

MODELISATION DES DEFORMATIONS D'UNE FOUILLE A PROXIMITE IMMEDIATE D'UN TUNNEL ET DE BATIMENTS

MODELLING OF EXCAVATION-INDUCED DEFORMATION ON A SUBWAY TUNNEL AND NEARBY BUILDINGS

Rémi DELUZARCHE¹, Cristina NOGUE SANCHEZ², Vincent SAVATIER

¹ EGIS géotechnique, agence de Balma, France, remi.deluzarche@egis.fr

² EGIS géotechnique, agence de Balma, France, cristina.nogue-sanchez@egis.fr

³ EGIS géotechnique, agence de Balma, France, vincent.savatier@egis.fr

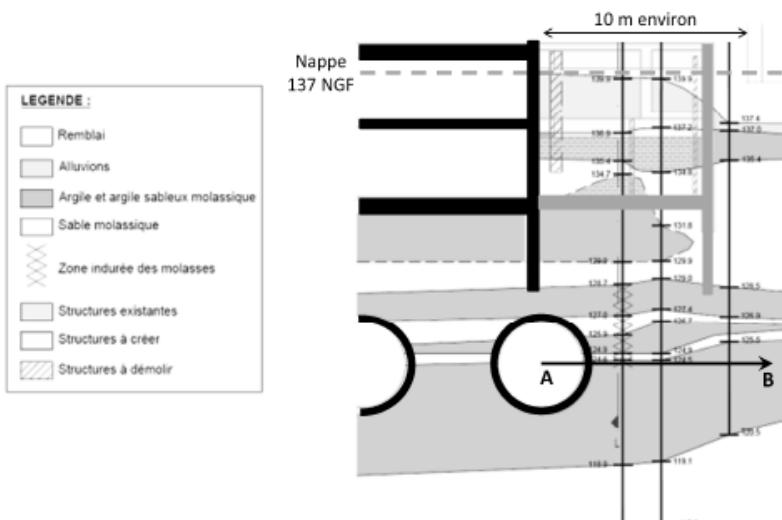
RÉSUMÉ – Cet article présente la modélisation de l'extension de la Station Jean-Jaurès du métro toulousain, et des dispositions constructives particulières retenues pour limiter au maximum les déplacements sur le tunnel du métro et le bâti avoisinant. Un modèle de comportement en petites déformations (HMSs, défini en détails dans un autre article) est utilisé ; son intérêt par rapport à d'autres modèles de sol est discuté.

ABSTRACT – This article presents the modeling of an extension to Jean-Jaures station, in Toulouse. Specific construction arrangements have been defined to minimize the deformations on the nearby subway tunnel and buildings. A small strain model is used (HMHs – model definition is described in another article); its interest, compared to other models is discussed.

1. Introduction et présentation du projet

Dans le cadre du projet de doublement de la capacité de la ligne A du métro de Toulouse, la station Jean Jaurès, située à l'intersection des deux lignes de métro, fait l'objet d'un projet d'extension pour améliorer les flux de voyageurs. La nouvelle zone d'échange d'environ 30mx10m sera créée à l'arrière de la paroi moulée existante, dans un espace très contraint par la présence d'immeubles à moins de 1,5m de la future paroi moulée.

Comme on peut le voir sur la figure ci-après, les travaux seront réalisés à proximité immédiate de l'un des deux tubes du tunnel de la ligne A, le fond de fouille se trouvant à 6 m au-dessus du tunnel. L'autre particularité est le fait que la paroi moulée existante est fondée à moins de 1 m au-dessus du même tunnel. Des injections ont par ailleurs été réalisées entre la pointe de la paroi moulée et la voûte du tunnel pour assurer l'étanchéité de la station ; on peut ainsi considérer que la paroi moulée repose sur la voûte du tunnel.



L'influence des travaux sur le tunnel et sur les bâtiments avoisinants est l'un des enjeux principaux de ce projet dont le démarrage est prévu au printemps 2018.

La géologie du site est caractérisée par une couverture de remblai et d'alluvions limoneuses sur 5m environ, puis par les molasses du Stampien. Ces formations d'origine palustre sont constituées d'une alternance de couches argileuses ou marneuses très raides, et de bancs de sables, parfois grésifiés, souvent propres. Ces formations sont très fortement consolidées et présentent des modules très élevées.

Compte tenu des très fortes contraintes du projet, une analyse en petite déformation a été retenue pour appréhender au mieux le comportement des molasses, et ne pas pénaliser la conception du projet par des calculs de déformations excessives.

Une modélisation du projet a été réalisé sous Plaxis 2D. Le modèle de sol utilisé est le Hardening Soil Model Small (HSMs). Ce dernier permet la prise en compte de l'évolution des modules de compression et de cisaillement des sols en fonction du niveau de déformation.

Pour définir les paramètres de sol du modèle HSMs, une campagne de reconnaissances spécifique a été réalisée. L'analyse de cette campagne est l'objet de l'article : « Variation des modules en fonction du niveau de déformation d'après des essais in-situ et des essais de laboratoire », rédigé par V. Savatier et al. (2018).

Dans un premier temps, seront exposés les principaux paramètres utilisés dans le calcul Plaxis. Ensuite, les hypothèses principales de conception de la station seront évoquées. En dernier lieu, une comparaison des résultats obtenus suivant plusieurs types de modèles sur Plaxis sera réalisée.

2. Calage des paramètres du modèle HSMs

2.1. Définition des trois modules

Dans le modèle HSM (Hardening Soil model) de Plaxis, on définit trois modules :

- un module de chargement E_{50} à 50% du déviateur maximal,
- un module de déchargement en grande déformation, caractérisant le domaine élastique, E_{ur} ,
- un module œdométrique E_{oedo}

Dans les molasses, le module de déchargement E_{ur} pour des grandes déformations est pris égal au module de cyclique pressiométrique E_r . L'analyse de ces essais (Savatier et al. 2018) a montré, qu'on pouvait distinguer selon la nature des molasses :

- Dans les faciès sableux et limoneux ($\alpha = 0.33$ à 0.5) : $E_{ur} = E_r = 2.4 \text{ Em}$
- Dans les faciès argileux (coefficient rhéologique $\alpha = 0.66$ à 1.0) : $E_{ur} = E_r = 1.6 \text{ Em}$

L'analyse des essais triaxiaux CD a montré que l'on pouvait déterminer E_{50} à partir de E_{ur} en retenant un coefficient de proportionnalité conforme aux valeurs données dans la littérature : $E_{50} = E_{ur} / 3.0$

Le module œdométrique est déduit du module E_{50} par la relation :

$$E_{oedo} = E_{50} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (1)$$

Où ν est le coefficient de Poisson dans le domaine élastique. Le modèle HSM ne permettant pas de définir un coefficient de Poisson variable (alors que les mesures montrent que celui-ci est proche de 0.5 en petites déformations et de 0.2 en grandes déformations), c'est le coefficient de Poisson en grande déformation (0.2 pour les molasses, 0.33 pour les alluvions et les remblais) qui a été retenu.

2.2. Caractéristiques à petites déformations

Le modèle « HMSs » permet de modéliser la variation des modules de déformation avec le niveau de contrainte, selon le principe de la loi de Hardin et Drnevich (1972) :

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + a \left(\frac{\gamma}{\gamma_{0,7}} \right)} \quad (2)$$

Celle-ci est définie par les trois paramètres G_0 (module de cisaillement en petites déformation), $\gamma_{0,7}$ (déformation de distorsion à 70% du module maximum), et a (caractérisant la courbure). Des mesures de module réalisées au cross-hole (module dynamique E_{dyn} à petite déformation : $\gamma = 10^{-5}$) et à l'essai pressiométrique cyclique (module E_r , $\gamma = 10^{-2}$) ont permis de caler le paramètre $a/\gamma_{0,7} = 760$.

2.3. Evolution des modules avec le confinement

Les valeurs de modules calculées au paragraphe 2.1. le sont pour l'état de contrainte effective en place, définit par : $\sigma'_1 = \sigma'_{v0}$ et $\sigma'_3 = \sigma'_{h0} = K_0 \sigma'_{v0}$

- Dans les remblais et alluvions, $K_0 = 1 - \sin \varphi'$ (formule de Jacky)
- Dans les molasses, $K_0 = 0.8$ (valeur issue d'expérimentation réalisée lors de l'étude de la station Esquirol)

Dans Plaxis, les modules du modèle HMSs répondent à trois lois de variation différentes définies ci-après :

Le modèle HSMs définit différentes lois de croissance des modules en fonction de l'état de contrainte :

- Pour les modules E_{50} et E_{ur}

$$E_{50} = E_{50ref} \left[\frac{\sigma'_3 + c' \cotan \varphi'}{p_{ref} + c' \cotan \varphi'} \right]^m \quad (3)$$

- Pour le module E_{oed}

$$E_{oed} = E_{oedref} \left[\frac{\sigma'_3 / K_0^{nc} + c' \cotan \varphi'}{p_{ref} + c' \cotan \varphi'} \right]^m \quad (4)$$

- Pour le module G_0

$$G_0 = G_{0ref} \left[\frac{\sigma'_1 + c' \cotan \varphi'}{p_{ref} + c' \cotan \varphi'} \right]^m \quad (5)$$

Avec :

- φ' : angle de frottement du sol à long terme
- c' : cohésion effective
- σ'_3 : contrainte principale mineure effective. On retient $\sigma'_3 = \sigma'_{h0}$ à mi-couche
- σ'_1 : contrainte principale majeure effective. On retient $\sigma'_1 = \sigma'_{v0}$ à mi-couche
- K_0^{nc} : coefficient de poussée des terres au repos pour un sol normalement consolidé (formule de Jacky) – c'est cette valeur qui est utilisée (et non K_0) pour la loi oedométrique, car c'est elle qui définit l'état de contrainte sur le courbe de compression vierge.
- p_{ref} est une contrainte de référence qui est fixée par convention – elle est la même pour les trois lois d'évolution des modules. On retient usuellement $p_{ref} = 100$ kPa (valeur par défaut de Plaxis)

- m est un coefficient pris égal à :
 - $m = 0.8$ pour les argiles et limons ($\alpha=0.5$ à 0.67), valeur issue des essais triaxiaux CD et conforme aux valeurs retenues pour ce type de sols,
 - $m = 0.5$ pour les sables et graves ($\alpha=0.33$) – il s'agit de la valeur usuellement retenue pour ce type de sol ; elle n'a pas été directement mesurée dans le cadre du projet.

Les valeurs de $E_{50\text{ref}}$, E_{urref} , E_{oedref} et G_{oref} sont alors calculés pour chaque couche unitaire en fonction de l'état de contrainte et des valeurs de modules définies à ces profondeurs.

3. Hypothèses de conception de la station

3.1. Limitation des charges sur la paroi moulée existante

La paroi moulée existante, derrière laquelle est réalisée l'extension, est fondée à 1m environ de la clé de voûte du tube du tunnel de la ligne A du métro de Toulouse. Dans la configuration actuelle, les charges verticales apportées par la structure de la station sur la paroi moulée sont reprises par le radier de la station.

Compte tenu des risques induits sur le tunnel et des risques de défaut en pointe, une solution permettant de limiter au maximum le report des charges verticales sur cette paroi a été étudiée. Cette solution consiste à reporter les charges verticales sur une structure porteuse réalisée devant la paroi moulée existante mais indépendante de celle-ci (en noir sur la figure ci-dessous), et reposant sur un nouveau radier :

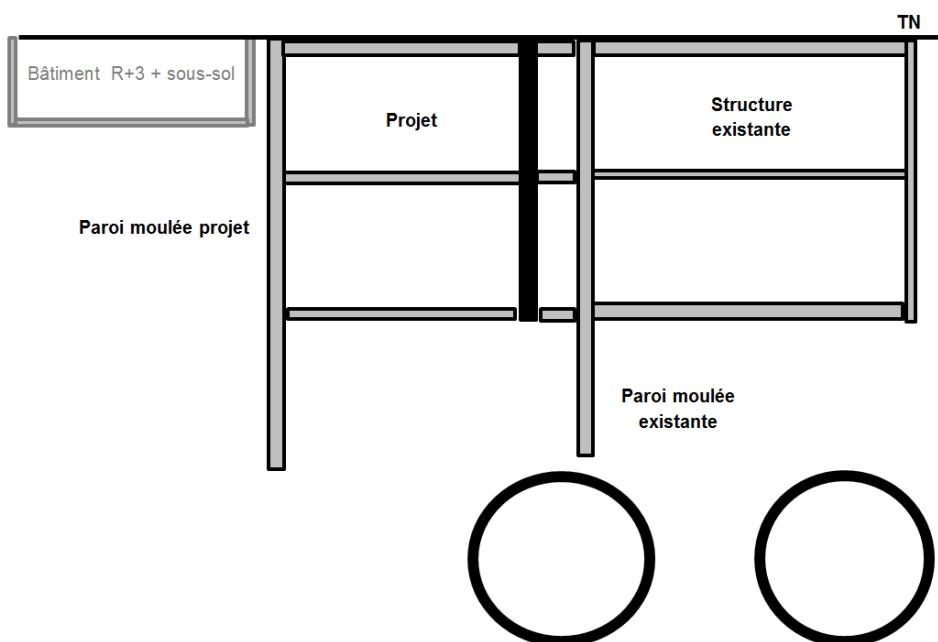


Figure 2. Schéma de principe du projet

La fouille sera réalisée de façon classique en butonnant la nouvelle paroi moulée sur l'ancienne, au moyen de trois lits de butons disposés au-dessous des futurs niveaux de planchers. La nouvelle structure de l'extension sera construite en maintenant ce butonnage. Le contact entre la nouvelle structure est la paroi moulée existante ne s'établit que lorsque les butons sont retirés ; des charges verticales peuvent alors être transmises par frottement ; elles sont limitées au charges de service apportées après l'enlèvement des butons.

3.2. Bâti existant

Les bâtiments avoisinants sont des immeubles élancés (R+3) en structure maçonnerie avec un niveau de sous-sol. Ils sont portés par des fondations superficielles espacées de 5 m. Ces dernières sont modélisées par des charges ponctuelles linéaires appliquées au niveau du sous-sol.

Les travaux étant réalisés à proximité immédiate des bâtiments (moins de 2m), ces derniers sont classés très sensibles aux déformations. Un seuil de déformation acceptable pour la conception des ouvrages de 5 mm de tassement absolu a ainsi été défini.

4. Modélisation de la station et présentation des résultats

4.1. Modèles de calcul

L'étude de la station a été menée sur la base de trois modèles numériques : « Mohr-Coulomb », Hardening Soil et Hardening Soil Small.

Le « modèle de Mohr-Coulomb » (MCM), est un modèle élastique linéaire parfaitement plastique qui fait intervenir les paramètres suivants :

- Module d'Young et coefficient de poisson (caractère élastique)
- Cohésion, angle de frottement et angle de dilatation (caractère plastique)

Il s'agit d'un modèle simple, mais mal adapté au calcul des écrans de soutènement, en particulier pour ce qui concerne la détermination des tassements en tête d'écran.

Dans le cas du modèle Hardening Soil (HSM), le critère de rupture est également un critère de rupture de Mohr Coulomb. Cependant, le mécanisme plastique avec écrouissage cinématique permet de modéliser plus fidèlement le comportement du sol.

Comme expliqué au paragraphe 2, le modèle finalement retenu pour la conception de l'extension de la station est un modèle « HSMs » qui permet d'affiner le calcul des déformations en prenant en compte l'augmentation du module de cisaillement sous petites déformations.

4.2. Présentation des résultats

Les enjeux principaux de l'étude concernent le bâti existant, le tunnel ainsi que la paroi moulée créée. Les résultats obtenus sur chacun de ces éléments de structure sont présentés dans ce paragraphe à trois stades différents du projet :

- État actuel avant travaux
- Excavation fond de fouille (correspondant au dernier niveau de sous-sol)
- État final, après travaux

4.2.1. Tassements du bâti

On rappelle que le critère à respecter pour le bâti est un déplacement maximum de 5 mm par rapport à l'état actuel. Les résultats obtenus pour chaque modèle de sol sont présentés ci-après.

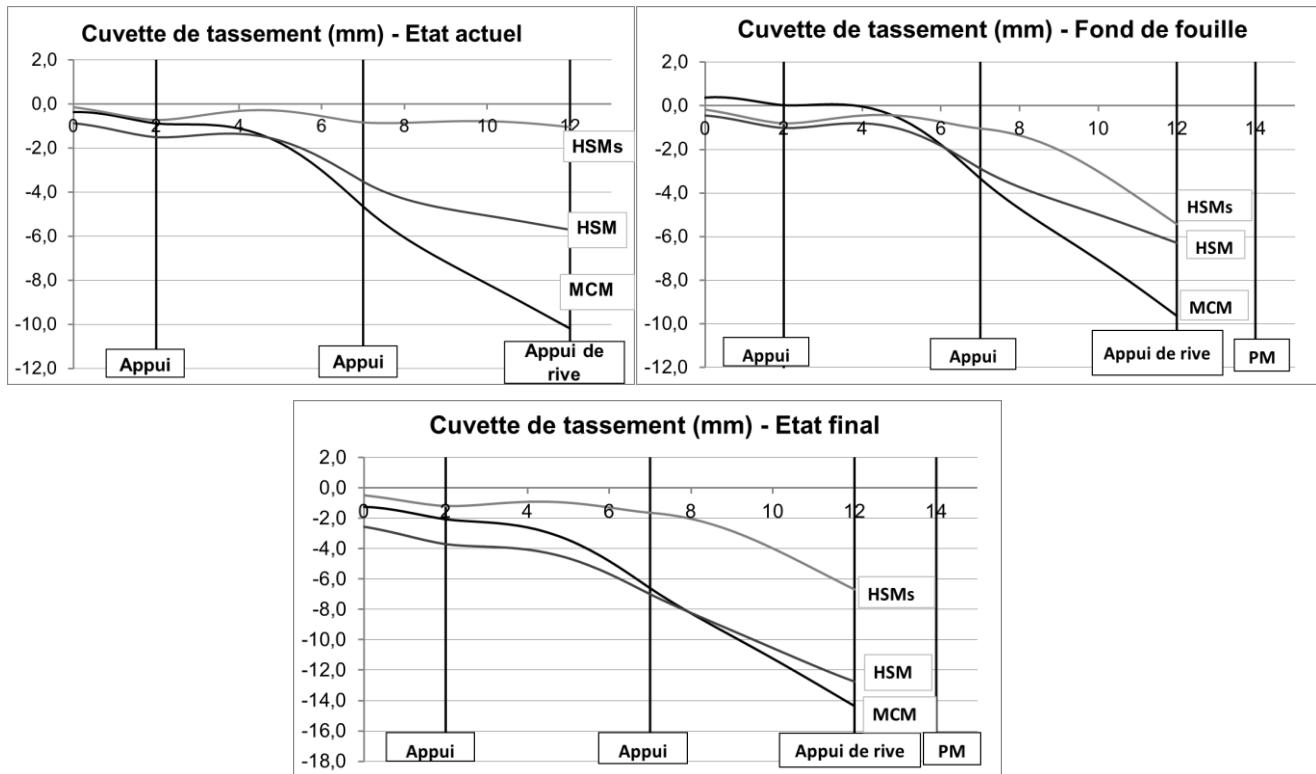


Figure 2. Tassement du bâti (tassements cumulés depuis l'état préexistant jusqu'à la fin des travaux d'extension).

Les écarts entre les différents modèles sont significatifs : le modèle HSMs montre que la station existante a eu très peu d'impact au niveau des bâtiments, alors que le modèle MCM montre un tassement significatif dû à la mobilisation de la poussée. Au contraire, les travaux d'extension à proximité immédiate des bâtiments auront un impact significatif avec le modèle HSMs lors des terrassements au fond de fouille, alors que le modèle MCM montre un gonflement des terrains (de 10mm à 9.5mm) qui est uniquement dû à un modèle inadapté (sans mobilisation du critère de rupture, la réduction de la contrainte moyenne entraîne un gonflement).

Au final, on peut constater que le modèle HSMs permet d'obtenir des déformations plus faibles que les autres modèles : le tassement du bâti induit par les seuls travaux d'extension est de l'ordre de 5 mm pour les courbes HSMs contre 7 mm pour le modèle HSM et 12 mm pour le « modèle de Mohr Coulomb ». Le constat est similaire en ce qui concerne les déplacements horizontaux.

4.2.2. Impact sur le tunnel

Les critères à respecter en termes de déplacements et de convergence au niveau du tunnel sont respectivement 1,5 cm maximum et $\Phi/1000$ maximum, soit 0,45%. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant. Les variations de contrainte dans les voussoirs du tunnel sont limitées par le cahier des charges à 15%.

Tableau 1. Déplacement du tunnel

Déplacement (cm) (absolu)	Modèle de sol					
	Mohr-Coulomb		Hardening Soil		Hardening Soil Small	
Phases	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
Etat actuel	0,1	0	0	0	0	0
Fond de fouille	0,8	0,2	0,9	0,2	0,3	0,1
Etat final	0,1	0	0,1	0	0	0

Tableau 2. Convergence du tunnel

Convergence (valeur absolue)	Modèle de sol		
	Mohr-Coulomb	Hardening Soil	Hardening Soil Small
Etat actuel	0,03%	0,03%	0,03%
Fond de fouille	0,08%	0,08%	0,05%
Etat final	0,04%	0,04%	0,04%

On constate que le modèle HSMs permet d'obtenir des déplacements du tunnel plus raffinés par rapport au modèle HSM. En effet, sous très faibles déformations, le module de cisaillement du sol est différent entre ces deux modèles, ce qui explique la différence observée pendant la phase d'excavation au fond de fouille.

En tout état de cause, les modules très élevés des molasses donnent lieu à des déplacements très faibles, quelle que soit la méthode de calcul.

Les graphiques suivants montrent la distributions des contraintes normales en extrados des voussoirs du tunnel en fonction des phases de travaux

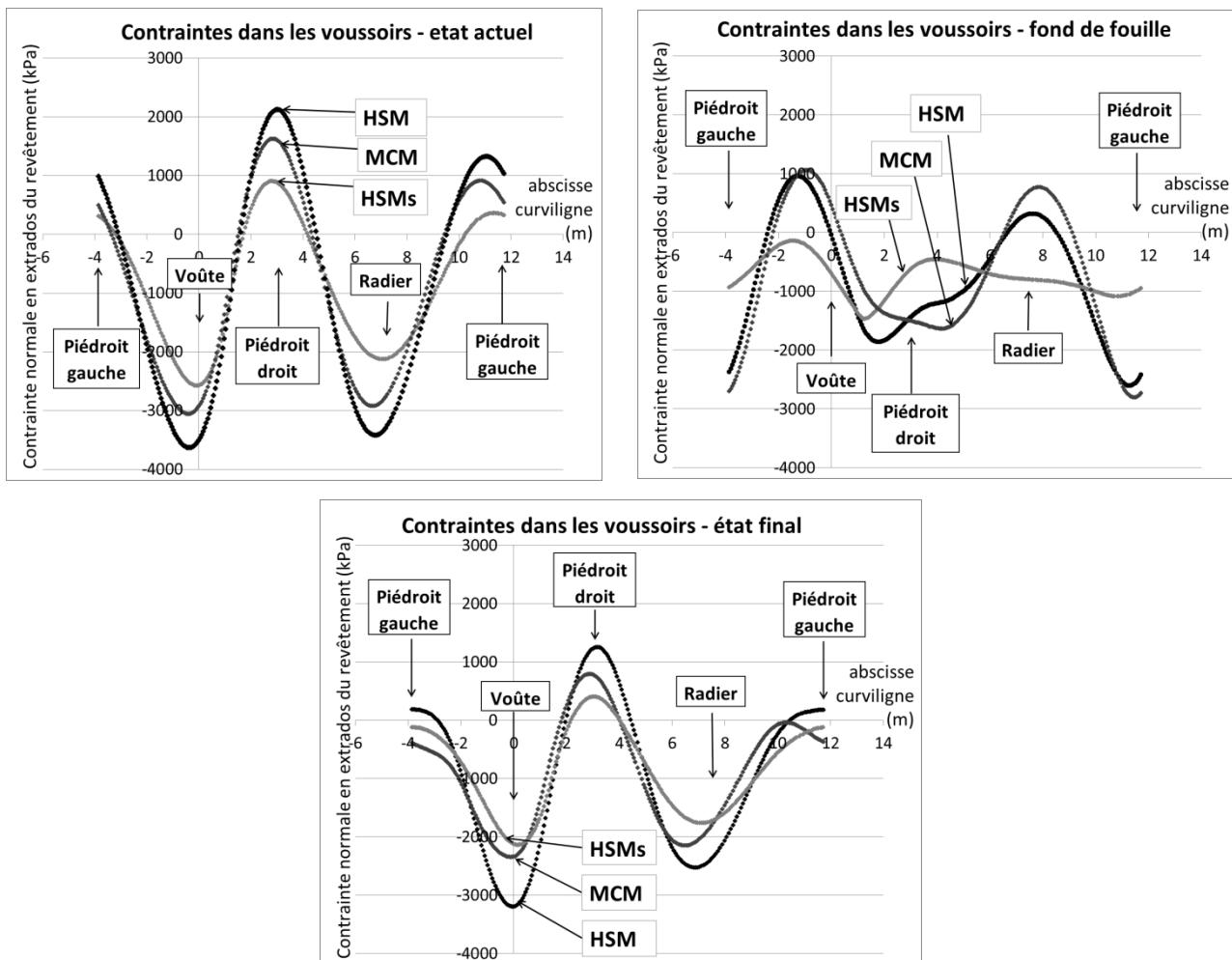


Figure 3. Contraintes dans les voussoirs du tunnel (extrados)

On constate que, quel que soit le modèle, la distribution des contraintes est très hétérogène sur la périphérie du tube. Ceci s'explique d'une part par la dissymétrie du site (terrain excavé côté station et non excavé côté bâtiments), mais également par la présence de la pointe de la paroi moulée au voisinage immédiat de la voûte.

La réalisation de l'extension a une influence considérable sur cette distribution, bien au-delà des seuils fixés par la maîtrise d'ouvrage. Les modèles MCM et HSM montrent tous deux une inversion des pics de contrainte entre les piédroits et le radier. Au

contraire, le modèle HMSs montre que lors de l'excavation au fond de fouille, les voussoirs passent entièrement en compression avec une contrainte presque uniforme, ce qui est une configuration somme toute plus favorable.

Dans la configuration définitive, les trois modèles concordent à montrer une distribution de forme similaire à celle de l'état existant, mais avec une réduction substantielle des niveaux de contrainte ; le modèle HMSs montre les variations les plus faibles par rapport à l'état initial (écart de 540 kPa pour le modèle HMSs – 950 kPa pour le modèle HMS). Cette variation, bien que dépassant les seuils fixés par le Maître d'ouvrage, a été jugée acceptable, moyennant la surveillance du métro.

4.2.3. Déplacements de la paroi moulée projet

On rappelle que le critère à respecter pour le bâti est un déplacement en tête maximum de 5mm. Les déplacements obtenus avec le modèle HSM restent en deçà des seuils admissibles, avec notamment des déplacements très faibles au niveau de la fiche de la paroi, que l'on ne retrouve pas avec les autres modèles.

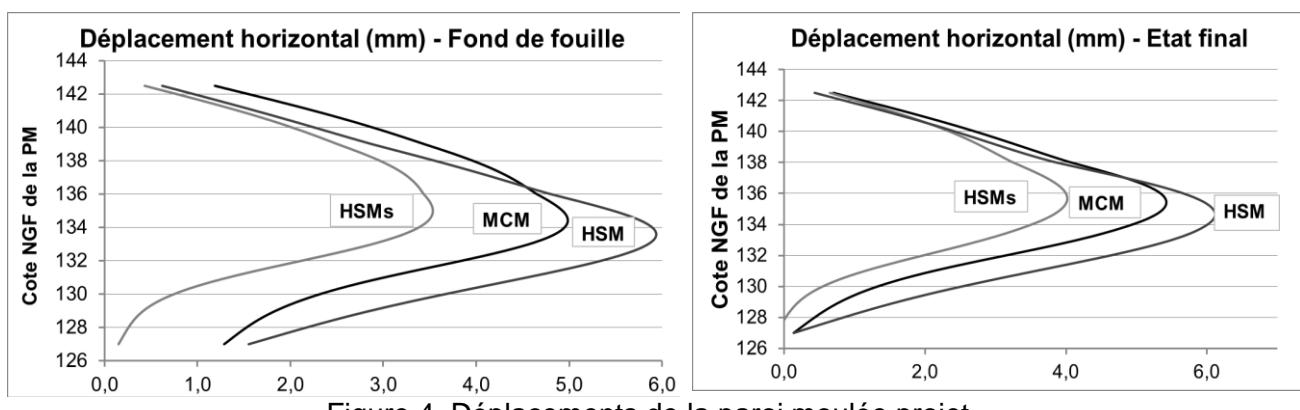


Figure 4. Déplacements de la paroi moulée projet

5. Conclusion

L'utilisation d'un modèle rhéologique permettant d'appréhender précisément le comportement du sol dans le domaine des petites déformations a permis de trouver une conception de l'extension de la station Jean Jaurès permettant de respecter les seuils de déformations sur les avoisinants. Sans l'utilisation d'une approche en petite déformation, les déplacements auraient été jugés inacceptables, et il aurait été nécessaire d'intervenir sur les avoisinants pour les renforcer.

D'une manière plus générale, ce type d'approche paraît pertinent pour des projets où les contraintes en termes de déplacement sont très fortes, et dans le cas de sols raides où les déformations resteront faibles. Il est alors intéressant d'investir dans une campagne géotechnique spécifique pour permettre de définir un tel modèle.

6. Références bibliographiques

Hardin B.O., Drnevich V.P., 1972. Shear modulus and damping in soils. Measurement and parameter effects. *J. Soil Mech. Found. Div.*, ASCE, 98(6), 603-624.
 Plaxis 2D. Reference manual. (2015)
 Savatier V. Deluzarche R., Serratrice J.F. Variation des modules en fonction du niveau de déformation d'après des essais in-situ et des essais de laboratoire. Application au métro toulousain. JNGG 2018