



HAL
open science

Evaluation des désordres lors d'un creusement de tunnel en site urbain : quelle fiabilité dans les modélisations numériques ?

Yvon Riou, Fabrice Emeriault, Denys Breysse, Bernard Cambou

► To cite this version:

Yvon Riou, Fabrice Emeriault, Denys Breysse, Bernard Cambou. Evaluation des désordres lors d'un creusement de tunnel en site urbain : quelle fiabilité dans les modélisations numériques ?. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 2003, XXV (1-2), pp.255-264. hal-01006821

HAL Id: hal-01006821

<https://hal.science/hal-01006821>

Submitted on 8 Apr 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

EVALUATION DES DÉSORDRES LORS D'UN CREUSEMENT DE TUNNEL EN SITE URBAIN: QUELLE FIABILITÉ DANS LES MODÉLISATIONS NUMÉRIQUES?

YVON RIOU

LGCNSN, Ecole Centrale de Nantes, BP 92101, 44321 Nantes cedex 04. E-mail: Riou@ec-nantes.fr

FABRICE EMERIAULT

URGC Géotechnique, INSA Lyon, 69621 Villeurbanne cedex. E-mail: emeriault@gcu-geot.insa-lyon.fr

DENYS BREYSSE

CDGA, Université de Bordeaux, 33405 Talence cedex. E-mail: denys.breysse@cdga.u-bordeaux.fr

BERNARD CAMBOU

LTDS, Ecole Centrale de Lyon, BP 163, 69131, Ecully cedex. E-mail: Bernard.Cambou@ec-lyon.fr

Résumé: Face à l'évolution sans cesse croissante des centres urbains, les aménageurs ont de plus en plus recours aux infrastructures souterraines. Le maître d'ouvrage se trouve alors en présence d'un sol, objet de sollicitations diverses et offrant des caractéristiques généralement peu favorables à la construction. Dans ces conditions, un calcul numérique peut s'avérer utile afin de fournir des résultats en déplacements. La question, tout à fait légitime, du maître d'ouvrage est alors: Quelle fiabilité accorder à une telle modélisation?

Un premier élément de réponse est fourni par une étude de sensibilité sur les paramètres rhéologiques du sol fournis par divers experts et intégrant, à des niveaux différents, des facteurs de sécurité.

1. INTRODUCTION

Face à l'évolution sans cesse croissante des centres urbains, les aménageurs ont de plus en plus recours aux infrastructures souterraines. Le maître d'ouvrage se trouve alors en présence d'un sol présentant des géométries et stratigraphies complexes, faisant l'objet de sollicitations diverses et offrant des caractéristiques mécaniques généralement peu favorables à la construction. Par ailleurs, des critères drastiques rendent le dimensionnement des ouvrages délicat compte tenu de leur environnement parfois sensible.

Dans ces conditions, un calcul numérique, basé sur des méthodes de résolution par discrétisation, peut s'avérer utile afin de représenter ces géométries complexes et ces sollicitations diverses, de reproduire ces comportements sophistiqués, et de fournir

des résultats en déplacements. La question, tout à fait légitime, du maître d'ouvrage est alors: Quelle confiance accorder à une telle modélisation, si elle a été traitée par une personne ayant toutes les qualités requises pour analyser de manière experte le dossier géotechnique et pour mettre en oeuvre la modélisation sur un code de calcul approprié?

Un premier élément de réponse est fourni par une étude de sensibilité sur les paramètres rhéologiques du sol fournis soit en intégrant à des niveaux différents des facteurs de sécurité, soit par différents experts. Les variations de tassement en surface sont comparées dans les deux cas. L'ouvrage ayant servi de support à cette étude est le prolongement de la ligne *D* du métro de Lyon. Cet ouvrage a été creusé à l'aide d'un tunnelier à pression de boue.

2. PRINCIPE DE L'ÉVALUATION DES ERREURS SUR LE TASSEMENT

2.1. PRINCIPE DE DÉTERMINATION DES TASSEMENTS DE SURFACE: RAPPEL

La modélisation d'un ouvrage souterrain est traitée d'une manière particulière due au fait que les sollicitations agissant sur le revêtement lors du creusement par bouclier sont très complexes et que les phénomènes mécaniques qui se développent sont difficilement maîtrisables.

L'usage courant, en France du moins, est d'assimiler l'opération de creusement à un déconfinement du sol dans une section transversale, caractérisé par un taux de déconfinement appelé λ . Ce taux correspond au relâchement uniforme des contraintes initiales s'exerçant sur les facettes dont l'enveloppe représente le futur gabarit du tunnel. Afin de représenter au mieux les deux phases essentielles du creusement, à savoir le passage de la jupe et le report sur les voussoirs, on considère un premier relâchement sur le tunnel non revêtu jusqu'à un certain taux λ_1 , puis un relâchement complet ($\lambda_2 = 100\%$) sur le tunnel revêtu.

La valeur λ_1 est déterminée par le calage des résultats d'un calcul numérique avec les observations in situ effectuées dans une section amont de l'ouvrage, appelée section de référence. Cette section fait l'objet d'une reconnaissance permettant d'identifier les paramètres rhéologiques et les paramètres stratigraphiques des différentes couches constituant le massif de sol. Une instrumentation de la section de référence fournit par ailleurs le tassement du sol en surface et son évolution dans le temps. Cette mesure servira à la détermination du taux de confinement λ_1 , par calage de la mesure avec les résultats de la modélisation numérique.

Afin d'estimer le tassement le long du projet, ce taux de déconfinement est ensuite appliqué aux sections situées en aval (sections d'étude), sections modélisées

stratigraphiquement et mécaniquement sur la base de reconnaissances généralement moins denses que dans la section de référence.

2.2. CAUSES D'INCERTITUDE DANS LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE

L'opération de calage corrige sur la section de référence:

- toutes les incertitudes attachées à la détermination des paramètres stratigraphiques, des paramètres rhéologiques, et de ceux définissant l'état de contraintes initial;
- les erreurs provenant de la modélisation et notamment les conséquences de certains choix concernant: le modèle conceptuel, la dimension, le modèle de comportement, la méthode de résolution, la discrétisation, les paramètres de la méthode de résolution, l'échelle, les conditions limites, les sollicitations, etc.

Mais on peut s'interroger sur le bien-fondé des résultats numériques obtenus dans les sections d'étude, sachant qu'ils sont fondés sur une reconnaissance incomplète et qu'ils prennent en compte un taux de déconfinement dépendant de l'interprétation des experts, dépendant de la modélisation, et identifié dans une section de référence qui peut différer sensiblement des sections d'étude.

2.3. STRATÉGIE PROPOSÉE POUR L'ESTIMATION DES ERREURS

Dans le cadre du GIS Sol Urbain, le groupe de travail «Ouvrage en site urbain» s'est attaché à étudier la sensibilité des résultats aux paramètres rhéologiques et stratigraphiques, au paramètre caractérisant l'état initial et à la méthode de résolution. Seuls seront présentés les résultats concernant l'incidence, sur les tassements calculés, de l'incertitude associée aux paramètres rhéologiques, tous les autres paramètres étant fixés par ailleurs.

La détermination de ces paramètres intervient à la fois dans la section de référence lors du calage du taux de déconfinement et dans les sections d'étude lors de l'estimation du tassement. L'identification dans la section de référence présente les particularités suivantes:

- Elle est établie sur une reconnaissance du terrain généralement approfondie. L'incertitude sur les données y est en principe moins grande que dans les sections d'étude qui font l'objet de reconnaissances plus sommaires. L'analyse présentée ici considère que les informations géotechniques sont de qualité et que les variations à prendre en compte sur ces paramètres proviennent essentiellement d'interprétations différentes des experts.

- Elle doit être définie sur la base d'un jeu de paramètres rhéologiques «moyen», i.e. pour lequel aucune considération sécuritaire n'est prise en compte. Afin de fournir une surestimation du tassement, on pourrait être tenté, lors de cette étape du calcul, de considérer un jeu de paramètres «pessimiste» privilégiant des résistances et des rigidités faibles. Mais, une telle démarche aurait un effet contraire à celui espéré compte tenu du calage.

Dans les sections d'étude, les données géotechniques sont généralement limitées. De ce fait, il convient d'analyser les différentes valeurs du tassement calculé, en fonction du niveau de sécurité dans la détermination de ces paramètres.

En conséquence, l'étude se divise en deux étapes:

1. Étude de la variation du tassement en considérant dans la section d'étude les jeux proposés par un expert et intégrant différents niveaux de sécurité. Ces calculs sont effectués avec une modélisation de référence décrite dans § 3.1.

2. Étude de l'incidence du taux de déconfinement λ_1 sur cette variation du tassement. Les valeurs du taux de déconfinement sont préalablement déterminées avec des jeux de paramètres rhéologiques fournis par différents experts. On suppose ici que la valeur du taux de confinement définie dans la section de référence est représentative du creusement dans toutes les sections d'étude.

3. PARAMETRES DES MODÉLISATIONS

3.1. MODÉLISATION DE RÉFÉRENCE

L'analyse présentée ci dessus, est appliquée aux observations effectuées sur le chantier de l'extension de la ligne *D* du métro de Lyon. Il s'agit d'un site urbain dans la mesure où il se situe sous une zone habitée. Le tunnel et sa couverture couvrent une zone très hétérogène dont la reconnaissance géotechnique a été largement commentée dans diverses publications: [1], [2], [3]. Nous indiquons, ci-dessous, les données de la modélisation de référence.

Dans le jeu de référence, les caractéristiques mécaniques associées au modèle de Mohr-Coulomb correspondent à un jeu «moyen». Il s'agit de valeurs moyennes brutes, sans sélection préalable des valeurs ni analyse experte: voir tableau 1 [3].

La méthode de résolution de référence est la méthode des éléments finis. Elle a été mise en œuvre sur le code de calcul Cesar-LCPC. Le maillage comporte 4736 éléments T6 et 9649 nœuds. La modélisation numérique s'effectue en 3 phases:

- Phase 0: détermination de l'état de contraintes initial. Faute d'information provenant de mesures sur le site, cet état a été calculé en appliquant des forces de volume sur une configuration correspondant à la situation avant creusement, et en considérant les caractéristiques mécaniques indiquées dans le tableau 1.

- Phase 1: déconfinement jusqu'à un taux λ_1 sur le tunnel non revêtu (3 étapes).

- Phase 2: déconfinement total sur le tunnel revêtu (7 étapes).

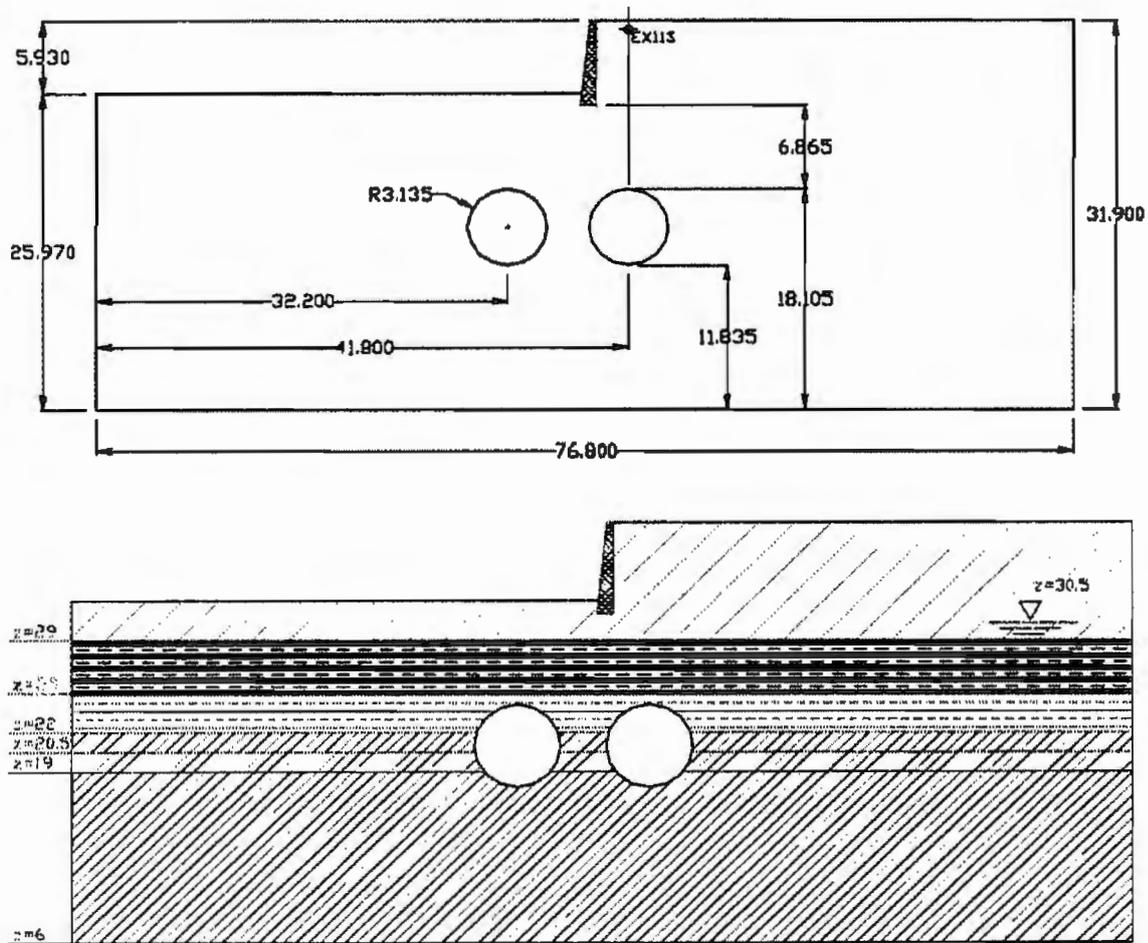


Fig. 1. Configuration du site

Tableau 1

Stratigraphie et caractéristiques mécaniques des différentes couches de sol

Matériau	Cote (m)	E (MN/m ²)	γ (kN/m ³)	ν	C (kPa)	ϕ (degré)	ψ (degré)
Surface (droite)	31,9						
Remblai	23,0	11,2	18,0	1/3	30	38	18
Limon ocre	19,0	15,0	20,3	1/3	0	36	16
Limon gris	16,0	15,0	16,3	1/3	50	22	2
Sables et graviers	14,5	47,7	21,0	1/3	5	35	15
Argile violette	13,0	16,9	18,4	1/3	14	20	1
Sables et graviers	0,0	47,7	21,0	1/3	5	35	15

Position de la nappe: 24,5 NGF.

Le mur comme le revêtement du tunnel ont un comportement linéaire élastique. Lors de la 2^{ème} phase de calcul, le poids volumique déjaugé du tunnel ($-3,2 \text{ kN/m}^3$) est progressivement appliqué et se substitue à celui des terres.

3.2. PARAMÈTRES RHÉOLOGIQUES DES VARIANTES

Les premiers calculs ont montré que le comportement du massif était principalement élastique si on limitait le tassement final en surface à 10,7 mm, valeur observée sur le terrain dans la section de référence. Aussi, nous n'avons étudié que la sensibilité aux valeurs des paramètres élastiques, les autres paramètres étant semblables à ceux de la modélisation de référence. Par ailleurs, compte tenu de l'incidence relativement faible du coefficient de Poisson et de la pratique courante qui tend à lui affecter une valeur constante égale à 1/3, l'étude de sensibilité a essentiellement porté sur le module d'Young.

3.2.1. JEUX DE PARAMÈTRES SUR LA SECTION D'ÉTUDE

Nous rappelons ici brièvement les propositions de jeux dont on trouvera la justification dans [2]. Conformément aux principes exposés précédemment, ces jeux ont été fournis par un même expert et procèdent donc de la même démarche d'identification que celle utilisée pour définir les paramètres de la modélisation de référence. Le seul élément qui les distingue, est le niveau de sécurité pris en compte dans l'estimation du module d'Young.

- Le jeu de paramètres appelé jeu «projet», X_d . Ce jeu intègre un niveau «classique» de sécurité, à savoir qu'il résulte d'une analyse «raisonnablement sécuritaire» des données. Il est établi par une étude statistique et plus particulièrement à partir des courbes des distributions cumulées qui font ressortir des valeurs de paramètres élevées se distinguant des valeurs moyennes. Le jeu X_d , conservatif, est déterminé par une moyenne des valeurs «écrêtées».

- Le jeu de paramètres appelé jeu «caractéristique», X_k . Ce jeu considère à nouveau les valeurs «écrêtées» du jeu X_d , mais intègre un niveau de sécurité bien supérieur puisqu'il résulte de la moyenne réduite d'un écart type. On obtient ainsi un jeu dont les données sont très proches des valeurs les plus basses issues de l'identification: voir tableau 2.

Tableau 2

Modules d'Young des jeux de paramètres «projet» et «caractéristique» (MPa)

	E - jeu «moyen»	E - jeu «projet» X_d	E - jeu «caractéristique» X_k
Remblai	11,2	7,9	4,6
Limon ocre	15,0	6,1	4,0
Limon gris	15,0	6,1	4,0
Sable gravier	47,7	34,4	22,2
Argile violette	16,9	16,0	15,5
Sable gravier	47,7	34,4	22,2

3.2.2. JEUX DE PARAMÈTRES DANS LA SECTION DE RÉFÉRENCE

Pour cette étude, il a été décidé de faire appel à trois nouveaux experts proposant des jeux de paramètres pour les différentes couches de sol. Seuls les modules d'Young ont été traités ici, compte tenu des remarques précédentes. Le tableau 3 in-

dique ces valeurs correspondant à des jeux «projet», à savoir des jeux intégrant une certaine sécurité, et non pas des jeux «moyens» qui permettent de définir le taux de déconfinement. Ces jeux sont de même nature que le jeu «projet» X_d du tableau 2.

Tableau 3

Modules d'Young «projets» proposés par les différents experts dans la section de référence (MPa)

	Expert A	Expert B	Expert C	Expert D
Remblai	8,5	7,8	3,9	7,9
Limon ocre	9,5	7,3	6,5	6,1
Limon gris	9,0	4,2	6,5	6,1
Sable gravier	31,5	28,0	35,2	34,4
Argile violette	11,0	13,8	4,9	16,0
Sable gravier	31,5	28,0	14,4	34,4

L'objectif étant d'évaluer l'incidence de la démarche experte et la sensibilité au coefficient λ_1 sur les tassements, nous avons appliqué la procédure suivante:

- Calcul des coefficients λ_1 avec les quatre jeux experts: Chacune des quatre valeurs est calée sur un tassement de 10,7 mm. Elles ne sont pas très réalistes puisque intégrant une certaine sécurité, mais leurs variations sont significatives.

- Calcul, pour chacun de ces coefficients λ_1 , des écarts de tassement déterminés avec les jeux équivalents X_{moyen} , X_d et X_k associés à chaque expert.

Ne disposant pas des jeux X_{moyen} et X_k , ceux-ci ont été déterminés en appliquant aux jeux «projets» les rapports définis précédemment par l'expert (expert D) ayant analysé la section d'étude: voir tableau 2. Ainsi pour le remblai, nous avons appliqué à la valeur «projet» de chaque expert les rapports (11,2/7,9) et (4,6/7,9) afin de déterminer les jeux «moyen» et «caractéristique». Nous avons fait l'hypothèse que les experts intégraient les mêmes niveaux de sécurité dans leurs variantes sur la section d'étude.

4. VARIATIONS DANS LES TASSEMENTS CALCULES

4.1. VARIATIONS DU TASSEMENT SUR LA SECTION D'ÉTUDE

En considérant la modélisation de référence et le jeu de paramètres «moyen», il a été déterminé, par calage avec le tassement observé (10,7 mm), une valeur de référence du taux de déconfinement: 32,5%. Ce taux appliqué aux deux jeux X_d et X_k a donné des tassements de 20,3 mm et 29,3 mm: voir figure 2.

Ainsi, en considérant une marge de sécurité correspondant à la pratique courante des experts vis-à-vis des paramètres de raideur des différentes couches de sol, la valeur estimée du tassement en surface est deux fois plus élevée que la valeur dite «moyenne». Dans le cas le plus défavorable, le tassement estimé est trois fois plus élevé que cette valeur «moyenne». Il est clair que ces rapports dépendent de la configuration étudiée et qu'on ne pourrait les généraliser à toutes les configurations.

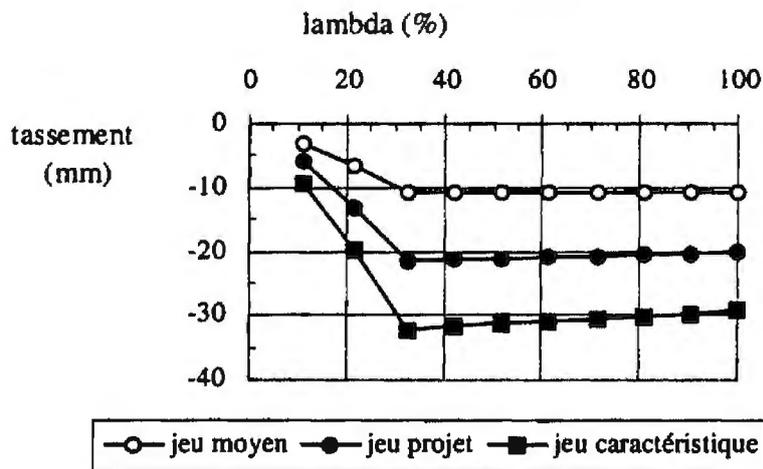


Fig. 2. Evolution du tassement lors du creusement: incidence, sur le tassement en surface, du niveau de sécurité introduit dans la détermination de la raideur élastique

4.2. INCIDENCE DU TAUX DE DÉCONFINEMENT SUR CES VARIATIONS DE TASSEMENT

Comme indiqué dans le chapitre précédent, nous avons associé un taux de déconfinement à chacun des jeux experts: voir tableau 4.

Tableau 4

Valeurs du coefficient λ_1 obtenues avec les 4 jeux «projet» des experts

	Expert A	Expert B	Expert C	Expert D
λ_1	24,4	18,2	20,9	19,5

L'incidence des jeux experts sur les variations du tassement dans une section d'étude a été déterminée en appliquant la procédure définie dans le chapitre 3.2.2. Les résultats sont reportés dans la figure 3.

Ainsi les écarts de tassement (7,97 expert A; 8,96 expert B; 6,7 expert C; 8,85 expert D) peuvent varier dans un rapport allant de 1 à 1,35. Ces variations ne peuvent être justifiées par un raisonnement simple et généralisable à toutes les configurations de sols urbains. On notera également qu'il n'est pas possible d'extrapoler les résultats d'un jeu expert à un autre jeu expert, ou d'un jeu projet à un jeu caractéristique, en raison du caractère élastoplastique plus ou moins prononcé des matériaux, du nombre

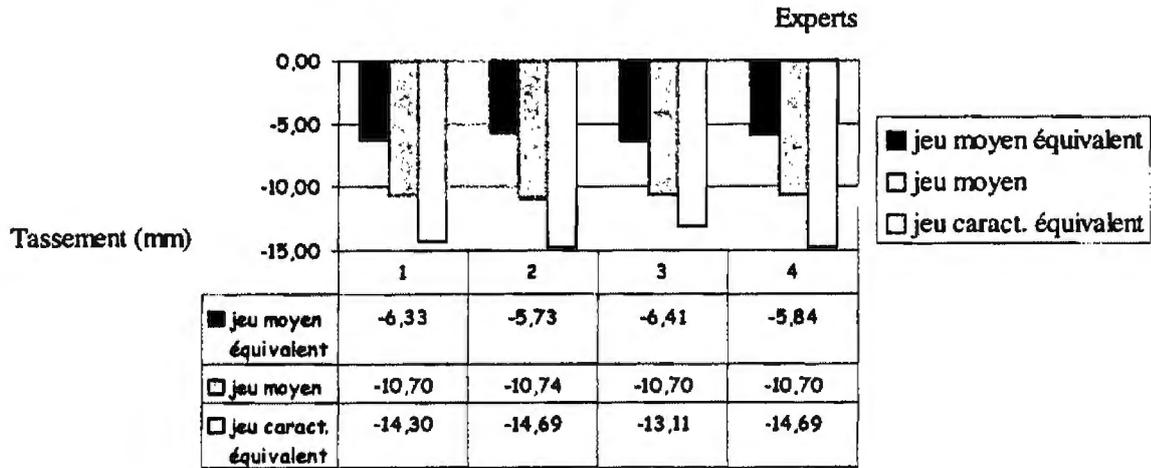


Fig. 3. Variations du tassement en fonction des experts et du niveau de sécurité dans les jeux de paramètres

de paramètres, des rôles différents joués par chacune des couches lors du déconfinement, et des deux phases de modélisation qui génèrent des mécanismes de déformation différents.

5. CONCLUSIONS

En conclusion à cette étude partielle traitant de l'estimation des tassements de surface produits par le creusement d'un tunnel en site urbain, on retiendra principalement que l'incertitude des données d'ordre rhéologique peut se traduire, selon le niveau de sécurité pris en compte par l'expert, par des tassements calculés variant dans des rapports allant de 1 à 3. Par ailleurs, ces rapports eux-mêmes sont susceptibles de varier dans des rapports de 1 à 1,35, suivant les experts.

Une analyse semblable sur les paramètres stratigraphiques, sur l'état de contraintes initial et sur la méthode de résolution est en cours. Ce travail sera poursuivi en intégrant l'incidence du modèle de comportement. Il semble en effet qu'il soit possible de limiter la forte dépendance des résultats vis-à-vis du module d'Young tel qu'il est considéré dans le modèle Mohr-Coulomb et ceci en considérant des modèles de comportement des sols avec écrouissage. Ce travail permettra ainsi de quantifier toutes les erreurs qu'une modélisation numérique peut générer dans une telle configuration, et de hiérarchiser l'ensemble des causes d'erreur.

Il a ensuite été convenu d'appliquer ces résultats à l'ensemble des sections de la ligne D du métro de Lyon pour laquelle on dispose d'une grande quantité d'informations (essais de reconnaissance géotechnique et mesure du tassement en surface). Cette confrontation permettra de juger de la pertinence de l'analyse proposée dans ce document et des hypothèses qui ont été faites, à savoir notamment celles concernant l'état de contraintes initial et le taux de déconfinement supposés constants sur

l'ensemble du projet. Elle pourra notamment fournir des indications sur la longueur de projet pour laquelle ces hypothèses sont valides. Cette information qui caractérise un sol urbain, est importante pour les maîtres d'ouvrage. Elle donne une indication sur la fréquence de réactualisation du taux de déconfinement.

REMERCIEMENT

Ce travail a été mené dans le cadre du GIS Sol Urbain, projet «Ouvrages en site urbain».

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] BERNAT S., *Modélisation du creusement d'un tunnel en terrain meuble. Qualification sur chantier expérimental*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, France, 1996.
- [2] EMERIAULT F., BREYSSE D., RIOU Y., CAMBOU B., *Prédiction des mouvements induits par les travaux souterrains en milieu urbain: mise au point d'une stratégie de reconnaissance et quantification des sols*, 1ères Rencontres du Réseau Doctoral Génie Civil, 31 janvier–2 février 2000, Aussois – France.
- [3] OLLIER C., *Etude expérimentale de l'interaction sol–machine lors du creusement d'un tunnel peu profond par tunnelier à pression de boue*, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, France, 1997.