

CHOIX DU TAUX DE DECONFINEMENT A LA POSE : EVALUATION DE LA ROBUSTESSE D'APPROCHES ANALYTIQUES

CHOOSE OF DECONFINEMENT RATE AT SUPPORT INSTALLATION: ASSESSING THE ROBUSTNESS OF ANALYTICAL APPROCHES

Nathan SIMON¹, Martin CAHN¹, Lassana TRAORE², Nicolas BERTHOZ²

¹ Terrasol, Paris, France

² CETU, Lyon, France

RÉSUMÉ – Que ce soit pour alimenter une modélisation numérique en déformations planes ou pour prédimensionner un soutènement ou un revêtement, la principale difficulté de la méthode convergence-confinement réside dans la détermination du déconfinement qui a déjà eu lieu au moment de la pose. La présente communication cherche à évaluer la robustesse de différentes approches analytiques, permettant de relier le taux de déconfinement à la distance au front, notamment dans le cas où l'influence de la rigidité du soutènement déjà mis en œuvre est prise en compte. Le cas particulier des terrains fortement plastifiés, creusés en méthode traditionnelle avec un soutènement rigide est discuté.

ABSTRACT – The main difficulty with the convergence-confinement method, whether it is used for numerical modelling in plane deformation or for the design of a temporary or permanent support, lies in determining the deconfinement rate at its installation. This paper seeks to assess the robustness of different analytical approaches for relating the deconfinement rate to the distance to the face, particularly when the influence of the stiffness of the support already in place is taken into account. The special case of highly plasticised ground excavated using conventional method with a rigid support is discussed.

1. Introduction

Popularisée en France à partir des années 1970 par Marc Panet, la méthode convergence-confinement est une approche analytique d'interaction sol-structure dont l'objectif est d'évaluer le déplacement en paroi et les efforts repris par le soutènement à l'équilibre avec le terrain.

Les hypothèses fondamentales qui la sous-tendent sont restrictives : tunnel circulaire, contrainte initiale isotrope σ_0 , terrain aux propriétés homogènes et isotropes.

Cette approche reste néanmoins très puissante : elle permet une réduction du problème tridimensionnel de creusement du tunnel, dû à la présence du front de taille, à un problème bidimensionnel équivalent en déformations planes. La convergence du tunnel générée par l'avancement du creusement est simulée au moyen d'une pression fictive de confinement σ_R s'appliquant sur la paroi latérale du tunnel, qui décroît avec l'éloignement du front de taille. On définit classiquement le taux de déconfinement $\lambda = 1 - \sigma_R/\sigma_0$, qui varie entre 0 loin en avant du front de taille et 1 loin en arrière (Figure 1).

En pratique, la méthode met en jeu trois courbes (Figure 2) :

- La courbe de réaction du massif ou *Ground Reaction Curve (GRC)* : celle-ci est issue de la résolution explicite du problème élastoplastique plan dans le cadre de la mécanique des milieux continus, et traduit le lien entre la pression de confinement (σ_R) et la convergence du massif (u_R). Elle est affine dans sa partie élastique, puis convexe dans la partie plastique.
- La courbe de réaction du support ou *Support Characteristic Curve (SCC)* : celle-ci permet d'obtenir la pression reprise par le soutènement (σ_R) en fonction de la

convergence depuis la pose du soutènement ($u_R - u_d$). Elle est généralement linéaire (rigidité normale K_{sn}), avec palier plastique.

$$\sigma_R = K_{sn} \frac{u_R - u_d}{R} \quad (1)$$

avec K_{sn} la rigidité normale du soutènement et R le rayon d'excavation

- Le profil de déplacement longitudinal ou *Longitudinal Displacement Profile (LDP)* : qui donne l'évolution du déplacement radial en paroi suivant la distance au front (notée x).

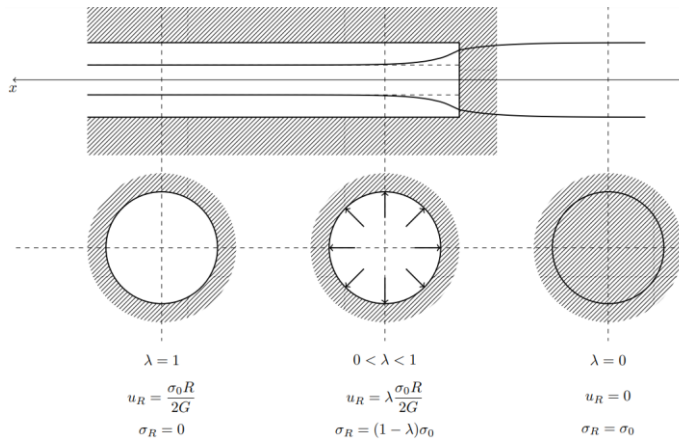


Figure 1. Principe de la méthode convergence-confinement (d'après Panet, 1995)

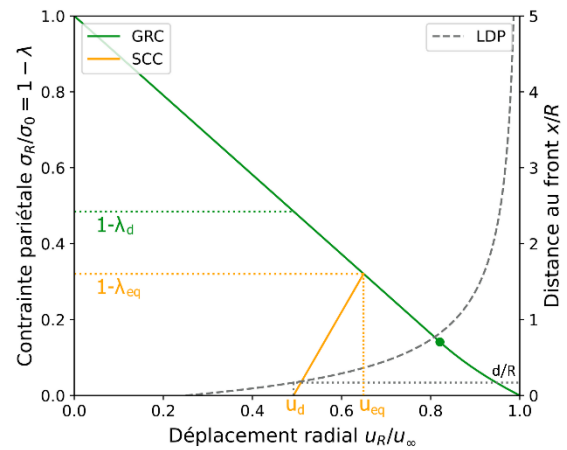


Figure 2. Mise en œuvre de la méthode convergence-confinement

A partir de la distance non soutenue d , correspondant à la distance moyenne de pose du soutènement par rapport au front, le déplacement à la pose u_d peut être déterminé sur la LDP, et le taux de déconfinement associé est le taux de déconfinement à la pose noté λ_d . Ce déplacement u_d définit alors le point de départ de la SCC, dont l'intersection avec la GRC permet de trouver le point d'équilibre du tunnel. Dans le cas de calculs numériques en déformations planes, l'influence de la distance du soutènement au front de taille est introduite via un taux de déconfinement λ_d . L'évaluation du taux de déconfinement λ_d du terrain lors de la pose du soutènement, déduit de la LDP, revêt donc un point majeur de la méthode.

Différentes formulations de LDP sont proposées dans la littérature pouvant être complétées par des méthodes « implicites », qui permettent la prise en compte de la rigidité du soutènement déjà posé à l'arrière du front de taille dans la détermination de l'équilibre.

Cet article questionne le domaine de validité de différentes LDP et de la méthode implicite donnée par Nguyen-Ming & Guo (1996), en particulier vis-à-vis des soutènements très rigides et des terrains très plastifiés, configurations qui peuvent être rencontrées pour des tunnels peu profonds en terrains meuble.

2. Mise en œuvre de la méthode implicite de Nguyen-Minh & Guo

2.1 Formulation de la relation

Les calculs numériques réalisés par Nguyen-Ming & Guo (1996) ont montré que la rigidité du soutènement déjà posé limite la convergence du terrain au niveau du décousu. Considérer un taux de déconfinement « non soutenu » conduit donc à surestimer la convergence du terrain avant la pose du soutènement et à sous-estimer les efforts exercés à terme dans le soutènement. Dans leurs études, Guo (1995), Nguyen-Minh et Guo (1998), ont réalisé une série de calculs numériques axisymétriques pour un comportement élastique ou élastique parfaitement plastique (critère de Mohr-Coulomb) en faisant notamment varier :

- La rigidité relative du soutènement par rapport à celle du terrain : $k_{sn} = K_{sn}/2G$ où G est le module de cisaillement du terrain,
- Le degré de plastification du terrain, paramétré par le nombre de stabilité $N_s = 2\sigma_0/\sigma_c$ où $\sigma_c = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi}$ est la résistance à la compression uniaxiale du terrain.

Les domaines de variation de ces deux paramètres correspondent à : $k_{sn} < 2$ et $N_s < 5$. A partir des résultats numériques, présentés en Figure 4, une relation entre les rapports soutenus et non soutenus des déplacements à la pose du soutènement $u_d^* = u_{sd}/u_d$ et à l'équilibre loin du front $u_\infty^* = u_{s\infty}/u_\infty$ est proposée :

$$\mathcal{G}(u_d^*, u_\infty^*) = u_d^* - 0.55 - 0.45u_\infty^* + 0.42(1 - u_\infty^*)^3 = 0 \quad (2)$$

En élasticité, cette relation permet d'établir un tableau permettant de corriger les taux de déconfinement calculés par la méthode traditionnelle (voir par exemple Panet, 1995), en fonction des rapports d/R et $K_{sn}/2G$. En élastoplasticité, il faut systématiquement rechercher le zéro de la fonctionnelle \mathcal{G} compatible avec l'équilibre, par exemple par dichotomie sur u_{sd} suivant le logigramme de la Figure 3.

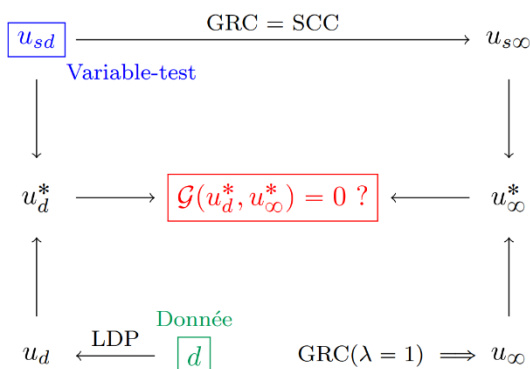


Figure 3. Logigramme de résolution.

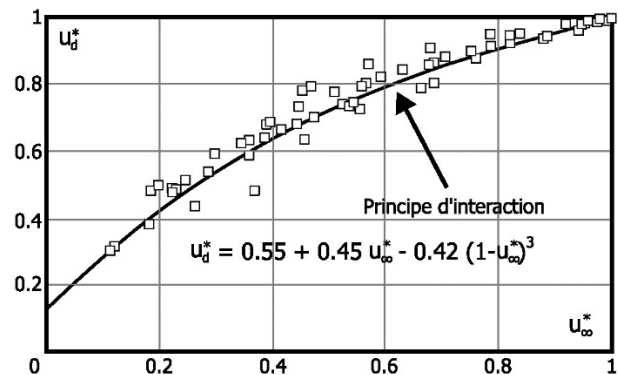


Figure 4. Principe d'interaction, d'après Nguyen-Minh & Guo (1998).

2.2 Erreur associée à la correction de Nguyen-Minh & Guo en considérant le terrain élastique

Dans la pratique, la fonction $\mathcal{G}(u_d^*, u_\infty^*)$ est rarement utilisée et le taux de déconfinement non soutenu est souvent corrigé au moyen du tableau, donné notamment dans la recommandation AFTES GT7.R6F1 (2001) :

En résolvant le principe d'interaction de Nguyen-Minh & Guo, dans le cas d'un massif élastique ce tableau compile les coefficients correcteurs β à affecter à λ_d (taux de déconfinement dans le cas du tunnel non soutenu) pour estimer λ_{sd} suivant les valeurs de k_{sn} et de d/R .

Il est courant de constater l'application de ces valeurs pour un comportement élastoplastique du terrain. Retenir ces valeurs « élastiques » dans le cas où de la plasticité se développe peut néanmoins conduire à introduire une erreur dans le calcul de l'équilibre final du tunnel soutenu.

Pour évaluer cette erreur, les figures 5 et 6 présentent, pour un critère de Tresca, la comparaison entre le coefficient correcteur issu du tableau 1 et le coefficient correcteur ré-évalué à partir de l'application de la relation de

$k_{SN} \backslash d/R$	0,25	0,50	0,75	1	2
0,25	0,97	0,97	0,98	0,99	0,99
0,50	0,93	0,96	0,96	0,98	0,99
1	0,88	0,92	0,95	0,97	0,98
2	0,83	0,89	0,93	0,96	0,97
5	0,76	0,85	0,89	0,94	0,97
10	0,71	0,82	0,86	0,93	0,96
∞	0,69	0,81	0,85	0,92	0,96

Tableau 1 : Coefficients correcteurs pour estimer λ_{sd} à partir de λ_d . (AFTES GT7.R6F1 (2001))

Nguyen-Minh & Guo (eq.2). L'étude paramétrique montre globalement que l'utilisation des coefficients correcteurs élastiques aboutit à une surestimation des taux de déconfinement à la pose du soutènement. Cette surestimation reste cependant inférieure à 25%. Pour les cas où $d/R \geq 0,5$, la surestimation est d'autant plus importante que le nombre de stabilité est élevé. A l'inverse, aucune tendance claire n'émerge dans le cas où $d/R = 0,25$.

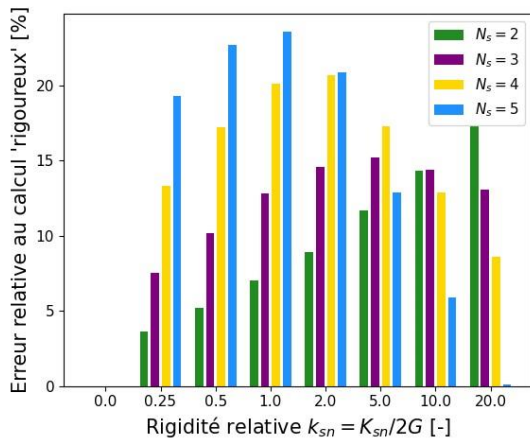


Figure 5. Erreur relative du facteur correctif au calcul rigoureux pour $d/R=0,25$.

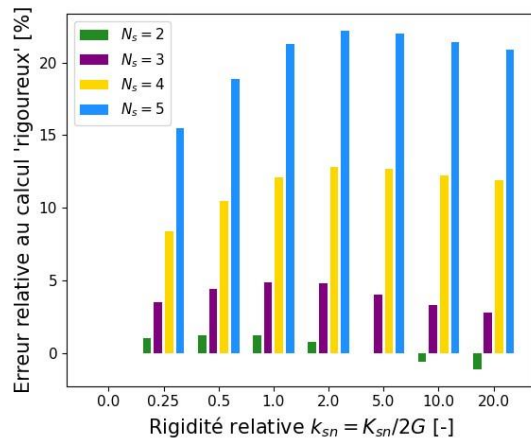


Figure 6. Erreur relative du facteur correctif au calcul rigoureux pour $d/R=1$.

3. Evaluation de la performance des LDP et de la méthode implicite de Nguyen-Minh & Guo

3.1. Cadre et objectif de l'étude

Une étude paramétrique numérique aux éléments finis est menée en s'appuyant sur les données d'un projet réel d'un tunnel dans les Alpes Suisses. L'objectif est d'évaluer la performance des LDP proposés dans la littérature et de la méthode implicite de Nguyen-Minh & Guo, en les comparant aux résultats numériques. Cette démarche a récemment été entreprise par De La Fuente et al. (2019) et (2021), et l'on propose dans cette communication de poursuivre cette analyse en se concentrant sur la quantification de l'erreur commise, notamment dans des domaines où la méthode ne devrait plus être valable. En effet, dans la pratique, cette approche reste couramment utilisée lors du pré-dimensionnement des tunnels de faibles profondeurs, pour lesquels l'hypothèse d'isotropie de contraintes initiales est mise en défaut.

Les différentes caractéristiques mécaniques de terrains précisées dans le Tableau sont investiguées, avec un coefficient de Poisson $\nu = 0,25$ et une *dilatance* ψ nulle.

La contrainte initiale isotrope introduite dans les modèles axisymétriques aux éléments finis est choisie de telle sorte que le nombre de stabilité $N_s = 2\sigma_0/\sigma_c$ varie entre 2 (plastification modérée) et 5 (plastification importante). Chaque calcul élastoplastique est également réalisé en élasticité linéaire.

Quatre types de soutènements parfaitement élastiques sont étudiés pour un rayon équivalent de quatre mètres (cf. Tableau). Les cas considérés correspondent à une excavation traditionnelle, avec pose de cintres tous les 1 à 2 mètres et une distance minimale non soutenue d_1 de 25 cm. La raideur adimensionnée $k_{sn} = K_{sn}/2G$ varie ainsi entre 0,175 et 15,25.

Le domaine de l'étude en termes de nombre de plasticité reprend celui initialement étudié par Guo (1995). Au-delà de $N=5$, la plastification du front de taille rend la méthode CV-CF inutilisable en pratique, comme souligné par De La Fuente (2021).

Tableau 2. Configurations considérées

Cas	1	2	3	4
E [MPa]	90	400	800	1900
c' [kPa]	40	90	130	170
φ' [°]	24	34	41	50
$\sigma_0(N_s = 2)$ [MPa]	0,123	0,339	0,571	0,934
$\sigma_0(N_s = 5)$ [MPa]	0,308	0,846	1,426	2,335

Tableau 3. Soutènements proposés.

Soutènement	BP[10cm]	BP[15cm]	HEB200+BP[25cm]	HEB200+BP[25cm]
Pas p [m]	2	1.25	1.5	1
Rigidité K_{sn} [MPa]	265	400	950	1100

3.2. Modèle numérique

Le modèle est pris suffisamment grand devant le rayon, avec une largeur de 160 m pour une longueur de 220 m afin de ne pas avoir d'effets de bords. Un détail du maillage est présenté sur la Figure 8. Une étude de sensibilité (non présentée ici) est menée pour s'assurer qu'un raffinement supérieur du maillage ne conduit pas à une modification sensible des résultats.

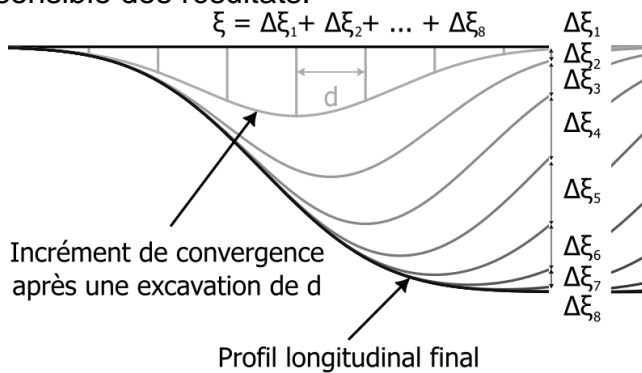


Figure 7. Principe de la méthode stationnaire, d'après Corbetta (1990).

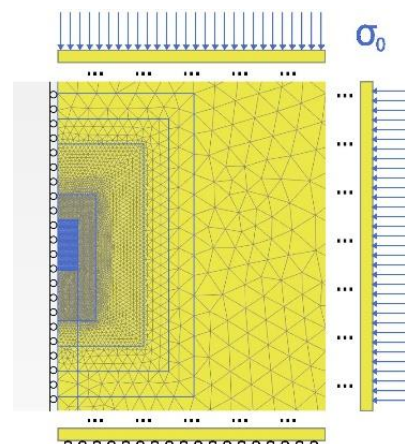


Figure 8. Maillage Plaxis et conditions limites (11489 éléments)

Pour réduire le temps de calcul, la méthode stationnaire développée par (Corbetta, 1990) est adoptée. Ainsi, après une phase d'éloignement du bord avec un taux de déconfinement proche de celui analytiquement attendu (ceci pour accélérer la convergence), plusieurs pas d'excavation sont réalisés jusqu'à obtenir la stationnarité des déplacements par phase. Il est alors possible de sommer pas par pas le dernier profil incrémental obtenu pour remonter au profil longitudinal réel (Figure 7). La figure 9 illustre par ailleurs le bienfondé de cette approche « incrémentale » par comparaison avec un calcul complet pas à pas.

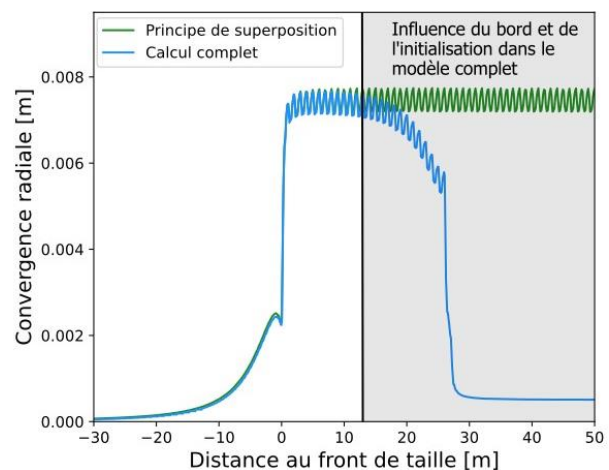


Figure 9. Comparaison des LDP stationnaire et issues d'un modèle complet

Celui-ci est mené jusqu'à obtention d'un profil stationnaire au voisinage du front de taille.

4. Résultats et discussion

4.1 Comparaison des profils de déplacements longitudinaux

Plusieurs profils de déplacement longitudinaux sont proposés dans la littérature, parmi lesquels Corbetta (1990), Panet (1995), Chern (1998), Unlu & Gercek (2003) et Vlachopoulos & Diederichs (2009). Tous sont basés sur des simulations numériques de tunnels non soutenus, à l'exception des travaux de Chern qui s'appuient sur des mesures réelles de tunnels soutenus.

Le principe de similitude de Corbetta (1990) est employé pour adapter au cas élastoplastique les LDPs conçues pour l'élasticité. Il consiste en une homothétie de centre O et de rapport $\xi = u_{\infty}^{el}/u_{\infty}^{ep}$. Le premier objectif de l'étude est d'évaluer la pertinence des différentes relations proposées dans la littérature. Des simulations sans soutènement sont donc menées, sur la base des données précédentes. Le profil de Chern *et al.* diverge des autres LDP et des résultats des modélisations.

En élasticité, les profils de Panet, Corbetta et Unlu sont quasiment similaires et cohérents avec résultats des modélisations numériques. En élastoplasticité, un phénomène d'oscillation ayant pour période spatiale le pas de creusement apparaît, et est amplifié par la plastification lié au point singulier au niveau du front de taille. La plupart des profils numériques sont bien approchés par le profil de Panet, tandis qu'en cas de forte plastification, le profil de Vlachopoulos & Diederichs permet de mieux capter les valeurs moyennes du profil numérique.

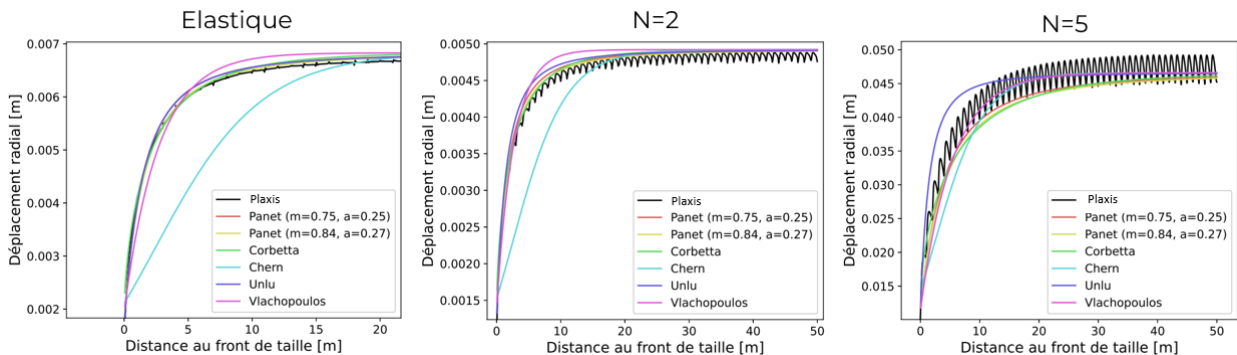


Figure 10. Comparaison des LDP

4.2 Évaluation de robustesse de la méthode de Nguyen-Minh & Guo

L'étude des LDP numériques met en évidence l'apparition d'oscillations, qui perturbent la bonne lecture du profil. Si le point d'intérêt est situé proche du front de taille, à la distance correspondant à l'installation du soutènement, le risque y est de confondre l'oscillation avec la croissance locale du profil. Dans un objectif d'évaluation de la pertinence des méthodes analytiques, il semble alors plus sûr d'évaluer le déplacement loin du front de taille, là-même où le profil est « stabilisé », et en se basant par exemple sur la valeur moyenne des pics. La loi de comportement du soutènement étant connue et consistante (élastique linéaire), aucune erreur supplémentaire ne peut être commise si l'on souhaitait revenir à u_d à partir de u_{∞} (car $u_{\infty} = u_{eq}$). Sur les figures 11 à 13, l'erreur relative de la méthode convergence confinement (avec ou sans méthode implicite) par rapport au calcul numérique Plaxis est présentée :

$$\text{Erreur} = \frac{u_{\infty}^{\text{CV-CF}} - u_{\infty}^{\text{Plaxis}}}{u_{\infty}^{\text{Plaxis}}} \quad (4)$$

4.2.1. Cas de plasticité modérée $N_s \leq 2$

Tel qu'attendu, la définition des taux de déconfinement à la pose basée sur les LDP non soutenue surestime systématiquement les déplacements à l'équilibre. Dans un calcul « orienté tassement », l'erreur associée peut être assumée, mais il apparaît important de garder à l'esprit qu'elle dépasse 20% lorsque le rapport k_{sn} est supérieur à 6.

La méthode implicite de Nguyen-Minh & Guo a, elle, tendance à sous-estimer les valeurs de déplacement radial et ainsi surestimer les contraintes reprises par la structure. Globalement, l'erreur est plus importante dans le cas d'une plasticité modérée ($N_s = 2$) par rapport au cas élastique du terrain ($N_s > 1$). Pour des valeurs de k_{sn} inférieures à 4, la différence entre les calculs numériques et analytique reste inférieure à 10 % ; ce qui confirme la pertinence de la méthode de Nguyen-Minh & Guo dans la gamme étudiée par les auteurs. Cependant, il est important de souligner que l'erreur devient très significative dès lors que la rigidité relative augmente. Par exemple, pour $k_{sn} = 15$, les calculs montrent des erreurs relatives de 17% en élasticité et de 27% pour $N_s = 2$.

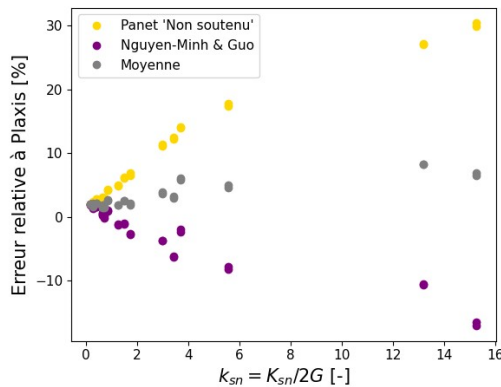


Figure 11. Erreur relative en élasticité.

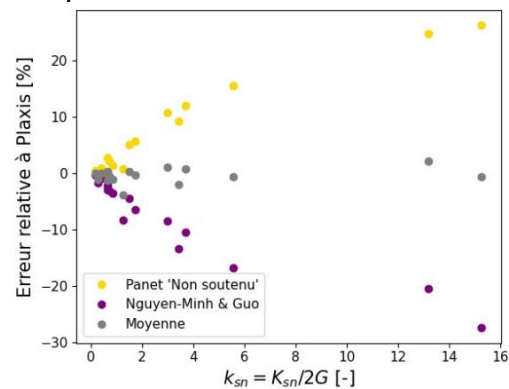


Figure 12. Erreur relative en plasticité modérée ($N=2$).

4.2.2. Cas de forte plasticité $N_s = 5$

La Figure 13 montre que dans le cas d'une forte plasticité du terrain ($N_s = 5$), les différences sont plus importantes que celles observées dans le cas d'une plasticité modérée ($N_s = 2$). Cette sous-estimation des déplacements se remarque même pour les cas de faibles rigidités relatives du soutènement avec des valeurs allant de 15% à 45%. En effet, les modèles numériques montrent que le front de taille plastifie entièrement, qui peut se traduire comme un « éloignement fictif » du front.

Sans que cela ne puisse constituer une règle générale, on peut par ailleurs observer que, quel que soit le niveau de plasticité, et même dans le cas de forts contrastes de rigidité, la moyenne des deux approches non soutenue et implicite, permet d'obtenir une bonne estimation du déplacement numérique.

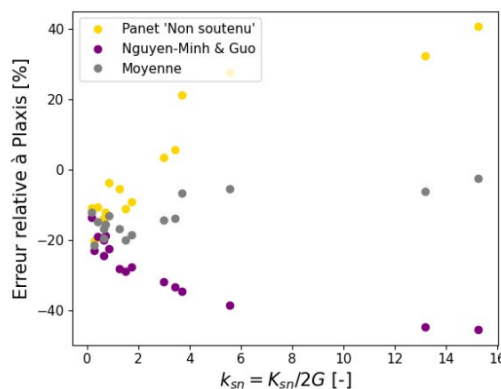


Figure 13. Erreur relative en forte plasticité ($N=5$).

5. Conclusion

La présente étude est en accord avec les conclusions sur l'applicabilité de la méthode convergence-confinement obtenues par De La Fuente *et al.* (2021). Elle la complète en se focalisant sur le cas courant des tunnels creusés en méthode traditionnelle avec des pas de longueur limitée et met en évidence que l'erreur sur la détermination de l'équilibre est fonction croissante de la rigidité du soutènement et du développement de la plasticité. Une quantification de cette évolution est présentée pour les cas étudiés. Pour des terrains présentant une plasticité modérée, la relation de Nguyen-Minh et Guo donne des résultats satisfaisants si $k_{sn} \leq 4$. En revanche, lorsque le soutènement posé est très rigide par rapport au terrain, les erreurs deviennent importantes et davantage marquées dans des terrains à forte plasticité où elles peuvent atteindre jusqu'à 45%.

Comme déjà souligné par Panet & Sulem (2021), l'étude paramétrique menée confirme le bienfondé de la LDP proposée par Panet en 1995. La LDP de Vlachopoulos et Diederichs trouve elle son intérêt lorsque le développement de la plasticité est important.

Il convient alors de tenir compte de ces limites de validité et des erreurs pouvant être induites par l'utilisation des LDP et par l'application de la méthode implicite de Nguyen-Minh & Guo, notamment pour des tunnels urbains peu profonds, souvent creusés dans des terrains de faibles caractéristiques mécaniques. Pour ces tunnels où l'état de contrainte n'est pas homogène, des calculs tridimensionnels dédiés, pouvant notamment tirer profit de la méthode stationnaire, sont préconisés pour dimensionnement les soutènements.

6. Références

- AFTES, GT7.R6F1. (2001) La méthode convergence-confinement.
- Chern J.C., Shiao F.Y., Yu C.-W. (1998). An empirical safety criterion for tunnel construction, Proc. Reg. Symp. Sed. Rock. Eng.
- Corbetta F. (1990). Nouvelles méthodes d'étude des tunnels profonds : Calculs analytiques et numériques, Thèse de doctorat, École nationale des mines de Paris, France.
- De La Fuente M., Taherzadeh R., Sulem J., Nguyen X., Subrin D, (2019) Applicability of the convergence-confinement method to full-face excavation of circular tunnels with stiff support system, Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52 (7), pp.2361-2376.
- De La Fuente M., Berro F., Khodr S., Taherzadeh R., Sulem J., (2021). Effect of the lay distance of a stiff support on the applicability of the Convergence-Confinement method, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.
- Guo C. (1995). Calcul des tunnels profonds soutenus, Thèse de doctorat, École nationale des ponts et chaussées, France.
- Nguyen-Minh D., Guo C. (1998). A new approach to convergence confinement method, Advances in Rock Mechanics, World Scientific, pp 267-279.
- Oke J., Vlachopoulos N., Diederichs M. (2018). Improvement to the Convergence-Confinement Method : Inclusion of Support Installation Proximity and Stiffness, Rock Mech Rock Engng.
- Panet M. (1995). Le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement, Presses de l'École nationale des ponts et chaussées.
- Panet M. Sulem J.(2021). Le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement, Presses de l'École nationale des ponts et chaussées.
- Unlu T., Gercek H. (2003). Effet of Poisson's ratio on the normalized radial displacements occuring the face of a circular tunnel, Tunnelling and Underground Space Technology, 18
- Vlachopoulos N., Diederichs M. (2009). Improved Longitudinal Displacement Profiles for Convergence Confinement Analysis of Deep Tunnels, Rock Mech Rock Engng.