

Projet Eléments finis appliqués aux Ouvrages Géotechniques



*Etude de l'impact du creusement d'un tunnel sur des structures avoisinantes :
Cas du chantier du prolongement du métro de Lyon (ligne B)*

SOMMAIRE

I Objectifs de l'étude.....	3
II Modélisation en éléments finis.....	3
II.1/ maillage du modèle.....	3
II.2/ Caractéristique du sol.....	5
II.3/ Procédure de Calcul.....	5
II.3.1 Etape 1 : Initialisation des contraintes géostatiques et vérification des conditions limites.....	6
II.3.2 Etape 2: Excavation du tunnel.....	6
II.3.3 Etape 3: Mise en place des voussoirs.....	7
II.3.4 Etape 4: Mise en place du radier.....	7
III Première étude : Construction du Tunnel.....	7
III.1 Scénario 1 : RP et $\lambda_p = 0.2$	7
III.1.1 Vérification condition limites et chargement.....	7
III.1.2 Excavation du Tunnel.....	8
III.1.3 Pause du voussoir et du radier.....	9
III.1.4 L'évolution des tassements au cours de la conception.....	10
III.2 Comparaison des différents scénarios.....	11
III.3 Comparaison avec d'autre maillage.....	12
IV Deuxième étude : Influence du coefficient de poussé des terres au repos K_0	14
IV.1 Résultats obtenus.....	14
IV.2 Commentaires et analyse de l'influence de K_0	14
V Troisième étude: Confrontation des résultats numériques aux mesures in-situ.....	16
V.1 Recherche du coefficient λ_p lors de l'excavation.....	16
Nous reprenons nos phases de calcul de la première partie avec un $K_0 = 0.5$, nous cherchons un.....	16
V.2 Vérification du coefficient λ_p choisie après pose des voussoirs.....	17
V.3 Conclusion sur la modélisation.....	20

I Objectifs de l'étude

L'objectif est la modélisation d'un passage d'un tunnelier pour évaluer les conséquences sur les structures environnantes. Le cas étudié est celui du prolongement de la ligne B du métro lyonnais. La méthode utilisée a été celle du tunnelier à pression boue, solution justifiée par le passage de la future ligne de métro sous le Rhône. Une zone sensible sera étudiée : Le passage sous les lignes SNCF (Lyon-Givors). En effet de faible tassement suffisent à sensibiliser ce type d'infrastructure d'où le besoin d'une vérification.

La méthode utilisée sera la méthode numérique par éléments finis. Le programme utilisé sera CLEO2D avec le code CESAR_LCPC. Nous établirons dans un premier temps les hypothèses pour établir un maillage de notre modèle le plus fiable et le plus rapide possible. La première phase modélisera le comportement lors du creusement selon les hypothèses de l'énoncé. La deuxième phase soulignera l'importance des coefficients de poussés. Enfin la troisième phase nous permettra de comparer les résultats numériques après pose du soutènement à ceux mesuré lors du chantier enfin d'analyser et critiquer notre modèle.

II Modélisation en éléments finis

II.1/ maillage du modèle

Nous sommes dans le cas d'une étude tridimensionnel en raison de l'environnement d'étude (ouvrage à la surface, irrégularité du terrain) et des phénomènes physiques d'un creusement de tunnel (noyau du terrain, extrusion du front de taille, évolution du déconfinement).

Cependant dans le but de simplifier l'étude nous nous ramèrons à une étude en 2 dimensions, c'est-à-dire par la modélisation d'une section courante de Tunnel. Pour cela le massif sera considéré comme infini dans la longueur du tunnel afin de justifier une étude en déformation plane. Pour la hauteur du modèle nous nous arrêterons à 40 m de profondeur, profondeur ou le terrain est un socle granitique et où l'on emmétra l'hypothèse que les déformations sont nulles. Pour la largeur les données empiriques conseillent de modéliser un massif 10 fois plus large que le diamètre du tunnel. Le tunnel faisant 9.5m, nous modéliseront un massif de 95m de large (-47.5, 0, 47.5).

La voie SNCF est perpendiculaire au tracé du tunnel, nous ne modéliserons pas la voie. La mesure des déformations verticales en surface nous permettra de voir si le creusement du tunnel pose problème.

Les dimensions du tunnel ainsi que du terrain sont données sur le schéma suivant :

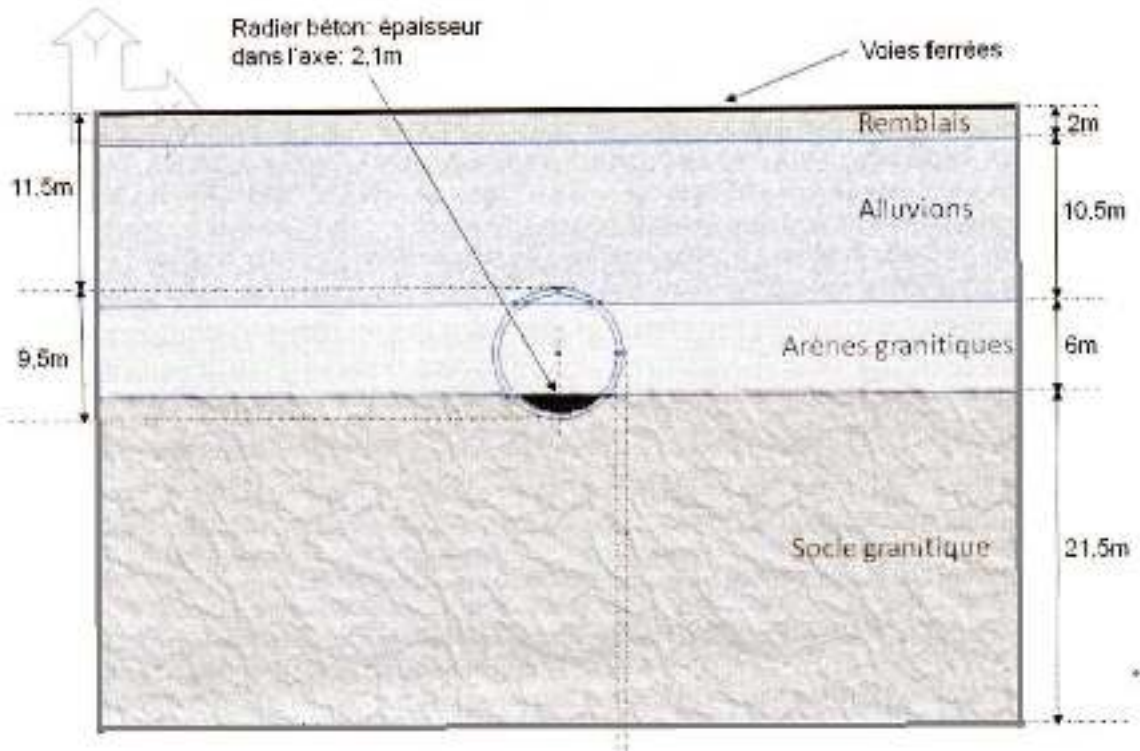


Figure 1 : Coupe du terrain étudié

La modélisation proposée avec le programme sera donc la suivante :

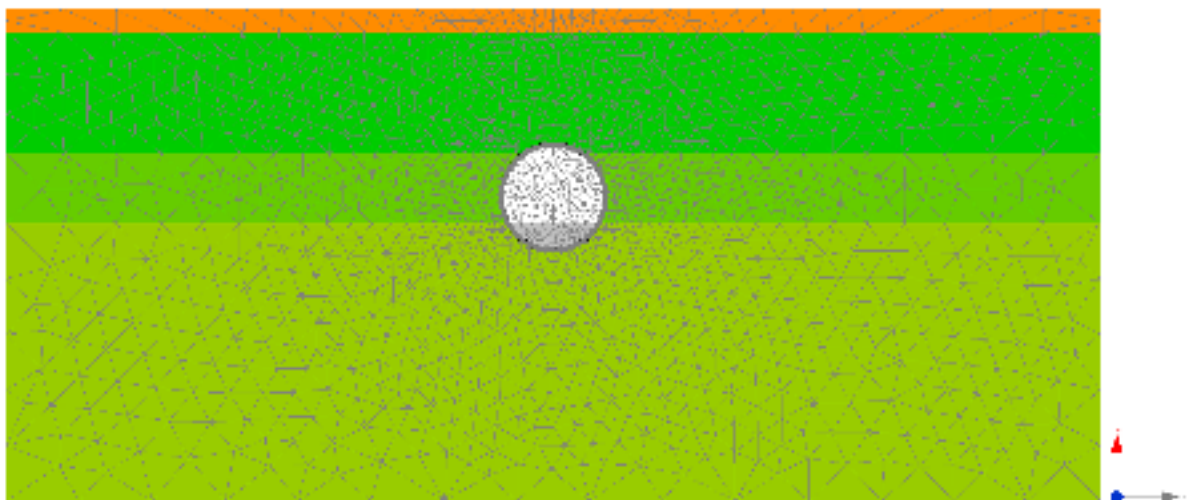


Figure 2 : Le maillage du modèle étudié

Données du maillage :

Hauteur	40m
Largeur	95m
Nombres d'éléments	3013
Nombre de Nœuds	6106

II.2/ Caractéristique du sol

Dans le cadre de notre projet de modélisation, nous ne considérerons que le cas du comportement à long terme du terrain. Le comportement mécanique des différentes couches de sol est supposé de type élastique plastique parfait et vérifiant le critère de Mohr Coulomb.

Nous utiliserons ce critère pour définir les caractéristiques du terrain qui se résume dans le tableau ci-dessous :

	Remblais	Alluvions		Arènes granitiques		Socle granitiques	
		RP	P	RP	P	RP	P
Masse volumique (kg/m ³)	1900	1900	1900	2400	2400	25000	2500
E (MPa)	10	40	10	120	80	1000	500
C' (kPa)	1	20	10	0	20	180	100
f' (°)	25	35	30	35	30	45	40
y' (°)	8	12	0	10	0	10	5
ν	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
K0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Tableau 1 : caractéristiques mécaniques des différents éléments de sol présent au droit des voies ferrées

Les sols seront étudiés dans deux cas **RP** (Relativement Prudent) et **P** (Pessimiste) afin de bien analyser les différents scénarios de tassement possible.

Les voussoirs pour le soutènement du tunnel et le béton de radier aux comportements supposé élastique linéaire parfait sont résumés dans le tableau suivant :

	Voussoir	Radier
Masse volumique (kg/m ³)	2200	2400
E (MPa)	30000	25000
ν	0.2	0.2

Tableau 2 : caractéristiques mécaniques des bétons de voussoirs et de radier

Le coefficient de poussée des terres au repos K0 pour les différentes couches sera égal à 0.5 pour la première et troisième partie. Dans la deuxième partie nous modifierons ce coefficient pour analyser son influence sur les résultats.

Une adhérence parfaite entre les différents éléments de structure et le sol sera supposé. Ceci nous permettra de ne pas prendre en compte les éléments de surface et travailler avec le module de calcul MCNL du code César-LCPC.

II.3/ Procédure de Calcul

Pour modéliser le comportement du terrain au passage du Tunnelier Agathe nous proposons de procéder en 4 étapes.

- Etape 1 : Initialisation des contraintes géostatiques et vérification des conditions limites
- Etape 2 : Excavation du tunnel
- Etape 3 : Mise en place des voussoirs
- Etape 4 : Mise en place du radier

Les calculs seront faits en phasage avec reprises déplacements entre l'étape 2 et 4.

II.3.1 Etape 1 : Initialisation des contraintes géostatiques et vérification des conditions limites

Les conditions limites resterons les mêmes pour chaque étape. Elles se résument:

- Au blocage des mouvements verticaux sur la face inférieure du modèle
- Au blocage des mouvements horizontaux sur les faces latérales du modèle

A chaque étape de calcul, il sera nécessaire de vérifier ces conditions en analysant les déplacements u et v selon les lignes suivantes :

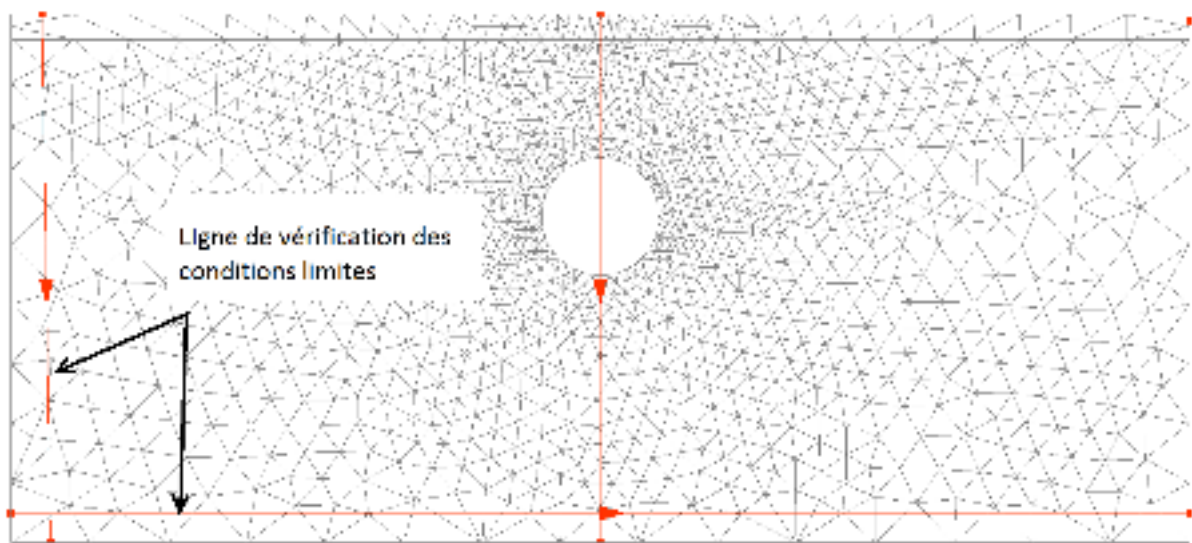


Figure 3 : Conditions limites du modèle

La première étape s'illustre par la mise en place des contraintes géostatique avant le creusement du tunnel. On applique la pesanteur aux différentes de couche égale à -9.81 m/s^2 . Une phase de calcul sera effectuée et l'on vérifiera bien que les déplacements horizontaux (u) sont bien nuls dans tout le terrain.

II.3.2 Etape 2 : Excavation du tunnel

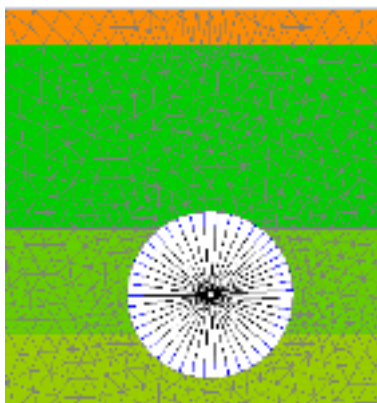


Figure 4 : Excavation

L'excavation s'effectuera par la désactivation des éléments au niveau du percement, c'est-à-dire d'un cercle de 9.5m de diamètre. Un déconfinement λ_p sera appliqué sur ce cercle égal à 0.1 ou 0.2 selon le cas d'étude pour les 2 premières parties Ce déconfinement faible s'explique par l'utilisation du tunnelier Agathe munis d'une voute parapluie.

Nous ferons attention de bien désactiver les contraintes géostatiques calculées dans la première étape.

II.3.3 Etape 3 : Mise en place des voussoirs

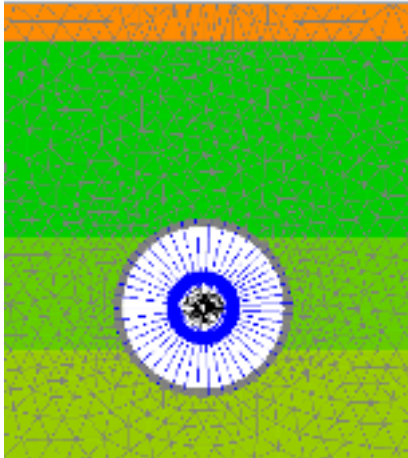


Figure 5: Mise en place des voussoirs

La mise en place du voussoir s'effectuera par la réactivation des éléments correspondant et par la définition du matériau béton et l'application de la gravité à l'élément voussoir.

La déconfinement sera poursuivie pour attendre la valeur $\lambda_p=1$. Comme nous reprenons les calculs de l'étape précédente, nous appliquerons la valeur $\lambda_{p\text{etape3}}=1-\lambda_{p\text{etape2}}$.

II.3.4 Etape 4 : Mise en place du radier

Nous activerons l'élément radier, appliqueront la gravité et les données du matériau, comme dans l'étape 3 et en appliquant aucun déconfinement.

III Première étude : Construction du Tunnel

L'objectif de cette première partie est d'effectuer 4 modélisations combinant différents paramètres de déconfinement et de caractéristiques de matériaux. Dans le cas RP ou P vus précédemment, nous allons modéliser l'évolution selon les 2 valeurs de déconfinement suivante :

- $\lambda_p = 0.1$ dans le cas d'un creusement parfaitement maîtrisé.
- $\lambda_p = 0.2$ dans le cas d'un creusement relativement bien maîtrisé.

Nous effectuerons une analyse complète pour le cas RP / $\lambda_p=0.2$

III.1 Scénario 1 : RP et $\lambda_p = 0.2$

Toutes les étapes décrites dans la partie précédente sont ici respectées. L'objectif est de vérifier si notre modèle est cohérent avec la théorie.

III.1.1 Vérification condition limites et chargement

Les conditions limites dans la première phase sont respectées. Aucun déplacement notable à la frontière latérale et inférieure de notre modèle. De même pour les autres phases, pas de déplacement notable par vérification visuelle ou graphique.

Notre modèle est donc suffisamment étendu pour respecter les conditions limites.

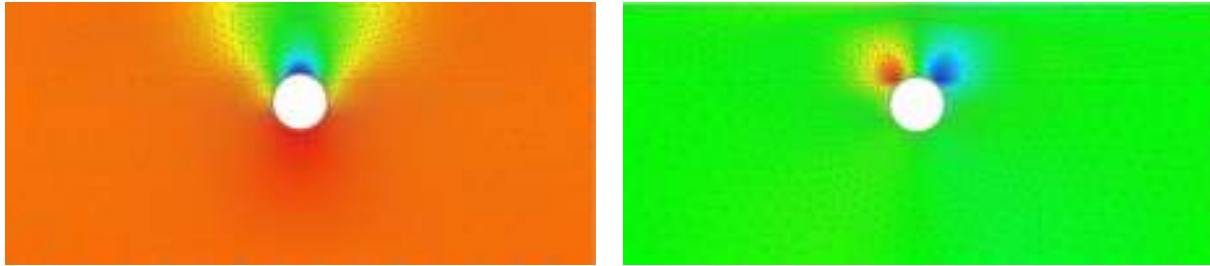


Figure 6 & 7: Déplacement vertical et horizontal du terrain après excavation.

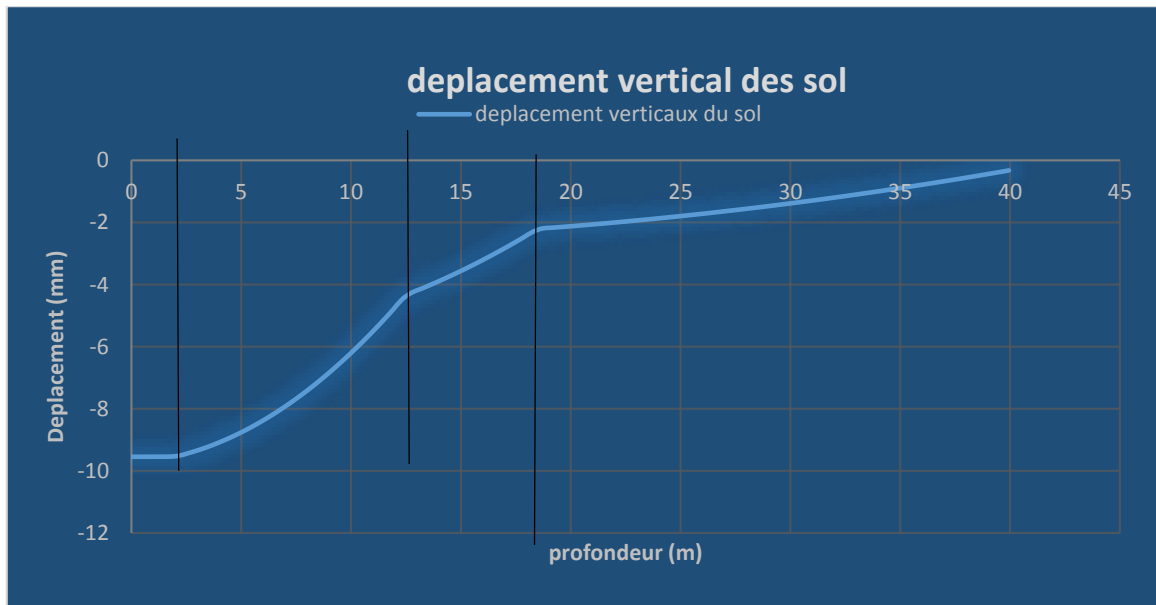


Figure 8: Déplacement vertical du massif en phase 1 de calcul

En ce qui concerne l'initialisation des contraintes géostatiques l'on observe bien une continuité et différence de comportement à chaque interface de sols (-2m, -12.5m et -18.5m) en ce qui concerne les déplacements verticaux.

Le modèle semble cohérent en ce qui concerne l'initiation des contraintes géostatiques.

III.1.2 Excavation du Tunnel

Nous avons observé les contraintes verticales au niveau de l'axe du tunnel avant et après excavation. On voit bien apparaître l'excavation entre -11.5m et -21m ce qui est rassurant.

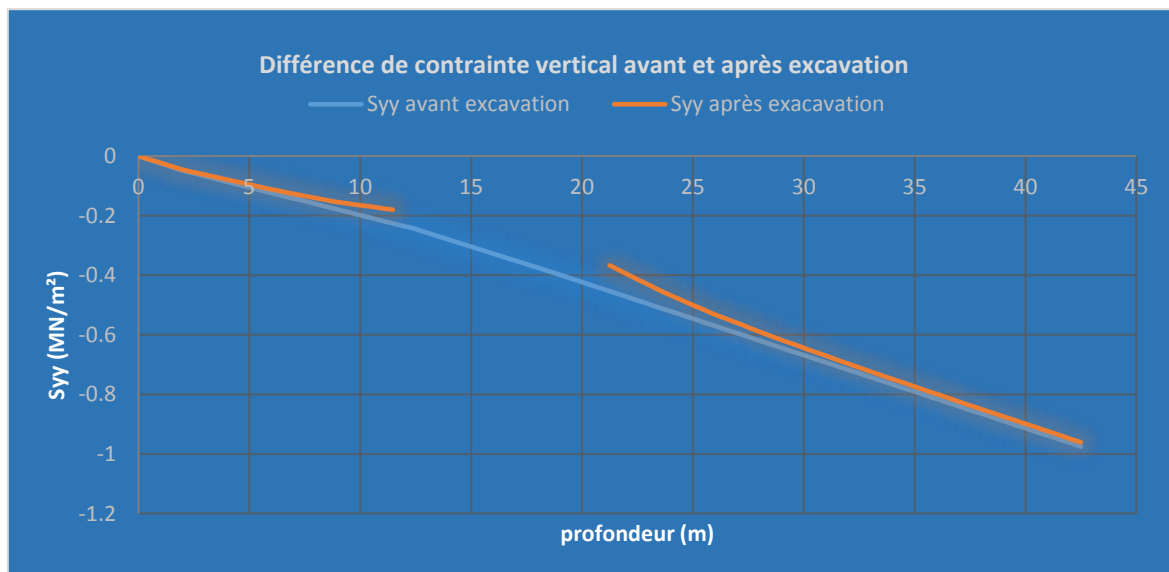


Figure 9: Contrainte verticale du massif après et avant excavation

Au niveau de la clé de voute (-11.5m) l'on a 226 kPa et 180 kPa avant et après. Hors nous avons un déconfinement de 0.2, soit $0.8 \times 226 = 180.8$, le déconfinement est bel et bien pris en compte, le modèle est cohérent.

III.1.3 Pause du voussoir et du radier

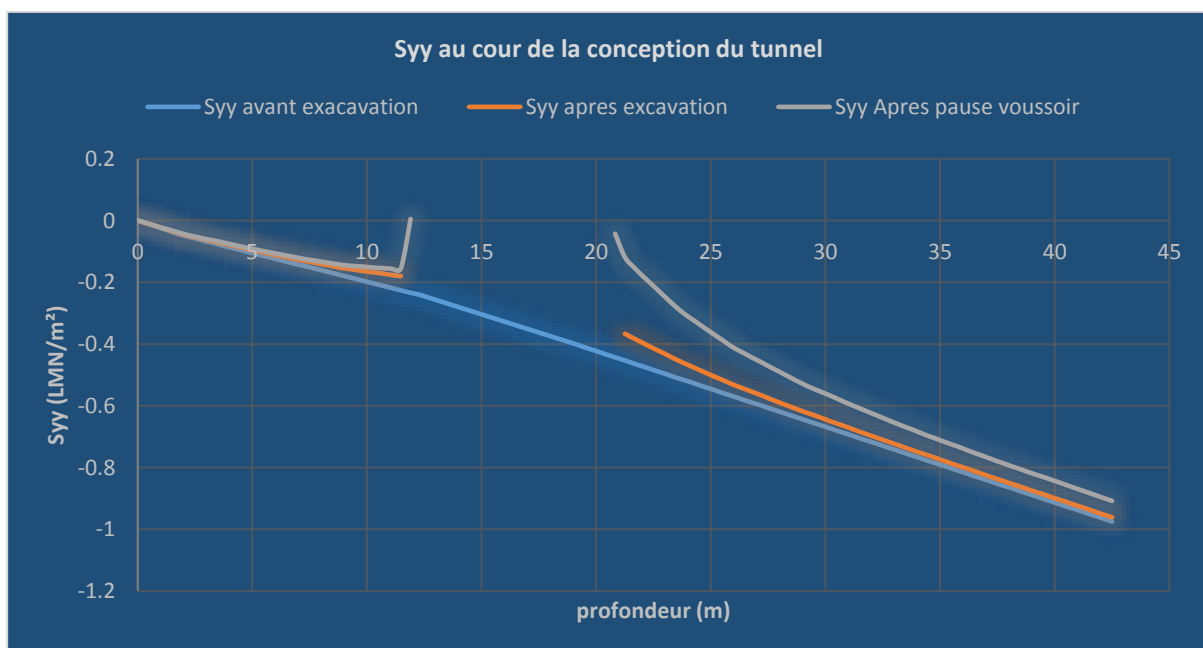


Figure 10: Contrainte verticale du massif au cours de la conception du tunnel

Dans la même logique que précédemment, l'on s'intéresse à Syy en clé de voute. L'on observe apparition du voussoir sur le graphique. Et surtout l'on observe une contrainte verticale presque nulle (5Kpa), signifiant que le déconfinement est bien total et que le modèle est cohérent sur ce point. Enfin en pied de voute la contrainte verticale n'est pas nulle, nous émettrons l'hypothèse que le poids propre des voussoirs est responsable de ce phénomène.

III.1.4 L'évolution des tassements au cours de la conception

Nous en arrivant enfin à l'objectif de cette étude, l'observation de la cuvette de déplacement vertical en surface. Les différents résultats sont résumés dans le tableau suivant :

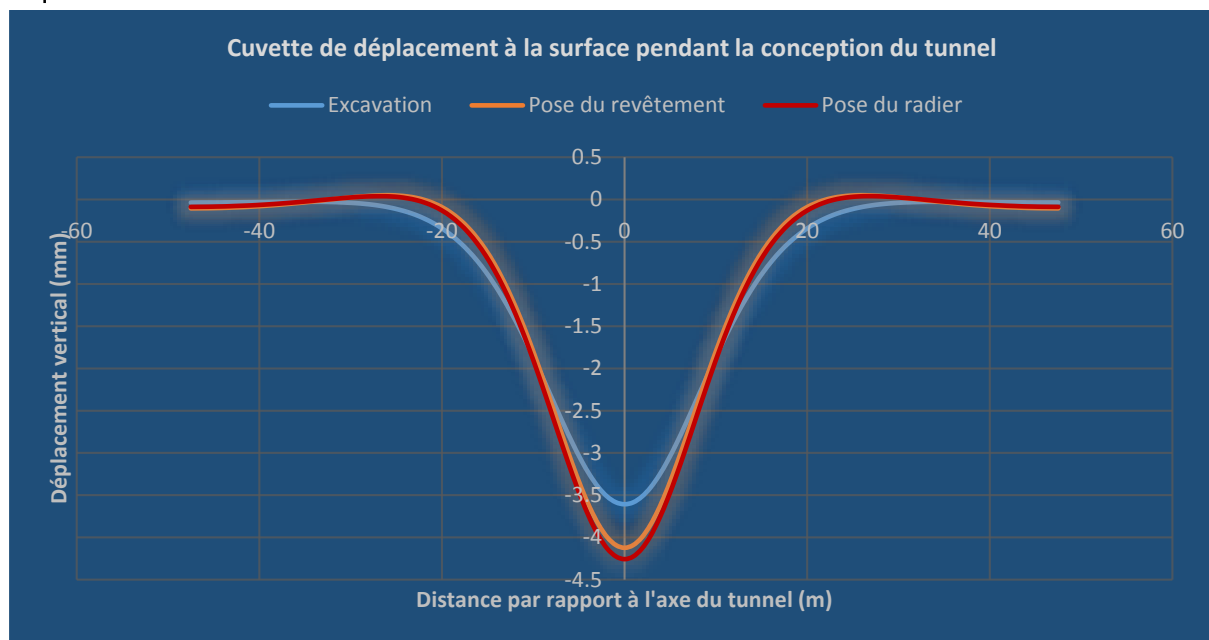


Figure 11: Cuvette de déplacement à la surface pendant la conception du tunnel

Nous avons de belle courbe parfaitement symétrique, ce qui est rassurant. Le tassement final et maximal observé est de -4.3mm ce qui correspond à un résultat plutôt positif par rapport aux recommandations de la SNCF.

L'évolution la plus nette s'observe après l'excavation mais l'on observe une remonté du terrain au niveau +/-20 par rapport à l'axe du tunnel après la pose du revêtement. Une analyse à l'aide des vecteurs déplacements nous a permis de déceler le phénomène suivant :

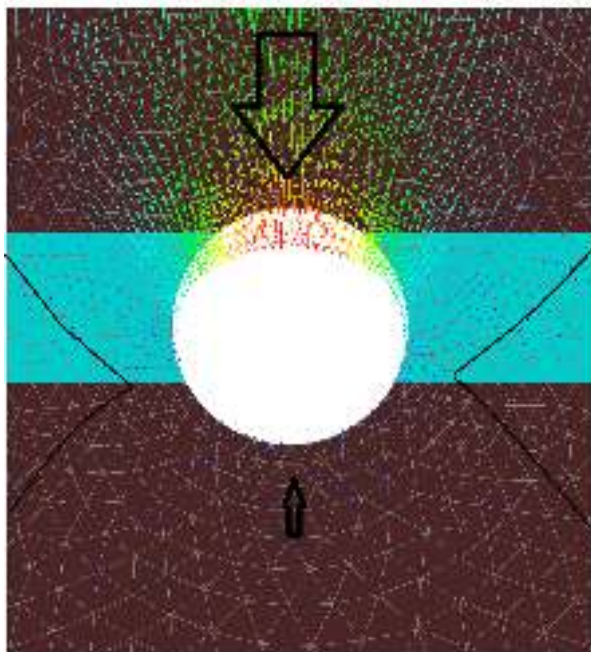


Figure 12: Vecteur déplacement après excavation

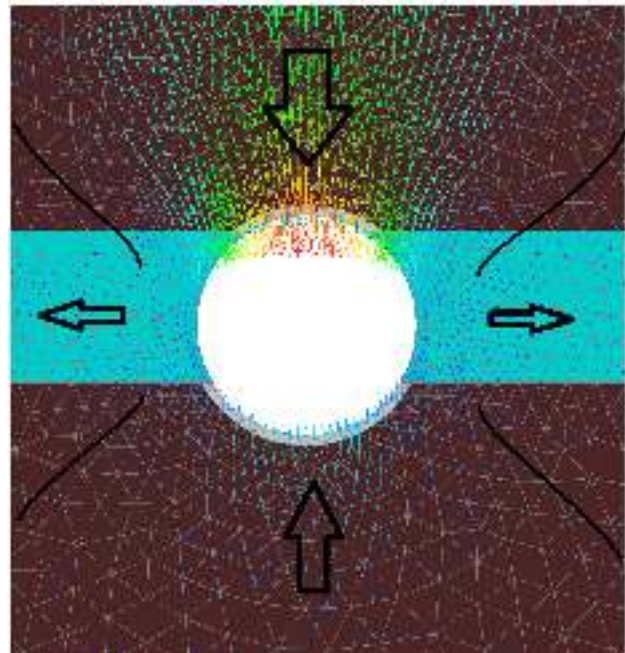


Figure 13: Vecteur déplacement après pose du

revêtement

Le premier point d'observation est le déplacement en clé de voute du terrain après excavation du terrain dut aux poids des terres. On observe une remonté du terrain en pied du tunnel, phénomène qui nous expliquerons par la décompression engendré par l'excavation.

Le deuxième point est l'évolution de la direction des déplacements. Nous sommes initialement dans un équilibre des contraintes verticales et horizontales, hors l'excavation va modifier l'état des contraintes verticales dans le terrain entrainant une rotation des axes principaux.

Le phénomène le plus intéressant est celui après la pose du soutènement. On observe des déplacements horizontaux de part et d'autre des faces latérales du tunnel. Si l'on observe les contraintes à l'intérieur du revêtement l'on voie clairement la reprise du poids du sol par effet de voute.

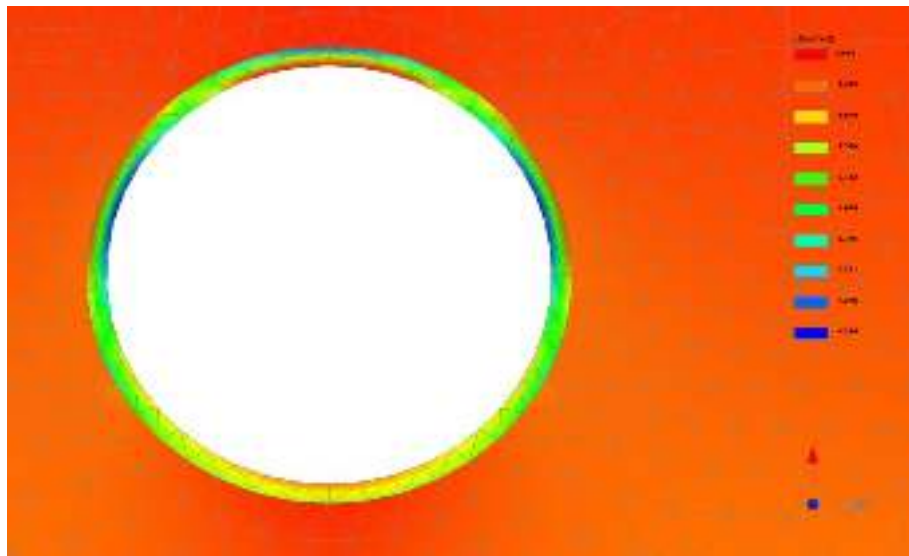


Figure 14: Contraintes principales dans le revêtement

Le revêtement « s'aplatit » entrainant un déplacement du sol de chaque côté. Ces deux déplacements de masse latéral va entrainer une légère remontée du sol à la surface (dans notre cas à +/-20m par rapport à l'axe du tunnel)

Enfin la pose du radier n'entraine pas de nouveaux phénomènes, elle ne fait que ajouter de la masse au tunnel, d'où ce léger enfoncement après cette étape effectuée.

III.2 Comparaison des différents scénarios

L'objectif est de maintenant comparer les différentes cuvettes de tassements selon les paramètres de sol et de déconfinement.

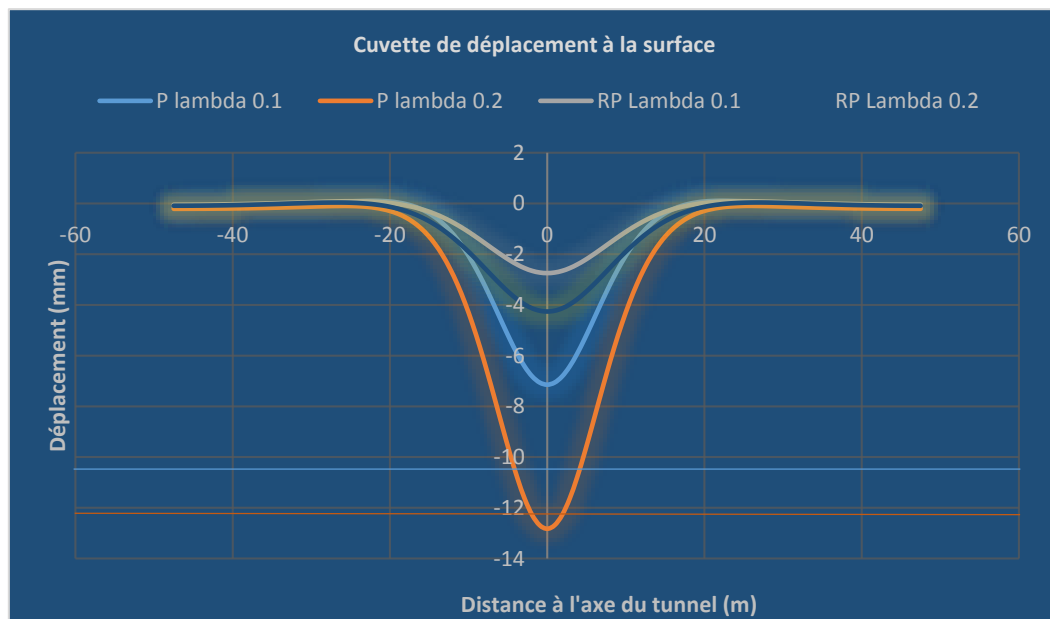


Figure 15: Cuvette de déplacement à la surface selon les différents scénarios

Les seuils définis par la SNCF sont à 10 mm (vigilance) et 12.5mm (alerte). Dans le pire des cas, c'est dire sol Pessimiste et avec un déconfinement de 0.2, nous dépassons ces 2 seuils. Sachant qu'un déconfinement de 0.1 est idéal mais que 0.2 correspond bien plus à la réalité, il conviendra lors l'excavation d'effectuer des carottages régulièrement pour s'assurer que le terrain ne correspond pas au profil pessimiste. Et si c'est le cas de porter une grande attention au déconfinement lors de son passage sous les rails.

Dans les 3 autres scénarios les cuvettes sont acceptables. Notons tout de même qu'un traitement en surface des sols, comme une congélation ou du jet-grouting, serait idéal. Un bon pilotage du tunnelier et une fréquente auscultation du déconfinement reste la principale recommandation.

III.3 Comparaison avec d'autre maillage

Afin de s'assurer de la fiabilité de notre modèle nous le comparerons avec les camarades de classes qui ont travaillé sur ce projet. Nous prendrons le cas de Benjamin Terrade qui a fait 2 choix différents de notre cas :

- Celui de segmenter son maillage avec un centre très concentré et les frontières moins dense.
- Celui de faire un second maillage très raffiné (5 fois plus dense que les recommandations de l'énoncé)

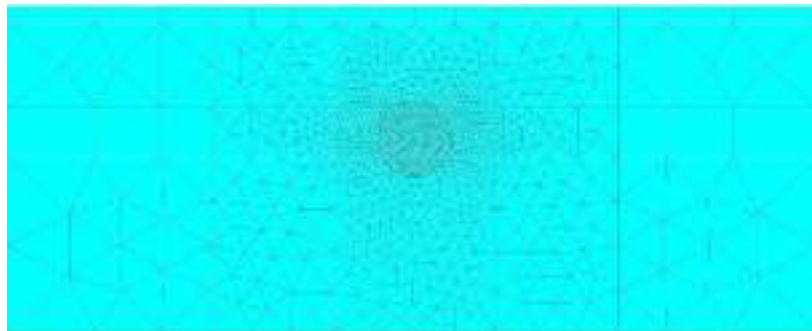


Figure 16: Maillage de Benjamin Terrade à 2094 éléments

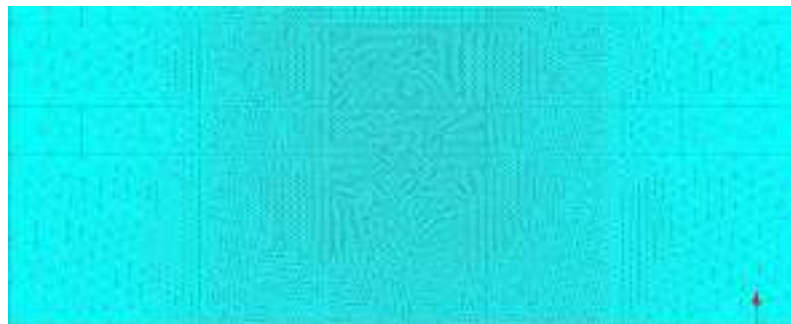


Figure 17: Maillage plus raffiné de Benjamin Terrade à 14966 éléments

Les résultats de ses différents essais étant résumés dans le graphique suivant :

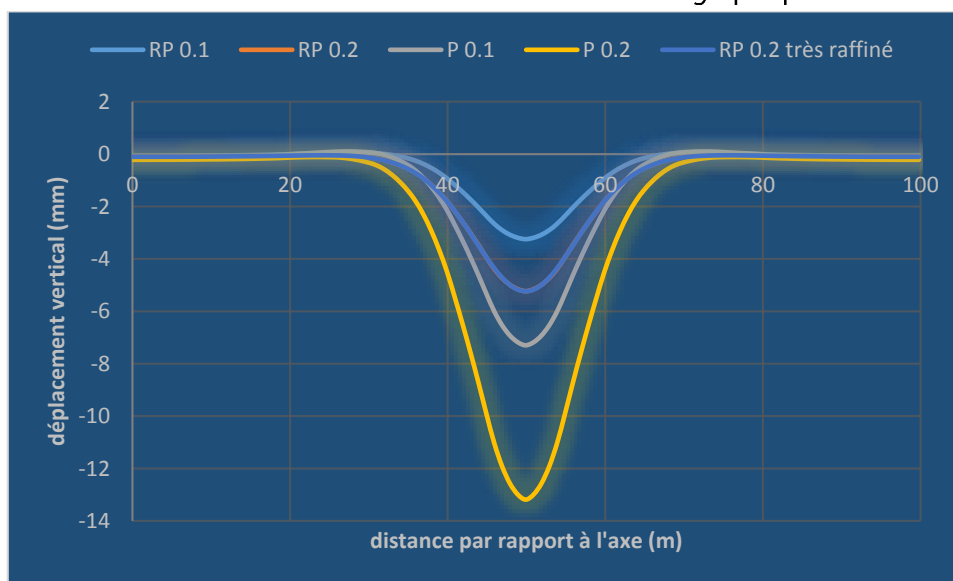


Figure 18: Cuvette de déplacement à la surface selon les différents scénarios par benjamin Terrade

Le point le plus intéressant de son maillage est que ses 2 courbes en RP 0.2 avec maillage raffiné et simple sont confondues. Ce qui signifie qu'un maillage à 2094 éléments est déjà suffisant pour obtenir des résultats cohérent.

	RP 0.1	RP 0.2	P 0.1	P 0.2
Benjamin	-3.249	-5.232	-7.294	-13.186
Jean	-2.746	-4.258	-7.143	-12.823
différence %	18.31755	22.87459	2.113958	2.830851

Tableau 3: Différence en % de tassement au-dessous du passage du tunnel

Ce qui est inquiétant est la différence observée entre les 2 modèles. En effet avec près de 20% de différence en tassement maximum l'on voit comment le fait de segmenter ou non le modèle influence les résultats.

Mon hypothèse est que cette segmentation crée des erreurs au niveau des frontières de ses « carrés », particulièrement au niveau des angles. Par contre il a l'avantage d'être plus précis autour de l'excavation (dans la zone 2-3 mètre autour).

IV Deuxième étude : Influence du coefficient de poussée des terres au repos K_0

L'objectif est à présent d'étudier l'influence de la valeur du coefficient de poussée des terres au repos sur les tassements de surface. Le coefficient a été défini à 0.5 dans la première partie, basé sur des études théoriques et empiriques mais qui restent contestable. Nous allons recalculer le cas en RP avec un $\lambda_p=0.2$ mais avec d'abord $K_0=0.33$ puis $K_0=1$ et ceux en modifiant la valeur de ν des sols ou en utilisant la procédure géostatique du programme CLEO.

IV.1 Résultats obtenus

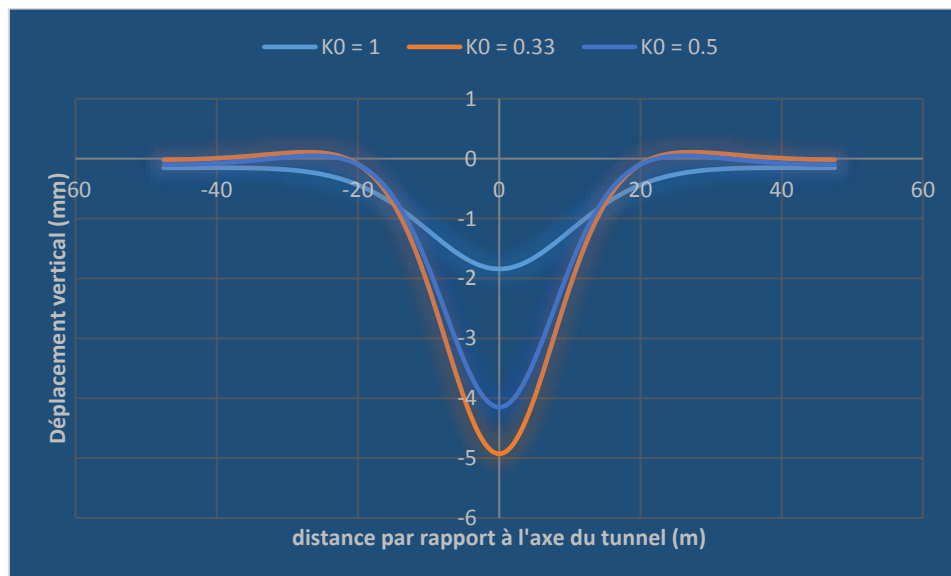


Figure 19: Cuvette de déplacement à la surface selon les différentes valeurs de K_0

IV.2 Commentaires et analyse de l'influence de K_0

La première observation est simple : un K_0 plus faible crée un tassement plus important qu'avec un $K_0=0.5$, et un K_0 plus fort crée un tassement plus faible. Ceci est à première vue normal et rassurant. Si K_0 est faible il est plus facile de s'enfoncer, comme il faut moins de force verticale pour contraindre horizontalement le sol. Le deuxième point, plus intéressant, est l'absence de la remontée du sol de part et d'autre du passage du tunnel (phénomène vu page

10). Si l'on observe les déplacements verticaux dans le massif on observe une différence entre $K0=0.33$ ou 0.5 et $K0=1$.

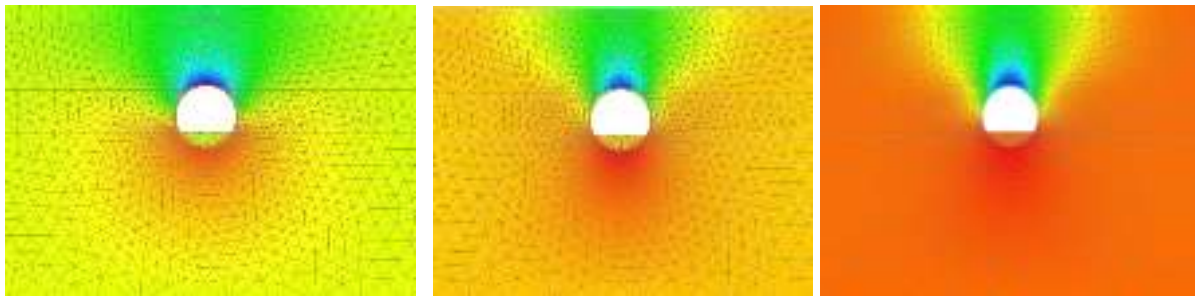


Figure 20: Déplacement vertical avec $K0=1$ (à gauche) puis $K0=0.5$ et $K0=0.33$ (respectivement à droite)

Si l'on effectue une observation comme dans la première partie des vecteurs déplacements dans le sol on observe l'absence du phénomène observé précédemment :

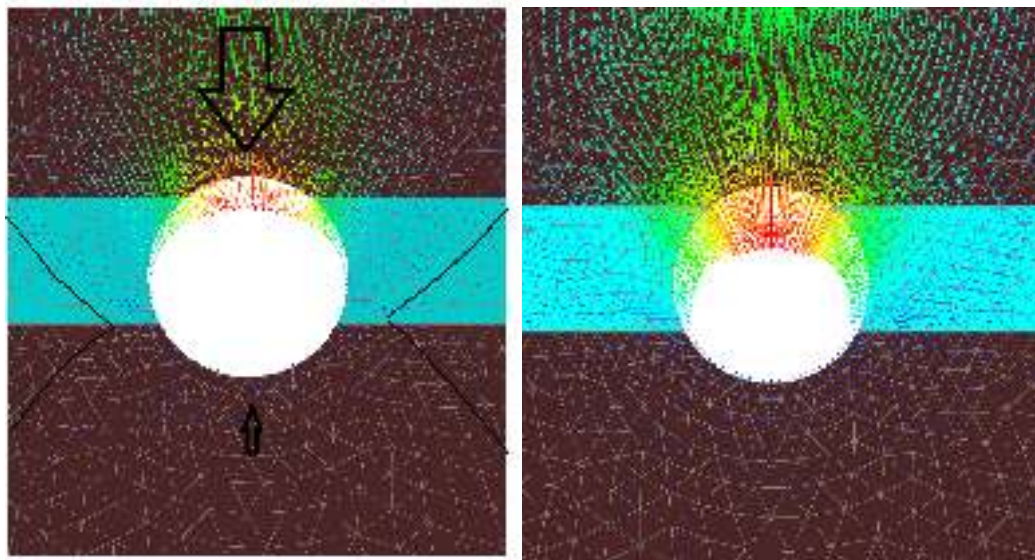


Figure 21: Vecteur déplacement après excavation $K0=0.5$ à gauche et $K0=1$ à droite

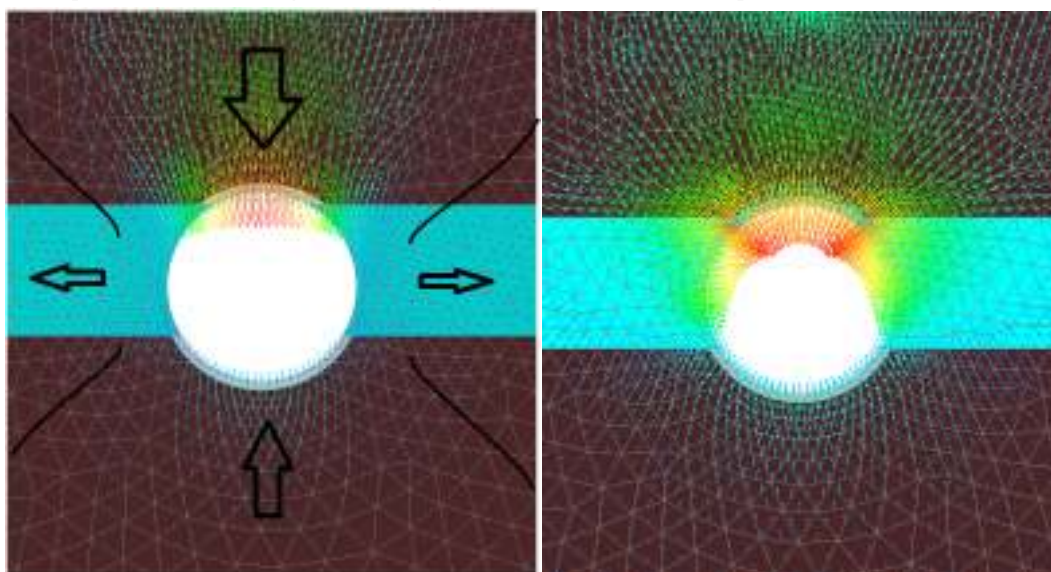


Figure 22: Vecteur déplacement après revêtement $K0=0.5$ à gauche et $K0=1$ à droite

Le comportement du sol est à peu près le même après excavation, la différence réside après la pose du revêtement. On n'observe pas ce déplacement latéral de part et d'autre des voussoirs. En effet comme il faut autant de contrainte verticale que horizontale avec $K_0=1$ pour effectuer un déplacement nous ne voyons pas ce phénomène et du même coup nous n'observons pas cette remontée des terres à ± 20 m de l'axe du tunnel.

Si l'on observe maintenant les contraintes à l'intérieur du revêtement l'on voit un comportement différent des voussoirs

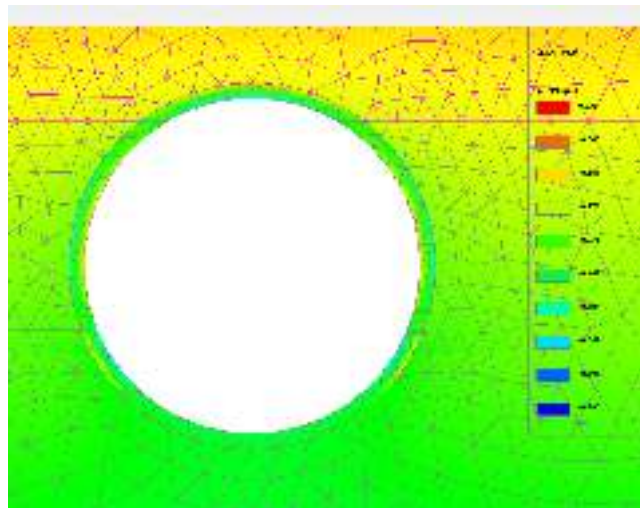


Figure 23: contrainte principale dans le revêtement avec $K_0=1$

Contrairement au cas $K_0=0.5$ les contraintes sont beaucoup plus uniforme dans le béton. Nous n'observons pas un « aplatissement » du revêtement comme auparavant.

Pour conclure il semblerais que le cas $K_0=1$ soit le cas le plus rassurant, mais aussi le moins réaliste, donc il s'agit du cas au fond le moins intéressant pour une phase d'étude de projet. La différence entre $K_0=0.33$ et $K_0=0.5$ est faible mais notable, il serait intéressant d'effectuer une étude avec un K_0 faible pour évaluer le pire des scénarios possibles.

V Troisième étude : Confrontation des résultats numériques aux mesures in-situ.

Dans cette dernière partie nous tenterons de créer le modèle le plus proche de la réalité en se basant sur les mesures in situ relevées lors du creusement. L'idée principale étant de retrouver le déconfinement λ_p lors de l'excavation et ceux en faisant l'hypothèse que nous sommes dans le cas de caractéristique de matériaux raisonnablement prudente.

V.1 Recherche du coefficient λ_p lors de l'excavation

Nous reprenons nos phases de calcul de la première partie avec un $K_0 = 0.5$, nous cherchons un λ_p pour avoir un tassement après excavation de 4 mm, hors avec $\lambda_p=0.2$ nous dépassons cette valeur. Le déconfinement λ_p recherché est donc inférieur à 0.2.

La méthode utilisé est donc de réalisé une simulation de tassement avec un λp égale à 0.2 et avec 200 incréments dans le calcul, pour avoir une valeur à 0.001 près. Pour les valeurs de λp compris entre 0.190 et 0.198 nous obtenons les courbes suivantes couplés avec les mesures de tassement in Situ.

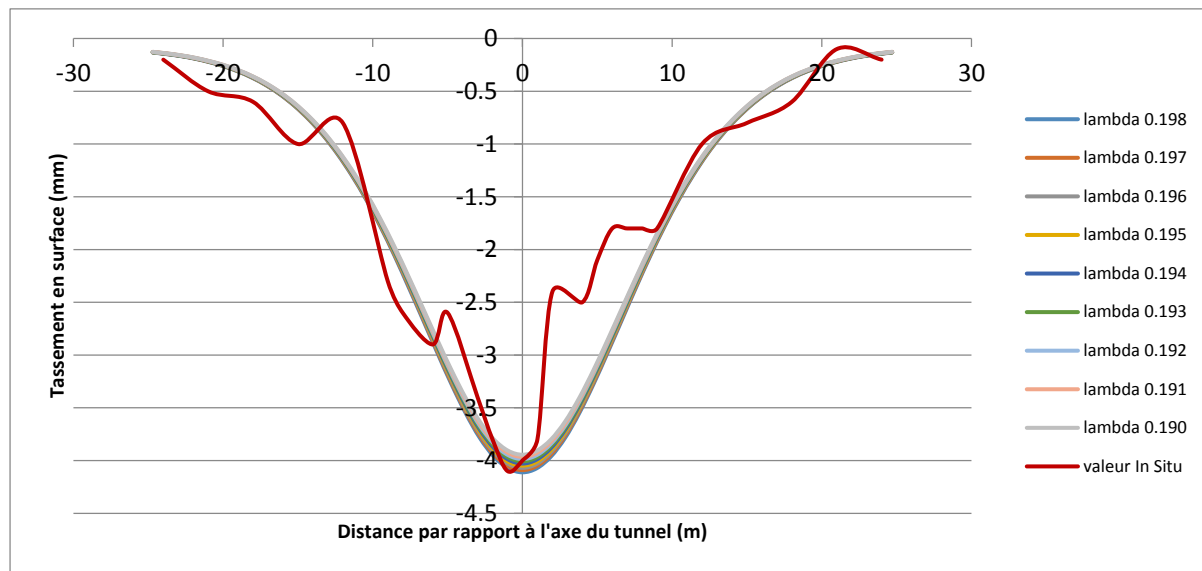


Figure 24: recherche du λp pour retrouver les valeurs In Situ

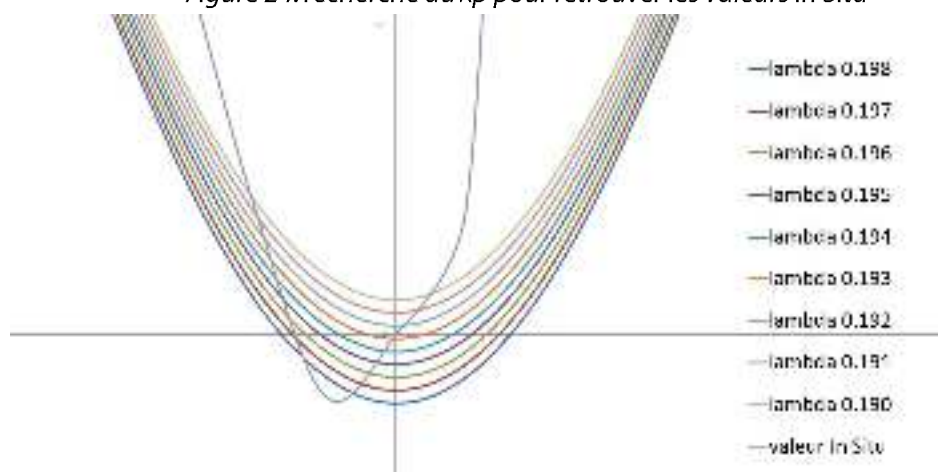


Figure 24: recherche du λp pour retrouver les valeurs In Situ (Zoom)

Les mesures In situ sont bien évidemment moins régulières que la théorie, ce qui rend le choix un peu plus difficile. Nous ferons le choix dans notre cas de prendre pour valeur $\lambda p=0.194$ car elle nous semble la valeur la plus cohérente.

V.2 Vérification du coefficient λp choisie après pose des voussoirs

Nous avons poursuivi la modélisation avec cette valeur de déconfinement pour voir si l'on retrouvait les valeurs In situ après pose des voussoirs. Notons que nous ne prenons pas en compte la pose du radier. En effet il s'agit de mesure 15m après le passage du tunnelier, hors ce type

tunnelier mesure plus de 50m, le radier n'est donc pas installé à cette phase de chantier. Malgré cela le résultat obtenu est inquiétant.

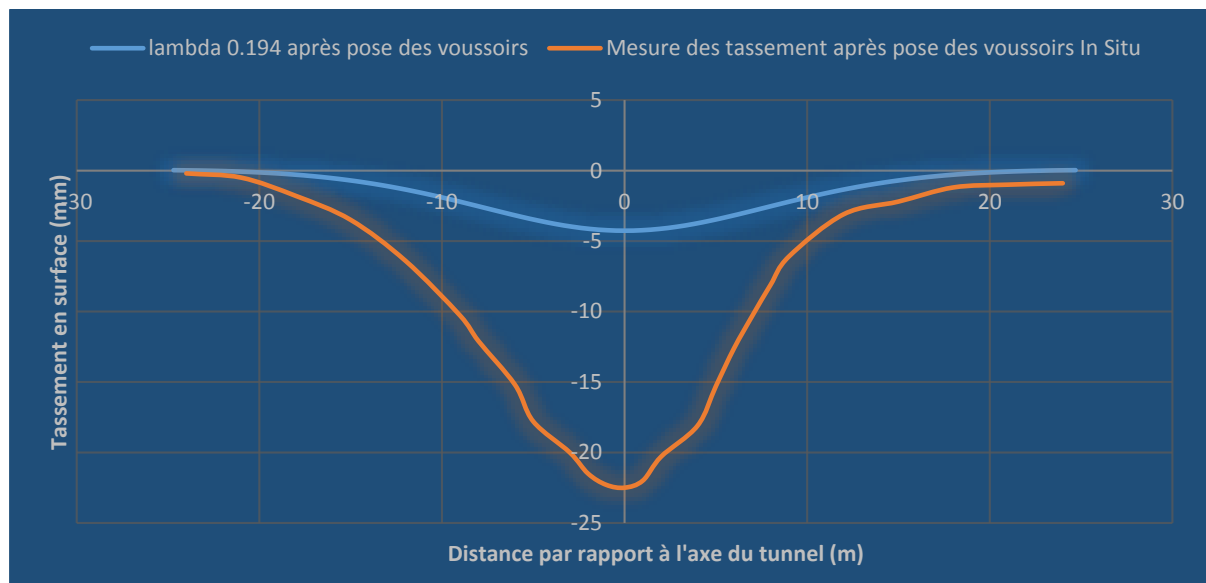


Figure 25: Comparaison des tassements avec lambda 0.194 et mesure In situ

Notre modélisation ne correspond pas à la réalité. Il nous faut donc émettre des hypothèses pour essayer de comprendre cette grande différence.

- Un nombre de phases insuffisant

Le premier point critiquable est le fait de que nous n'avons que 3 phases de modélisation avec pour hypothèse que le déconfinement après creusement reste constant jusqu'à la pose du radier. Or nous savons que la voute parapluie de la tête de tunnelier est conique, il y a donc un déconfinement possible.

Pour vérifier ce point nous avons effectué une modélisation avec une phase supplémentaire, prenant en compte cette évolution de déconfinement. D'un déconfinement de 0.194 nous avons effectué une recherche, comme précédemment, du déconfinement optimal. Malheureusement nous n'obtenons pas la valeur de 22mm après pose des voussoirs, malgré cette phase intermédiaire où nous effectuons finalement un déconfinement total. Les résultats sont modélisés dans le graphique suivant :

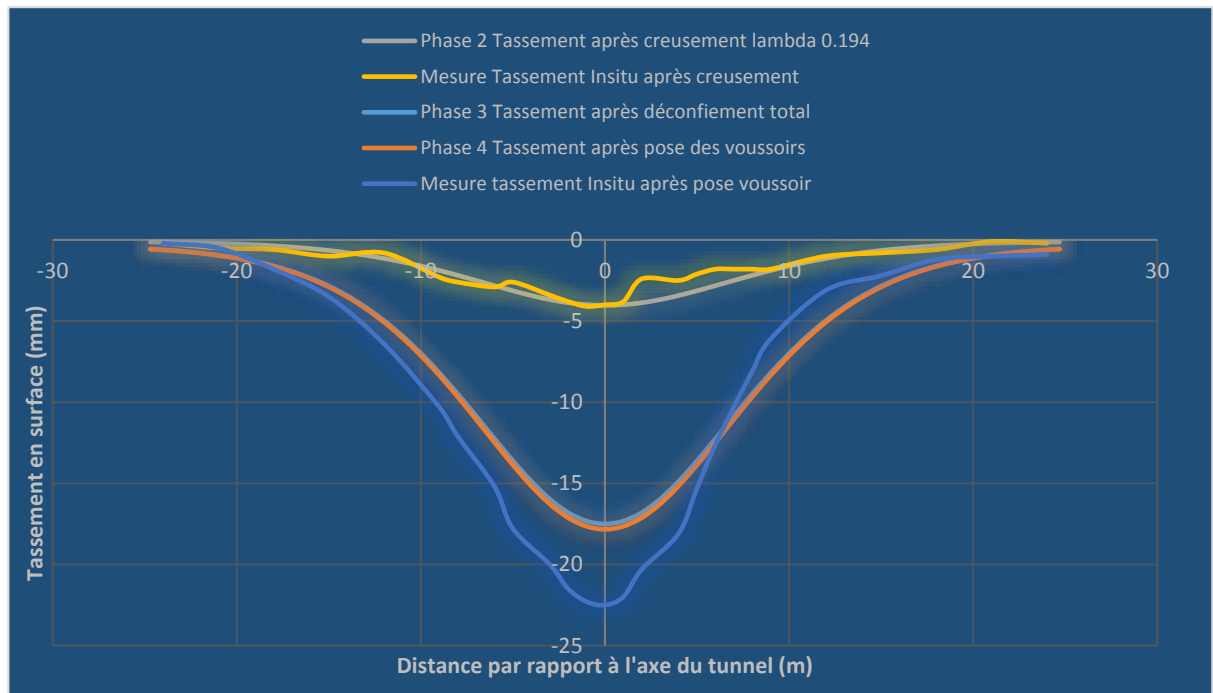


Figure 25: Comparaison des tassements avec une phase de déconfinement supplémentaire

Cette phase de calcul supplémentaire nous donne une simulation plus réaliste mais pas encore suffisante. Plusieurs raisons pourraient expliquer cette divergence :

- Des hypothèses sur les terrains erronées

Nous avons testé lors de notre étude plusieurs caractéristiques de terrain et avons vu à quel point elle pouvait changer les résultats. Une modélisation supplémentaire avec les caractéristiques de sol à mi-chemin entre RP et P aurait pu être proposée.

De même la valeur de K_0 choisie peut être remise en cause. Soulignons aussi que K_0 a été pris pareil pour chaque couche du sol étudié.

Nous supposons toutes les couches du sol de type élastique plastique parfait, ce qui n'est pas vraiment réaliste.

Les couches de sol sont parfaitement droites dans notre simulation ce qui est à remettre en cause étant donné le côté très vallonné du terrain à l'ouest du Rhône.

L'absence de prise en compte des nappes phréatiques dans le terrain est également un élément qui peut avoir un rôle critique, surtout lorsque nous étudions un cas aussi près du Rhône.

- Les caractéristiques du Tunnelier

Un point étonnant est que l'étude ne prend pas en compte, le poids du tunnelier. Le tunnelier Agathe a un poids total de 1300 tonnes, sachant que les éléments de la tête (dont le bouclier) rassemble une grande partie du poids, il est aurait été judicieux de modéliser un élément de masse supplémentaire lors des différentes phases.

L'on sait également que le diamètre extradados des voussoirs est inférieur à celui de la roue de coupe. Ce point n'est pas modélisé et aurait pu être pris en compte avec une phase supplémentaire pour la mise en place du coulis de ciment entre les voussoirs et le sol.

Le « Cake » de bentonite autour du tunnelier lors du creusement doit engendrer des différences de caractéristiques dans le sol. Même si son effet doit être négligeable (à part dans le cas d'étude avec eau dans le sol), il pourrait être pris en compte dans l'étude.

➤ Les erreurs lors du creusement

L'on sait que le pilotage d'une telle machine n'est pas toujours simple. Une surcoupe lors du creusement aurait pu avoir lieu lors du creusement par erreur. Un ralentissement lors du creusement (nuit/weekend/réparation) aurait pu permettre à un tassement entre l'excavation et la pose des voussoirs. Une erreur lors de l'injection du coulis de ciment aurait pu créer des dépressions dangereuses à l'extrados du voussoir. Enfin des travaux de renforcement des sols (jet grouting, colonne ballastée, traitement des sols) auraient pu être réalisés avant le passage du tunnelier sans que les sondages ou document n'en parlent, influençant l'homogénéité du sol.

V.3 Conclusion sur la modélisation

Notre modélisation est cohérente, elle représente des tassements et des comportements correspondant à la théorie et globalement ce que l'on peut observer sur le terrain. Nous obtenons tout de même parfois des différences par rapport aux mesures sur terrain. Globalement la simplification de beaucoup de paramètres explique cette différence. Une étude plus poussée, notamment dans le domaine 3D, serait à proposer, si nous avions plus de temps pour cela.