

Modélisation numérique bidimensionnelle de l'effet de chargements des revêtements de tunnels circulaire et non circulaire en présence d'écoulement

Two-dimensional numerical modeling of the loading effect on circular and non-circular tunnel coverings in the presence of flow

Said Kechida^{*1,3}, Farid Bouchelghoum², Fares Laouacheria³ & Hocine Amarchi³

¹Laboratoire de recherche sols et hydraulique, université badji mokhtar, bp 12, annaba, 23000, Algérie.

²Office national d'assainissement Sétif.

³Département d'hydraulique, Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba, 23000, Algérie.

Soumis le : 18/09/2017

Révisé le : 30/05/2018

Accepté le : 04/06/2018

ملخص

تعتبر دراسات الحمولات المختلفة على دعم الأنفاق، وأثار تدفق المياه ذات أهمية نظرية وتطبيقية كبيرة ولكن هذا النوع من الدراسات لم يولى الأهمية المناسبة نظراً لتعقيدها خاصة في الأوضاع الهيدروميكانيكية المقترنة التي تتطلب مدة حسابية طويلة. في هذا العمل، سوف نقوم بدراسة إمكانية أخذ بعين الاعتبار دور المياه وتأثيره في نهج مبسط المتمثل في الحسابات الميكانيكية الكلاسيكية. ومع ذلك، فإن انتهاج الفصل يتميز بغاية البساطة في التنفيذ. ويسمح هذا المنهج، إذا كنا نفترض حساب في المجال الهرن في تحليل أولي، من الظواهر المعقدة، مثل إعادة توزيع الإجهاد على بطانة النفق في وقت الإصلاح الجزئي للنفق. لذلك، نقدم دراسة رقمية لتأثير تدفق المياه على نفق بشكل دائري باستخدام Flac2D و Flac3D. وتبين هذه الدراسة أن النمذجة الرقمية تسمح بتوفير عناصر من التفكير مثيرة للاهتمام.

الكلمات المفتاحية: النمذجة الرقمية - Flac3D - نفق - بطانة - اقتران هيدروميكانيكي.

Résumé

Le problème des chargements différés sur le soutènement des tunnels, et des effets d'écoulement d'eau, sont des problèmes d'un grand intérêt pratique mais relativement peu abordés en raison de leur complexité surtout en mode hydromécanique couplé qui nécessitent de grands temps de calcul. Dans ce travail, on examine la possibilité de prendre en compte le rôle de l'eau dans une approche simplifiée, qui se ramène à un calcul mécanique classique. Pour autant, une approche découplée présente l'avantage d'être extrêmement simple à mettre en œuvre, et elle permet d'aborder, si l'on se contente d'un calcul élastique en première analyse, des phénomènes complexes, comme la redistribution des contraintes sur le revêtement d'un tunnel lors d'une réparation partielle. Donc, on présente une étude numérique de l'effet de l'écoulement d'eau sur un tunnel circulaire à l'aide du code de calcul numérique explicite Flac2D et Flac3D. Cette étude montre que la modélisation numérique peut permettre de fournir des éléments de réflexion intéressants.

Mots clés : Modélisation numérique – Flac – tunnel – revêtement – couplage hydromécanique.

Abstract

The problem of differed loadings on the tunnels support, and the water flow effects, are problems of a big convenient interest but landed relatively little especially because of their complexity in coupled hydromechanical mode that require of big calculation times. In this work, we examine the possibility to take in account the role of water in a simplified approach that amounts to a classic mechanical calculation. For as much, an uncoupled approach presents the advantage to be extremely simple to put in work, and it permits to land, if we are content with an elastic calculation in first analysis, of the complex phenomena, as the stress redistribution on the tunnel liner at the time of a partial repair. Therefore, we present a numerical study of water flow effect on a circular tunnel with using the explicit numeric code Flac2D and Flac3D. This study shows that the numeric modelling can permit to provide elements of interesting reflection.

Key words: Numeric modelling – Flac3D – tunnel – liner – hydromechanical coupling.

*Auteur Correspondant : said_kechida@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

Le dimensionnement des revêtements de tunnels repose sur l'estimation des efforts qui s'exercent sur eux. L'une des approches couramment utilisées est la méthode du solide composite [1] [2]. Elle repose sur une modélisation mécanique du revêtement et du terrain comme des milieux continus et permet de tenir compte des particularités géométriques et géotechniques de l'ouvrage ainsi que des différentes phases de réalisation. En pratique, elle est souvent utilisée en considérant une coupe en section transversale du tunnel et du terrain encaissant. Le caractère tridimensionnel du processus de creusement du tunnel est introduit au moyen de la méthode de *convergence-confinement* [3][4] qui permet de simuler l'avancement du front par l'intermédiaire d'un paramètre adimensionnel λ caractérisant les efforts d'excavation à appliquer sur le bord de la galerie dans les différentes phases de calcul [5][6]. Dans cette représentation bidimensionnelle par Flac2D, le caractère tridimensionnel est pris en compte au moyen de la méthode de relaxation.

Cette approche doit être complétée par une étude du comportement différé du massif à long terme autour du tunnel. En pratique, la prise en compte de l'évolution à long terme des efforts dans le revêtement du tunnel est cependant peu courante. Cette évolution dépend de l'évolution des matériaux constituant le revêtement, du fluage des terrains, des phénomènes de gonflement (dans certaines roches) et de l'évolution du régime hydraulique. On s'intéresse ici plus particulièrement à ce dernier phénomène.

Parmi les études sur le sujet, on peut citer l'étude de Atwa (1996), qui a réalisé des calculs couplés pour étudier l'évolution des tassements de surface à long terme due à la consolidation autour des tunnels [7]. El Houari Boucif (2015) a étudié le comportement mécanique tridimensionnel des tunnels en présence d'eau [8]. Cependant, Zadjajoui (2016) a utilisé la méthode des éléments finis pour analyser les écoulements autour de tunnels en conditions bidimensionnelles et en régime transitoire [9].

En s'intéressant particulièrement à l'influence de la perméabilité du revêtement des tunnels. Benamar (1996) a pris en compte les couplages hydromécaniques pour étudier le lien entre la vitesse d'avancement du front de taille et les contraintes calculées dans le revêtement à la fin de la construction [10].

On discute dans la suite les sollicitations dans le revêtement induites par les évolutions de la pression du fluide dans le massif, et au moyen de les prendre en compte dans un calcul numérique découplé. Les résultats obtenus sont comparés avec les méthodes couramment utilisées pour prendre en compte la charge d'eau dans le calcul des sollicitations imposées au revêtement.

2. POSITION DU PROBLEME

On considère un tunnel creusé dans un massif saturé. La construction est modélisée en deux étapes (fig. 1) :

- l'excavation du tunnel, que l'on simulera en appliquant sur le contour de la zone excavée un déconfinement total (ce qui correspond au cas où le revêtement serait mis en place loin derrière le front de taille) ;
- la pose du revêtement proprement dite. Compte tenu du choix fait à l'étape précédente pour le taux de déconfinement, le revêtement n'est pas chargé à l'issue de la construction (on néglige son poids propre).

À l'issue de la construction, il règne dans le terrain un champ de pression interstitielle qui résulte du déconfinement lié à l'excavation, donc différent de la pression hydrostatique initiale. À long terme, on suppose en première analyse que la pression redevient hydrostatique, et on se propose de calculer les efforts dans le revêtement du tunnel.

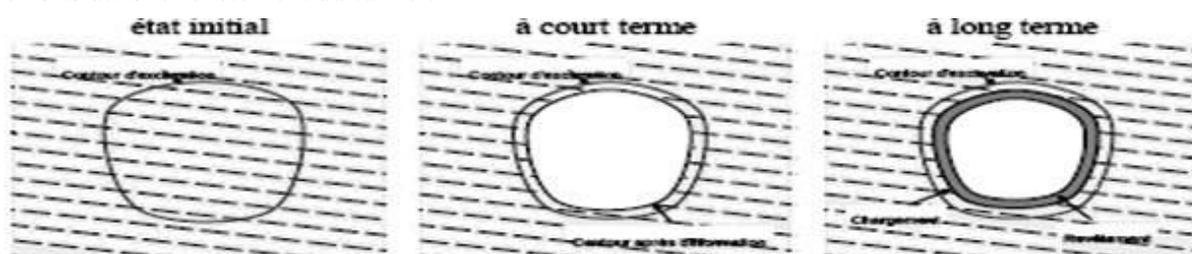


Figure 1. États initial, à court terme et à long terme.

Dans la suite, on ne s'intéresse qu'à la situation à court terme, immédiatement après l'excavation, et à la situation à long terme, après rétablissement de la pression hydrostatique. L'analyse est conduite en supposant que le terrain encaissant peut être modélisé comme un milieu élastique.

2.1. Formulation du problème à court terme

On suppose qu'il règne initialement dans le massif de sol un champ de contraintes géostatique σ^0 et un champ de pression p^0 hydrostatique. On étudie tout d'abord la situation immédiatement après l'excavation ($t=0^+$), en considérant que le creusement est suffisamment rapide pour que l'évolution du terrain soit non drainée. On note σ^{0+} et p^{0+} les champs de contraintes et de pression à court terme dans le massif. On désigne par $\delta\sigma = \sigma^{0+} - \sigma^0$ et $\delta p = p^{0+} - p^0$ les variations du champ de contraintes et de pression entre cette configuration et la configuration initiale. La formulation du problème est la suivante :

$$\operatorname{div} \delta\sigma = 0 \quad (\text{Équation d'équilibre}) \quad (1)$$

$$\delta\sigma = (\lambda_0 + k_w / n) \operatorname{tr}(\varepsilon) \mathbf{1} + 2\mu\varepsilon \quad (\text{Loi de comportement}) \quad (2)$$

$$\delta p = -k / n \operatorname{tr} \varepsilon \quad (\text{Conservation de la masse d'eau en conditions non drainées}) \quad (3)$$

A laquelle on ajoute les conditions aux limites mécaniques :

$$\xi = 0 \text{ sur le plan } z=0$$

$$\delta\sigma n = -\sigma^0 n \text{ sur le contour de l'excavation}$$

L'excavation du tunnel cause une perturbation des champs de contraintes et de déformations, qui se traduit par une perturbation du champ de pression hydraulique. Le problème peut être résolu numériquement avec des caractéristiques mécaniques non drainées. Cette perturbation de la pression se dissipe ensuite au cours du temps après la pose du revêtement ; jusqu'au rétablissement de l'état hydrostatique.

2.2. Problème à long terme

L'évolution de la surpression se traduit par une redistribution des contraintes dans le massif entre la situation à court terme après l'excavation et la situation à long terme. La prise en compte de la variation de la pression du fluide dans un milieu poreux élastique est analogue à la prise en compte d'une variation de température dans un milieu thermoélastique ; elle passe par la définition d'un champ de forces volumiques associées à la variation de pression entre les instants considérés. Cette variation est égale à $-\delta p$ si l'on suppose que, à long terme, la pression revient à sa valeur initiale hydrostatique (en réalité, si le revêtement n'est pas imperméable, le champ de pression atteint un état stationnaire qui ne coïncide pas avec l'état hydrostatique de départ, mais que l'on peut obtenir au moyen d'un calcul hydraulique découplé). Le code Flac2D dispose d'une option permettant de prendre en compte ce type de chargement dans un calcul découplé, dans lequel le comportement élastique linéaire est cette fois décrit par les modules drainés [11]:

$$\delta\sigma = \lambda_0 \operatorname{tr}(\varepsilon) \mathbf{1} + 2\mu\varepsilon - \delta p \mathbf{1} \quad (\text{Loi de comportement}) \quad (4)$$

Le rétablissement de la pression se traduit par une déformation du terrain, qui est gênée par la présence du revêtement du tunnel, plus rigide que lui. Il en résulte une mise en charge du revêtement, qui est l'objet des discussions qui suivent.

3. MODELISATION NUMERIQUE DECOUPLEE ET COMPARAISON AVEC LE MODE COUPLE PAR FLAC2D

Les calculs ont été réalisés en configuration bidimensionnelle. Dans le but d'étudier l'influence de la géométrie du tunnel sur la redistribution du chargement sur le revêtement due à la variation de la pression, deux maillages ont été considérés (fig. 2 et 3) : le premier contient un tunnel *circulaire* et le deuxième contient un tunnel *non circulaire*. Le diamètre du tunnel est de 10 m et l'axe se trouve à une profondeur de 25 m.

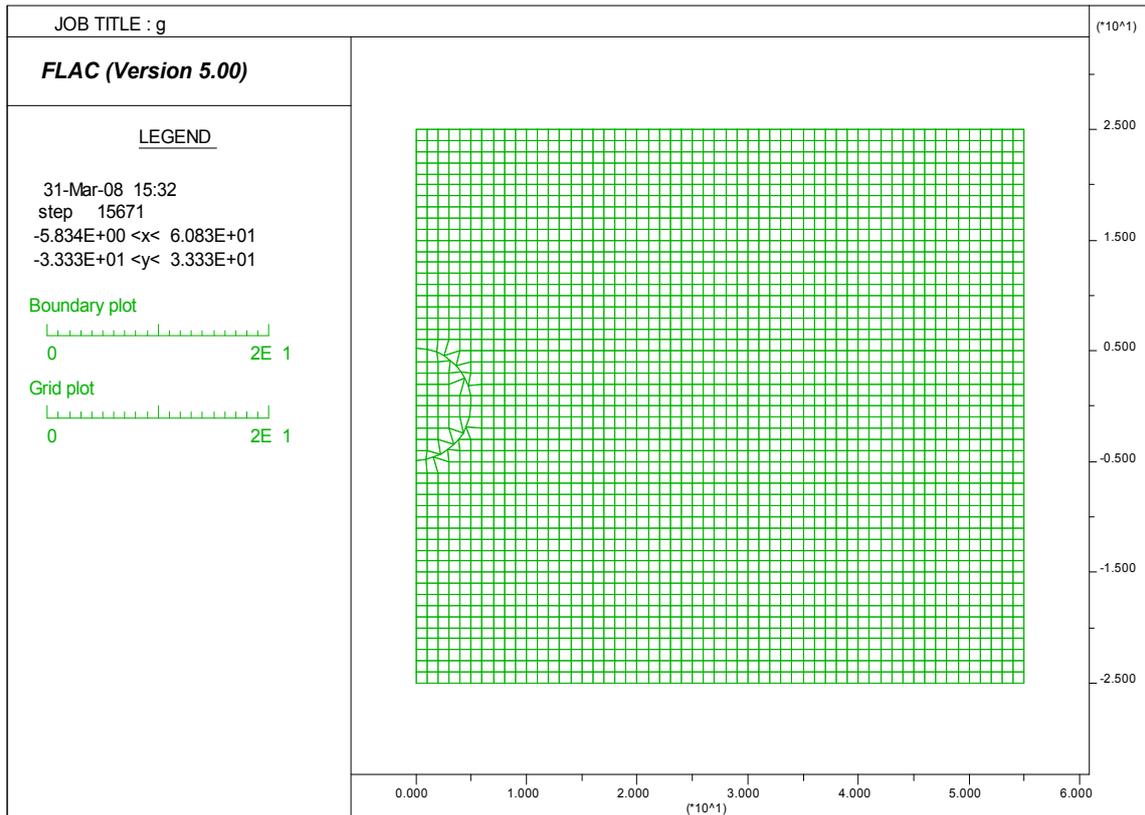


Figure 2. Maillage utilisé pour le calcul numérique (cas d'un tunnel circulaire).

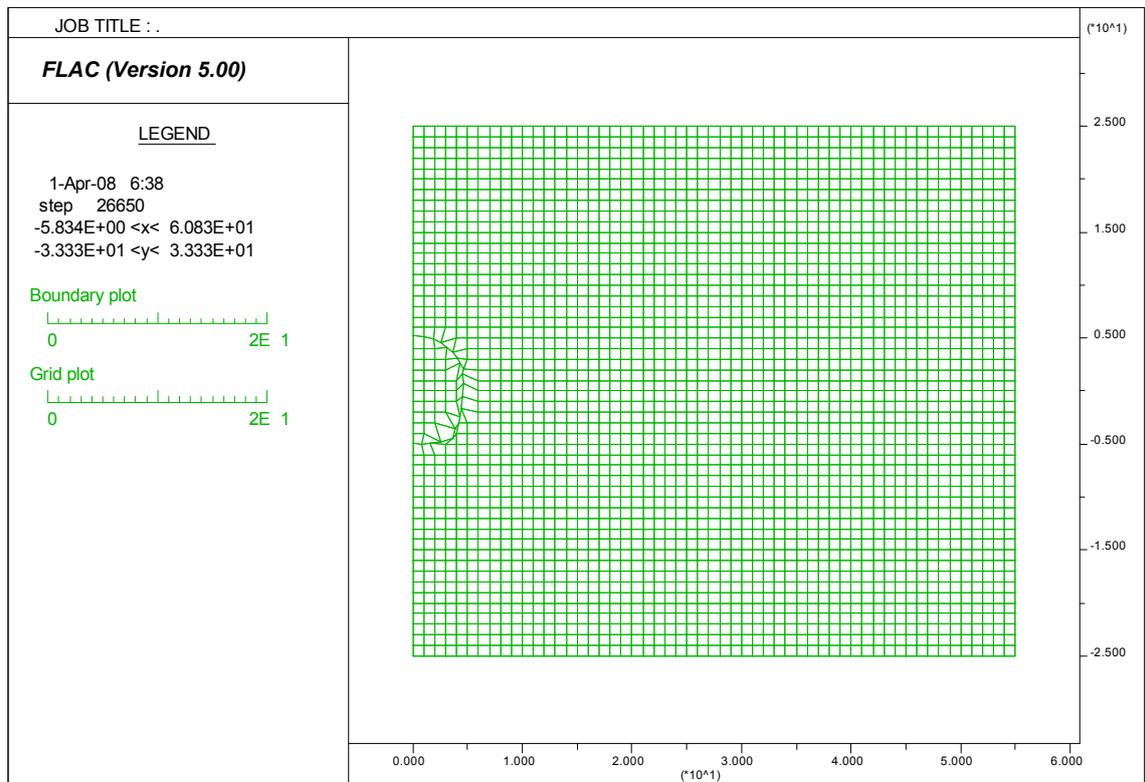


Figure 3. Maillage utilisé pour le calcul numérique (cas d'un tunnel non circulaire).

Les caractéristiques mécaniques et hydrauliques utilisées pour les calculs sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques mécaniques utilisées pour les calculs numériques. (Nguyen, 2003) [12].

	Court terme	Long terme
Module d'Young (KPa)	115238.10	100000
Coefficient de Poisson	0.498	0.3
Poids volumique du sol γ (KN/m ³)		20
Poids volumique de l'eau γ_w (KN/m ³)		10
Module de compressibilité de l'eau (MPa)		2000
Porosité de la couche de sol		0.2

On récapitule rapidement la démarche à suivre pour réaliser la simulation décrite ci-dessus avec Flac2D. Partant d'un maillage comptant trois groupes (intérieur du tunnel, revêtement, terrain), on enchaîne les trois étapes suivantes :

- la première étape consiste à chercher l'état des contraintes et des déplacements à court terme. On réalise un calcul *non drainé*, avec le code Flac2D, en adoptant pour le terrain un comportement *élastique* linéaire *isotrope* avec des paramètres « *non drainés* », l'intérieur du tunnel étant constitué d'éléments auxquels on attribue un *module nul*. Le chargement imposé est un chargement surface de type forces d'excavation (commande *Model null* du code Flac2D) [11], avec un taux de déconfinement égal à 1 (100%);
- la deuxième étape consiste à relire le fichier de résultats issu du calcul précédent pour calculer la pression aux nœuds du maillage. Ce calcul nécessite, l'utilisation de la fonction FISH "EXTRAP.FIS" pour extrapoler les variables de la zone-basée aux nœuds du maillage [11].
- la troisième étape consiste à calculer les déplacements induits par la variation de la pression à long terme, à l'aide d'un calcul mécanique (avec la commande *Set Mech On*), dans lequel le chargement est un champ de pression de fluide, la réponse mécanique qui résulte de la variation de pression interstitielle est calculée. Le mode de calcul d'écoulement est bloqué et le module volumique de l'eau est mis à **zéro**. Le mode de calcul mécanique est permis en faisant des calculs en déformations larges.

L'état initial des contraintes est spécifié supposant qu'aucun écoulement n'est présent. La densité du sol donnée dans le Tableau 1 est considérée d'être la valeur non saturée, et supposant une valeur de 10 m/s² pour la gravité, la contrainte totale verticale calculée au fond du modèle (profondeur de 50 m) est alors -1.1 MPa. Une variation linéaire basée sur cette valeur est entrée pour les contraintes *yy*, en utilisant la commande *Initialnstress*. Les composantes des contraintes *xx* et les contraintes *zz* sont aussi entrées, basé sur le rapport des pressions des terres au repos, $K_o = 0.5$, donc, $S_{xx}=S_{zz}= S_{yy}*0.5= -0.55\text{MPa}$.

Les calculs de *l'écoulement des eaux* souterraines sont bloqués. On calcule l'état initial des contraintes. Le modèle devrait être très près d'un état de l'équilibre. Pour assurer qu'une distribution des contraintes uniformes est développée dans le modèle, l'option *Solve Initial Equilibrium as elastic model* est sélectionnée [11]. En revanche, la prise en compte d'un comportement élastoplastique dans un calcul découplé est plus délicate. Il est alors nécessaire de réaliser un calcul couplé, à l'aide du mode de calcul hydromécanique couplé de Flac2D, mais la mise en œuvre est moins simple que celle d'un calcul découplé.

4. RESULTATS DU CALCUL DES EFFORTS INDUITS DANS LE REVETEMENT AVEC FLAC2D

Les figures 4 et 5 montrent le champ de pression à court terme calculé avec la procédure précédente, pour un champ de contraintes initiales dans le massif géostatique avec un coefficient de poussée des terres au repos de $K_o=0,5$ pour un tunnel circulaire et non circulaire. On montre que la variation de pression ne varie pas de manière simple sur le bord de l'excavation (à noter que la charge hydraulique initiale est uniforme et prend la valeur $h = 50\text{m}$ où $P=500000\text{Pa} =500\text{KPa}$).

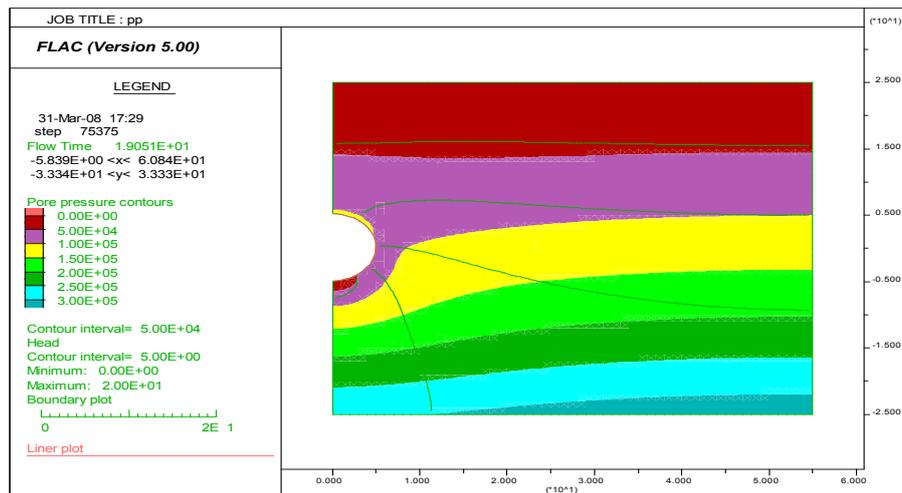


Figure 4. Distribution de la charge hydraulique à court terme due à l'excavation (cas d'un tunnel circulaire). Flac2D.

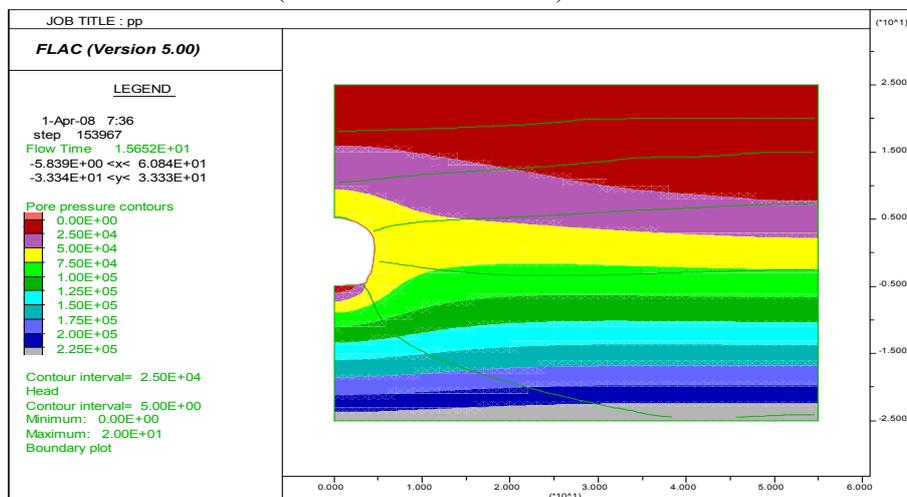


Figure 5. Distribution de la charge hydraulique à court terme due à l'excavation(cas d'un tunnel non circulaire). Flac2D

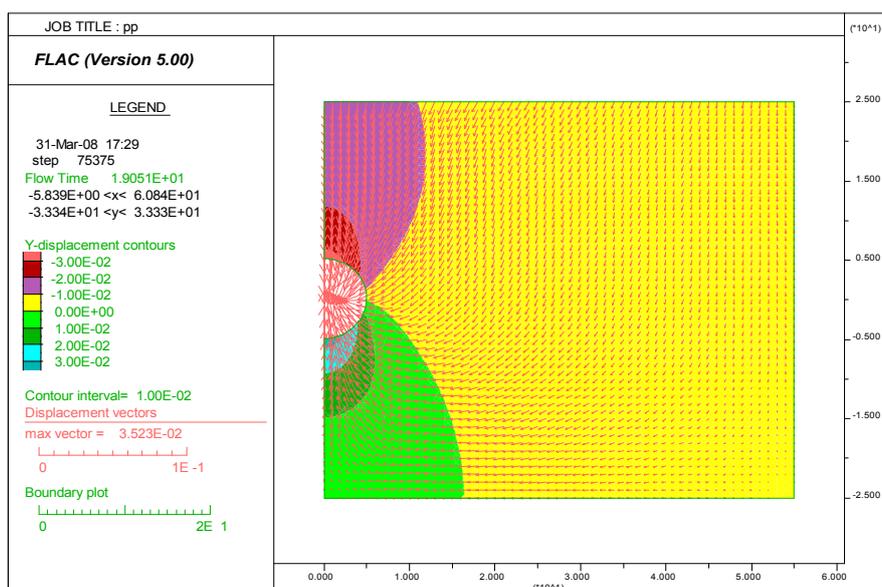


Figure 6. Champ et vecteurs de déplacements dans le maillage après installation du revêtement du tunnel circulaire. Flac2D.

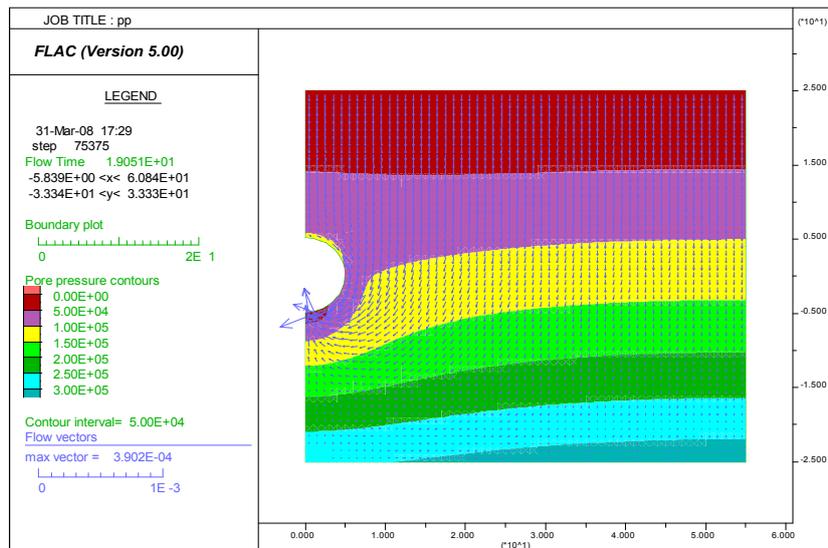


Figure 7. Champ de pressions interstitielles et vecteurs d'écoulement dans le maillage après installation du revêtement du tunnel circulaire. Flac2D.

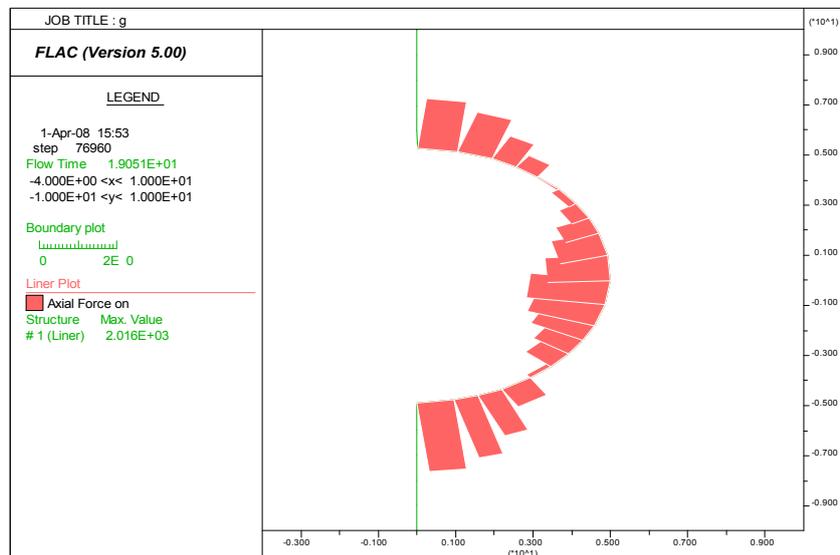


Figure 8. Effort normal sur le revêtement du tunnel circulaire. Flac2D.

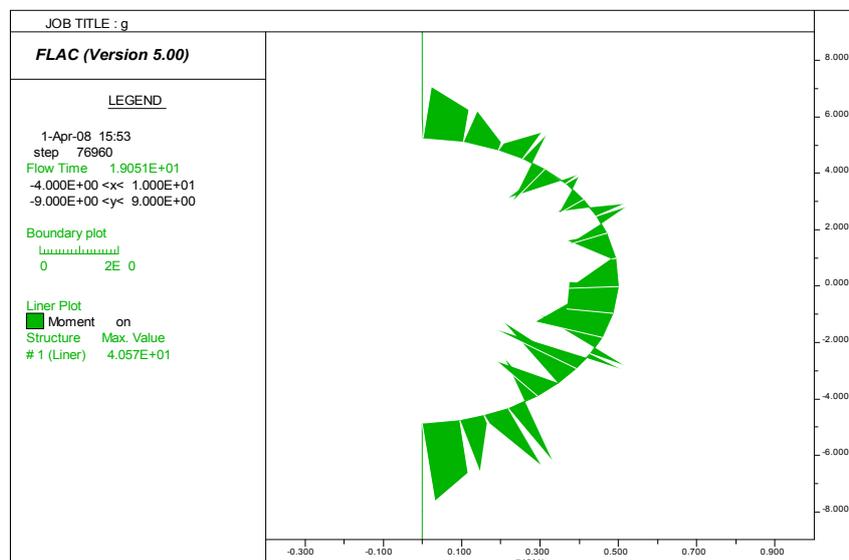


Figure 9. Moment fléchissant sur le revêtement du tunnel circulaire. Flac2D.

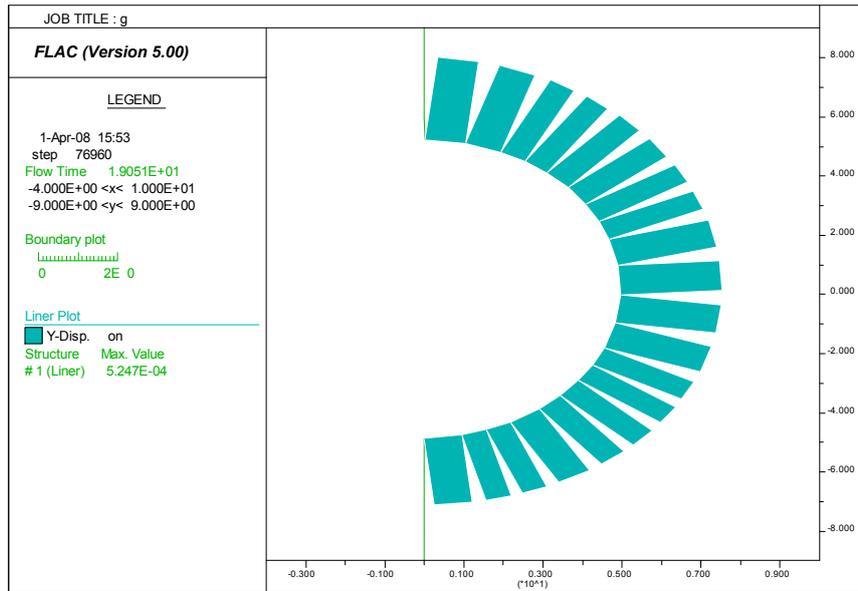


Figure 10. Déplacements verticaux sur le revêtement du tunnel circulaire. Flac2D.

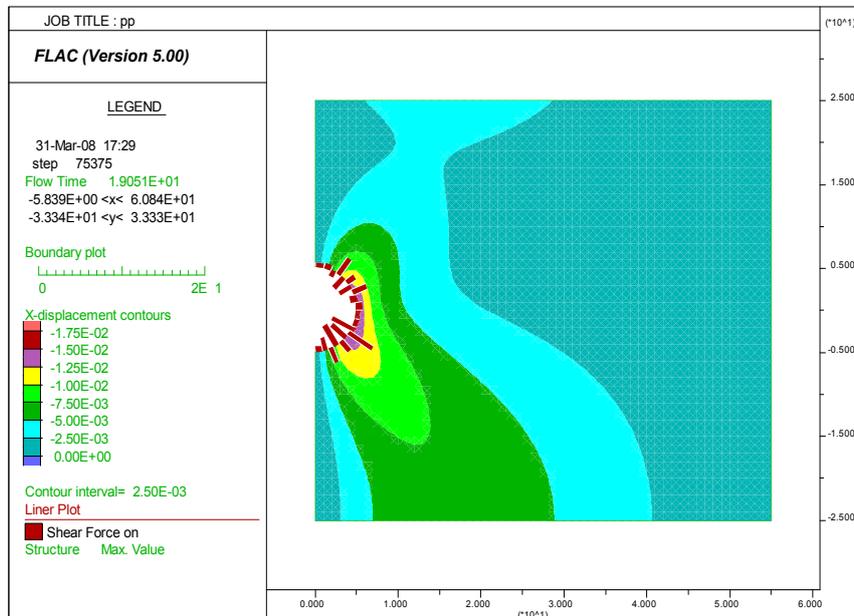


Figure 11. Champ de déplacements horizontaux dans le maillage et force de cisaillement sur le revêtement du tunnel circulaire. Flac2D.

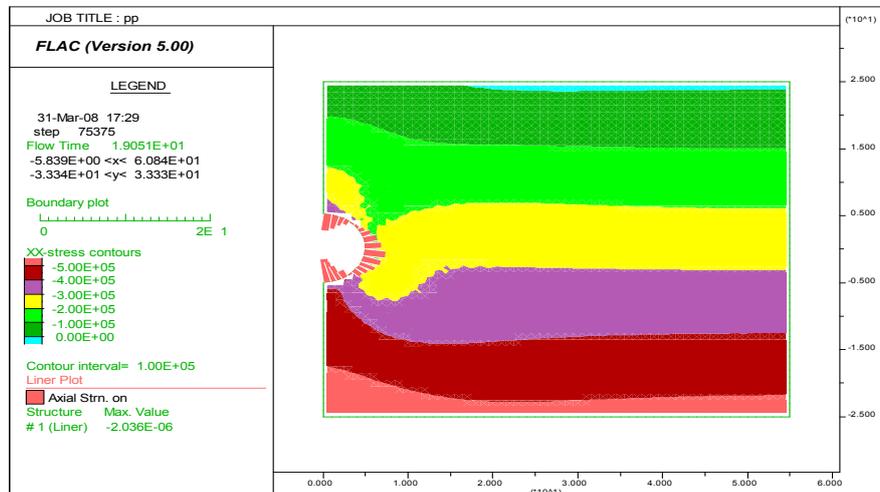


Figure 12. Champ de contraintes totales horizontales dans le maillage et déformation du revêtement du tunnel circulaire. Flac2D.

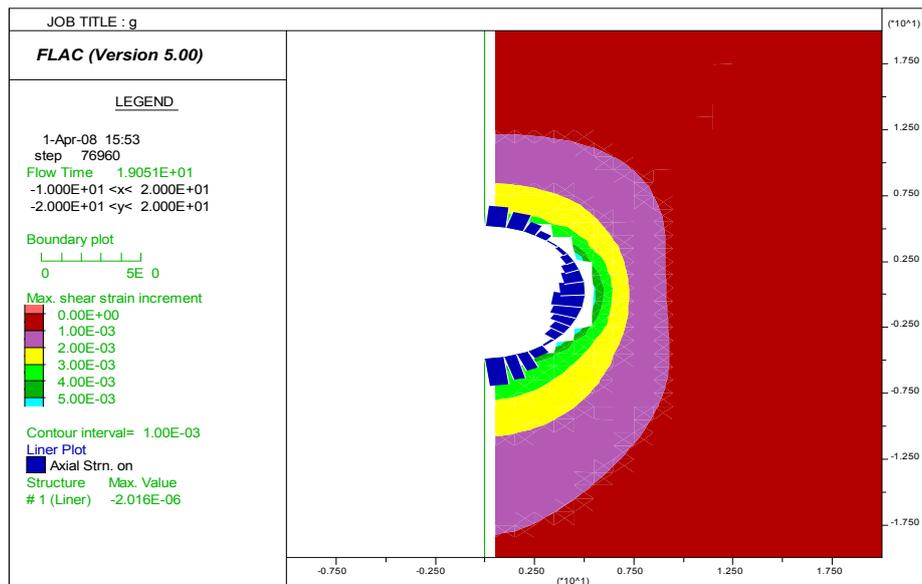


Figure 13. Champ de déformations du sol dans le maillage et déformation du revêtement du tunnel circulaire. Flac2D.

Note : Il est intéressant de remarquer que, dans le cas où la pression initiale du sol sur le contour de la cavité est uniforme ($K_o=1$), le chargement d’excavation n’induit aucune variation de volume et donc pas de variation de la pression.

Les figures 14 et 15 montrent la distribution de la charge hydraulique à court terme calculée par la solution découplée sur la coupe EF à 0,5 mètres du contour d’excavation. Une comparaison avec une solution couplée (à l’aide du mode de calcul hydromécanique couplé du code Flac2D) donne une concordance parfaite dans le cas d’un tunnel circulaire et moins bonne dans le cas d’un tunnel non circulaire.

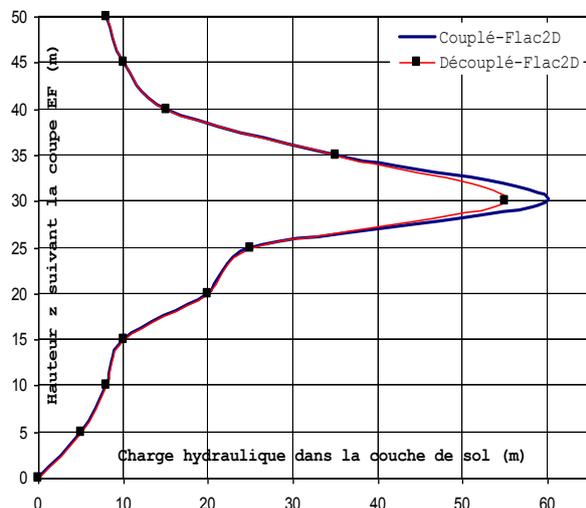


Figure 14. Distribution de la charge hydraulique à court terme sur la coupe EF. (Cas du tunnel circulaire). Flac2D.

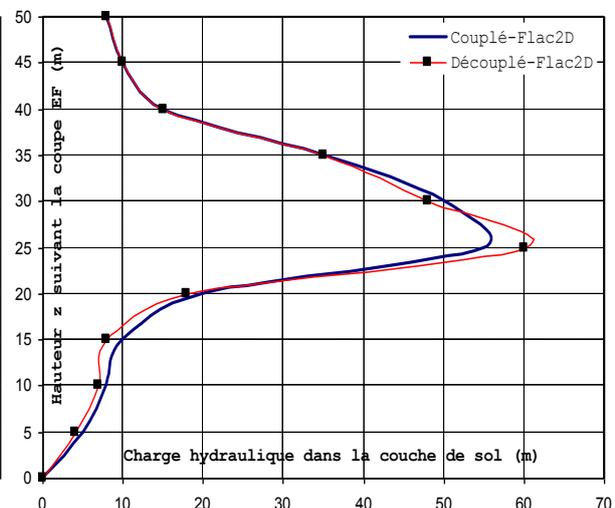


Figure 15. Distribution de la charge hydraulique à court terme sur la coupe EF. (Cas du tunnel non circulaire). Flac2D.

Les figures 16 et 17 présentent la contrainte normale à long terme sur le revêtement dans le cas des tunnels circulaire et non circulaire. Cette correction due à l’effet hydraulique à long terme est de 60 kPa pour une contrainte effective horizontale initiale de l’ordre de 130 kPa (à 25m de profondeur pour $K_o=0,5$).

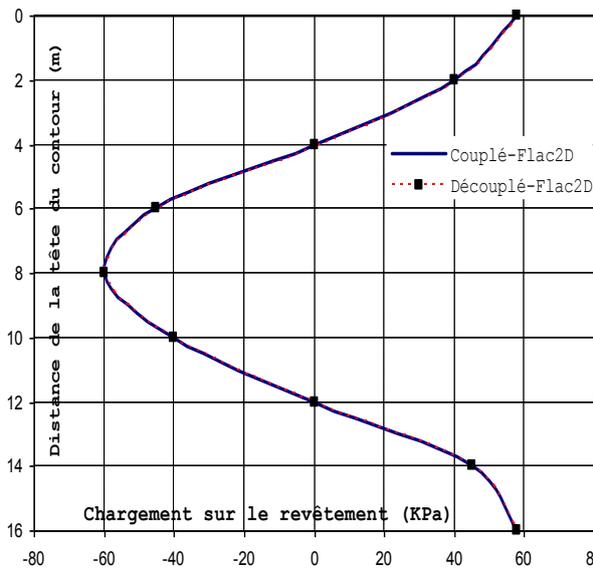


Figure 16. Contrainte normale sur le revêtement due à la variation de la pression (Cas du tunnel circulaire). Flac2D.

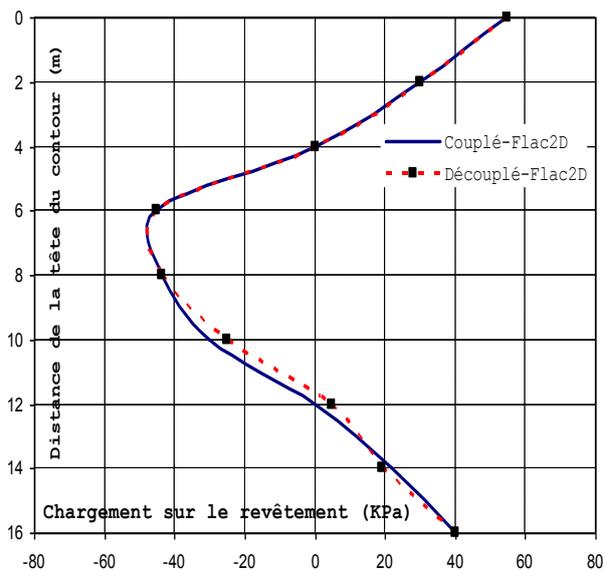


Figure 17. Contrainte normale sur le revêtement due à la variation de la pression (Cas du tunnel non circulaire). Flac2D.

Les figures 18 et 19 présentent le déplacement vertical de la surface du massif dû à la variation de la pression interstitielle à long terme dans le cas des tunnels circulaire et du tunnel non circulaire.

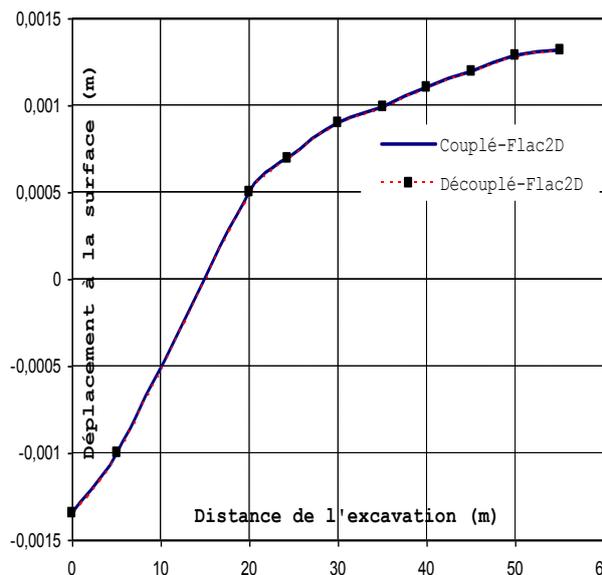


Figure 18. Déplacement vertical de la surface du massif. (Cas du tunnel circulaire). Flac2D.

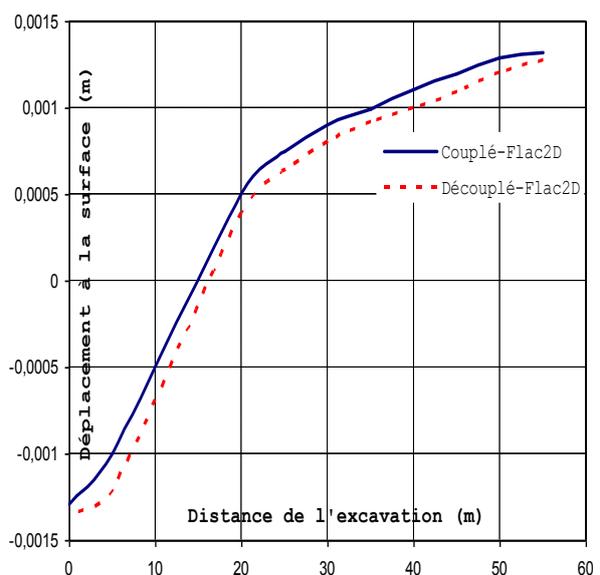


Figure 19. Déplacement vertical de la surface du massif. (Cas du tunnel non circulaire). Flac2D.

Sur les figures 16, 17, 18 et 19, on peut constater que la solution découplée présentée dans le paragraphe précédent donne une concordance parfaite avec les résultats issus d'un calcul couplé (avec le mode de calcul hydromécanique couplé du code Flac2D) dans le cas du tunnel circulaire. Dans le cas du tunnel non circulaire, la concordance est moins satisfaisante.

5. APPLICATION DIRECTE DE LA CHARGE HYDRAULIQUE ET OPTION RELAXATION DU CODE FLAC2D

5.1. Comparaison avec l'application d'une pression hydrostatique

Une façon simple de prendre en compte l'effet différé de l'évolution du champ de pression est d'appliquer une pression hydrostatique supplémentaire sur le revêtement. Cette pression est simulée dans Flac2D par la fonction FISH APPLY_GAP_PRESS.FIS appliquée sur le revêtement en béton [11]. Sur les figures 21 à 24, on compare le chargement sur le revêtement et les déplacements à la surface obtenus par cette méthode avec ceux donnés par l'approche précédente.

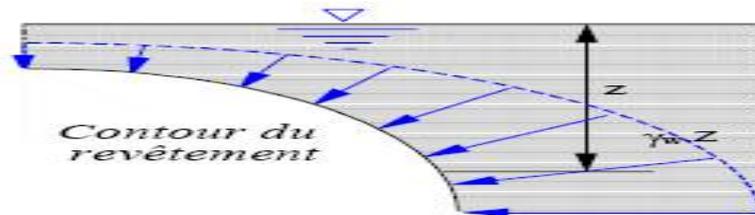


Figure 20. Chargement de type hydrostatique.

On voit que l’application d’une pression de type hydrostatique conduit à surestimer légèrement le chargement sur le revêtement et sous-estimer légèrement les déplacements à la surface du massif. En premier lieu, lorsque le niveau de l’eau est changé, l’eau est rétablie partout dans le sol et le revêtement imperméable en béton. En deuxième lieu, afin d’appliquer une pression au revêtement en béton, on utilise une fonction FISH qui calcule les forces aux nœuds de revêtement qui correspondent à la pression de l’eau. La fonction, “APPLY_GAP_PRESS.FIS exécute cette opération [11]. Cette fonction accède les variables des éléments du revêtement associées avec le revêtement en béton.

5.2.Confrontation des résultats

On présente sur les figures 21 à 24une comparaison des résultats des différents moyens utilisés pour prendre en compte cet effet hydraulique : le calcul découplé, le calcul avec l’application d’une pression hydrostatique sur le revêtement : le calcul avec l’utilisation de la fonction FISH APPLY_GAP_PRESS.FIS, et le calcul avec prise en compte du couplage (avec le mode de calcul hydromécanique couplé du code Flac2D).

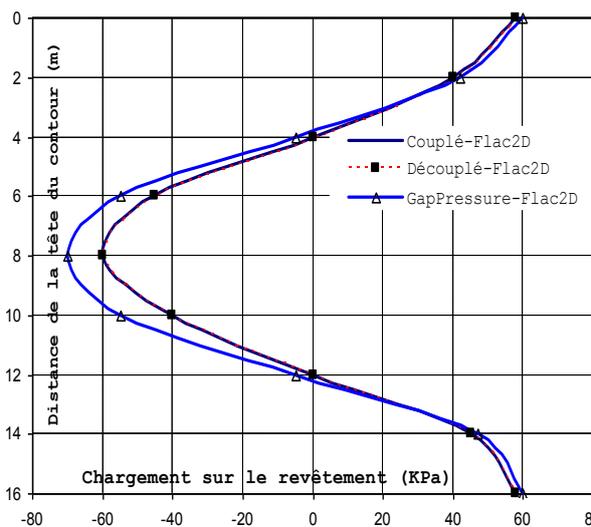


Figure 21. Contrainte normale sur le revêtement due à la variation de la pression (cas du tunnel circulaire). Flac2D.

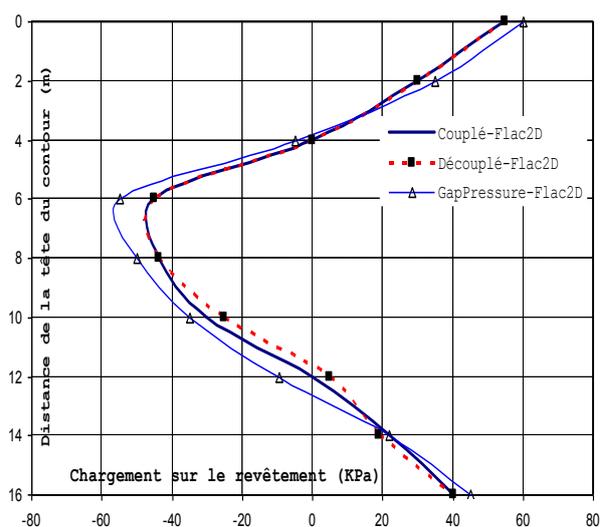


Figure 22. Contrainte normale sur le revêtement due à la variation de la pression (cas du tunnel non circulaire). Flac2D.

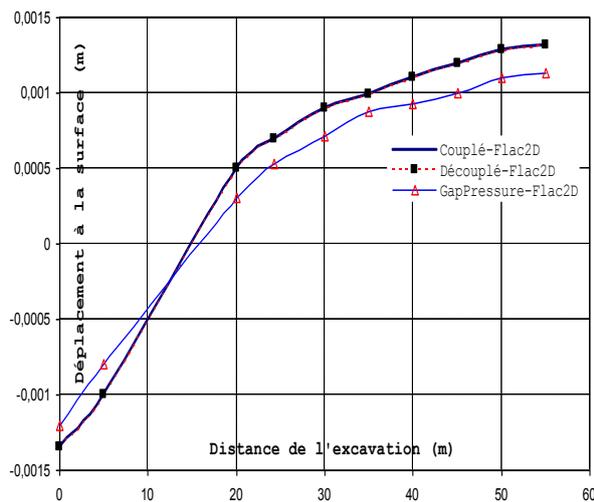


Figure 23. Déplacement vertical de la surface du massif (cas du tunnel circulaire). Flac2D.

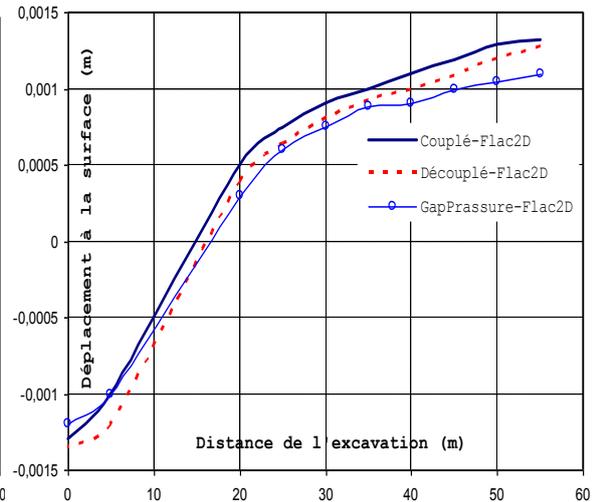


Figure 24. Déplacement vertical de la surface du massif (cas du tunnel non circulaire). Flac2D.

6. CAS DU REVÊTEMENT SEMI PERMEABLE

Jusque-là, on a considéré que le revêtement du tunnel est parfaitement imperméable, de sorte que le champ de pression hydraulique à long terme peut être considéré comme hydrostatique. En réalité, il peut arriver que le revêtement ne soit pas imperméable. Le tunnel constitue donc dans ce cas un drain permanent et le champ de pression à long terme atteint un *état stationnaire* qui n'est pas hydrostatique. La prise en compte de cet effet dans le calcul découplé se réalise en rajoutant un calcul de diffusion pour déterminer le champ de pression à long terme en fonction de la *perméabilité* du revêtement. Dans ce cas, le revêtement est suffisamment poreux. L'eau exerce une pression sur ce revêtement ; cette pression cause des efforts normaux pour se développer dans le revêtement. Donc, l'eau est rétablie partout dans le sol et le revêtement semi-perméable. Les figures 25 et 26 montrent les déplacements à la surface du massif ainsi que la contrainte normale sur le revêtement due à la variation de la pression interstitielle à long terme pour différentes perméabilités du revêtement. La perméabilité a une influence primordiale sur des déplacements, mais il n'en est pas de même pour le chargement sur le revêtement.

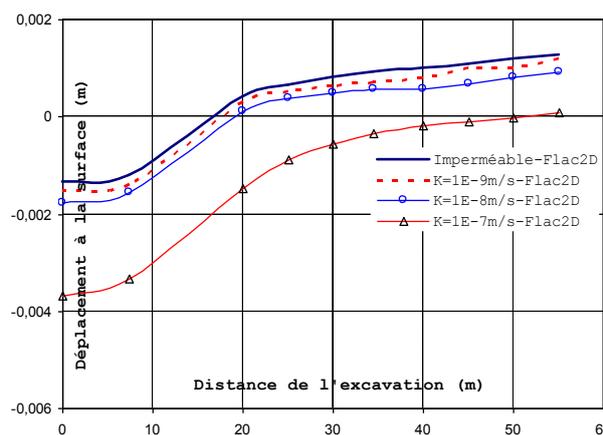


Figure 25. Déplacement vertical de la surface du massif (cas du tunnel circulaire) en fonction de la perméabilité du revêtement (m/s). Flac2D.

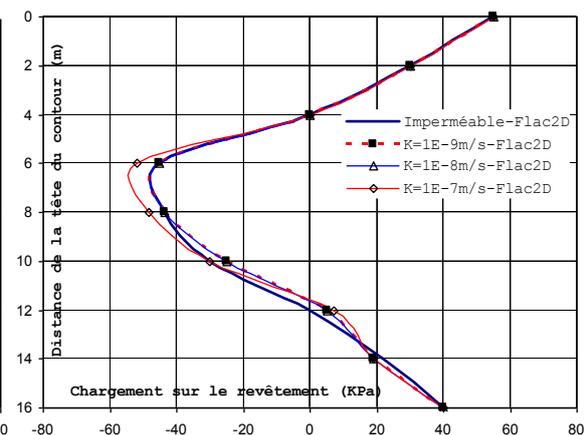


Figure 26. Contrainte normale sur le revêtement (cas du tunnel circulaire) en fonction de la perméabilité du revêtement (m/s). Flac2D.

7. INFLUENCE DU TAUX de DECONFINEMENT

Le caractère tridimensionnel du processus de creusement du tunnel est introduit dans la configuration bidimensionnelle au moyen du taux de déconfinement λ définissant les efforts d'excavation à appliquer sur le bord de la galerie en fonction du degré d'avancement du front de taille [1][2] (Panet, 1995). Avant l'arrivée du front de taille, l'état des contraintes dans le massif correspond à l'état naturel

initial et le taux de déconfinement λ est nul. Au fur et à mesure que le front approche de la section étudiée, le taux de déconfinement augmente jusqu'à la valeur $\lambda=1$, obtenue à une certaine distance après le passage du front (fig. 27).

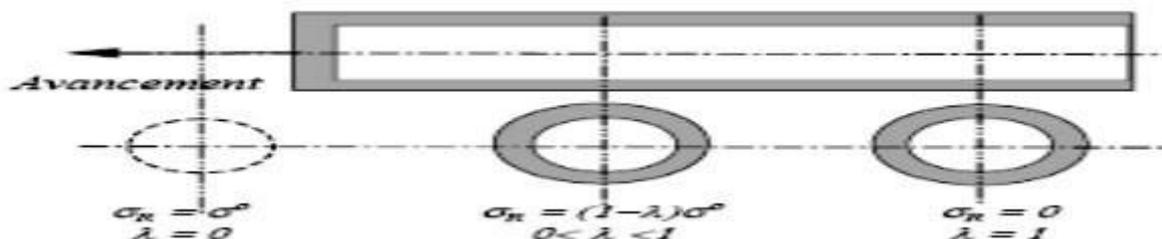


Figure 27. Variation du taux de déconfinement.

La figure 28 présente une comparaison des résultats du chargement sur le revêtement issus des calculs avec prise en compte de la variation de pression à long terme (AVP) pour $\lambda=1$ et $\lambda=0,5$ et sans prise en compte de la variation de la pression à long terme (SVP) avec $\lambda=0,5$. On voit bien que le calcul sans prise en compte de la variation de pression sous-estime le chargement sur le revêtement. La Figure 29 montre l'influence de la variation du taux de déconfinement sur le chargement du revêtement dans les calculs avec prise en compte de la variation de pression à long terme. Plus le taux de déconfinement est petit, plus le chargement sur le revêtement à long terme lié à la variation de pression est petit, et le chargement à long terme lié au déconfinement est grand, et donc le chargement total est grand.

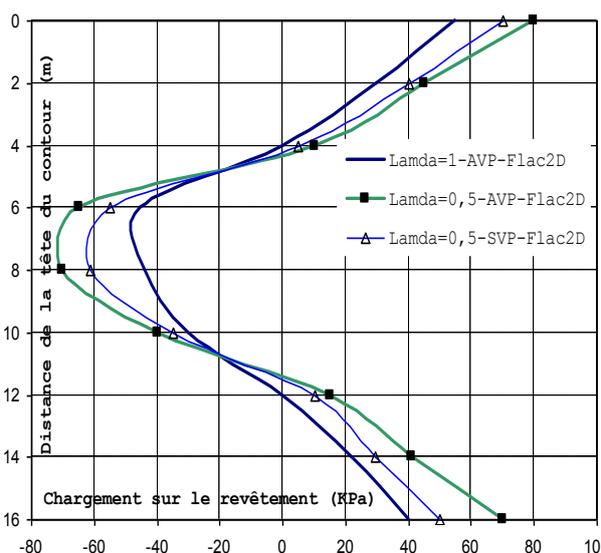


Figure 28. Contrainte normale sur le revêtement (kpa) avec (AVP) et sans (AVP) prise en compte de la variation de la pression. Flac2D.

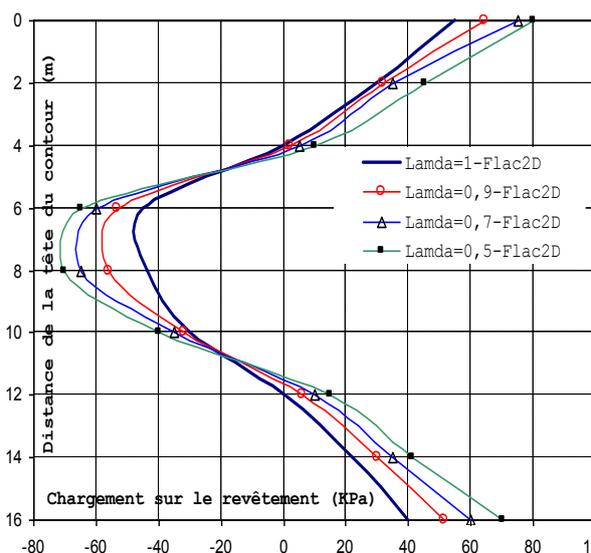


Figure 29. Contrainte normale sur le revêtement (kpa) en fonction du taux de déconfinement. Flac2D.

8. ANALYSE DES RESULTATS ET REMARQUES

L'évolution à long terme du champ de pression autour d'un tunnel induit un chargement différé sur le revêtement. Dans cette partie du travail, on a montré comment il est possible de prendre en compte dans les calculs découplés. Du point de vue des efforts obtenus, ces calculs donnent une correction du chargement due à l'effet hydraulique à long terme de 60 kPa pour une contrainte initiale σ'_h de l'ordre de 130 kPa. Par ailleurs, une comparaison du chargement sur le contour du revêtement et des déplacements à la surface montre que l'estimation calculée en appliquant de manière forfaitaire une pression hydrostatique sur le revêtement peut *surestimer légèrement* le chargement sur le revêtement ainsi que *sous-estimer légèrement* les déplacements à la surface du massif. Il est donc nécessaire de prendre en compte la variation de la pression hydraulique à long terme. Enfin, la démarche pour prendre en compte la variation de pression dans les calculs découplés est simple à mettre en œuvre, même pour des problèmes complexes.

9. CONCLUSION

Le problème des chargements différés sur le soutènement des tunnels, et des effets de la réparation d'une partie du revêtement, sont des problèmes d'un grand intérêt pratique mais relativement peu abordés en raison de leur complexité surtout en mode hydromécanique couplé qui nécessitent de grands temps de calcul. On a essayé de proposer ici une première approche simplifiée de ces problèmes, qui montre que la modélisation numérique peut permettre de fournir des éléments de réflexion intéressants.

L'étude présentée ici avait donc pour but d'illustrer les applications possibles des calculs découplés pour la prise en compte du couplage hydromécanique et d'étudier l'influence du temps de calcul: elle est donc comparée au mode de calcul couplé (à l'aide du mode de calcul hydromécanique couplé du code Flac3D). Une comparaison avec cette dernière donne une concordance parfaite dans ce cas de tunnel circulaire en 3D et les calculs mécaniques prennent un laps du temps moins comparés aux calculs couplés.

Donc, on s'est attaché à mettre en œuvre l'approche découplée pour étudier les chargements différés sur le soutènement des tunnels et l'effet de la réparation d'une partie du soutènement. Les résultats montrent que les variations de la pression de l'eau dans le sol jouent un rôle *très important* sur la redistribution des *contraintes*, mais l'approche reste limitée au cas élastique.

REFERENCES

- [1] Szechy K., 1970. Traité de construction des tunnels. Ed. DUNOD. 701p.
- [2] Vermeer P.A., Möller S.C. & Ruse N. 2003. On the application of numerical analysis in tunnelling. 12th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (12ARC), Singapore.
- [3] Panet M., 1979. Time-Dependent Deformations in Underground Works, Proceedings of the 4th *ISRM* Congress (Montreux), Rotterdam, A. A. Balkema and the Swiss Society for soil and Rock Mechanics, Vol, 3, 279-289.
- [4] Panet M., 1995. Le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement. Presses de l'école Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 177 p.
- [5] AFTES, La méthode convergence-confinement. Tunnels et Ouvrages Souterrains, 2002, 79-89.
- [6] Svoboda T., Mašín D., 2010. Convergence-confinement method for simulating NATM tunnel evaluated by comparison with full 3D simulations, International Conference Underground Constructions - Transport and City Tunnels, Prague.
- [7] Atwa M., 1996. Analyse numérique des écoulements d'eau et de la consolidation des sols autour des tunnels creusés dans l'argile. Thèse de Doctorat., Ecole des Ponts et Chaussées, Paris, 476 p.
- [8] El Houari Boucif N., 2015. Contribution à l'étude mécanique et hydraulique des tunnels en configuration tridimensionnelle. Thèse de Doctorat. Université Aboubekr Belkaid. Tlemcen. Algérie,
- [9] Zadjoui A., (2016). Analyse de régime hydrique autour des tunnels en régime transitoire, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Nancy.
- [10] Benamar I. 1996. Etude des effets différés dans les tunnels profonds. Thèse Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 205p.
- [11] Itasca Consulting Group, 2005. Inc. *Flac2D Manual version 5.0*. Minneapolis, Minnesota.
- [12] Nguyen P. D., 2003. *Modélisation numérique des soutènements d'excavation*. Thèse de LCPC, Paris, France, 288p.

Nomenclature

k : pente la courbe de déchargement-rechargement

n : porosité du sol

p^{o+} : champs de pression

p^o : pression hydrostatique

t : *temps*

$\text{tr}\varepsilon$: variation de la déformation

λ : taux de déconfinement

σ'_h : contrainte initiale

σ^o : contraintes géostatique

σ^{o+} : champs de contraintes

$\delta\sigma$: variations du champ de contraintes

δp : variations du champ de pression

ε : tenseur de déformation

k_w : module de compression du fluide

.