformation de la surface du sol de fondation et en conséquence du remblai.

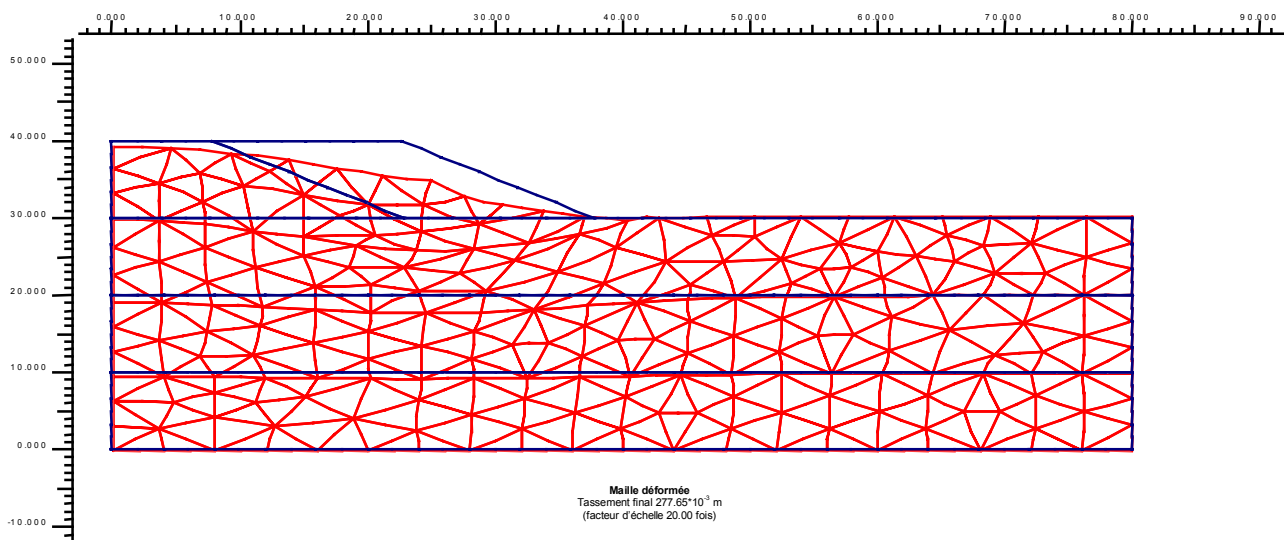


Figure 3 – Vue du modèle aux éléments finis avec définition géométrique du problème et configuration de la déformation due au poids du remblai d’élargissement.

Il est utile de faire observer que les tassements maximums de la surface du sol de fondation se vérifient comme nous l’avons déjà indiqué précédemment, en correspondance avec la zone de jonction entre le remblai préexistant et le remblai d’élargissement. Pour la résolution d’un tel modèle il a été utilisé un code de calcul approprié, le Plaxis (Plaxis, 1998).

#### 4. ANALYSE DES RESULTATS ET COMPARAISON ENTRE LES TASSEMENTS CALCULES SELON DES APPROCHES DIFFERENTES

Les tassements (immédiats  $w_o$  et de consolidation  $w_c$ ) ont été calculés pour divers types de sous-sols (argile NC, argile OC, terrains pulvérulents) compte tenu des différentes caractéristiques physiques et mécaniques des terrains in situ, des différents matériaux du remblai, et des différentes configurations géométriques des remblais.

A titre d’exemple, en faisant référence au sous-sol argileux NC ayant des caractéristiques peu intéressantes ( $E_o = 15$  MPa,  $E_{ed} = 5$  MPa) ainsi qu’aux remblais en gravier concassé, dans la figure 4 on pourra observer les diagrammes des tassements maximums  $w_o$ , et dans la figure 5 les tassements maximums de consolidation correspondants  $w_c$ . Les résultats montrent clairement qu’aussi bien les tassements immédiats que ceux de consolidation augmentent proportionnellement à l’élargissement B et à la hauteur H des remblais. En revanche, ils diminuent quand augmente la rigidité des terrains (modules  $E_o$  et  $E_{ed}$ ).

En synthèse, en ce qui concerne les remblais constitués de gravier concassé, on a calculé, suivant des approches simplifiées, dans les terrains argileux, des tassements maximums immédiats  $w_o$  compris entre 0.4 et 14.5 cm, et des tassements de consolidation  $w_c$  compris entre 0.5 et 42.0 cm, auxquels correspondent les tassement finaux  $w_f$  entre 0.9 et 56.5 cm. Dans les cas où l’on adopte la pouzzolane aussi bien pour le remblai préexistant que pour le remblai d’élargissement, on a calculé des tassements immédiats compris entre 0.3 et 11.3 cm et des tassements de consolidation entre 0.4 et 30.2 cm, auxquels correspondent des tassements finaux compris entre 0.7 et 41.5 cm. Cela prouve que grâce à l’utilisation d’un matériau plus léger tel que la pouzzolane, on obtient une réduction des tassements oscillant, quant aux valeurs finales, entre 20-25%.

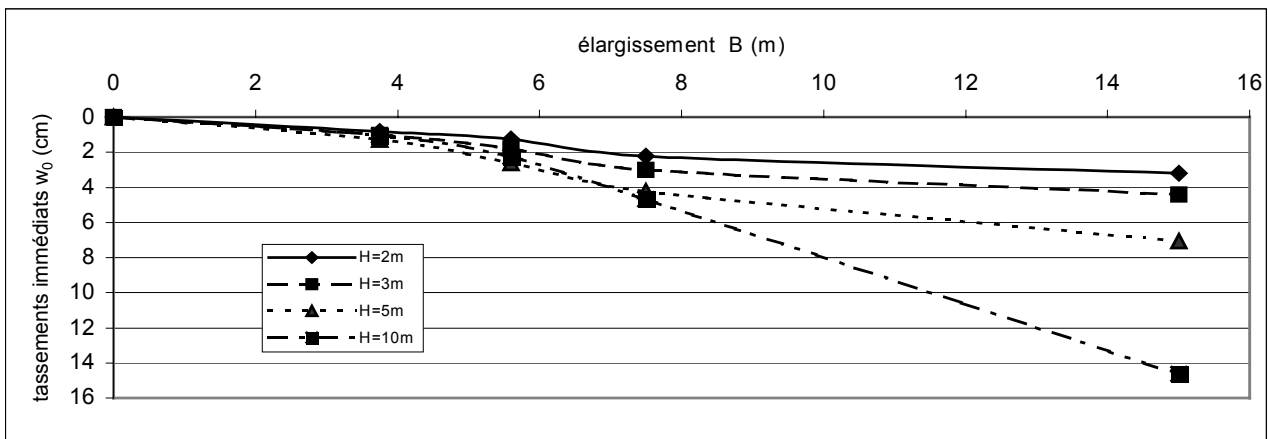


Figure 4 - Terrain argileux normalement consolidé NC ( $E_0 = 15$  MPa): tassements maximums immédiats ( $w_0$ ) de la surface du sol de fondation dus au poids du gravier concassé constituant le remblai d'élargissement.

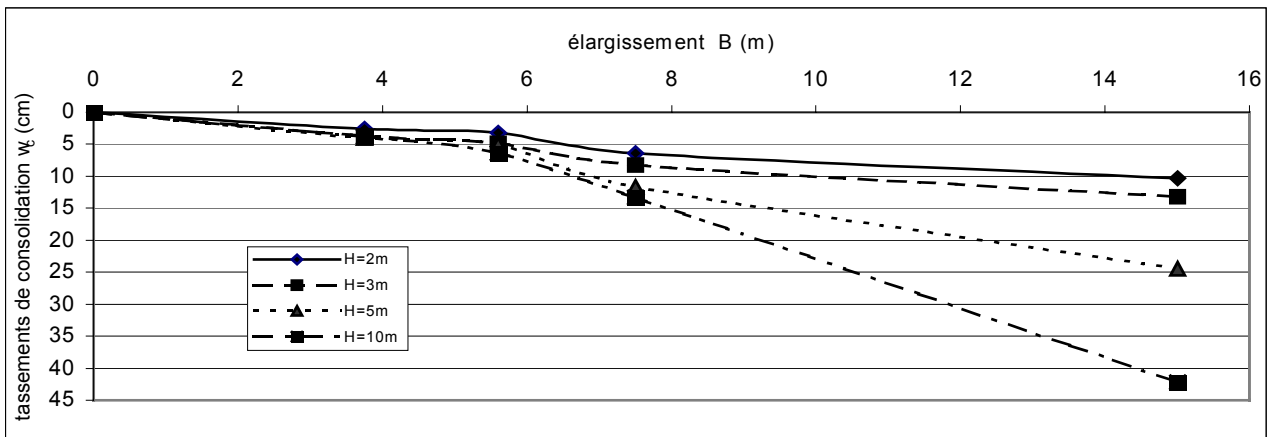


Figure 5 – Terrain argileux normalement consolidé NC ( $E_{ed} = 5$  MPa): tassements maximums de consolidation ( $w_c$ ) de la surface du sol de fondation dus au poids du gravier concassé constituant le remblai d'élargissement.

En ce qui concerne le sous-sol pulvérulent, les valeurs des tassements maximums finals ( $w_f$ ) de la surface du sol de fondation sont sensiblement plus petit que ceux des terrains argileux, dans la mesure où ils sont compris entre 0.3 et 16.0 cm pour les remblais en gravier concassé, et entre 0.2 et 12.0 cm pour les remblais en pouzzolane, avec une réduction du tassement final de 25%.

Les taux des tassements dus aux déformations propres aux matériaux constituant les remblais d'élargissement ont été toujours pour ainsi dire négligeables par rapport aux tassements correspondants de la surface du sol de fondation (tassement maximum des remblais en gravier concassé de 0.3 cm, et de 0.6 cm pour les remblais en pouzzolane). Il va donc de soi que les tassements finals au sommet des remblais sont à attribuer aux propriétés de déformation des terrains du sous-sol, compte tenu des bonnes caractéristiques de rigidité des remblais que l'on obtient avec les techniques de mise en oeuvre classiques.

En ce qui concerne la méthode aux éléments finis, elle a été appliquée à la plupart des cas examinés. A titre d'exemple nous illustrons ci dessous la comparaison entre les deux méthodes (FEM et approches simplifiées) pour le terrain de fondation le plus déformable analysé (argile NC avec modules de rigidité  $E_0 = 15$  MPa et  $E_{ed} = 5$  MPa). En



particulier dans la figure 6 sont représentés, avec référence aux remblais en gravier concassé, les tassements maximums finals ( $w_f$ ) de la surface du sol de fondation.

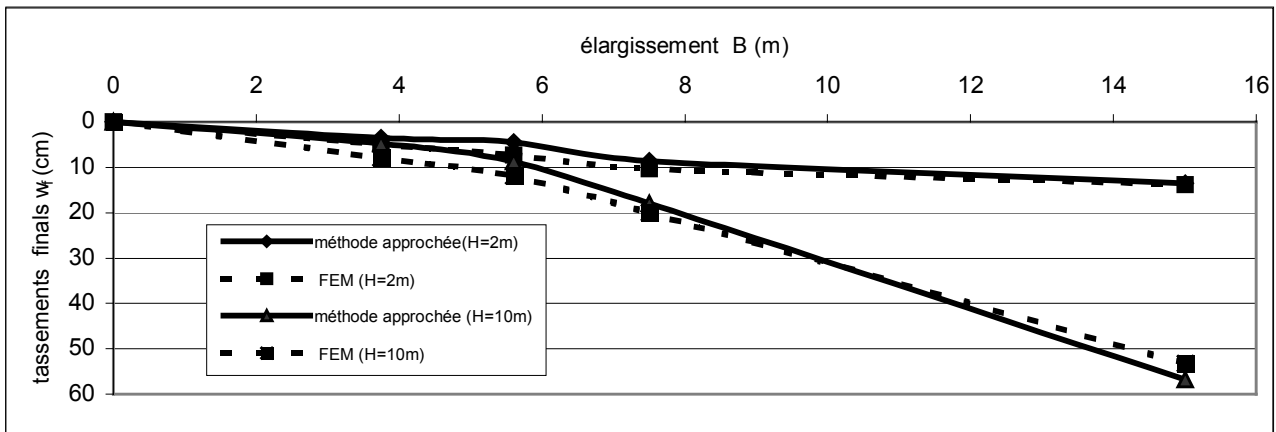


Figure 6 – Terrain argileux normalement consolidé NC ( $E_o = 15$  MPa,  $E_{ed} = 5$  MPa): confrontation entre les tassements maximums finals ( $w_f$ ) de la surface du sol de fondation dus au poids du remblai d'élargissement, calculées selon la méthode FEM et la méthode approchée.

D'après ce dessin il ressort que les tassements maximums finals de la surface du sol de fondation, obtenus suivant les deux approches, sont en congruence. On parvient à la même conclusion sur la base des confrontations effectuées pour les autres cas étudiés.

## 5. CORRELATIONS ANALYTIQUES POUR L'EVALUATION DES TASSEMENTS MAXIMUMS

Comme nous l'avons annoncé au paragraphe 2, le tassement maximum induit par le remblai d'élargissement a été choisi comme paramètre représentatif du comportement du remblai même. De là naît l'exigence de déterminer une méthode simple et efficace pour évaluer directement ce tassement. A cet effet ont été effectuées des analyses de régression des résultats obtenus, en déterminant des fonctions analytiques qui corrélient le tassement maximum de la surface du sol de fondation avec les caractéristiques géométriques et mécaniques du système:

$$w = a \bullet B^2 + b \bullet B \quad (8)$$

où:

$w$  (cm) représente, pour les terrains argileux, le tassement immédiat  $w_o$  ou celui de consolidation  $w_c$ , tandis que pour les terrains pulvérulents c'est le tassement final  $w_f$ ,  $B$  étant l'ampleur de l'élargissement exprimé en mètres (compris entre 3.75 et 15.0 m), ( $a$ ) et ( $b$ ) sont les coefficients de la régression, fonction de la hauteur  $H$  des remblais ( $H = 2 \div 10$  m), du module du terrain (pour les terrains argileux  $E_o$  compris entre 15 et 30 MPa et  $E_{ed}$  entre 5 et 20 MPa, tandis que pour les terrains pulvérulents  $E_{ed}$  compris entre 20 et 75 MPa), sans parler du poids de l'unité de volume  $\gamma$  du matériau du remblai.

Dans les tableaux 1 et 2 sont reportés, en fonction du module du terrain, de la hauteur  $H$  des remblais et du type de matériau dont ils sont constitués (respectivement gravier concassé et pouzzolanes), les valeurs des coefficients ( $a$ ) et ( $b$ ) à introduire en (8) aux fins du calcul des tassements maximums de la surface du sol de fondation. Pour la clarté de l'exposé ces coefficients sont indiqués pour les terrains argileux par les symboles ( $a_o$ ,  $b_o$ ) et ( $a_c$ ,  $b_c$ ) respectivement pour le calcul des tassements immédiats et de ceux de consolidation. Le coefficient de corrélation  $R^2$  trouvé est un résultat compris pour tous les cas examinés entre 0.90 et 0.99.

Tableau 1 – Terrains argileux: définition des valeurs des coefficients de régression ( $a_o$ ) et ( $b_o$ ) pour le calcul des tassements maximums immédiats ( $w_o$ ) et des coefficients  $i$  ( $a_c$ ) et ( $b_c$ ) pour l'évaluation des tassements maximums de consolidation ( $w_c$ ) de la surface du sol de fondation induits par le poids du remblai d'élargissement.

$w = a \cdot B^2 + b \cdot B$								
Terrain argileux normalement consolidé								
Remblais en gravier concassé				Remblais en pouzzolanes				
$E_o = 15$ MPa		$E_{ed} = 5$ MPa		$E_o = 15$ MPa		$E_{ed} = 5$ MPa		
H (m)	$a_o$	$b_o$	$a_c$	$b_c$	$a_o$	$b_o$	$a_c$	$b_c$
2	-0.0049	0.2894	-0.0039	0.7505	-0.0051	0.2574	-0.0091	0.6677
3	-0.0056	0.3829	-0.0132	1.0855	-0.0046	0.3147	-0.0128	0.9249
5	-0.0015	0.4989	0.0445	0.9758	0.0072	0.3111	0.0209	0.8546
10	0.0558	0.1436	0.1580	0.4486	0.0389	0.1719	0.0937	0.6183
$E_o = 17$ MPa		$E_{ed} = 6$ MPa		$E_o = 17$ MPa		$E_{ed} = 6$ MPa		
H (m)	$a_o$	$b_o$	$a_c$	$b_c$	$a_o$	$b_o$	$a_c$	$b_c$
2	-0.0026	0.2351	-0.0033	0.6263	-0.0041	0.2276	-0.0076	0.5563
3	-0.0036	0.3277	-0.0111	0.9057	-0.0034	0.2764	-0.0107	0.771
5	0.006	0.3461	0.0372	0.8115	0.0084	0.2569	0.0175	0.7119
10	0.0521	0.1142	0.1307	0.3891	0.0368	0.1173	0.0781	0.5153
$E_o = 20$ MPa		$E_{ed} = 7.5$ MPa		$E_o = 20$ MPa		$E_{ed} = 7.5$ MPa		
H (m)	$a_o$	$b_o$	$a_c$	$b_c$	$a_o$	$b_o$	$a_c$	$b_c$
2	-0.0033	0.2162	-0.0049	0.4608	-0.0033	0.1875	-0.006	0.4453
3	-0.003	0.2764	-0.0104	0.6507	-0.0031	0.2398	-0.0085	0.6167
5	0.0061	0.2862	0.0237	0.5564	0.0064	0.2297	0.014	0.5693
10	0.0455	0.0803	0.086	0.2753	0.0306	0.1293	0.0624	0.4128
Terrain argileux sur consolidé								
$E_o = 25$ MPa		$E_{ed} = 10$ MPa		$E_o = 25$ MPa		$E_{ed} = 10$ MPa		
H (m)	$a_o$	$b_o$	$a_c$	$b_c$	$a_o$	$b_o$	$a_c$	$b_c$
2	-0.0008	0.1523	-0.0039	0.3770	-0.0007	0.1261	-0.0037	0.3069
3	-0.001	0.2114	-0.0076	0.5309	-0.0011	0.1788	-0.0027	0.3881
5	0.0027	0.2768	0.0309	0.3611	0.0057	0.1892	0.01	0.3798
10	0.0339	0.1292	0.0696	0.2121	0.0293	0.0546	0.04	0.2975
$E_o = 27$ MPa		$E_{ed} = 15$ MPa		$E_o = 27$ MPa		$E_{ed} = 15$ MPa		
H (m)	$a_o$	$b_o$	$a_c$	$b_c$	$a_o$	$b_o$	$a_c$	$b_c$
2	0.0005	0.1267	-0.0026	0.2508	0.0004	0.105	-0.0025	0.2043
3	0.0016	0.1665	-0.0065	0.3769	-0.0002	0.1604	-0.0019	0.2545
5	0.0056	0.2268	0.0229	0.2051	0.0067	0.1659	0.0067	0.2535
10	0.033	0.1198	0.0475	0.1252	0.0256	0.0948	0.0267	0.1984
$E_o = 30$ MPa		$E_{ed} = 20$ MPa		$E_o = 30$ MPa		$E_{ed} = 20$ MPa		
H (m)	$a_o$	$b_o$	$a_c$	$b_c$	$a_o$	$b_o$	$a_c$	$b_c$
2	0.0014	0.1024	-0.0019	0.1882	-0.001	0.1194	-0.0019	0.1537
3	0.0007	0.1672	-0.0042	0.2718	-0.0004	0.1525	-0.0013	0.1899
5	0.0096	0.1681	0.0171	0.154	0.0059	0.1588	0.005	0.1896
10	0.0319	0.0998	0.0337	0.123	0.0229	0.0986	0.02	0.1492

Tableau 2 – Terrains pulvérulents: définition des valeurs des coefficients de régressions (a) et (b) pour le calcul des tassements maximums finals ( $w_f$ ) de la surface du sol de fondation induits par le poids du remblai d'élargissement.

$w = w_f = a \cdot B^2 + b \cdot B$								
Terrains pulvérulents								
Remblais en gravier concassé				Remblais en pouzzolanes				
$E_{ed} = 20$ MPa		$E_{ed} = 25$ MPa		$E_{ed} = 20$ MPa		$E_{ed} = 25$ MPa		
H(m)	a	b	a	b	a	b	a	b
2	-0.0057	0.305	-0.0045	0.244	-0.004	0.2479	-0.0032	0.1983
3	-0.0073	0.4325	-0.0049	0.3325	-0.0069	0.3612	-0.0054	0.2925
5	0.0058	0.4811	0.0047	0.3849	0.0056	0.3584	0.0045	0.2866
10	0.054	0.2436	0.0437	0.1882	0.0378	0.2432	0.0306	0.1889
$E_{ed} = 30$ MPa		$E_{ed} = 50$ MPa		$E_{ed} = 30$ MPa		$E_{ed} = 50$ MPa		
H(m)	a	b	a	b	a	b	a	b
2	-0.0038	0.2033	-0.0023	0.122	-0.0027	0.1653	-0.0016	0.0992
3	-0.0041	0.2771	-0.0024	0.1662	-0.0045	0.2438	-0.0027	0.1463
5	0.0039	0.3207	0.0023	0.1924	0.0037	0.2389	0.0022	0.1434
10	0.0364	0.1569	0.0218	0.0941	0.0255	0.1574	0.0153	0.0944
$E_{ed} = 60$ MPa		$E_{ed} = 75$ MPa		$E_{ed} = 60$ MPa		$E_{ed} = 75$ MPa		
H(m)	a	b	a	b	a	b	a	b
2	-0.0019	0.1017	-0.0015	0.0811	-0.0013	0.0827	-0.001	0.0647
3	-0.002	0.1385	-0.0016	0.1108	-0.0023	0.1219	-0.0018	0.0975
5	0.0019	0.1604	0.0017	0.1264	0.0019	0.1195	0.0015	0.0955
10	0.0182	0.0785	0.0145	0.064	0.0128	0.0788	0.0102	0.063

A titre d'exemple pour les terrains argileux, les corrélations proposées fournissent pour les remblais en gravier concassé des tassements immédiats  $w_o$  de la surface du sol de fondation calculé comme suit:

$$(a) w_o = a_o \cdot B^2 + b_o \cdot B = [0.0558 \cdot (15)^2 + 0.1436 \cdot (15)] = 14.7 \text{ cm}$$

$$(b) w_o = [0.0014 \cdot (3.75)^2 + 0.1024 \cdot (3.75)] = 0.4 \text{ cm}$$

dans les cas respectifs:

(a)  $B=15 \text{ m}$ ,  $H=10 \text{ m}$  et  $E_o = 15 \text{ MPa}$  (exemple de terrain normalement consolidé),

(b)  $B=3.75 \text{ m}$ ,  $H=2 \text{ m}$  et  $E_o = 30 \text{ MPa}$  (exemple de terrain sur consolidé).

Ces valeurs coïncident pratiquement avec celles trouvées par les approches simplifiées (cf. paragraphe 4), qui ont fourni des tassements immédiats respectivement de 14.5 cm et de 0.4 cm. Les tassements de consolidation maximums correspondants  $w_c$  sont dans les deux cas ci-dessus respectivement:

$$(a) w_c = [0.1580 \cdot (15)^2 + 0.4486 \cdot (15)] = 42.3 \text{ cm}$$

(b)  $w_c = [-0.0019 \cdot (3.75)^2 + 0.1882 \cdot (3.75)] = 0.7 \text{ cm}$ ; valeurs qui peuvent elles aussi être confrontées avec celles des approches simplifiées égales respectivement à 42.0 cm et à 0.5 cm.

En définitive les tassements finals  $w_f$  pour les terrains argileux retrouvés avec de telles corrélations sont compris entre 1.1 et 57.0 cm, pour  $w_f = 0.9 \div 56.5 \text{ cm}$  des approches simplifiées.

Dans le cas des remblais en pouzzolanes l'on calcule les tassements immédiats maximums  $w_o$  de la surface du sol de fondation compris entre 0.4 et 11.3 cm, eux aussi semblables à ceux précédemment calculés (respectivement 0.3 et 11.3 cm des approches simplifiées) et les tassements maximums de consolidation  $w_c$  compris entre 0.5 et 30.4 cm (pour  $w_c = 0.4 \div 30.2 \text{ cm}$ ).

En ce qui concerne enfin les terrains pulvérulents, il résulte des corrélations que les tassements finals de la surface du sol de fondation  $w_f$ , respectivement pour le remblai en gravier concassé et en pouzzolanes, compris entre 0.3 et 15.8 cm et entre 0.2 et 12.2 cm; par les approches simplifiées l'on obtient respectivement  $w_f = 0.30 \div 16.0 \text{ cm}$  et  $w_f = 0.2 \div 12.0 \text{ cm}$ .

De telles corrélations peuvent aussi être utilisées par le biais d'opportunes interpolations, pour une estimation approchée des tassements maximums dans d'autres cas, dont les paramètres seraient contenus dans le domaine des valeurs examinées dans l'étude.

## 6. TECHNIQUES D'AMÉLIORATION DU SOL DE FONDATION

Le caractère fonctionnel de l'infrastructure, suite à l'élargissement du profil en travers de la route, est évidemment influencé par l'entité des tassements de la surface du sol de fondation ainsi que par leur évolution dans le temps. Il est connu que les tassements immédiats ( $w_o$ ) se vérifient à la fin de la réalisation de l'intervention; c'est pourquoi ce qui intéresse est l'évolution des simples tassements de consolidation ( $w_c$ ). Une évaluation approchée de cette évolution (Caliendo et Simonelli, 2002) a montré que les tassements de consolidation se développent assez rapidement au cours des premières années pour augmenter ensuite plus lentement dans le temps. Par exemple, au bout de 20 ans d'exercice (correspondant grosso modo à la vie d'une chaussée), on a pu remarquer qu'ils atteignent déjà des valeurs généralement supérieures à 50% du tassement total de consolidation. C'est pourquoi, même si ceci est d'importance significative, ce qui se vérifie par exemple pour les terrains plus compressibles et en présence de remblais hauts et d'amples élargissements, l'uni de la couche de roulement, responsable de la sécurité routière ainsi que du confort, pourrait être compromise même à court terme par l'ouverture de la route à la circulation. Dans ces cas il faut prévoir des interventions afin de réduire les effets des tassements de consolidation de la surface du sol de fondation.

Les interventions qui peuvent être réalisées sont nombreuses et dépendent essentiellement des caractéristiques des terrains ainsi que de l'épaisseur de la couche de sous-sol compressible. Parmi les interventions les plus courantes que l'on pourrait adopter, il y a celles qui prévoient l'emploi de pré-charges et/ou de drainages (pieux en sables ou drains préfabriqués) (Lambe et al., 1969 ; Rodrigues et al., 1988; Lancellotta, 1993 ; Jappelli, 1996; Yeung, 1997; ASCE, 1997; PIARC/AIPCR, 2001) ou bien des consolidations avec *jet-grouting* (Lunardi, 1992; La Banca, 2000). Parmi les techniques les plus modernes, notre intérêt porte sur celles qui permettent de limiter les charges appliquées à la surface du sol de fondation, en employant, pour la construction du remblai d'élargissement, du matériau ultra-léger comme par exemple l'argile expansée (Bowders et al., 1997; Caraffa, 1999 ; Di Prisco, 2001) ou le polystyrène expansé (Magnan et al., 1985; PIARC/AIPCR, 2001, Montepara et al., 2001).

La technique de la pré-charge consiste en l'application sur la surface du sol, avant la construction du remblai d'élargissement, d'une adéquate charge provisoire qu'il faudra laisser sur place jusqu'à ce que, par effet de son poids, le degré de consolidation du terrain n'aie atteint l'effet souhaité. Toutefois à cause de la faible perméabilité des terrains argileux, les temps nécessaires pour anticiper le tassement de consolidation seraient presque certainement trop longs, il faut donc prévoir également l'emploi de drains.

Les drains doivent intéresser le sous-sol non seulement au-dessous du remblai d'élargissement mais aussi du remblai préexistant et par conséquent devront être sub-verticaux. Les drains, on le sait, sont habituellement divisés en: drains de sable et drains préfabriqués. Les premiers peuvent à leur tour être classés en fonction de la technique d'excavation en drains exécutés par enfoncement ou vibro-enfoncement sans élimination de terrain, et drains réalisés par sondeuse et élimination de terrain ou bien par perforation avec méthode hydraulique (*jetting*). Nous rappelons que les principales problématiques rattachées à l'emploi de drains réalisés par enfoncement, battage ou vibration, sont dues principalement à la plus forte gêne portée au terrain, ce qu'il faudra éviter là où la réduction de la résistance au cisaillement provoque des problèmes de stabilité, de même que dans ces terrains dont la distribution de la macrostructure provoque une réduction du drainage des canaux naturels et donc une augmentation des temps de consolidation. Avec les drains exécutés par forage, si d'un côté, grâce à l'élimination du matériau, l'on évite de fortes déformations horizontales du terrain autour du trou, de l'autre côté les problèmes dus à son remaniement demeurent. Avec les drains de type "*jetting*" la perforation du trou s'effectue moyennant l'eau en pression, en limitant ainsi les inconvénients rappelés ci-dessus, mais il faudra tout de même prévoir une série de contrôles pendant le chantier afin de ne pas compromettre l'efficacité de l'intervention. Les drains préfabriqués, utilisés à la place des drains de sable, semblent offrir les avantages d'une installation plus rapide et d'un moindre coût. En général ils sont constitués d'un corps central en plastique où ont été prévus les canaux pour le drainage des eaux et qui constitue aussi l'élément résistant. Cet élément est enveloppé généralement d'un filtre extérieur en tissu non tissé ou bien en papier traité pour empêcher l'occlusion du drain par des particules de terrain. L'on peut installer de façon dynamique (moyennant battage d'un mandrin à l'intérieur duquel passe le drain) ou statiquement (enfoncement du mandrin moyennant pressoirs) et, selon la technique employée, la pression de l'eau produite en phase d'installation est évidemment différente.

Avec la technique *jet-grouting* qui devra en tous cas intéresser le terrain sous-jacent, qu'il s'agisse du remblai d'élargissement ou du remblai préexistant, la réponse mécanique du terrain s'améliorerait directement, soit en réduisant les propriétés de déformation soit en augmentant sa résistance au cisaillement. Cette technique consiste, on le sait bien, à injecter dans le terrain, après avoir effectué des perforations de petits diamètres, des

quantités établies à l'avance de mélanges de béton à pression et vitesse élevées. Le fluide consolidant injecté dans les conditions ci-dessus, désagrège le terrain environnant qui est successivement mélangé avec le matériel injecté et transformé donc en matériau lié. Avec le *jet-grouting* on peut donc réaliser dans le sous-sol des éléments de terrain lié en forme presque cylindrique (colonnes consolidées) dont le diamètre est fonction de la granulométrie du terrain ainsi que des modalités opérationnelles. Les plus grosses problématiques tiennent au fait que l'on peut avoir des caractéristiques variables du terrain consolidé, à cause de la présence éventuelle de fuites latérales du mélange injecté si bien que les consolidations se produiraient à travers des voies de fuite préférentielles (claquage).

La réalisation de remblais d'élargissement en matériaux légers et éventuellement même le remplacement de certaines couches du sol plus compressibles, permettrait de réduire les valeurs des tassements de la surface du sol de fondation en exploitant le poids moindre des matériaux constituant le remblai. Les typologies à adopter pourraient être de deux types: remblai d'élargissement en matériaux légers avec ou sans compensation. Avec les remblais allégés sans compensation on exploiterait uniquement la charge moindre correspondante agissant sur la surface du sol de fondation, alors que pour les remblais compensés on aurait aussi le remplacement d'une partie du terrain compressible par du matériau plus léger, mais aux caractéristiques plus performantes, pour une épaisseur pouvant compenser en partie ou complètement la surcharge du remblai d'élargissement à construire. Un des matériaux les plus diffusés pouvant être employé dans ce sens est l'argile expansée. La légèreté de l'argile expansée ( $\gamma_s = P_s/V = 3\div 5 \text{ kN/m}^3$ ) est due au fait qu'à l'intérieur de chaque grain est présente une quantité remarquable de vides dont quelques-uns ne sont pas interconnectés. Puisque la surface extérieure de chaque grain est pratiquement étanche, les creux intérieurs sont faiblement accessibles à l'eau extérieure. Une des problématiques majeure des remblais en argile expansée concerne la mise en œuvre adéquate de ce matériau. En effet un compactage excessif sans parler de l'action du rouleau compacteur, peut provoquer une augmentation sensible du pourcentage d'argile concassée, ce qui comporte la réduction de l'avantage du moindre poids à cause de la variation de la granulométrie et un risque élevé qu'un gros contenu d'eau puisse être absorbé.

Il est donc prévu que l'argile expansée soit mise en place par couches successives après avoir enduit le terrain in situ d'un géotextile sur afin d'éviter que le matériau fin sous-jacent puisse pénétrer dans les espaces vides entre les particules de la couche d'argile, provoquant ainsi en exercice des tassements même importants. Par exemple, la modalité de mise en œuvre généralement répandue en Italie prévoit l'étalage au-dessus du géotextile d'une première couche d'argile expansée (épaisseur généralement de l'ordre de 60-80 cm) qui sera recouverte d'une couche de grave (épaisseur de l'ordre de 20-30 cm). Entre la couche de grave et celle d'argile est posé un autre géotextile ayant la fonction d'éviter la compénétration de l'un des deux matériaux dans les vides de l'autre. Au-dessus du grave on fera ensuite passer le rouleau compacteur, généralement un rouleau léger de type dynamique. Une fois le compactage obtenu, on passera sur le grave un autre géotextile avant de passer une seconde couche d'argile expansée. Il est prévu que les talus du remblai soient recouverts d'une couche de grave (épaisseur de l'ordre de 30-50 cm) dont la fonction est d'éviter l'érosion superficielle de l'argile expansée par effet de l'action de ruissellement de l'eau; tandis que leur pente, de manière compatible avec l'angle de frottement interne de ce matériau, ne dépasse pas les 33°.

Une dernière technique, introduite seulement depuis quelques années en Italie et donc encore en phase d'expérimentation, pourrait être adoptée: elle prévoit l'emploi de matériau très léger comme le polystyrène expansé (EPS) pour la construction du remblai

d'élargissement. Les blocs de polystyrène sont plutôt légers (masse volumique comprise entre  $0.2\div 0.4 \text{ kN/m}^3$ ) et présentent donc une grande capacité de flottement, même s'ils sont pratiquement étanches. Le matériau est homogène, isotrope et lors de la compression il a un comportement élasto-plastico-écrouissant. Afin de limiter les phénomènes de *fluage* en exercice, les expériences internationales imposent le contrôle des valeurs de contrainte et de déformation. Le remblai est réalisé moyennant la superposition de blocs prismatiques de polystyrène mis en œuvre en déphasant les joints et pour éviter les glissements et permettre la transmission des contraintes, les blocs sont reliés entre eux moyennant des goujons dentés en matériau métallique (gripper). A cause de la masse volumique réduite du matériau, il faut éliminer les situations dans lesquelles il pourrait y avoir une interférence de la nappe afin d'empêcher le flottement des blocs. Dans ces cas il faut donc prévoir un système de drainage pour l'eau de la nappe. Le remblai en polystyrène doit être protégé du ruissellement, en recouvrant par exemple les talus de terrain végétal. Le polystyrène est plus coûteux par rapport aux matériaux traditionnels employés dans les remblais, même s'il faut dire que l'aspect économique doit être évalué dans son ensemble en tenant compte, par exemple, que son emploi entraîne des temps de réalisation plus brefs et donc une facilité de mouvements dans le chantier sans l'aide de machines. Par ailleurs, avec le polystyrène on peut réaliser des talus à pente plus forte, ce qui se traduit par un encombrement mineur.

Les remblais qui emploient du matériau ultra-léger (argile expansée ou polystyrène) demandent généralement la réalisation d'une chaussée robuste, qui permette une haute répartition des charges de circulation, afin de réduire l'entité des valeurs de contrainte et de déformation auquel ces matériaux sont soumis en exercice. Pour cela il serait nécessaire de prévoir l'emploi, par exemple, d'une chaussée en béton armé continu qui ait aussi la fonction de fondation des barrières de sécurité.

Parmi les interventions exposées ci-dessus, un grand intérêt est attribué aujourd'hui surtout à celles qui se basent sur du matériau ultra-léger. Avec cette solution on aurait l'avantage de pouvoir effectuer des interventions économiquement moins coûteuses et en temps plus brefs par rapport à celles qui prévoient la réduction du contenu d'eau pour accélérer les tassements de consolidation ou l'amélioration des propriétés du sous-sol. On a ainsi décidé de prévoir dans ce travail, en tant qu'intervention finalisée à réduire les effets des  $w_c$  de la surface du sol de fondation sur la fonctionnalité de l'infrastructure intéressée à l'élargissement, la réalisation de remblais d'élargissement en matériau ultra-léger. En particulier on prévoit l'argile expansée dont l'utilisation, contrairement au polystyrène, est attestée dans certaines réalisations en Italie. Pour l'évaluation de la portée de l'efficacité de la solution proposée, on a effectué les calculs des tassements correspondants  $w_c$  et on a confronté les résultats obtenus avec ceux relatifs à l'emploi de gravier concassé ou de pouzzolane.

## 7. ANALYSE DES TASSEMENTS DE CONSOLIDATION DE LA SURFACE DU SOL DE FONDATION INDUITS PAR LE POIDS DU REMBLAI D'ÉLARGISSEMENT EN ARGILE EXPANSÉE ET COMPARAISONS CORRESPONDANTES.

Les résultats des calculs des tassements maximums de consolidation  $w_c$ , induits par le poids du remblai d'élargissement en argile expansée sont représentés dans des diagrammes correspondants en fonction de H et de B, pour une valeur fixée à l'avance du module oedométrique ( $E_{ed}$ ) du terrain argileux. A titre d'exemple dans les figures 7 et 8 sont reportés ceux relatifs aux remblais les plus élevés (H = 5 m, H = 10 m), pour les cas extrêmes de module du sous-sol considérés (respectivement  $E_{ed} = 5 \text{ MPa}$  pour les terrains

normalement consolidés NC et  $E_{ed} = 20$  MPa pour ceux surconsolidés OC). Sur les mêmes figures sont aussi reportés, en vue d'une comparaison utile, les tassements de consolidation relatifs aux deux autres types de matériau étudiés (gravier concassé et pouzzolanes).

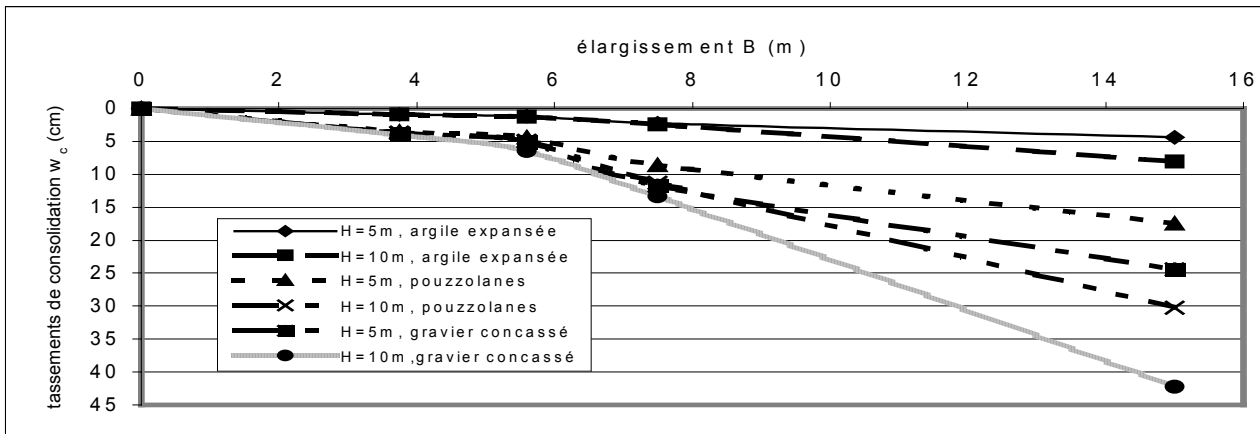


Figure 7 – Terrain argileux normalement consolidé ( $E_{ed} = 5$  MPa): comparaison entre les tassements maximums de consolidation de la surface du sol de fondation ( $w_c$ ) induits par le poids du remblai d'élargissement réalisé respectivement en argile expansée, gravier concassé ou pouzzolanes.

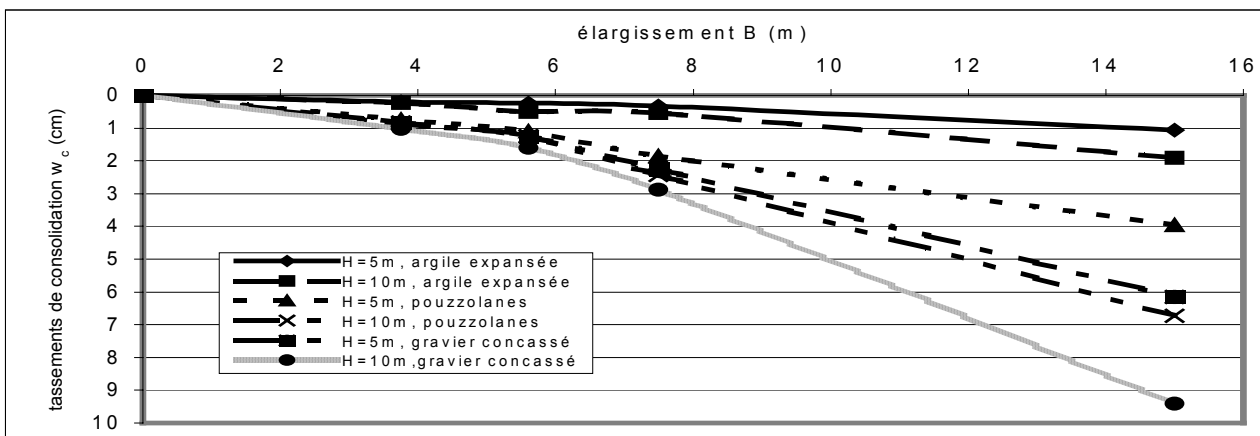


Figure 8 – Terrain argileux sur consolidé ( $E_{ed} = 20$  MPa): comparaison entre les tassements maximums de consolidation de la surface du sol de fondation ( $w_c$ ) induits par le poids du remblai d'élargissement réalisé respectivement en argile expansée gravier concassé ou pouzzolanes.

Elles montrent que les tassements de consolidation ont un comportement semblable pour les trois types de matériaux (c'est à dire qu'ils augmentent avec H et B, tandis qu'ils diminuent quand augmente  $E_{ed}$ ), mais que les  $w_c$  relatifs aux remblais en argile expansée sont notablement plus petits. En se référant à la totalité des cas étudiés, l'on trouve en faisant la synthèse que les tassements de consolidation  $w_c$  avec l'argile expansée sont compris entre 0.13 et 8.1 cm, pour les  $w_c = 0.5\div 42.0$  cm et  $w_c = 0.4\div 32.0$  cm, déjà trouvés respectivement pour le gravier concassé et les pouzzolanes. Donc la réalisation du remblai d'élargissement avec ce matériau ultra léger entraîne une réduction des tassements maximums de consolidation de la surface du sol de fondation que l'on peut estimer de l'ordre d'environ 75-80% par rapport au gravier concassé et de 70-75% par rapport aux pouzzolanes.

En vérité pour pouvoir estimer le bénéfice total qui est fait avec l'emploi de l'argile expansée sur la fonctionnalité en exercice de l'infrastructure intéressée par l'élargissement, la comparaison devrait être faite en se référant aux tassements totaux de

la surface de roulement de la route. C'est-à-dire qu'aux tassements susvisés (attribuables seulement aux propriétés de déformation du terrain) devraient être ajoutés ceux dus à celles de déformation propres au matériau constituant le remblai et induits par les véhicules en circulation et ceux dont l'origine vient de la viscosité irréversible des couches de béton bitumeux et/ou en grave éventuellement présents dans la chaussée. Il faut dire aussi que pour évaluer ces derniers tassements qui ne font pas l'objet de cette étude, la méthodologie suivie en général utilise les valeurs des contraintes causées par la circulation des véhicules dans les lois d'accumulation des déformations permanentes sous des charges dynamiques, définies pour les divers matériaux. Les contraintes susdites se retrouvent à travers la résolution du modèle du multicouches élastique, constitué par les couches de la chaussée et par le remblai, ce dernier reposant sur un sol de fondation indéformable.

Aux fins de fournir une méthode simple pour l'évaluation directe du tassement maximum de consolidation  $w_c$  de la surface du sol de fondation même dans les cas des remblais d'élargissement réalisés en argile expansée, ont été effectuées des analyses de régression des résultats du calcul des  $w_c$ . Dans le tableau 3 sont reportés, en fonction du module oedométrique  $E_{ed}$  des terrains NC et OC et de la hauteur H des remblais, les valeurs correspondantes des coefficients de corrélation  $a_c$  et  $b_c$  à introduire en (8). Les corrélations proposées fournissent les valeurs suivantes de  $w_c$ :

Tableau 3 – Terrains argileux : définition des valeurs des coefficients de régression  $a_c$  et  $b_c$  pour le calcul des tassements de consolidation maximums ( $w_c$ ) de la surface du sol de fondation induits par le poids du remblai d'élargissement en argile expansée.

w = w <sub>c</sub> = a•B <sup>2</sup> + b•B						
Remblai d'élargissement en argile expansée						
Terrain argileux normalement consolidé (NC)						
E <sub>ed</sub> = 5 MPa		E <sub>ed</sub> = 6.5 MPa		E <sub>ed</sub> = 7.5 MPa		
H(m)	a <sub>c</sub>	b <sub>c</sub>	a <sub>c</sub>	b <sub>c</sub>	a <sub>c</sub>	b <sub>c</sub>
2	-0.0021	0.1688	-0.006	0.1334	-0.0006	0.1091
3	-0.0032	0.231	-0.0004	0.1643	-0.0007	0.1402
5	0.0043	0.2287	0.0088	0.1437	0.0118	0.0905
10	0.0302	0.0843	0.0257	0.0649	0.0206	0.062
Terrain argileux sur consolidé (OC)						
E <sub>ed</sub> = 10 MPa		E <sub>ed</sub> = 15 MPa		E <sub>ed</sub> = 20 MPa		
H(m)	a <sub>c</sub>	b <sub>c</sub>	a <sub>c</sub>	b <sub>c</sub>	a <sub>c</sub>	b <sub>c</sub>
2	-0.0015	0.087	0.0017	0.0289	0.0006	0.0234
3	-0.0007	0.0949	0.0008	0.0461	0.0011	0.028
5	0.0029	0.0887	0.0032	0.0435	0.003	0.0259
10	0.012	0.0573	0.01	0.0145	0.0071	0.0205

(a)  $w_c = [0.0302 \cdot (15)^2 + 0.0843 \cdot (15)] = 8.1 \text{ cm}$

(b)  $w_c = [0.0006 \cdot (3.75)^2 + 0.0234 \cdot (3.75)] = 0.10 \text{ cm}$

respectivement dans les cas:

(a) B = 15 m, H = 10 m et  $E_{ed} = 5 \text{ MPa}$  (exemple de terrain normalement consolidé),

(b) B = 3.75 m, H = 2 m et  $E_{ed} = 20 \text{ MPa}$  (exemple de terrain sur consolidé).

Les valeurs trouvées sont semblables à celles des méthodes de calcul (8.1cm et 0.13 cm).

## 8. CONCLUSIONS

A partir du présent travail, qui a concerné l'évaluation des tassements des remblais routiers suite à l'élargissement du profil en travers, l'on peut tirer les conclusions suivantes.

Les tassements de la surface du sol de fondation aussi bien immédiats  $w_0$  que de consolidation  $w_c$ , dus au poids du remblai d'élargissement augmentent, en ce qui concerne la géométrie de charge évaluées, proportionnellement à la croissance de l'entité



de l'élargissement (B) et de la hauteur (H) des remblais, tandis qu'ils diminuent avec la croissance du module du terrain ( $E_o$  ou  $E_{ed}$ ).

Par rapport aux remblais constitués de gravier concassé, on a remarqué qu'en présence de terrains argileux les tassements maximums immédiats ( $w_o$ ) de la surface du sol de fondation sont compris entre 0.4 et 14.5 cm, tandis que les tassements de consolidation ( $w_c$ ) sont compris entre 0.5 et 42.0 cm, auxquels correspondent des tassement finals ( $w_f$ ) entre 0.9 et 56.5 cm. En revanche, en cas d'utilisation de pouzzolane pour le remblai pré-existant ainsi que pour le remblai d'élargissement, on obtient une réduction des tassements qui, par rapport aux valeurs finals, est de l'ordre de 20-25%.

Les tassements maximums finals de la surface du sol de fondation pour les terrains pulvérulents ont été sensiblement plus petits que ceux des terrains argileux, étant compris entre 0.3 et 16.0 cm environ. Même dans ces cas l'emploi de la pouzzolane, au lieu du gravier concassé, entraîne une réduction des tassements de l'ordre de 25%.

Les tassements qui dépendent exclusivement des propriétés de déformation des deux matériaux susmentionnés constituant les remblais, provoqués par le poids du remblai d'élargissement s'avèrent pratiquement négligeables par rapport à ceux qui correspondent à la surface du sol de fondation, étant au maximum de 0.3 cm pour les remblais en gravier concassé et de 0.6 cm pour ceux en pouzzolane.

L'approche aux éléments finis du système terrain-remblai, pour la résolution de laquelle nous avons utilisé un code de calcul adéquat, a montré que les tassement obtenus avec cette méthode sont en congruence avec ceux fournis par les plus simples approches approchées (qui implémentent les méthodes traditionnelles de Skempton et Bjerrum pour les terrains argileux et oedométrique pour les terrains pulvérulents).

Les analyses de régression des résultats obtenus ont permis de repérer des corrélations analytiques qui fournissent une évaluation directe des tassements maximums de la surface du sol de fondation en fonction de la géométrie du système et des propriétés mécaniques des matériaux.

Parmi les interventions pour réduire les effets de tassements de consolidation  $w_c$  de la surface du sol de fondation sur la fonctionnalité en exercice de l'infrastructure intéressée à l'élargissement, ceux qui se basent sur l'emploi de matériau ultra-léger pour la réalisation du remblai d'élargissement semblent économiquement moins onéreux et présentent des temps de réalisation plus courts par rapport à ceux qui prévoient la réduction du contenu d'eau pour accélérer les tassements de consolidation ( $w_c$ ) ou l'amélioration directe des propriétés du sous-sol.

L'emploi de matériau ultra-léger, tel que l'argile expansée pour la réalisation du remblai d'élargissement comporte des tassements maximums de consolidation de la surface du sol de fondation compris entre 0.13 et 8.1 cm, ce qui implique une remarquable diminution des valeurs de ces tassements par rapport aux cas où l'on utilise du gravier concassé ou bien de la pouzzolane, appréciable dans la mesure respectivement d'environ 75-80% et 70-75%.

A côté des avantages en termes de réduction des  $w_c$ , l'emploi de l'argile expansée présente toutefois quelques problématiques non encore résolues, liées essentiellement à la modalité de mise en œuvre et/ou à des situations où l'interférence avec l'eau de la nappe et de ruissellement serait possible, ainsi que par rapport aux valeurs de contrainte

et de déformation auquel ce matériel a été soumis en exercice sous l'action des véhicules en circulation et donc à ses prestations dans le temps.

Dans ces conditions il faut espérer que des études et des recherches expérimentales s'orientent de plus en plus vers une meilleure compréhension de ces problématiques dont la solution encouragerait l'emploi à grande échelle de ce matériau léger dans la réalisation des remblais au lieu des matériaux traditionnels.

## REFERENCES

- ASCE (1997). Ground improvement / reinforcement / treatment. Geotechnical Special Publication n. 69. Edited by Vernon R. Schafer. Geo Institute, ASCE.
- Bowders J.J., Than J.P., Daniel d. E (1997). Expanded Clay and Shale Aggregate for Leachate Collection Systems. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE, Vol.123, n. 11.
- Caliendo C., Simonelli A. L. (2002). Un metodo per la valutazione dei cedimenti dei rilevati stradali indotti dall'allargamento della sezione trasversale. Atti del XII Convegno Internazionale della Società Italiana di Infrastrutture Viarie. Vol.1, 1<sup>a</sup> Sessione Tecnica.
- Caraffa T. (1999). I lavori per il primo lotto della Roma-Fiumicino. Le Strade, n. 4.
- Clough R.W., Woodward R.J. (1967). Analysis of embankment stresses and deformations. Journal Soil Mechanics Foundations Division, ASCE, Vol.93, n. SM4.
- Di Prisco C. (2001). Applicazioni geotecniche dell'argilla espansa. Rapporto interno diffuso a Verona al 2° Convegno sui Trasporti, Infrastrutture, Mobilità e Telematica (Infravia).
- Gray H. (1936). Stress distribution in elastic solids. Proceedings 1<sup>st</sup> International Conference Soil Mechanics Foundation Engineering. Vol.2, p.157.
- Jappelli R. (1996). Consolidamento dei terreni e delle rocce. Manuale di Ingegneria Civile Zanichelli/Esac. Vol.1, cap.VIII.
- La Banca, V. (2000). Jet-grouting nel consolidamento provvisionale. Quarry & Construction, n.3.
- Lambe T.W., Whitman R.(1969). Soil Mechanics. John Wiley & Sons, Inc.
- Lancellotta R. (1993). Geotecnica. Zanichelli.
- Lunardi, P. (1992). Il consolidamento del terreno mediante jet-grouting. Quarry & Construction, n. 3.
- Magnan J. P., Soyez B. (1985). Principe des remblais légers, contraintes d'emploi du polystyrène. Bull.Liason, n.136.
- Montepara A., Giuliani F. (2001). Rilevati stradali in polistirene espanso sinterizzato. Quarry & Construction, n. 11.
- PIARC / AIPCR (2001). Techniques d'élargissement des autoroutes / Techniques for motorway widening" Routes/Roads n.310.
- Plaxis program (1998). PLAXIS B.V. The Netherlands.
- Rodriguez A. R., del Castello H., Sowers G. F. (1988). Soil Mechanics in Highway Engineering. Trans Tech Publication.
- Skempton A.W., Bjerrum L. (1957). A contribution to the settlement analysis of foundations on clay. Géotechnique, Vol.7, n. 4.
- Terzaghi K., Peck R.B.(1948). Soil Mechanics in Engineering Practice. J. Wiley, New York.
- Yeung A. T. (1997). Design Curves for Prefabricated Vertical Drains. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE, Vol.123, n.8.