

Chapitre 7

ETUDE NUMÉRIQUE: INFLUENCE DES PARAMÈTRES DE CHARGEMENT ET DE COMPORTEMENT

Dans le chapitre précédent, nous avons uniquement analysé l'influence de la vitesse de creusement sur la convergence à l'équilibre final du tunnel soutenu. Plus précisément, nous avons montré qu'il existe une valeur de la vitesse réduite, au-dessus de laquelle, il est intéressant d'utiliser le modèle viscoplastique avec rupture, puisque l'écart sur les profils de convergence par rapport à un modèle viscoplastique de type Bingham peut être grand (supérieure à 25% dans certains cas).

De plus, cette gamme de vitesses est du même ordre que celle que l'on peut rencontrer dans la pratique lors de construction des tunnels dans des argiles raides.

En nous plaçant dans la gamme de vitesse réduite considérée ($V^* = 2.10^4$), nous allons à travers ce chapitre effectuer une étude paramétrique afin de mieux préciser l'importance des autres paramètres (rigidité du soutènement, seuil à court terme) sur l'évolution de la convergence et de la pression.

7.1 INFLUENCE DE LA RIGIDITÉ DU SOUTÈNEMENT

Dans beaucoup de situations (soutènement par béton projeté, par cintres métalliques, ou par boulonnages), on est conduit à assimiler le soutènement à une coque mince cylindrique d'épaisseur e . Dans le domaine du comportement élastique linéaire du soutènement, la rigidité du soutènement, caractérisée par un module K_s relie la pression de soutènement s'exerçant à l'extrados de rayon R_i au déplacement radial.

Parmi les méthodes simplifiées de calcul des tunnels, "la nouvelle méthode implicite" [Bernaud&Rousset, 1991] fondée sur les principes de base de la méthode convergence-confinement, permet en particulier de tenir compte de la dépendance de la convergence à la pose du soutènement par rapport à rigidité du soutènement. Dans le calcul de l'équilibre du tunnel, nous avons montré que la différence fondamentale entre le calcul VPR et VP est caractérisée par cette convergence à la pose du soutènement. Ce qui justifie l'intérêt de l'analyse de l'influence de la rigidité du soutènement sur la convergence à l'équilibre final du tunnel soutenu.

Dans ce paragraphe, nous analysons l'influence de la rigidité d'un soutènement élastique linéaire sur les valeurs de la convergence et de la pression en fonction de la distance au front de taille. Pour effectuer cette analyse, les calculs sont réalisés pour différentes valeurs de la rigidité. Depuis une faible valeur de rigidité K_s^* (0,04), et correspondant par exemple au boulonnage, jusqu'au soutènement par anneau de béton ou par coque de béton projeté pour lequel K_s^* est supérieur à 4.

L'étude est effectuée à partir des caractéristiques du comportement viscoplastique avec rupture suivantes pour le massif à excaver :

$E=1500$ MPa; $\nu=0,498$; $C=4$ MPa; $C_1=2$ MPa; $\eta = 4.10^4$ MPa.jours

Ces caractéristiques mécaniques sont égales celles des argiles raides (horizons de l'Aisne), pour lesquelles, nous avons par exemple montré que la valeur de la

viscosité considérée est bien justifiée. Nous supposons que la pression géostatique au niveau de la galerie est celle régnant par exemple à une profondeur de 450 mètres dans un horizon argileux de l'Aisne et donc la valeur de P_{∞} est de 9 MPa.

La vitesse d'avancement considérée est de $V=1\text{m/jours}$. Cette valeur bien que faible peut être rencontrée dans la pratique, de même que la distance de pose du soutènement considérée, qui est $d_0 = \frac{2}{3}$.

La simulation est réalisée en 36 creusements. Dans le calcul numérique, la longueur du maillage est limité par la taille des calculs. Rappelons que la fin de la construction ne correspond pas à la stabilisation finale, on laisse donc dans le calcul les déformations différées se développer jusqu'à la stabilisation finale après le 36eme creusement et en imposant alors une distance de pose nulle.

Les tableaux 7.1 et 7.2 ci-dessous nous donnent les paramètres adimensionnels correspondant aux caractéristiques précédentes, ainsi que les différentes valeurs de la rigidité réduite pour lesquelles les calculs sont effectués.

| E^* | N_s | S^* | V^* | d_0^* |
|-------|-------|-------|----------------|---------------|
| 750 | 4,5 | 2 | $2 \cdot 10^4$ | $\frac{2}{3}$ |

Tableau 7.1. Paramètres adimensionnels de comportement.

| K_s^* | 0,04 | 0,12 | 0,4 | 0,8 | 1,6 | 4 | 8 |
|---------|------|------|-----|-----|-----|---|---|
| | | | | | | | |

Tableau 7.2. Paramètres de calcul (rigidité).

7.1.1 Convergence en paroi

La figure 7.1 nous donne la convergence à l'équilibre final en fonction de la rigidité du soutènement des deux calculs VP et VPR. Comme il est prévisible, la convergence diminue quand la rigidité augmente pour les deux calculs. Cependant, la courbe viscoplastique simple (VP) est en-dessous de celle du calcul viscoplastique avec rupture (VPR). Au-delà d'une certaine valeur (0,8), la valeur de la rigidité n'affecte pas l'écart absolu entre les deux courbes.

Les profils de convergence en paroi en fonction de la distance au front se répartissent entre les profils limites non soutenus (rigidité très faible) et élastique (rigidité infinie). Cependant, le résultat le plus intéressant concerne l'écart entre les profils des deux modèles. Cet écart est illustré sur les figure 7.2 à 7.4, où nous avons la comparaison pour différentes valeurs de la rigidité entre les profils de convergence en fonction de la distance au front (après stabilisation) pour les deux modèles.

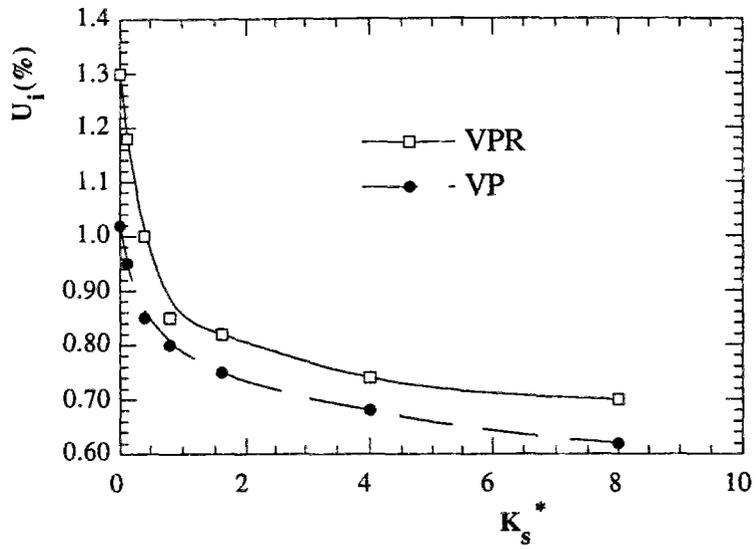


Figure 7.1. Convergence à l'équilibre en fonction de la rigidité (VPR et VP) .

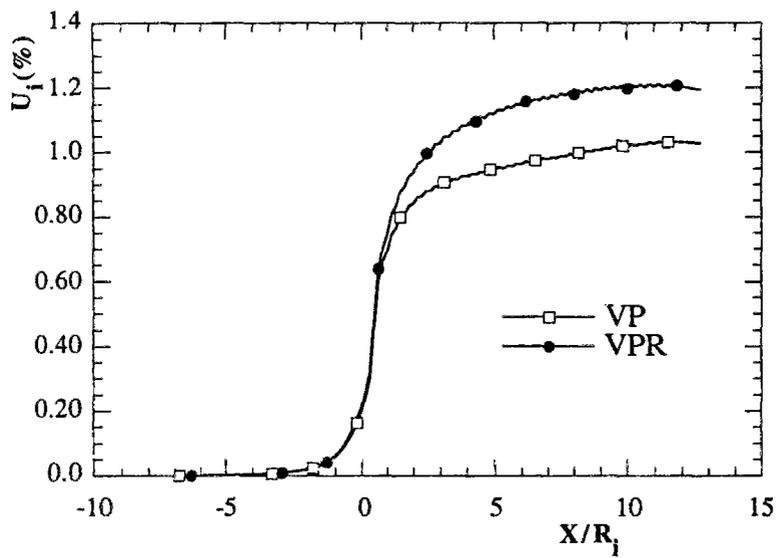


Figure 7.2. Profils des convergences ($K_s^*=0,12$).

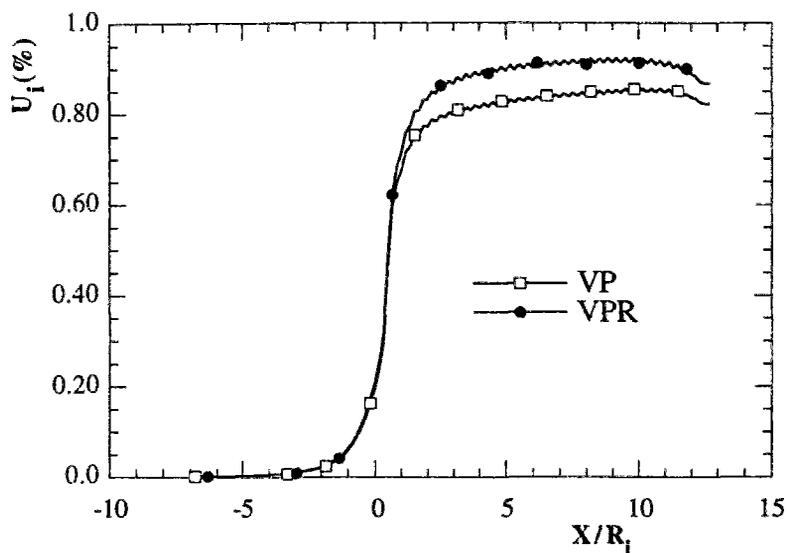


Figure 7.3. Profils des convergences ($K_s^*=0,8$).

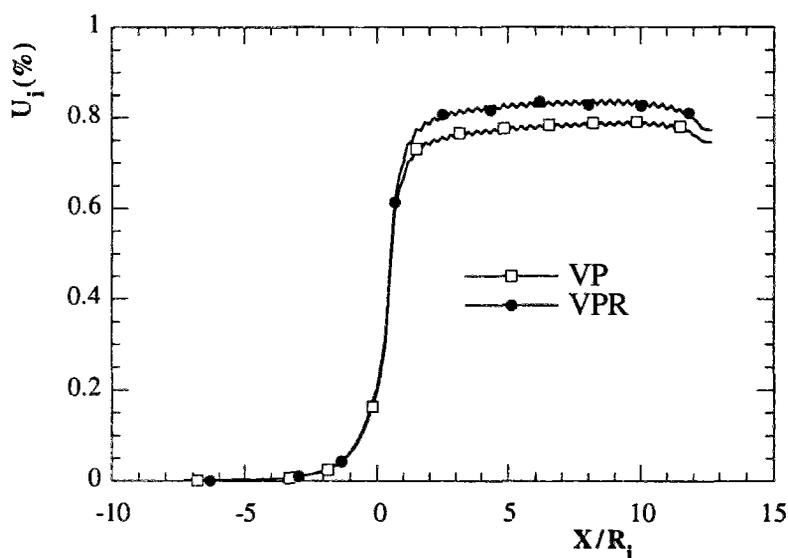


Figure 7.4. Profils des convergences ($K_s^*=1,6$).

Deux points importants se dégagent de l'observation des profils de convergence en fonction de la distance au front, pour les différentes valeurs de la rigidité.

1) Pour des valeurs de rigidité très faibles (figures 7.2 et 7.3) (ce qui correspond pratiquement à des soutènements très mous de type boulonnage), l'écart sur les profils de convergences entre les résultats du modèle viscoplastique avec rupture et le modèle viscoplastique associé est assez élevée (25%) même pour des zones proches du front de taille. Pour cette gamme de rigidité, la pression exercée par le soutènement sur le massif est très faible, le massif peut donc développer des déformations plastiques importantes

pendant le chargement. Ce qui se traduit aussi par la valeur de la convergence à la pose du soutènement qui est assez élevée.

2) Les valeurs de rigidité fortes et même très fortes (figure 7.4) (en pratique ceci peut correspondre à un soutènement par anneau de béton) l'écart est faible. Plus précisément, il est inférieur à 10%. Ce qui s'explique par le fait que la pression de confinement exercée par le soutènement sur le massif est telle qu'elle limite au maximum les déformations plastiques pendant les phases d'excavation.

7.1.2 Pression dans le soutènement

L'influence de la rigidité sur les pressions de soutènement finales du modèle viscoplastique avec rupture comparé au modèle viscoplastique associé est illustrée sur les figures 7.5 et 7.6, pour les valeurs de rigidité précédentes. Dans ce cas, le modèle VPR montre que le modèle de Bingham surestime la pression dans le soutènement, avec un écart qui est entre 10% et 25% pour les valeurs des paramètres de nos calculs.

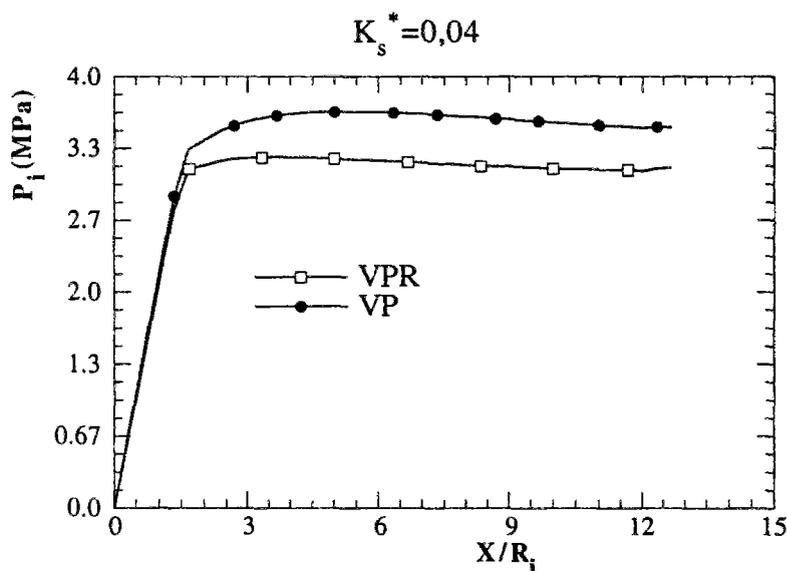


Figure 7.5. Pression de soutènement ($K_s^* = 0,04$).

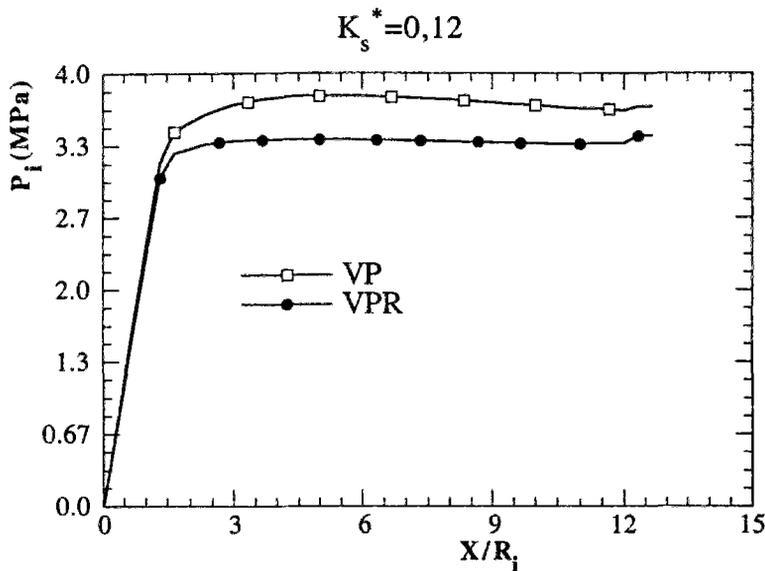


Figure 7.6. Pression de soutènement ($K_s^* = 0,12$).

On retiendra essentiellement de cette analyse, qu'il existe une gamme de rigidité pour laquelle, l'écart relatif entre les profils de convergence à l'équilibre du modèle viscoplastique avec rupture et le modèle viscoplastique de Bingham est maximale. Cette gamme correspond à des revêtements mous. La valeur de cet écart est de 20% environ pour les paramètres des tableaux 7.1 et 7.2.

Ce résultat traduit une fois de plus la nécessité de considérer le modèle viscoplastique avec rupture pour l'étude du prédimensionnement des tunnels profonds dans des argiles raides par exemple. Bien que cette valeur maximale de l'écart soit relativement faible (dans la gamme des paramètres considérés), le paragraphe qui suit va nous permettre de montrer que le paramètre qui influence de manière plus significative l'écart entre les deux modèles est la cohésion à court terme C .

7.2 INFLUENCE DE LA COHÉSION A COURT TERME

La cohésion à court terme est un paramètre important du modèle viscoplastique avec rupture. L'étude paramétrique doit nécessairement tenir compte de ce paramètre. Cette étude va quantitativement nous montrer l'influence de la cohésion à court terme sur la convergence à l'équilibre final du tunnel, sur les profils de convergence et de la pression en fonction de la distance au front.

Les paramètres de calcul sont toujours ceux du paragraphe précédent. Nous rappelons que leurs valeurs sont les suivantes :

$$E^* = 750; N_s = 4,5; K_s^* = 0,12; d_0^* = \frac{2}{3}$$

Les calculs ont été réalisés pour les valeurs suivantes du paramètre S^* :

| | | | | | | | |
|-------|---|------|-----|------|---|---|---|
| S^* | 1 | 1,25 | 1,5 | 1,75 | 2 | 3 | 4 |
|-------|---|------|-----|------|---|---|---|

Les résultats des calculs sont illustrés par exemple sur les figures 7.7 et 7.8 où on a tracé les profils de convergence (à la stabilisation) en fonction de la distance au front pour différentes valeurs de la cohésion. On observe notamment que plus la cohésion est faible, plus la convergence finale est élevée. Ce résultat s'explique par les valeurs élevées des déformations plastiques pendant les phases de creusement. Plus la cohésion est faible, plus importantes sont les déformations plastiques. Rappelons que la variation de S^* s'effectue pour une valeur de la cohésion à long terme fixée.

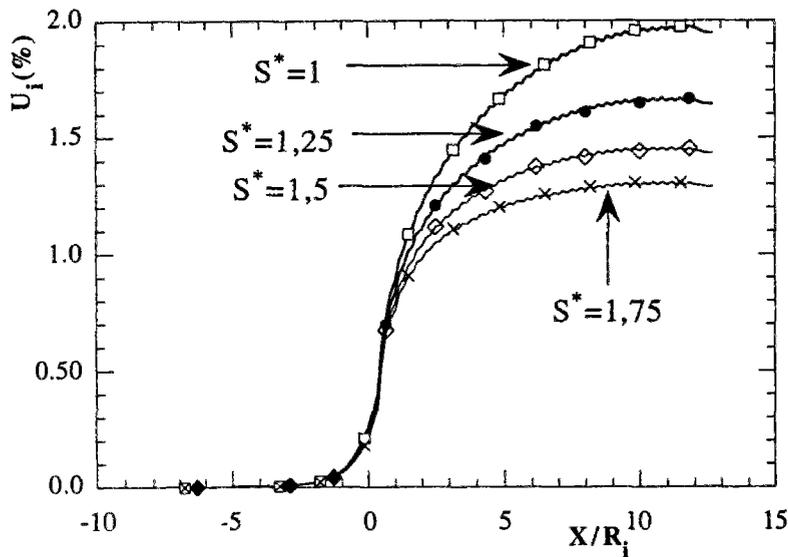


Figure 7.7. Profils des convergences

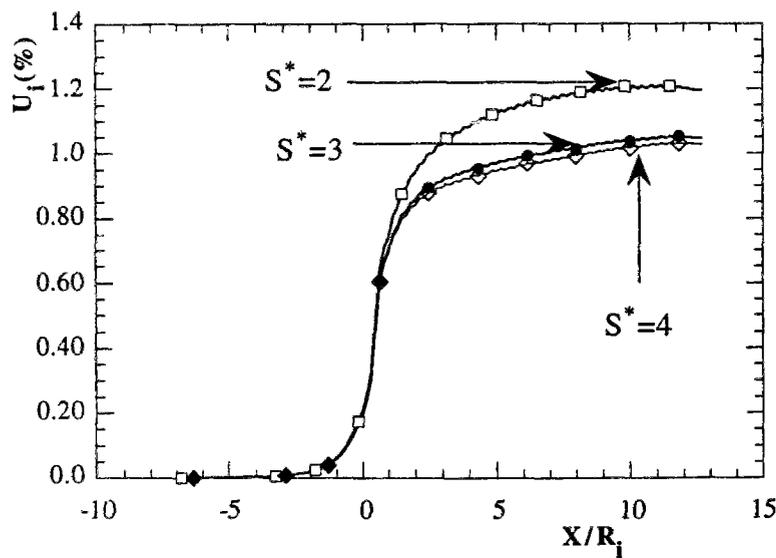


Figure 7.8. Profils des convergences.

Les résultats essentiels de ces calculs, concernent la valeur de la convergence à l'équilibre : plus S^* est petit (tend vers 1) plus la valeur de la convergence à l'équilibre augmente, la valeur maximale est obtenue pour $S^* = 1$. Ce phénomène s'interprète simplement grâce à la valeur du critère de plasticité : en effet, plus ce paramètre est petit, plus le critère est élevé pendant les phases de chargement (pose de soutènement), et par conséquent, les déformations plastiques sont importantes. Ce qui se traduit par une valeur élevée de la convergence à l'équilibre.

Sur la figure 7.9, nous avons tracé la courbe de convergence à l'équilibre des deux modèles en fonction de S^* . Ces courbes montrent que la cohésion à court terme a une influence significative sur la convergence à l'équilibre. Pour les cas traités ici, cet intervalle représente des cohésions entre 1 et 2 : ces valeurs sont susceptibles de correspondre à des paramètres de comportement des argiles raides (première partie). Dans cet intervalle, l'écart sur la convergence à l'équilibre des modèles varie de 25 à 80%, et peut se traduire par un écart pouvant atteindre 30% sur la pression dans le soutènement (figure 7.10 et 7.11), ce qui est important pour le paramètre fondamental de dimensionnement qu'est la pression à l'équilibre dans le soutènement.

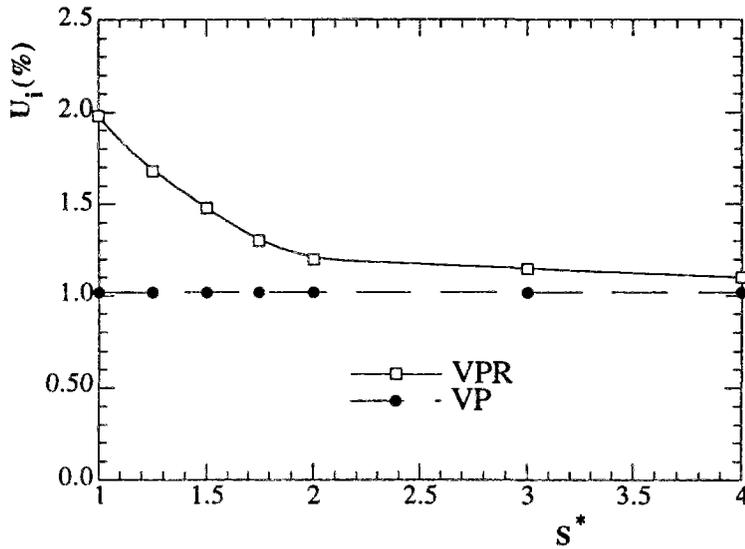


Figure 7.9. Ecart en fonction du seuil à court terme.

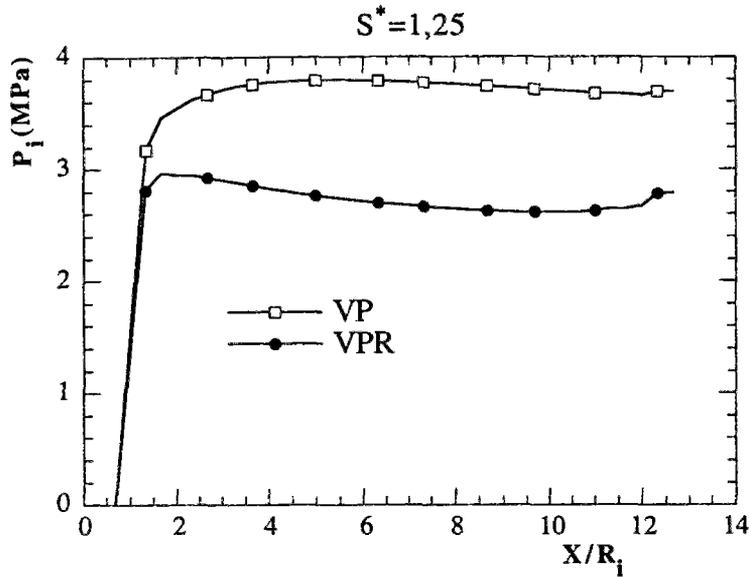


Figure 7.10 Pression à l'équilibre ($S^* = 1,25$)

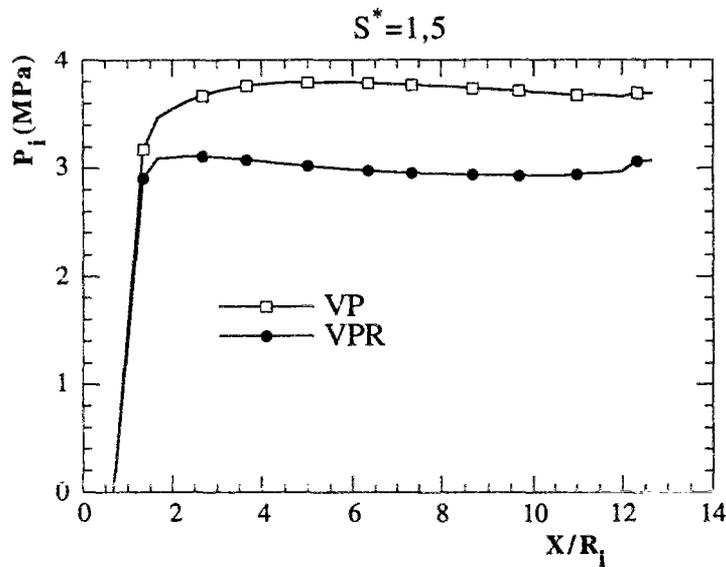


Figure 7.11. Pression à l'équilibre ($S^* = 1,5$)

Conclusions

L'influence du seuil réduit est très significative sur le profil des convergences à l'équilibre du tunnel soutenu. L'écart entre les deux modèles peut atteindre 80% comme nous venons de le montrer. Cependant toutes les conclusions que nous pouvons dégager de cette analyse vont dans le sens de la sécurité des ouvrages. En effet dans les modèles viscoplastiques de type Bingham, la convergence à l'équilibre est généralement sous estimée. Le modèle viscoplastique avec rupture montre qu'en réalité, la pression dans le soutènement à l'équilibre est plus faible.

CONCLUSION

En conclusion de ce chapitre, nous retiendrons l'importance de la cohésion à court terme sur la valeur de la convergence finale du tunnel soutenu. Dans une certaine mesure, la rigidité a également une influence sur les profils de convergence en fonction de la distance au front.

Le seuil à court terme a une influence très significative sur les valeurs de convergence en paroi ainsi que la pression dans le soutènement. Dans certains cas, on peut avoir des convergences dont l'écart relatif avec celles données par un calcul viscoplastique de Type Bingham est de l'ordre de 60%.

Pour un jeu de paramètres de comportement donné, le paramètre de chargement le plus important est la vitesse de creusement.

BIBLIOGRAPHIE PARTIE III

AFTES. [1983]. *Recommandations pour l'emploi de la méthode convergence-confinement.* Tunnels&Ouvrages Souterrains 59, pp. 219-138.

Bernaud D. [1991]. *Tunnels profonds dans les milieux viscoplastiques : Approches expérimentale et numérique.* Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

Bernaud D., Rousset G. [1992]. *La nouvelle méthode implicite pour l'étude du dimensionnement des tunnels.* Revue française de Géotechnique. N°60, pp. 5-26.

Bernaud D., Rousset G. [1993]. *L'essai de soutènement à convergence contrôlée : résultats et modélisation.* Proc. Int. Symp. ISRM. Athens, Greece. Vol 2 pp. 1381-1392.

Brown P. T., Booker J. R. [1985] *Finite element analysis of excavation.* Computers and Geotechnics Vol 1, pp. 207-220.

Corbetta F. [1990]. *Nouvelles méthodes d'étude des tunnels profonds. Calculs analytiques et numériques.* Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Descoedres F., [1974]. *Analyse tridimensionnelle de la stabilité d'un tunnel au voisinage du front de taille dans une roche élastoplastique.* Proc. 3rd Int. Cong. Rock. Mechanics, Denver, Vol 2, pp. 1130.

Egger P. [1974]. *Rock pressure in tunnelling and stabilizing effect of the tunnel face in rock beyond failure.* Proc. 3rd Int. Cong. Rock. Mechanics, Denver, Vol 2, pp. 1007.

Egger P. [1989]. *Lecture : problème géotechniques des tunnels profonds et solutions constructives.* Symp. Int. Rock and Great Depth, Pau, Vol. 3, pp. 1191

Giraud A., Picard J. M., Rousset G. [1993]. *Time dependent behaviour of tunnel excavated in porous rockmass.* Int. J. Rock Mech. Min. Sci.&Geomech Abstr. Vol. 30 N°7.

Hanafy E. A., Emery J. J. [1982]. *Three dimensional simulation of tunnel excavation in squeezing ground.* Proc. 3th Int. Conf. Numerical Methods in Geomechanics, Edmonton, Vol. 3 pp. 1203.

Pan X. D., Hudson J. A. [1989]. *Plane strain analysis in modelling three dimensional tunnel excavation.* Int. J. Rock Mechanics&Mining Science Vol. 25 N°5.

Pan Y. W., Dong J. J. [1991]. *Time-dependent tunnel convergence : advance rate and tunnel-support interaction.* Int. J. Rock Mech. Min. Sci.&Geomech. Abst.

Pan Y. W., Dong J. J. [1991]. *Time-dependent tunnel convergence : formulation of the model.* Int. J. Rock Mech. Min. Sci.&Geomech. Abst.

Panet M. Guellec P. [1974]. *Contribution à l'étude du soutènement d'un tunnel à l'arrière du front de taille.* Proc. 3rd Int. Cong. Rock. Mechanics, Denver, Vol 2 part B, pp. 1130-1134.

Panet M. [1976]. *Stabilité et soutènement des tunnels*. La mécanique des roches appliquée aux ouvrages de génie civil, Paris, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. pp. 663-690.

Panet M. [1979]. *Les déformations différées dans les ouvrages souterrains*. Proc. 4th. Conf. Int. Soc. Rock Mechanics Vol. 3, Montreux.

Panet M. [1995]. *Le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement*. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

Ranken R. E., Ghaboussi J. [1975]. *Tunnel design considerations : analysis of stress and deformation around advancing tunnels*. Report N°UILU-ENG 75-2016, National Technical Information Service, Springfields USA.

CONCLUSIONS GENERALES

Dans ce travail, on a abordé le problème de la modélisation du comportement mécanique des argiles raides. Cependant comme l'a remarqué [Lemaitre&Chaboche, 1984], "Le comportement d'un matériau donné ne peut être représenté par un modèle schématique qu'en fonction de l'utilisation souhaitée et de la précision désirée". Tout au long de ce mémoire, nous nous sommes efforcés de rester dans l'esprit de cette réflexion.

Pour ces matériaux, de nombreux aspects du comportement de la roche ont été abordés pour notre étude. Depuis les essais de laboratoire et la modélisation jusqu'au calcul des ouvrages. Cependant, l'utilisation des modèles de comportement en géotechnique ne va pas sans poser de problème. Contrairement aux structures métalliques pour lesquelles il n'est pas rare d'obtenir des écarts très faibles entre les prévisions des calculs numériques et les mesures réelles, il n'en est pas absolument de même, à de rares exceptions près en géotechnique. Les propriétés des matériaux peuvent varier dans une large proportion (dispersion vue dans le chapitre 1). Ces constatations suggèrent que l'utilisation des modèles en géotechnique doit passer par des calculs analytiques ou semi-analytiques pour mieux apprécier le modèle et des études paramétriques pour mieux caler les paramètres de comportement. Ce travail de thèse reste également dans cet esprit.

Pour la caractérisation du comportement mécanique de ces matériaux, l'analyse et l'interprétation des essais, nous montrent une dualité dans le comportement mécanique : à court terme, le comportement est de type élastoplastique; à long terme, il est de type viscoplastique. Cette dualité est intégrée dans le modèle rhéologique proposé, qui malgré sa simplicité rend compte dans une première analyse des phénomènes expérimentaux majeurs observés au cours des essais.

Concernant les tunnels de section circulaire, le calcul numérique par éléments finis nous montre qu'il existe une valeur pour la viscosité du matériau, en-dessous de laquelle le modèle viscoplastique avec rupture se confond avec le modèle viscoplastique de Bingham. Cependant, dans le cas des argiles raides pour lesquelles la viscosité des matériaux est relativement élevée, le nouveau modèle garde toute sa pertinence.

L'application à un cas concret de calcul des structures, (simulation numérique 2D axisymétrique du creusement des tunnels soutenus), nous montre l'importance de la vitesse de creusement. En effet, la comparaison entre les résultats des calculs viscoplastique et viscoplastique avec rupture montre que plus la vitesse de creusement du tunnel est élevée, plus l'écart entre les deux modèles est grand. Ce résultat est obtenu pour la gamme de viscosité pour laquelle le modèle viscoplastique avec rupture a toute sa pertinence. Cet écart peut dans certains cas atteindre 60%.

Cependant, tous les phénomènes observés expérimentalement n'ont pas été intégrés dans le modèle rhéologique. L'érouissage positif par exemple observé lors de l'apparition des déformations irréversibles sous faible déviateur, ou le radoucissement observé lorsque le déviateur maximal est atteint constituent des phénomènes qui peuvent facilement être intégrés dans le modèle, et constituent de ce fait des perspectives intéressantes.

Dans le domaine du calcul des structures, l'algorithme implanté est d'une portée générale (plusieurs critères y sont considérés). Son application à d'autres types de problèmes peut également être considérée comme une perspective. De même,

l'application des méthodes simplifiées de calcul des tunnels au modèle viscoplastique avec rupture constitue également une perspective envisageable.