

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département de Génie Civil



Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil

Thème :

Influence du choix du taux de déconfinement sur les pressions de soutènement et les convergences finales d'un tunnel (cas Métro d'Alger)

Préparé et présenté par :

AKCHICHE Rabah Mohamed Amine

Mémoire soutenu le 11 Octobre 2015 devant le jury composé de:

Présidente:

Pr.R.KETTAB

examineur:

Ma.S.LAKHAL

promotrices:

Ma.D.CHERID

Ma.H.MOHABEDDINE

Promotion 2015

Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi BP182 El-Harrach

16200 Alger, Algérie

Tel : +213 21 52 53 01/03 – Fax : +213 21 52 29 73

Remerciements

Je remercie tout d'abord ALLAH le tout puissant de nous avoir donnés la force et la patience de poursuivre nos études supérieures consacrées par la réalisation de ce projet de fin d'études qui est notre modeste contribution au calcul des ouvrages souterrains.

Mes remerciements vont aussi tout particulièrement à Mr GANI, cadre à la Direction Générale de l'entreprise Métro d'Alger, qui nous a proposé et inspiré le thème de mémoire.

Je tiens également à remercier Mmes MOHABEDDINE et CHERID qui nous ont su nous motiver et encourager tout au long notre travail à travers leurs conseils avisés et leurs recommandations pertinentes.

Un grand merci sincère aux membres du jury présidé par Mme KETTAB pour leur disponibilité et amabilité à évaluer notre thèse de fin d'étude.

J'adresse aussi ma profonde gratitude à tout le corps enseignant de l'ENP, en particulier, à tous les enseignants du département Génie Civil qui ont tous contribué à notre formation d'Ingénieur et qui n'aurons ménagé aucun effort pour accomplir leur noble mission de formateur.

Enfin j'adresse mes remerciements à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce modeste travail.

Dédicace

En signe de respect et de reconnaissance je dédie ce modeste travail à :

Mes grands-parents maternels et paternels, notamment à mon défunt grand-père M r AKCHICHE Rabah, pour les valeurs et les enseignements qu'ils m'ont inculqués.

Mes parents, particulièrement ma mère, ces êtres modèles qui m'ont donné la vie, élevé et instruit de la meilleure manière possible

Mon adorable sœur Yasmine pour sa présence, ses encouragements et sa joie de vivre.

L'ensemble de ma famille et mes amis, chacun en son nom.

Mon frère et binôme Anis et toute la promo de génie civil.

Rabah

ملخص: طريقة كونفرجنس-كونفنمن هي طريقة مفيدة لتصميم الأنفاق، إنها تسمح بالأخذ بعين الاعتبار التفاعل الحادث بين الأرض و المبنى.
لكن المعامل الذي يسمح بإعتبار هذا التفاعل أي التقارب الذي حدث عند وضع الدعم الوقت غير معروف.
الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير هذا المعامل على القوى المطبقة على دعم النفق و على الحركة الناتجة من الحفر.
إضافة إلى هذا هذه الطريقة تسمح للمهندس المدني بمقارنة نموذج التصميم مع الملاحظات التي يراها في موقع بناء النفق (ميترو الجزائر)
المؤقت والتلبيس النهائي و أخيرا سنتحقق من أن حفر النفق لا يسبب أضرار في السطح.
الكلمات المفتاحية نفق، كونفرجنس-كونفنمن ، بلاكسيس ،

Résumé :

La méthode convergence-confinement est une méthode très pratique pour le dimensionnement des tunnels soutenus, elle permet de prendre en compte l'interaction entre le massif et la structure. Cependant le paramètre clé qui conditionne cette interaction qui est la convergence acquise par la galerie au moment de la pose du soutènement (taux de déconfinement au moment de pose) reste indéterminée.

L'objet de ce Mémoire est d'examiner l'influence du choix du taux de déconfinement sur les calculs de dimensionnement d'un tunnel « Métro d'Alger ».

Ce travail permet aussi d'apporter à l'ingénieur de chantier le support théorique qui associée à l'auscultation pendant les travaux permet le calage des modèles théorique de calcul aux observations faites in situ.

Mot clés : Tunnel, convergence-confinement, PLAXIS V8.2.

Abstract:

The characteristic lines method is very useful for the design of supported tunnels in grounds with no time-dependent effects, but has however a drawback. The convergence of the tunnel when the support is installed, in relation to the distance from the front face, remains undetermined.

Using this method, we will examine the influence of the choice of the deconfinement rate on final support pressures and final wall convergences of a tunnel « Metro d'Alger ».

We will also bring to the site engineer the theoretical support he may need which associated with the auscultation during the construction allow him to compare the theoretical calculation models with observations in situ.

Key words: Tunnel, convergence-confinement, PLAXIS V8.2

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 Méthodes de calcul	2
1.1. Introduction.....	2
1.2. Position du problème et difficultés du calcul d'un ouvrage souterrain	2
1.3. Principe et classification des méthodes de calcul.....	3
1.4. Conclusion	4
Chapitre 2 : Etude de l'influence du choix de λd par la méthode Convergence -Confinement....	10
2.1. Introduction.....	10
2.2. Principe de calcul.....	10
2.3. Etude de l'influence du choix de λd	14
2.4. Conclusion	20
Chapitre 3 : Etude de l'influence du choix de λd par un modèle numérique basé sur la méthode Convergence -Confinement.....	21
3.1. Introduction.....	21
3.2. Hypothèses de calcul	22
3.3. Etude de l'influence du choix de λd	24
3.4. Conclusion	31
Conclusion générale	32
Références bibliographiques	

Liste des figures

Figure 1.1. Classification des méthodes de calcul.....	3
Figure 1.2. Méthode des réactions hyperstatiques	5
Figure 1.3. Méthode du solide composite	5
Figure 1.4. Méthode de Convergence-Confinement.....	6
Figure 1.5. Courbe Convergence-Confinement.....	7
Figure 2.1. Courbe de Convergence.....	12
Figure 2.2. Courbe de Confinement.....	13
Figure 2.3. La pression de convergence P_i en fonction de U_r	15
Figure 2.4. La pression de confinement P_i en fonction de U_r	17
Figure 2.5. Variation du taux de déconfinement λ en fonction de la distance d du front de taille.	17
Figure 2.6. Courbe d'équilibre final Convergence-Confinement	18
Figure 2.7. Variation de la pression à l'équilibre en fonction du taux de déconfinement λ	19
Figure 2.8. Variation du déplacement à l'équilibre en fonction du taux de déconfinement λ	19
Figure 3.1. Section du tunnel (métro d'Alger).....	21
Figure 3.2. Géométrie et maillage d'éléments pris en compte dans le modèle de calcul.....	23
Figure 3.2. Phasage exécutif adopté dans le code de calcul Plaxis.....	24
Figure 3.3. Champ de déplacements induits par l'excavation ($\lambda = 0,25$).....	25
Figure 3.4. Tassement en surface ($\lambda = 0,25$).....	25
Figure 3.5. Diagramme de l'effort normal ($\lambda = 0,25$).....	26
Figure 3.6. Diagramme de l'effort tranchant ($\lambda = 0,25$).....	26
Figure 3.7. Diagramme du moment fléchissant ($\lambda = 0,25$)	27
Figure 3.8. Variation du tassement en surface en fonction du taux de déconfinement λ	28
Figure 3.9. Variation de la convergence des parois en fonction du taux de déconfinement λ	29
Figure 3.10. Variation de l'effort normal en fonction du taux de déconfinement λ	30
Figure 3.11. Variation de l'effort tranchant en fonction du taux de déconfinement λ	30
Figure 3.12. Variation du moment fléchissant en fonction du taux de déconfinement λ	31

Liste des tableaux

Tableau 2.1. Caractéristiques du terrain encaissant.....	13
Tableau 2.2. Courbe caractéristique du terrain	14
Tableau 2.3. Caractéristiques du béton projeté.....	14
Tableau 2.4. Caractéristiques du cintre métalliques HEB160.....	15
Tableau 2.5. Variation du taux de déconfinement λ en fonction de la distance d du front de taille	17
Tableau 2.6. Variation du déplacement et de la pression à l'équilibre en fonction du taux de déconfinement λ	18
Tableau 3.1. Caractéristiques géomécaniques des différentes couches du massif.....	21
Tableau 3.2. Résultats du calcul pour les différentes valeurs du coefficient de déconfinement λ	26

Liste des symboles

γ	poids volumique du terrain.
H	hauteur de couverture.
δ_v	contrainte géostatique verticale.
K	coefficient de poussées des terres.
q	charge d'exploitation.
C	cohésion du terrain.
φ	angle de frottement du terrain.
R	rayon du tunnel.
f_{bu}	résistance en compression simple du béton.
e	épaisseurs de béton projeté.
A_s	section du cintre métallique.
I_s	moment d'inertie du profilé.
W_s	module de résistance du terrain.
A_b	Section du béton projeté.
I_b	moment d'inertie du béton projeté.
W_b	Module de résistance du béton projeté.
E_b	Module d'élasticité de béton projeté.
E_s	Module d'élasticité de l'acier.
E	Module de déformation du terrain.
δ_c	Résistance en compression simple du terrain.
K_p	Coefficient de butée.
r_p	Rayon de détente.
λ	Taux de déconfinement.
λ_d	Taux de déconfinement au moment de pose du soutènement.
F	Facteur de stabilité.
U_r	la convergence à la paroi.

Introduction générale

Introduction générale

Le creusement d'un tunnel est un problème de nature tridimensionnelle qui traduit un fort couplage entre deux structures très différentes: le massif encaissant d'une part et le revêtement du tunnel d'autre part.

La méthode convergence-confinement, aussi connue sous le nom de méthode des lignes caractéristiques, est une méthode de dimensionnement des tunnels soutenus. Elle représente la nouvelle approche qui prend en compte l'interaction entre le massif et la structure, par opposition aux anciennes méthodes qui remplaçaient le massif par un système de charges agissant a priori sur le soutènement ou qui ne considéraient pas les phases d'excavations

Le choix du paramètre clé qui conditionne l'interaction massif-soutènement, le taux de déconfinement λ_d à la pose du soutènement (la convergence acquise par la galerie U_d à la pose) est le problème le plus délicat de cette méthode.

L'objet de ce présent mémoire est l'étude de l'influence de ce choix sur les pressions de soutènement et les convergences finales d'un tunnel.

Le rapport se compose de trois chapitres. Le premier a pour objet de décrire le cadre théorique des méthodes de calcul et de dimensionnement des tunnels. Le deuxième et le troisième chapitre sont consacrés à l'étude de l'influence du choix du taux de déconfinement λ_d au moment de pose du soutènement sur les calculs de dimensionnement du tunnel « Métro d'Alger ».

CHAPITRE 1

Chapitre 1 Méthodes de calcul

1.1. Introduction

Parmi les problèmes qui se posent au projeteur de génie civil, celui de la détermination des caractéristiques du revêtement d'un ouvrage souterrain ou de la vérification de sa stabilité est certainement l'un des plus délicats et des plus difficiles à aborder. L'appréciation, le jugement et l'expérience de l'ingénieur sont, ici encore plus qu'ailleurs, nécessaires pour compenser l'absence de règles dans le domaine du dimensionnement de ces ouvrages.

La complexité du calcul du soutènement d'un tunnel a longtemps été considérée comme rédhibitoire. La définition du soutènement d'un ouvrage souterrain résultait alors d'un empirisme de bon aloi, consistant à reproduire des techniques qui avaient donné satisfaction dans des conditions géomécaniques semblables.

Ce chapitre a donc pour objectif de définir les diverses méthodes de calcul permettant de déterminer le soutènement des tunnels, ainsi que les domaines préférentiels d'emploi des principales méthodes actuellement utilisées.

1.2. Position du problème et difficultés du calcul d'un ouvrage souterrain

1.2.1. Positions du problème

La construction d'un ouvrage souterrain à l'intérieur d'un massif a pour conséquence la substitution au champ des contraintes naturelles préexistant dans ce massif d'un nouveau champ de contraintes intéressant le nouveau solide constitué par le massif évidé et son revêtement. Mais le passage d'un équilibre à l'autre ne peut, pour des raisons évidentes d'exécution, se faire de façon instantanée, de sorte que plusieurs phases intermédiaires d'équilibre interviennent successivement au cours de la construction. Les conditions à respecter sont généralement la stabilité des équilibres successifs qui se produisent pendant et à l'issue des travaux ainsi que la limitation des déformations cumulées. L'équilibre final dépend d'un nombre considérable de facteurs, et notamment : [1]

- de l'équilibre naturel initial,
- des caractéristiques physiques et des lois de comportement du terrain encaissant et de son environnement,
- des phases d'exécution et de leur déroulement dans le temps,
- des conditions d'utilisation de l'ouvrage,
- des caractéristiques géométriques et mécaniques des éléments de soutènement et de revêtements introduits à la surface du souterrain et de la nature de leur contact avec le terrain.

1.2.2. Difficultés du calcul

Ces facteurs sont généralement : [1]

- soit connus de façon très incomplète (équilibre initial),
- soit difficiles à quantifier (discontinuités du terrain),
- soit à la fois mal connus et difficiles à introduire dans les calculs (loi de comportement du terrain, conditions précises d'exécution des travaux).

Leur influence n'en est pas moins décisive vis-à-vis du comportement des ouvrages.

Un calcul idéal de l'ouvrage supposerait à la fois la connaissance parfaite et détaillée du milieu dans lequel l'ouvrage doit être construit et la possession d'un modèle mathématique suffisamment élaboré pour prendre en compte la totalité de ces données.

1.3. Principe et classification des méthodes de calcul

Les diverses méthodes de calcul utilisées en vue du dimensionnement du revêtement définitif peuvent être classées en quatre méthodes principales. [1]

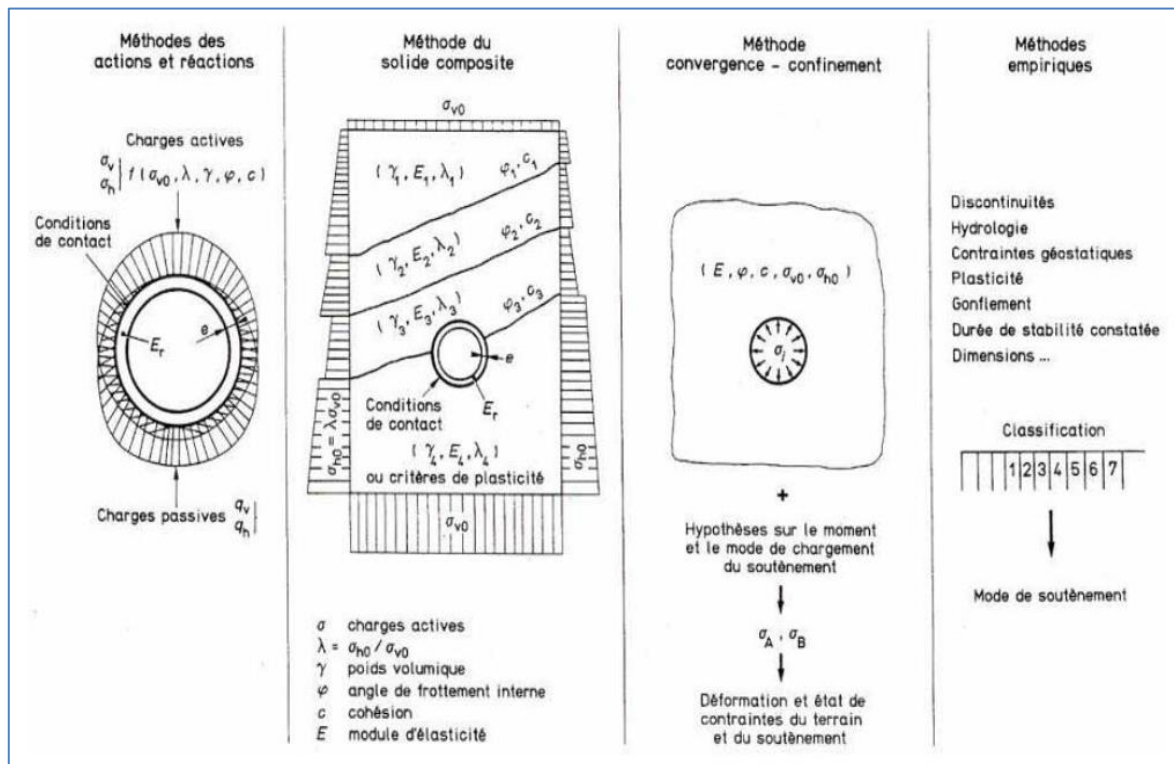


Figure 1.1 classification des méthodes de calcul

1.3.1. Méthodes empiriques

Diverses méthodes de classification géotechnique des massifs rocheux ont été proposées. Les plus universellement utilisées sont la classification RMR de Bieniawski et le système Q développé par N.Barton. Elles attribuent une note globale au massif fondée sur la quantification de plusieurs paramètres. Cette note détermine le mode de soutènement.

Pour sa part, l'AFTES a également proposé une méthode qui fait l'objet d'un texte provisoire de recommandations. Dans ce projet de recommandation, les paramètres pris en compte pour choisir le soutènement sont : la résistance du terrain à l'échelle de l'échantillon de laboratoire, la fracturation du massif (indice RQD), le degré d'altération des roches, les conditions hydrogéologiques, la hauteur de recouvrement du tunnel, la section transversale de l'ouvrage et son environnement. Un tableau à double entrée définit pour une situation donnée les méthodes de soutènement à rejeter, les méthodes utilisables et les méthodes appropriées.

A la différence des classifications RMR et Q, il n'y a aucune indication sur la distance non soutenue, l'inertie et l'espacement des cintres, la densité de boulonnage et la longueur des boulons, l'épaisseur de la coque en béton.

1.3.2. Méthode des réactions hyperstatiques

Dans cette méthode, on étudie le comportement du revêtement sous l'action de charges extérieures. On distingue des charges dites "actives" qui sont indépendantes de l'état de déformation du revêtement (poids propre et charges et surcharges intérieures et extérieures, actions du terrain encaissant), des charges dites "passives" qui sont des réactions hyperstatiques, dépendent de la déformation et dont la prise en compte égalise en première approximation les déformations du terrain et du revêtement sous l'ensemble des charges actives et passives.

Les déformations du revêtement sont calculées par les méthodes classiques de la résistance des matériaux en l'assimilant à un portique, un arc, une coque ou une structure à barres.

Les déformations du terrain sont souvent estimées à partir de la notion schématique de module de réaction "K", c'est-à-dire que l'on suppose que la réaction en un point est uniquement fonction de la déformation en ce point. Ce coefficient "K" dépend des caractéristiques du terrain, du rayon moyen de l'excavation et de sa forme.

Les méthodes de calcul diffèrent par la forme des galeries concernées (circulaire ou quelconque), la possibilité de tenir compte des phases successives de construction du revêtement et de l'hétérogénéité des terrains ; ils se distinguent aussi par la définition des charges actives (radiales ou quelconque), la définition des charges passives et la nature du contact entre le terrain et le revêtement (frottement ou glissement, résistance à l'arrachement ou non).

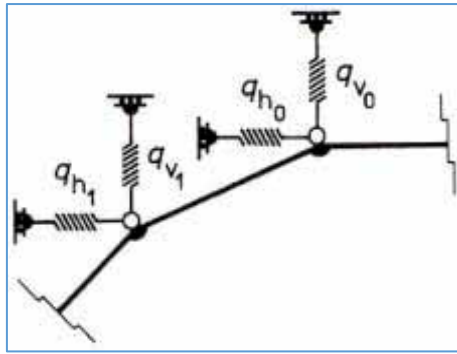


Figure 1.2. Méthode des réactions hyperstatiques

Avantage :

Les méthodes de cette famille présentent l'avantage d'un maniement très facile. Certaines d'entre elles peuvent être utilisées sous formes d'abaques et la résolution des problèmes est quasi instantanée. D'autres méthodes de la même famille présentent un caractère nettement plus élaboré et permettent, en faisant appel au calcul automatique, de faire varier les données les plus incertaines pour encadrer les hypothèses extrêmes et juger la sensibilité du résultat aux variations des paramètres.

1.3.3. Méthodes du solide composite

Dans cette méthode, on étudie le comportement de l'ensemble terrain-ouvrage qui est généralement décomposé en mailles planes ou en volumes élémentaires dont on écrit l'équilibre compte tenu des actions sur les frontières. Les seules hypothèses introduites obligatoirement sont les suivantes :

- le système est partout en équilibre,
- les déformations sont petites (géométrie inchangée),
- les matériaux sont continus,
- la loi de comportement des matériaux est connue et peut être traduite numériquement.

Les déformations aux nœuds des mailles du système sont calculées en écrivant, soit que l'énergie potentielle du solide est minimale, soit que son énergie complémentaire est minimale.

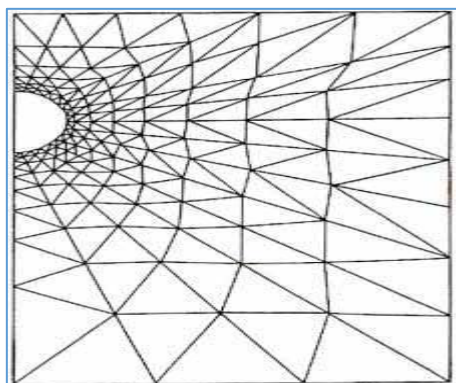


Figure 1.3. Méthode du solide composite

Le calcul fait obligatoirement appel à l'ordinateur. De nombreux programmes sont disponibles et peuvent être utilisés à cet effet. Les différences entre eux peuvent porter sur :

- le type de méthode (éléments finis, différences finies, équivalence),
- la plus ou moins grande finesse du découpage et l'étendue du modèle étudié,
- le type de matrice (rigidité ou flexibilité) caractérisant les éléments,
- la méthode de calcul (déplacement ou équilibre),
- l'étude en section plane ou en tridimensionnel,
- la possibilité d'introduire des équations constitutives des matériaux (loi de comportement) différentes de l'élasticité linéaire (notamment par des méthodes incrémentales),
- la possibilité de tenir compte des anisotropies du milieu,
- la possibilité de tenir compte des discontinuités du milieu et de la surface de contact entre le terrain et le revêtement.

Avantage :

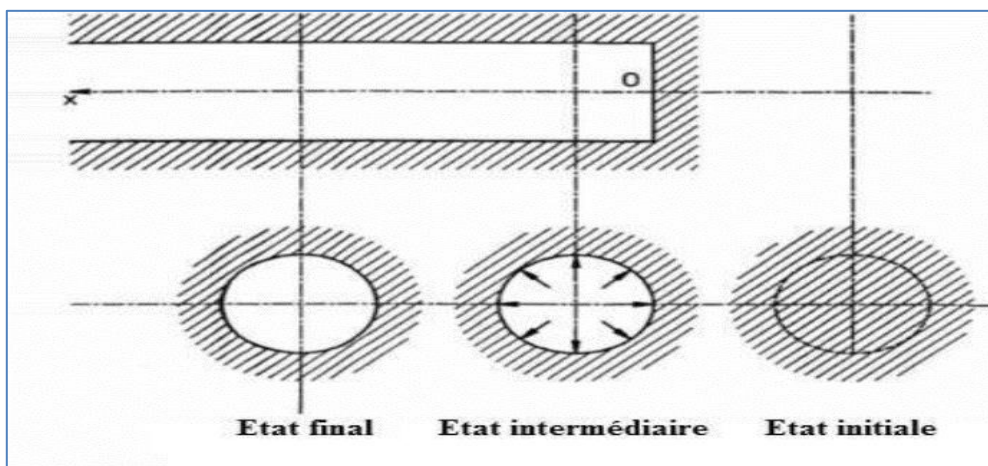
Les avantages de la méthode résident dans :

- la possibilité de tenir en compte des grandes discontinuités du terrain ou des charges isolées (fondations d'immeubles, autres ouvrages souterrains..),
- de sa possibilité d'adaptation à toutes les formes de section de l'ouvrage et à tous les types de contact terrain-revêtement.

1.3.4. Méthode Convergence-Confinement « CV-CF »

La méthode de Convergence-Confinement s'appuie sur la mécanique des milieux continus et fait donc nécessairement appel pour le massif à une loi de comportement d'un milieu continu isotrope ou anisotrope. [2]

Dans cette méthode, on substitue au problème tridimensionnel un problème bidimensionnel de déformation plane de l'interaction terrain-soutènement.

*Figure 1.4. Méthode de Convergence-Confinement*

Considérons une section plane du terrain soumise à une contrainte naturelle correspondant à un initial isotrope σ_0 . La cavité est supposée préexcavée et remplie de liquide à une pression p_i correspondant à l'état initial σ_0 . Le déplacement u de la paroi de la cavité est nul (point A de la figure 1.5). En diminuant la pression p_i , on provoque un déplacement radial u correspondant à la décompression du massif autour de l'excavation.

La contrainte appliquée aux parois de l'excavation est donnée par la relation suivante :

$$\sigma = (1 - \lambda) \sigma_0$$

σ_0 : est la contrainte naturelle dans le massif ; λ est un paramètre qui simule l'excavation en croissant de 0 à 1. On l'appelle le taux de déconfinement.

Dans un premier temps le comportement du terrain est élastique linéaire et la courbe pression déplacement suivie $p_i = f(u)$ est linéaire du point A au point B. Dans un deuxième temps, il peut se former autour de la cavité un phénomène de rupture (ou mise en plasticité) qui augmente la déformation. C'est la portion BC de la courbe. La courbe ABC est appelée « courbe caractéristique » du massif excavé.

Sur le même système graphique, on aussi représente aussi la courbe $p_i = f(u)$ reliant le déplacement radial du soutènement en fonction de la pression extérieure p_i qui lui est appliquée. Cette courbe est appelée « courbe caractéristique du soutènement ». Supposons un soutènement dont le comportement élastique linéaire. Sa courbe caractéristique est une droite : c'est le cas de la courbe 2 de la figure 1.5.

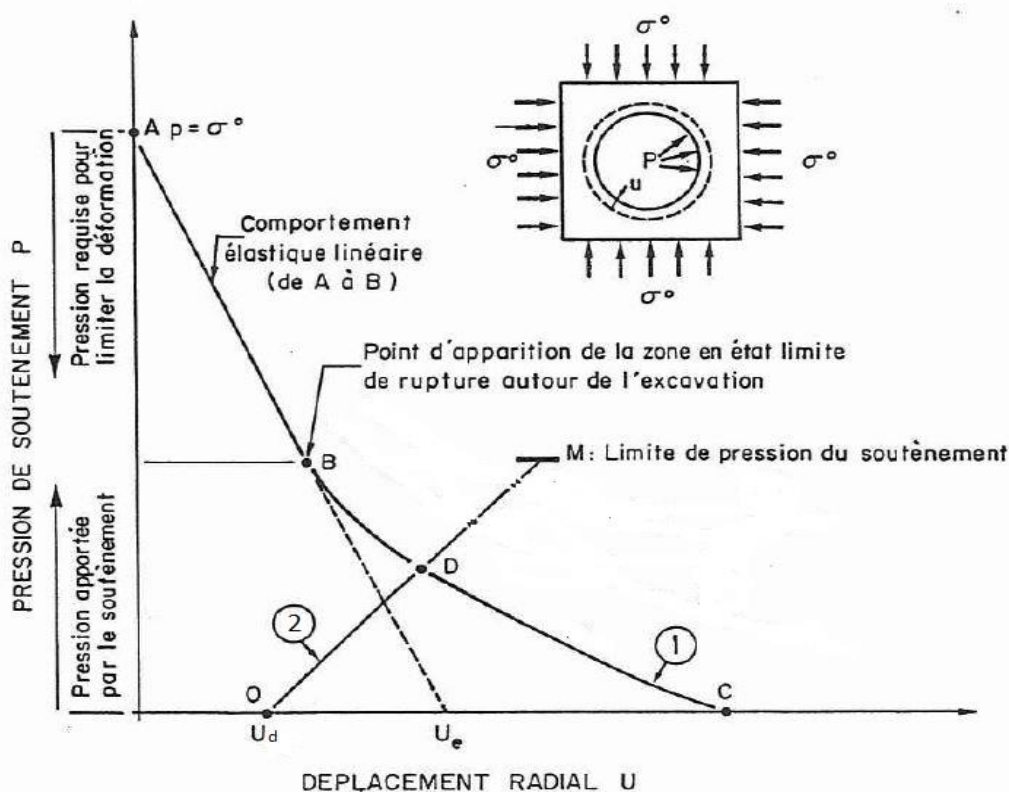


Figure 1.5. Courbe Convergence-Confinement

Parce qu'il n'est le soutènement est mis en place à une certaine distance d du front de taille, appelé distance non soutenue. Des déplacements u_d (point O) se sont produits en avant du front de taille et dans la zone non soutenue en arrière du front de taille. A la valeur du déplacement u_d correspond la valeur λ_d du taux de déconfinement. La notion de taux de déconfinement est essentielle dans cette méthode et la détermination de sa valeur λ_d au moment de la mise en place du soutènement en constitue la principale difficulté.

Le point D à l'intersection des deux courbes caractéristiques définit l'état d'équilibre. Nous voyons que ce dernier est en fonction du moment de mise en place du soutènement c'est-à-dire de la convergence qui s'est déjà produite lors de sa mise en place.

La détermination du taux de déconfinement :

Le choix du taux de déconfinement λ_d , qui correspond à la convergence qui s'est produite avant que le soutènement n'interagisse avec le terrain est le problème le plus délicat de la méthode Convergence-Confinement. [2]

Le choix de λ_d revient donc à déterminer la valeur du déplacement radial u_d à la distance non soutenue d à l'arrière du front de taille.

Plus le déplacement u_d est fort, plus le taux de déconfinement λ_d est élevé et proche de 1. Ce paramètre dépend essentiellement de la distance non soutenue à l'arrière du front de taille, d , mais il dépend également de la loi de comportement du terrain et, dans une moindre mesure, de la rigidité du soutènement.

La précision du calcul de la pression de soutènement est étroitement liée à la précision avec laquelle λ_d est déterminé. Elle dépend de la pente de la courbe de confinement. Il convient dans chaque cas d'évaluer l'incidence de l'incertitude sur la valeur de λ_d sur la valeur de la pression de soutènement.

De manière générale, pour un comportement élastique du massif la valeur de λ_d est donnée par :

$$\lambda_d = 1 - 0,75 \left[\frac{1}{1 + \frac{4d}{3R}} \right]^2$$

Représentativité des données et des hypothèses de calcul

Pour simplifier l'utilisation de cette méthode on s'appuie sur les hypothèses suivantes:

- hypothèse des déformations planes,
- le tunnel est de section circulaire,
- le matériau est composé d'un matériau homogène et isotrope,
- le champ de contraintes initiales est hydrostatique. C'est-à-dire que les contraintes naturelles verticale et horizontale sont égales,
- le tunnel est suffisamment profond pour que l'on puisse négliger la variation de la contrainte initiale hydrostatique à sa proximité,

- le soutènement est supposé exercer une pression radiale uniforme sur les parois de l'excavation.

D'autre part, pour que l'on puisse étudier le problème en état plan de déformation, la longueur du tunnel sera suffisamment importante.

Avantage :

La méthode Convergence-Confinement permet de tenir compte des facteurs jugés plus importants sur l'équilibre final du complexe terrain-soutènement, tel que :

- la déformabilité du terrain,
- la raideur du soutènement,
- la déformation atteinte par le terrain encaissant lors de la mise en place du soutènement provisoire.

En outre cette méthode de calcul peut se résoudre graphiquement de façon aisée.

Elle conduit à un pré dimensionnement satisfaisant du soutènement, à une orientation au stade de l'avant-projet sur le choix des caractéristiques de soutènement et donne l'ordre de grandeur des déformations à atteindre.

1.4. Conclusion

Il n'est pas possible de fixer des règles immuables pour choisir une méthode de dimensionnement dans chaque cas.

Comme nous avons pu nous en apercevoir, aucune méthode ne peut rendre compte de la totalité des facteurs qui interviennent dans l'équilibre d'un ouvrage souterrain et de son revêtement. Suivant leur degré de complexité, elles sont capables de prendre en considération un plus ou moins grand nombre de paramètres. Les plus sophistiquées sont aussi, bien entendu, celles dont l'utilisation est la plus onéreuse.

Certaines méthodes simplifiées, donc plus économiques, sont souvent admissibles, mais leur domaine d'utilisation est obligatoirement plus restreint puisqu'il faut que les simplifications ne concernent pas l'un des paramètres qui se trouve être prépondérant dans le cas étudié.

CHAPITRE 2

Chapitre 2 : Etude de l'influence du choix de λ_d par la méthode CV-CF

2.1. Introduction

Le calcul Convergence-Confinement a pour but principal d'étudier le comportement d'un ouvrage souterrain et de dimensionner en première approche son soutènement ou son revêtement. La modélisation d'un tunnel doit prendre en compte deux éléments essentiels :

- le problème tridimensionnel en raison de la présence du front de taille,
- le problème d'interaction pour lequel le couplage entre le terrain et les structures de soutènement est important.

La méthode Convergence-Confinement permet de se ramener à un calcul bi dimensionnel en déformation plane dans un plan perpendiculaire à l'axe du tunnel. Elle suppose que tout se passe comme si la convergence était due à la diminution d'une pression de soutènement fictive avec l'éloignement du front de taille. Cette méthode considère l'isotropie des contraintes initiales et l'homogénéité du massif, mais elle est seulement applicable pour les cavités de forme cylindrique.

L'équilibre final du complexe rocher-soutènement tient compte des facteurs ci-après :

- la déformabilité du terrain et son comportement à long terme,
- la raideur du soutènement,
- la déformation atteinte par le massif lors de la mise en place du soutènement.

Le dimensionnement par cette méthode permet d'optimiser le coût du soutènement et les caractéristiques de ce dernier.

2.2. Principe de calcul

La résolution d'un problème type par la méthode Convergence-Confinement passe par les étapes suivantes: [3]

Etape n°1 : Courbe caractéristique du terrain

Données types :

R : rayon de l'excavation,

E et ν : caractéristiques élastiques du terrain,

C et ϕ : caractéristiques de rupture du terrain (ou R_c et K_p),

Avec :

R_C : résistance à la compression simple.

Chapitre 2 Etude de l'influence du choix de λ_d par la méthode Convergence confinement

$$R_c = 2 C \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) = \frac{2 C \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad \dots \text{Eq (2.1)}$$

K_p : Coefficient de butée

$$K_p = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad \dots \text{Eq (2.2)}$$

γ : Masse volumique humide de la couche de sol.

σ_0 : Contrainte initiale du massif

a) Milieu élastique

-Si $\sigma_0 \leq \frac{R_c}{2}$, le creusement n'entraîne que des déformations élastiques. La courbe caractéristique du terrain est une droite qui coupe l'axe des déplacements en un point d'abscisse :

$$U_e = \frac{1 + \vartheta}{E} \sigma_0 R \quad \dots \text{Eq (2.3)}$$

b) Pression d'apparition de la zone en état limite de rupture

-Si $\sigma_0 > \frac{R_c}{2}$, le début de la déformation s'opère de manière élastique, comme dans le cas précédant, tant que la pression fictive du soutènement reste supérieure à P_a , pression d'apparition d'une zone en état limite de rupture à la paroi de l'excavation.

Si le critère de résistance maximale est par exemple de type Mohr-Coulomb, critère homogène et isotrope qui s'écrit en fonction des contraintes principales majeures et mineures σ_1 et σ_3 :

$$\text{Soit : } \sigma_1 = k_p \cdot \sigma_3 + R_c$$

$$\text{Soit : } \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \varphi + C \cdot \cos \varphi$$

La pression d'apparition de la zone en état limite de rupture P_a , du taux de déconfinement λ_a et du déplacement de la paroi U_a correspondant :

$$P_a = \sigma_0 (1 - \sin \varphi) - C \cos \varphi = \left(\sigma_0 - \frac{R_c}{2}\right) (1 - \sin \varphi) \quad \dots \text{Eq (2.4)}$$

Le taux de déconfinement à l'apparition de la rupture vaut :

$$\lambda_a = \frac{\sigma_0 - P_a}{\sigma_0} \quad \dots \text{Eq (2.5)}$$

Le déplacement de la paroi à l'apparition de la rupture vaut :

$$U_a = \lambda_a U_e \quad \dots \text{Eq (2.6)}$$

Chapitre 2 Etude de l'influence du choix de λ_d par la méthode Convergence confinement

Pour $P_a \leq P < \sigma_0$, la courbe caractéristique est un segment de droite passant par les deux points de coordonnées :

$$(P = \sigma_0 ; U = 0) \text{ et } (P = P_a ; U = U_a).$$

Pour $P < P_a$, calcul de la courbe point par point selon la loi de comportement choisie. Pour un milieu élastoplastique parfait on a :

$$P(\lambda) = (1 - \lambda)\sigma_0 \text{ Avec } : \lambda_a < \lambda \leq 1 \quad \dots \text{ Eq (2.7)}$$

$$U(\lambda) = U_a \left(\frac{r_p(\lambda)}{R} \right)^2 \quad \dots \text{ Eq (2.8)}$$

$$\left(\frac{r_p(\lambda)}{R} \right) = \left(\frac{2}{K_p + 1} \frac{(K_p - 1)\sigma_0 + R_c}{(1 - \lambda)(K_p - 1)\sigma_0 + R_c} \right)^{\frac{1}{(K_p - 1)}} \quad \dots \text{ Eq (2.9)}$$

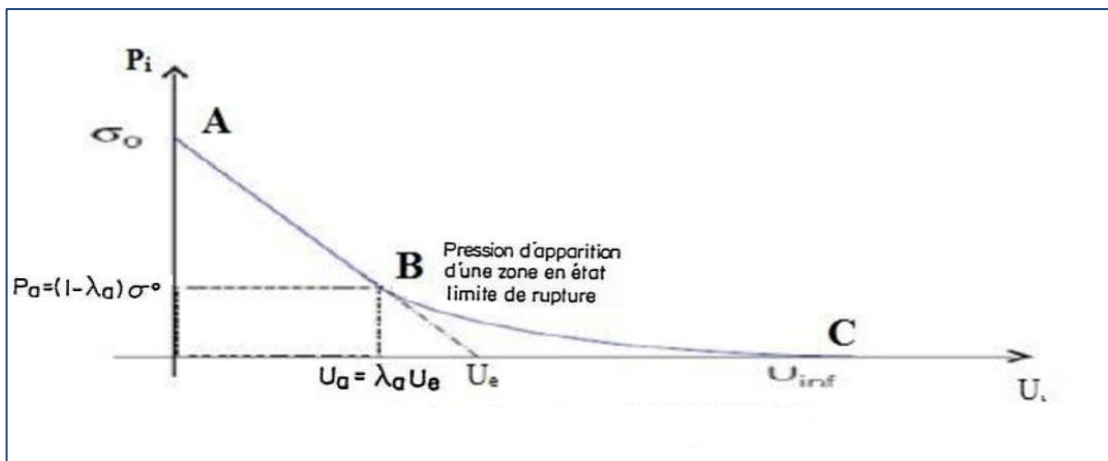


Figure 2.1. Courbe de convergence

Etape n°2 : Courbe caractéristique du soutènement

Il faut déterminer la raideur du soutènement choisi et la pression maximale de soutènement (état limite admissible ou état limite de rupture) puis tracer la courbe.

Dans le cas d'une section cylindrique mince de module de déformation E_b et d'épaisseur :

$$K_b = \frac{E_b \times e}{R} \quad \dots \text{ Eq (2.10)}$$

$$P_b^{max} = \frac{\sigma_b^{max} \times e}{R} \quad \dots \text{ Eq (2.11)}$$

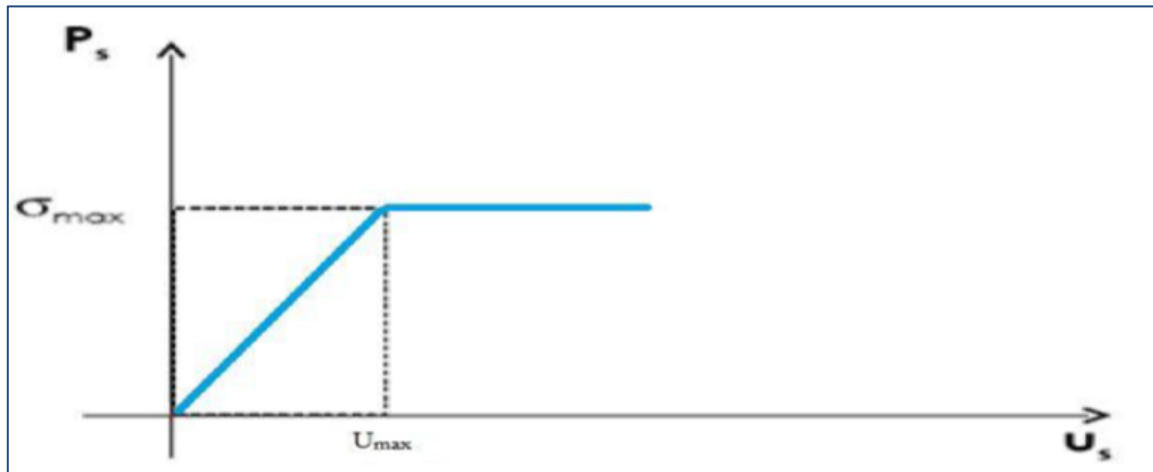


Figure 2.2. Courbe de confinement

Etape n°3 : Convergence acquise à la paroi au moment de la mise en place du soutènement

Cette valeur donne le point de départ de la courbe caractéristique du soutènement à

$p = 0$:

$$U_d = \lambda_d U_e \quad \dots \text{Eq (2.12)}$$

$$\lambda(d) = 1 - 0,75 \left[\frac{1}{1 + \frac{4d}{3R}} \right]^2 \quad \dots \text{Eq (2.13)}$$

Etape n°4 : Equilibre final

L'équilibre final qui permet de déterminer la pression de soutènement, est obtenu en superposant les deux courbes caractéristiques sur un même graphique, avec un décalage de l'origine de la courbe de soutènement de la valeur U_d pour tenir compte de la convergence qui s'est déjà produite lors de sa mise en place. Le point d'intersection des deux courbes définit le point d'équilibre.

2.3. Etude de l'influence du choix du taux de déconfinement au moment de pose du soutènement sur les pressions et les déformations à l'équilibre (cas Métro d'Alger)

2.3.1. Courbe caractéristique du terrain

Tableau 2.1. Caractéristiques du terrain encaissant [4]

R[m]	E [MPa]	C[KPa]	γ [KN/m ²]	φ	ν
4.86	700	100	25	43°	0.375

$$\sigma_0 = \sum \gamma_i \times h_i + q = 515 + 10 = 525 \text{ KPa.}$$

$$R_c = 2 \times 0.1 \text{tg}(45 + 21,5) = 0.46 \text{ MPa.}$$

$$K_p = \text{tg}^2(45+21,5) = 5,29$$

$$\sigma_0 > \frac{R_c}{2} \rightarrow 0,525 < 0,23 \quad \text{Comportement élastoplastique du massif.}$$

Le début de la déformation s'opère de façon élastique, tant que la pression fictive du soutènement reste supérieure à P_a , pression d'apparition d'une zone en état limite de rupture à la paroi de l'excavation. Lorsque p est inférieure P_a il se développe autour de la cavité une zone en état limite de rupture « plastique » qui est circulaire de rayon r_p .

La pression d'apparition de la zone plastique :

$$P_a = \left(\sigma_0 - \frac{R_c}{2} \right) (1 - \sin \varphi) = \left(0,525 - \frac{0,46}{2} \right) (1 - \sin 43).$$

$$P_a = 93.8 \text{ KPa}$$

Le taux de déconfinement correspondant :

$$\lambda_a = \frac{\sigma_0 - P_a}{\sigma_0} = \frac{525 - 93,8}{525} = 0,82.$$

Le déplacement de la paroi correspondant :

$$U_a = \lambda_a U_e.$$

$$U_e = \frac{1+0,375}{700} \times 0,525 \times 4.86 = 5,01 \text{ mm.}$$

$$U_a = 0,82 \times 5,01 = 4,1 \text{ mm.}$$

Pour $P_a \leq P < \sigma_0$, la courbe caractéristique est un segment de droite passant par les deux points de coordonnées :

$$(P = 525 \text{ KPa} ; U = 0) \text{ et } (P = 93,8 \text{ KPa} ; U = 4,1 \text{ mm}).$$

Chapitre 2 Etude de l'influence du choix de λ_d par la méthode Convergence confinement

Pour $P < P_a$, la courbe est calculée point par point selon la loi de comportement suivante :(milieu élastoplastique parfait)

Tableau 2.2. Courbe caractéristique du terrain

λ	0	0,82	0,84	0,86	0,88	0,9	0,92	0,94	0,96	0,98	1
U(λ) [mm]	0,00	4,11	4,21	4,33	4,45	4,58	4,73	4,89	5,08	5,28	5,52
P(λ) [KPa]	525	94,5	84	73,5	63	52,5	42	31,5	21	10,5	0

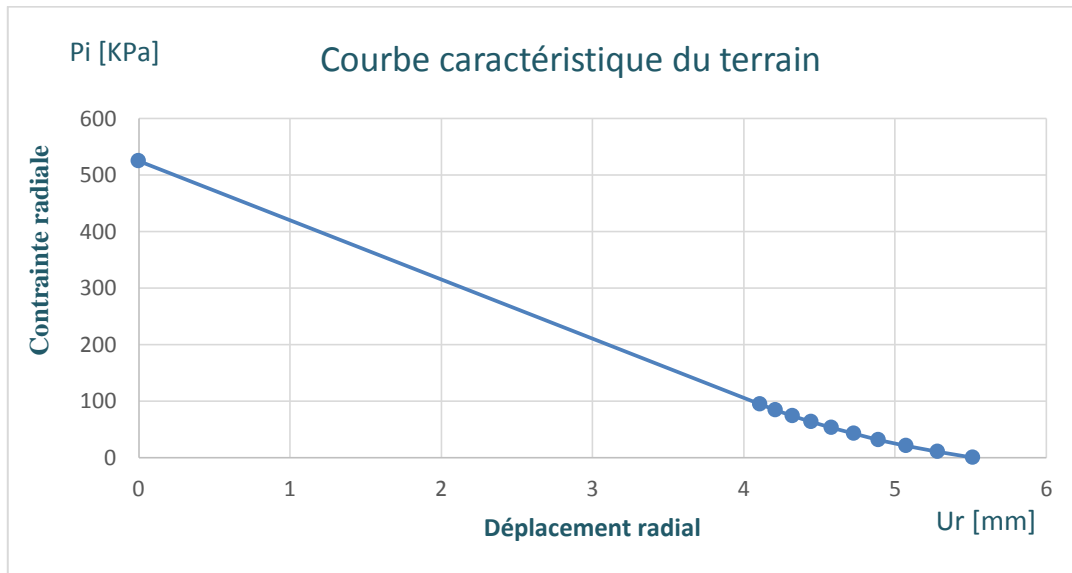


Figure 2.3. La pression de convergence P_i en fonction de U_r

2.3.2. Courbe caractéristique de soutènement

- Béton projeté

Tableau 2.3. Caractéristiques du béton projeté

E_b [MPa]	ν	e [m]	σ_b^{max} [MPa]	R [m]
10000	0.2	0.25	10	4.86

Dans le cas d'un revêtement cylindrique mince de module E_b et d'épaisseur e :

-Raideur du béton projeté:

$$K_b = \frac{E_b \times e}{(1 - \nu_b^2) \times R} = \frac{10000 \times 0,25}{(1 - 0,04) \times 4,86} = 535,8 \text{ MPa}$$

-Pression maximale développée par le béton projeté:

$$P_b^{max} = \frac{\sigma_b^{max} \times e}{R} = \frac{10 \times 0,25}{4,86} = 0,51 \text{ MPa}$$

Chapitre 2 Etude de l'influence du choix de λ_d par la méthode Convergence confinement

-Déplacement maximum du béton projeté:

$$U_b = \frac{P_b^{max} \times R}{K_b} = \frac{0,51 \times 4,86}{535,8} = 4,6 \text{ mm}$$

▪ Cintre métallique HEB160

Tableau 2.4. Caractéristiques du cintre métalliques HEB160

E_b [MPa]	A [cm ²]	a [m]	σ_e^{max} [MPa]	R [m]
210000	54,3	1	240	4.86

-Raideur du cintre :

$$K_C = \frac{A_S \times E_a}{a \times R} = \frac{54,3 \times 10^{-4} \times 210000}{1 \times 4,86} = 234,6 \text{ MPa}$$

-Pression maximale développée par le cintre :

$$P_c^{max} = \frac{A_S \times \sigma_e}{a \times R} = \frac{54,3 \times 10^{-4} \times 240}{1 \times 4,86} = 0,268 \text{ MPa}$$

-Déplacement maximum du cintre :

$$U_C = \frac{P_c^{max} \times R}{K_C} = \frac{0,268 \times 4,86}{234,6} = 5,55 \text{ mm.}$$

▪ Combinaison du cintre et du béton projeté

Raideur du soutènement :

$$K_S = K_C + K_b = 234,6 + 535,8 = 770,4 \text{ MPa}$$

Pression maximale développée par le soutènement :

$$P_s^{max} = P_c^{max} + P_b^{max} = 0,268 + 0,51 = 0,778 \text{ MPa}$$

Déplacement maximum du soutènement :

$$U_S = \frac{P_s^{max} \times R}{K_S} = \frac{0,778 \times 4,86}{770,4} = 4,9 \text{ mm}$$

Chapitre 2 Etude de l'influence du choix de λ_d par la méthode Convergence confinement

La courbe caractéristique du soutènement est une droite passant par les deux points de coordonnées :

$$(P = 0 ; U = 0)$$

et

$$(P = 778 \text{ KPa} ; U = 4,9 \text{ mm})$$

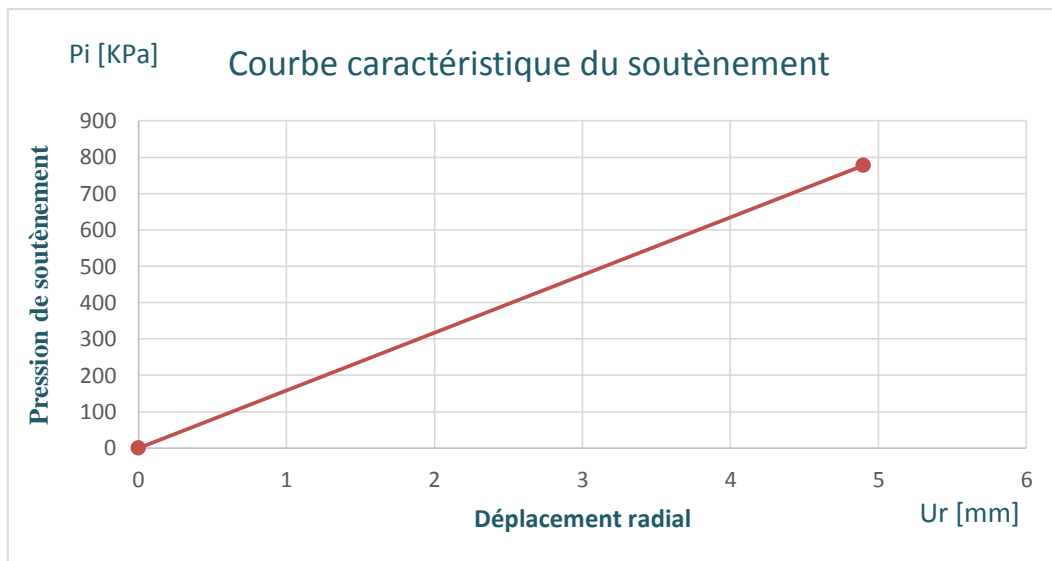


Figure 2.4. La pression de confinement P_i en fonction de U_r

2.3.3. Détermination de la convergence acquise à la paroi au moment de la mise en place de soutènement :

$$\lambda(d) = 1 - 0,75 \left[\frac{1}{1 + \frac{4d}{3R}} \right]^2$$

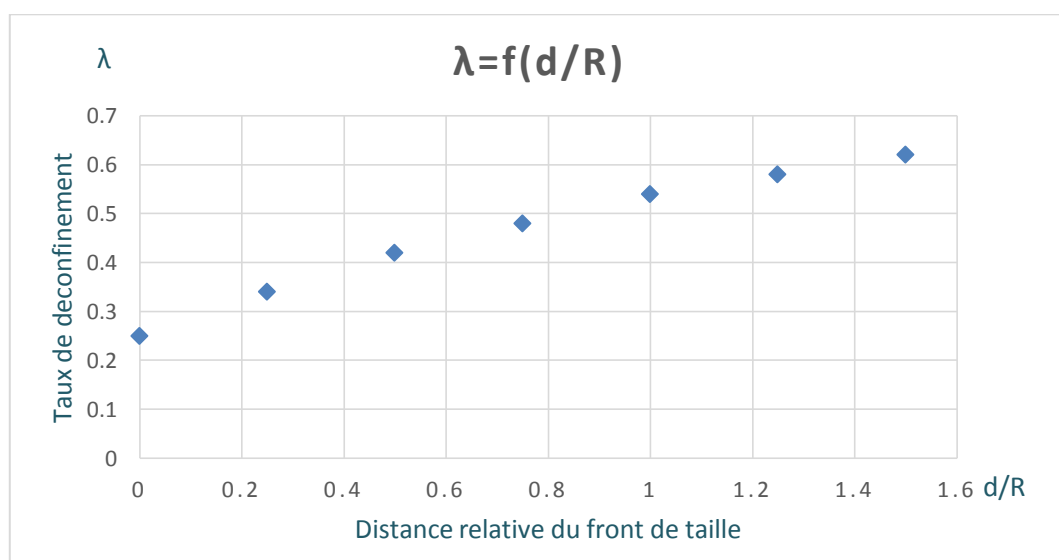


Figure 2.5. Variation du taux de déconfinement λ en fonction de la distance d du front de taille

Chapitre 2 Etude de l'influence du choix de λ_d par la méthode Convergence confinement

$$U_d = \lambda_d U_e$$

Pour différentes valeurs de d (distance de pose du soutènement par rapport au front de taille) on obtient les résultats suivants :

Tableau 2.5. Variation du taux de déconfinement λ en fonction de la distance d du front de taille

d [m]	0	0,25	0,5	0,75	1	1,5
λ_d	0,25	0,34	0,42	0,48	0,54	0,62
U_d [mm]	1,25	1,72	2,10	2,43	2,69	3,12

2.3.4. Equilibre final

L'équilibre final qui permet de déterminer la pression de soutènement, est obtenu en superposant les deux courbes caractéristiques sur un même graphique, avec un décalage de l'origine de la courbe de soutènement de la valeur U_d pour tenir compte de la convergence qui s'est déjà produite lors de sa mise en place. Le point d'intersection des deux courbes définit le point d'équilibre.

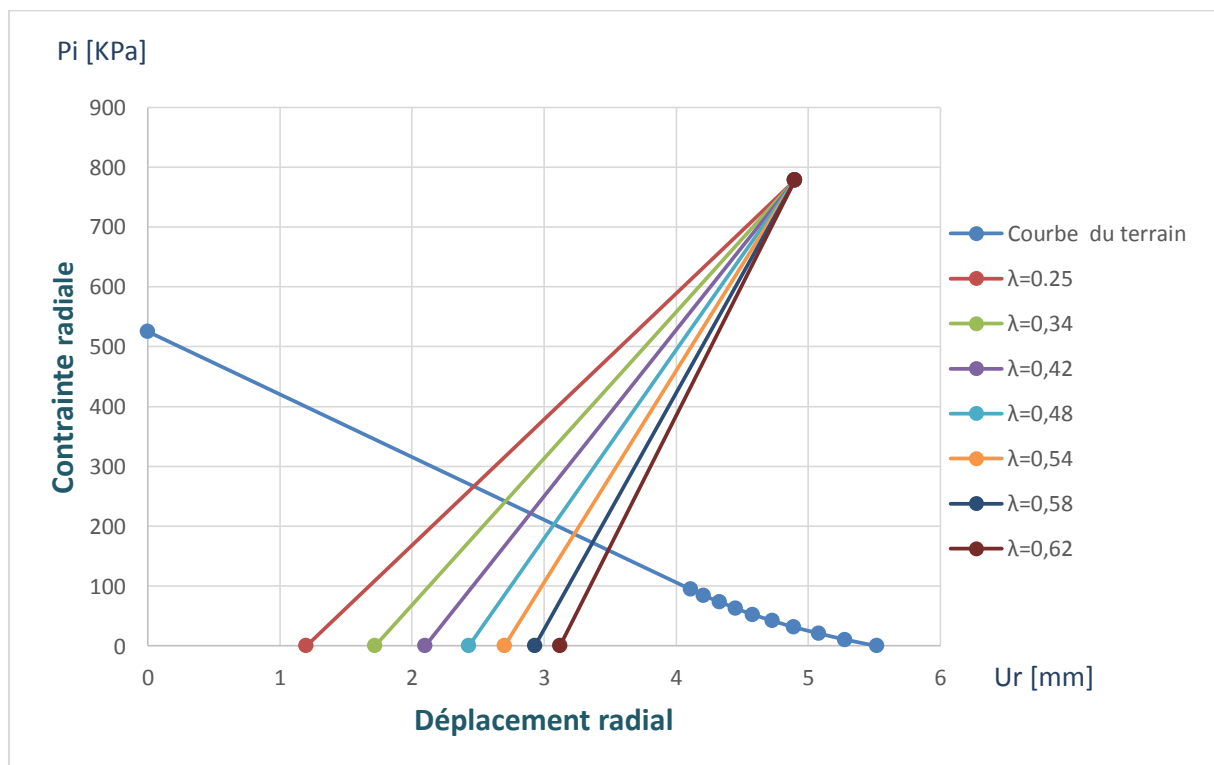


Figure 2.6. Courbe d'équilibre final Convergence-Confinement

Chapitre 2 Etude de l'influence du choix de λ_d par la méthode Convergence confinement

Le déplacement et la pression de soutènement à l'équilibre pour les différentes valeurs de λ_d sont :

Tableau 2.6. Variation du déplacement et de la pression à l'équilibre en fonction du taux de déconfinement λ_d

λ_d	0,25	0,34	0,42	0,48	0,54	0,58	0,62
U_{eq} [mm]	2,45	2,72	2,9	3,08	3,22	3,36	3,48
P_{eq} [KPa]	270	240	222	202	180	166	140

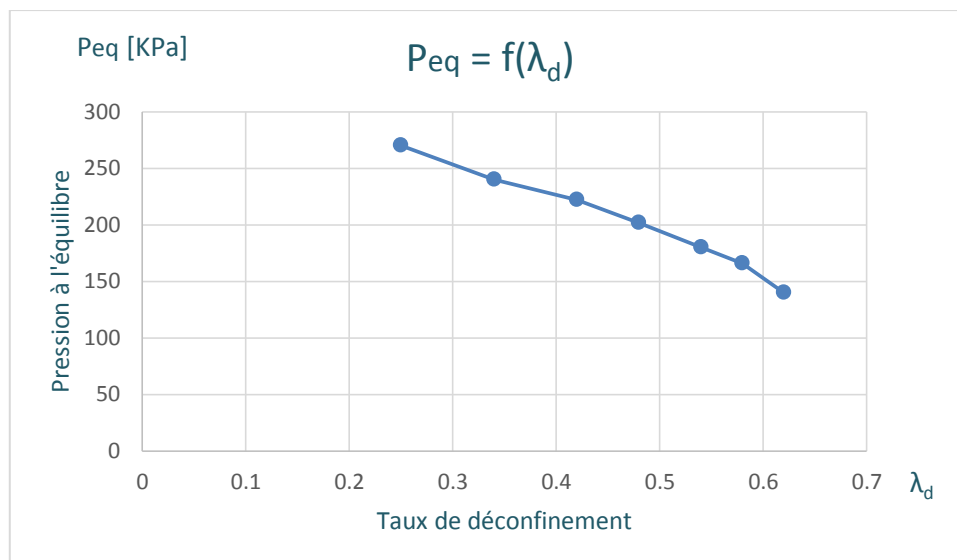


Figure 2.7. Variation de la pression à l'équilibre en fonction du taux de déconfinement λ_d

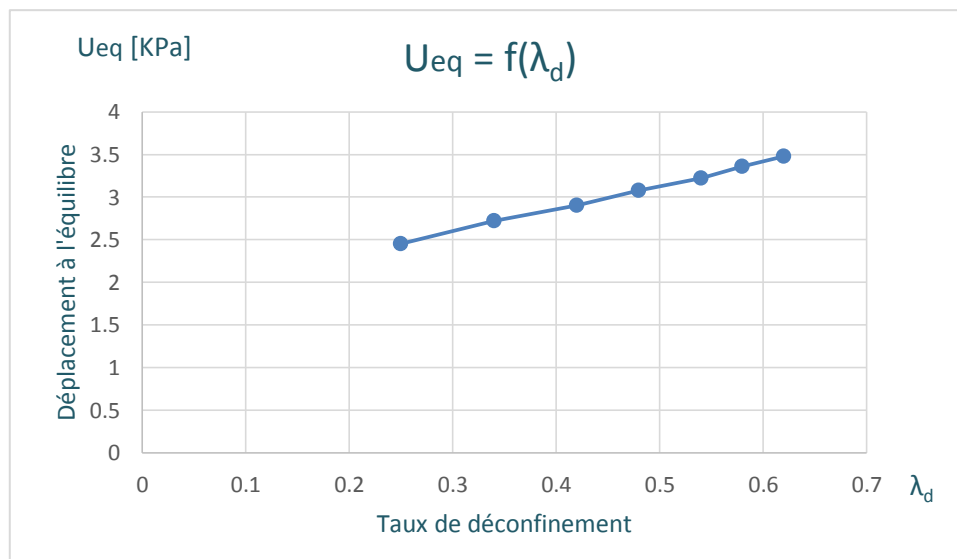


Figure 2.8. Variation du déplacement à l'équilibre en fonction du taux de déconfinement λ_d

Chapitre 2 Etude de l'influence du choix de λ_d par la méthode Convergence confinement

La précision de calcul de la pression de soutènement et du déplacement à l'équilibre est étroitement liée à la précision avec laquelle le taux de déconfinement au moment de pose de soutènement λ_d est déterminé. Il convient dans chaque cas d'évaluer l'incidence de l'incertitude sur la valeur de λ_d sur la valeur de la pression de soutènement

Les résultats obtenus montrent clairement l'influence du choix du taux de déconfinement sur la courbe de convergence-confinement. On constate que plus le moment de pose ou la distance de pose du soutènement est élevé plus la pression à l'équilibre est faible et le déplacement à l'équilibre est important.

2.4. Conclusion

Les résultats obtenus montrent clairement que le paramètre clé qui conditionne l'interaction massif-soutènement est le taux de déconfinement λ_d à la pose du soutènement (ou la convergence U_d à la pose). Des valeurs du taux de déconfinement élevés conduisent à des convergences plus importantes et à une sous-estimation de la pression que doit reprendre le soutènement ce qui peut conduire à la rupture de l'ouvrage

Cette méthode permet l'optimisation des caractéristiques et du coût du soutènement. Associée à l'auscultation pendant les travaux, elle autorise le contrôle et l'adaptation du soutènement aux conditions effectivement rencontrées sur le site. En faisant varier la distance de pose on peut déduire le soutènement optimal compte tenu des convergences maximales acceptable.

Un soutènement placé trop près du front de taille sera chargé prématurément et arrivera donc plus rapidement à la rupture. A l'opposé, un soutènement placé trop loin du front n'aura aucun effet, car le terrain se sera déjà presque entièrement déconfiné

CHAPITRE 3

Chapitre 3 Etude de l'influence du choix de λ_d par un modèle numérique basé sur la méthode Convergence-Confinement

Chapitre 3 : Etude de l'influence du choix de λ_d par un modèle numérique basé sur la méthode CV-CF

3.1. Introduction

L'utilisation d'un modèle numérique basé sur la méthode convergence-confinement permet de prendre en compte de nombreux facteurs (géométrie de l'ouvrage, anisotropie des contraintes géostatiques et les phases successives d'excavation) qui ne peuvent pas être intégrés dans le modèle analytique de cette dernière.

Dans cette méthode l'ensemble terrain-ouvrage est généralement décomposé en mailles planes ou en volumes élémentaires dont on écrit l'équilibre compte tenu des actions sur les frontières. Les seules hypothèses introduites obligatoirement sont les suivantes :

- le système est partout en équilibre,
- les déformations sont petites (géométrie inchangée),
- les matériaux sont continus,
- la loi de comportement des matériaux est connue et peut être traduite numériquement.

Les déformations aux nœuds des mailles du système sont calculées en écrivant, soit que l'énergie potentielle du solide est minimale, soit que son énergie complémentaire est minimale.

L'étude de l'interaction entre le massif et le soutènement au cours du creusement d'un tunnel, en appliquant les principes de la méthode Convergence-Confinement « substituer à un modèle tridimensionnel difficile à exploiter un modèle bidimensionnel en déformation plane », comprend, dans les cas simples les phases suivantes :

- L'établissement du maillage: le maillage doit inclure les limites du zonage géotechnique du massif, des différentes phases d'excavation et des différentes structures de soutènement.
- L'introduction des conditions de l'équilibre initial : génération du champ de contraintes initiales et application de charges extérieures éventuelles avant la construction du tunnel. Il en résulte des forces nodales F_0 s'exerçant sur l'intrados du tunnel.
- La simulation du creusement du tunnel avant la mise en place du soutènement : les forces nodales s'exerçant à l'intrados du tunnel sont diminuées de λF_0 , la valeur du taux de déconfinement est déterminée en suivant la procédure décrite dans le chapitre 1, pendant cette phase, les éléments des soutènements sont dits désactivés, c'est-à-dire que leur module de déformation est pris égale à 0.
- La simulation de la mise en place du soutènement par activation des éléments correspondant et de la fin du creusement du tunnel en annulant les forces nodales s'exerçant à l'intrados du tunnel.

Chapitre 3 Etude de l'influence du choix de λ_d par un modèle numérique basé sur la méthode Convergence-Confinement

3.2. Hypothèses de calcul

▪ Caractéristiques géomécaniques des différentes couches du massif [Métro d'Alger]

Les caractéristiques géomécaniques des différentes couches du massif sont donnée dans le tableau suivant :

Tableau 3.1. Caractéristiques géomécaniques des différentes couches du massif [4]

Classe rocheuse		γ [KN/m ³]	φ [°]	C [KPa]	E [GPa]	K_o
CR1	Non perturbé	28	58	350	3,5	0,8
	Perturbé	28	48	250	1,5	0,8
CR2		25	43	100	0,7	0,6
CR3		21	32	10	0,1	0,5
Remblais		18	30	5	0,015	0,5

▪ Caractéristiques géométriques de la section du tunnel [Métro d'Alger]

Les caractéristiques géométriques de la section du tunnel sont données par la figure 2.3 du chapitre présentation du projet.

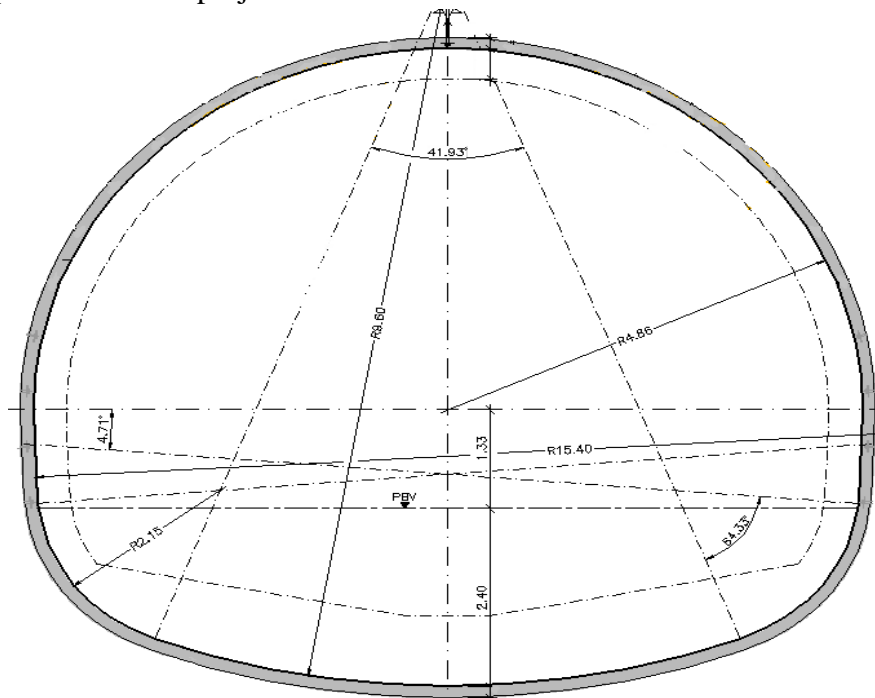


Figure 3.1. Section de tunnel

Chapitre 3 Etude de l'influence du choix de λ_d par un modèle numérique basé sur la méthode Convergence-Confinement

▪ Charge et surcharge à la surface du sol

Les charges et surcharges pris en considération sont :

- charges due au poids propre des bâtiments $q = 50 \text{ KN/m}^2$.
- charges et surcharges dues au trafic routier $q = 10 \text{ KN/m}^2$.

▪ Nappe phréatique

Le niveau de la nappe phréatique est situé à une profondeur de 30 m de la surface du sol.

▪ Interaction avec des ouvrages existant

On admet qu'ils n'existent pas d'ouvrages souterrains (galeries, collecteurs et des fondations profondes, qui n'ont pas forcément été prévues pour résister au creusement d'un tunnel) dans la zone d'influence de notre ouvrage pouvant interagir avec ce dernier celui-ci.

▪ Caractéristiques du soutènement provisoire

Béton projeté C25/30 :

- poids volumique $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$,
- résistance à la compression $f_{c28} = 25 \text{ N/mm}^2$,
- résistance à la traction $f_{t28} = 2,1 \text{ N/mm}^2$,
- module d'Elasticité $E = 10.000 \text{ N/mm}^2$.

Acier de cintres :

- acier S 235,
- limite d'élasticité $f_y = 240 \text{ N/mm}^2$,
- module d'Elasticité $E = 210.000 \text{ N/mm}^2$.

▪ Caractéristiques du revêtement définitif

Béton C30/37 :

- poids volumique $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$,
- résistance à la compression $f_{c28} = 30 \text{ N/mm}^2$,
- résistance à la traction $f_{t28} = 2,4 \text{ N/mm}^2$,
- module d'Elasticité $E = 31.900 \text{ N/mm}^2$.

Acier de ferrailage :

- barres, treillis soudé,
- enrobage : $c = 50 \text{ mm}$ intérieur et $c' = 50 \text{ mm}$ extérieur,
- limite d'élasticité $f_{yk} = 400 \text{ N/mm}^2$,
- module d'Elasticité $E_{ym} = 200.000 \text{ N/mm}^2$.

3.3. Etude de l'influence du choix de λ_d

3.3.1. Modèle de base

La Figure ci-dessous représente la géométrie et le maillage d'éléments pris en compte dans le modèle de calcul utilisé par le programme Plaxis V8.2 [5].

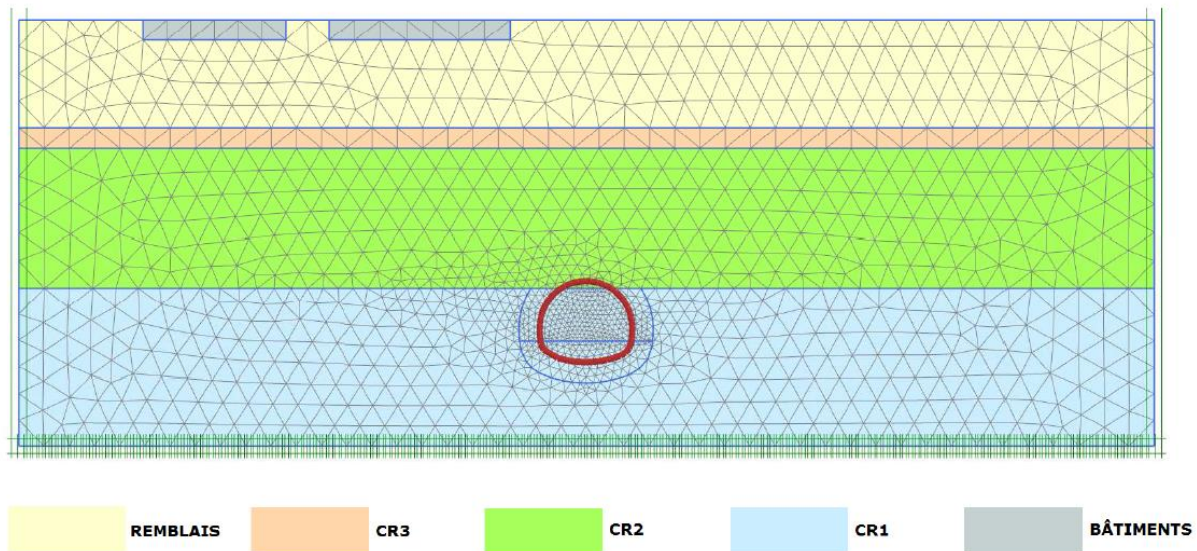


Figure 3.2. Géométrie et maillage d'éléments pris en compte dans le modèle de calcul

Le phasage exécutif adopté, représente le plus fidèlement possible, les diverses étapes du processus constructif que l'on propose de mettre en place dans l'ouvrage, les différentes phases sont décrites ci-dessous :

Phase 0 : introduction des conditions de l'équilibre initial,

Phase 1 : activation des charges et surcharges à la surface du sol,

Phase 2 : excavation de la demi-section supérieure, avec un coefficient de déconfinement λ ,

Phase 3 : mise en place du soutènement provisoire sur la demi-section supérieure,

Phase 4 : excavation de la demi-section inférieure avec un coefficient de déconfinement λ

Phase 5 : mise en place du soutènement provisoire sur la demi-section inférieure,

Phase 6 : mise en place du revêtement définitif avec les caractéristiques à court-terme,

Phase 7 : mise en place du revêtement définitif avec les caractéristiques à long-terme et activation du niveau de la nappe phréatique.

Le calcul a été fait pour différentes valeurs du coefficient de déconfinement λ_d (0,25 ; 0,34 ; 0,42 ; 0,48 ; 0,54 ; 0,58 ; 0,62), de sorte à permettre d'évaluer avec précaution le champ de déplacements induits par l'excavation et les forces exercées sur le soutènement.

Chapitre 3 Etude de l'influence du choix de λ_d par un modèle numérique basé sur la méthode Convergence-Confinement

Phasage exécutif adopté dans le code de calcul PLAXIS :

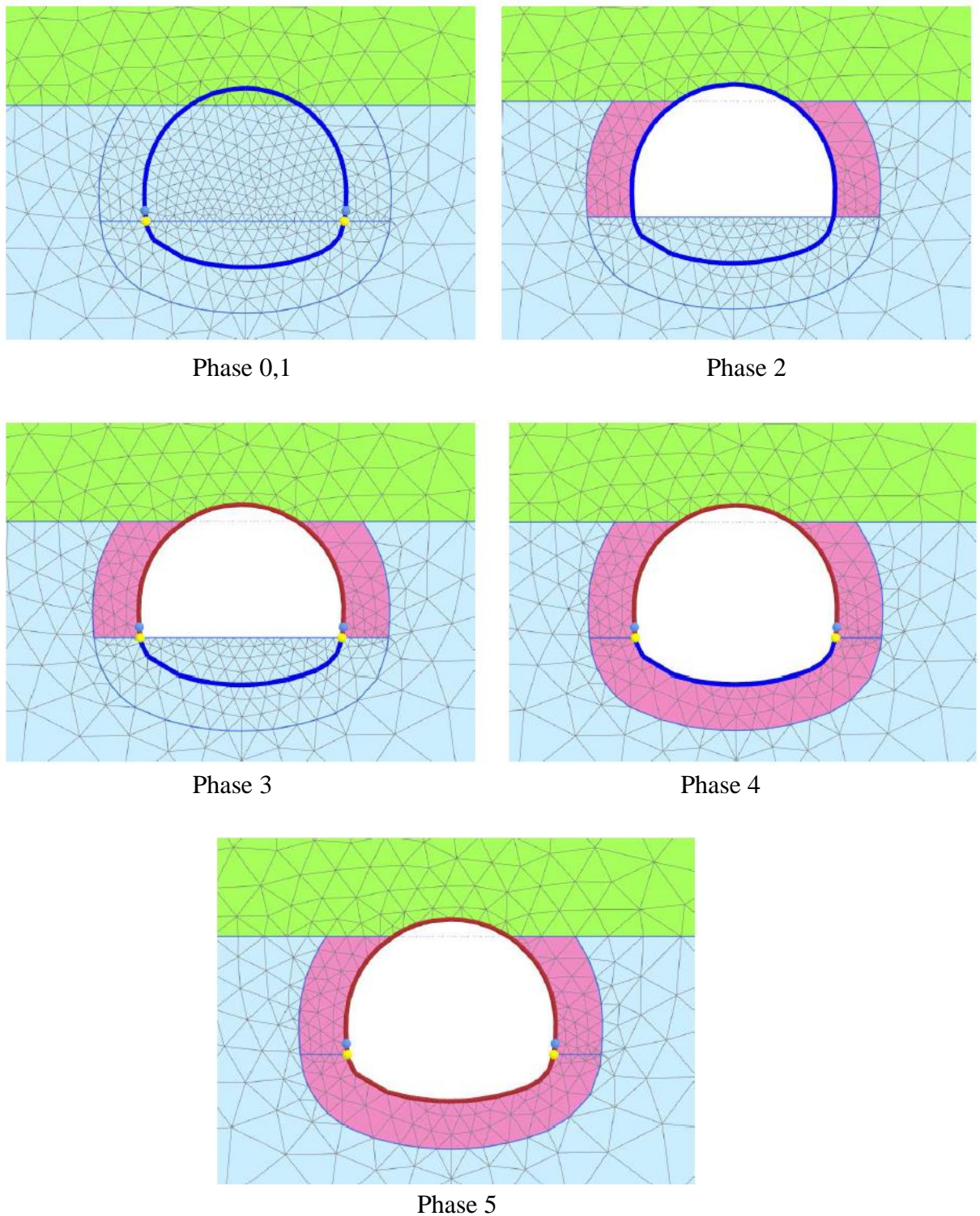


Figure 3.3. Phasage exécutif adopté dans le code de calcul Plaxis

Chapitre 3 Etude de l'influence du choix de λ_d par un modèle numérique basé sur la méthode Convergence-Confinement

3.3.2. Résultats obtenus

Pour $\lambda_d = 0,25$

- **Convergence des parois :** la convergence maximale est observée au niveau de la clé de voute et a une valeur de $3,77 \text{ mm}$.

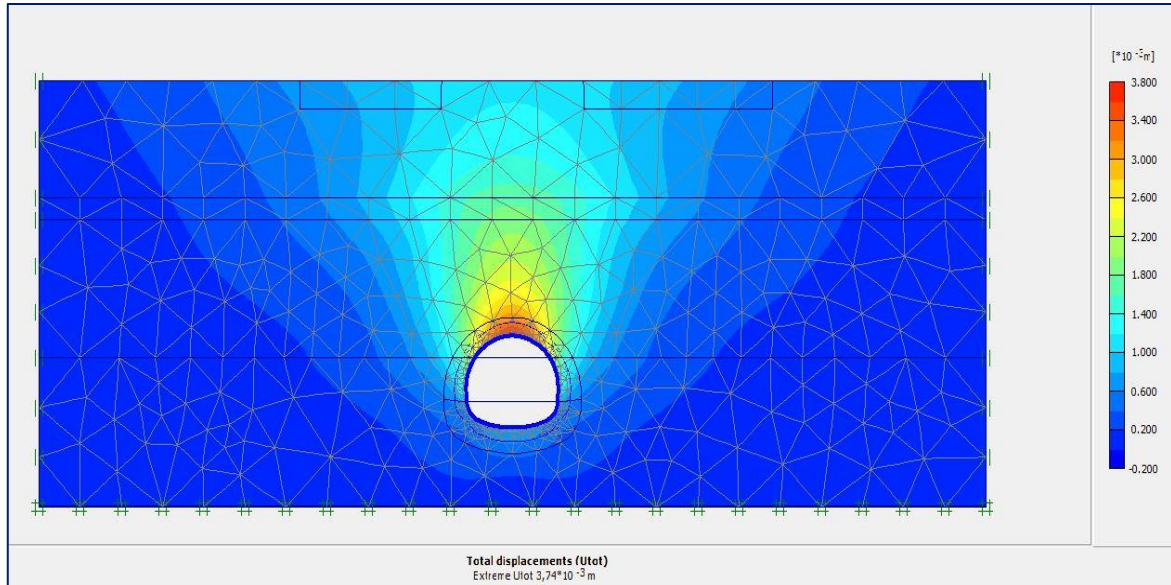


Figure 3.4. Champ de déplacements induits par l'excavation ($\lambda_d = 0,25$)

- **Tassement en surface:** le tassement maximum est observé au niveau de l'axe du tunnel et a une valeur de $1,44 \text{ mm}$.

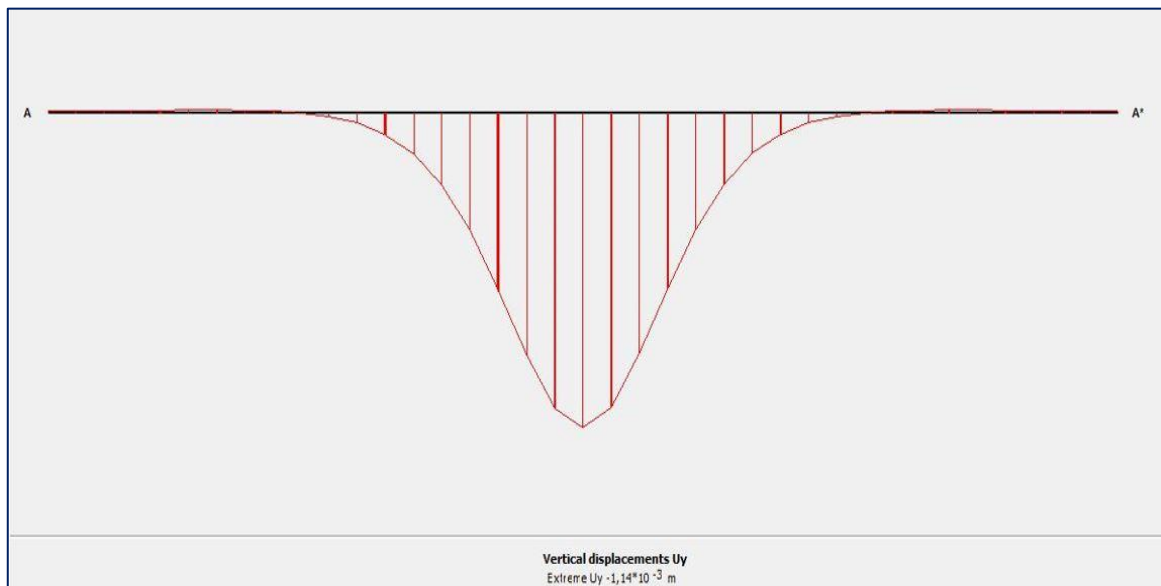


Figure 3.5. Tassement en surface ($\lambda_d = 0,25$)

Chapitre 3 Etude de l'influence du choix de λ_d par un modèle numérique basé sur la méthode Convergence-Confinement

- **Effort normal** : l'effort normal maximum est observé au niveau des naissances de la voûte et a une valeur de 1240 KN/m (compression).

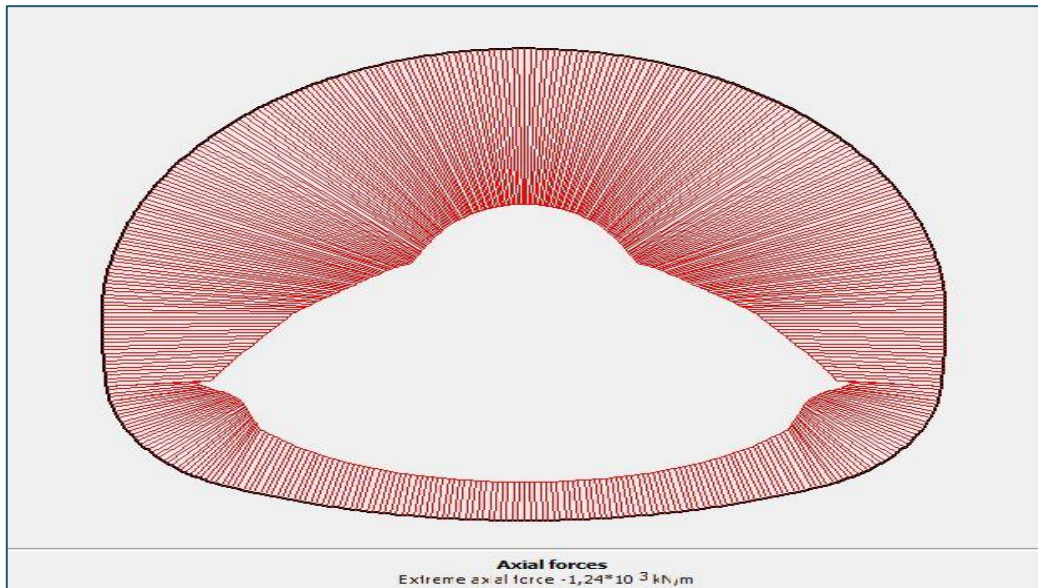


Figure 3.6. Diagramme de l'effort normal ($\lambda_d = 0,25$)

- **Effort tranchant** : l'effort tranchant maximum est observé au niveau du radier et a une valeur de 84,67KN/m.

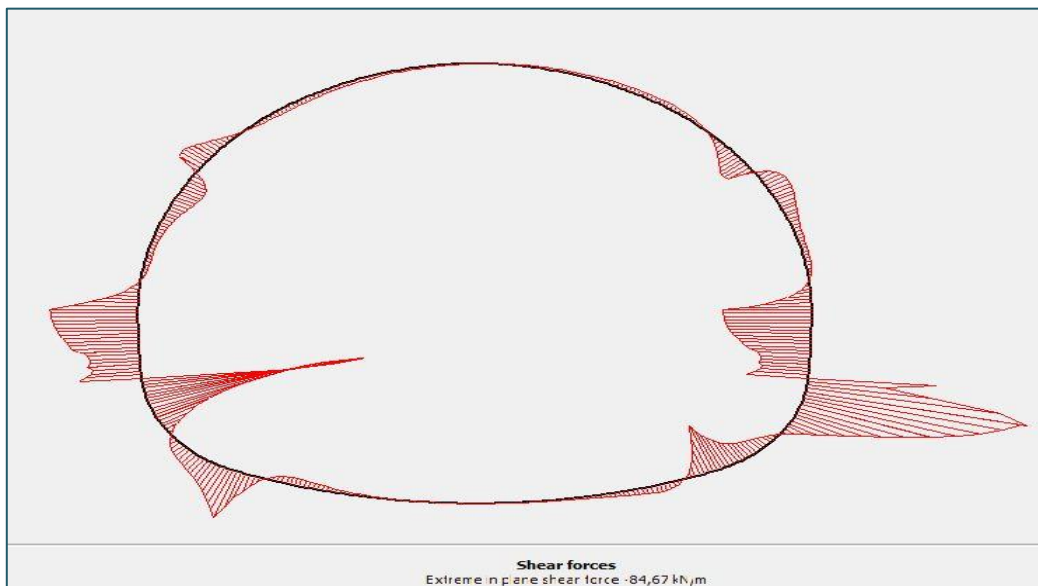


Figure 3.7. Diagramme de l'effort tranchant ($\lambda_d = 0,25$)

Chapitre 3 Etude de l'influence du choix de λ_d par un modèle numérique basé sur la méthode Convergence-Confinement

- **Moment fléchissant** : le moment fléchissant maximum est observé au niveau des piédroits et a une valeur de $33,25 \text{ KN.m/m}$.

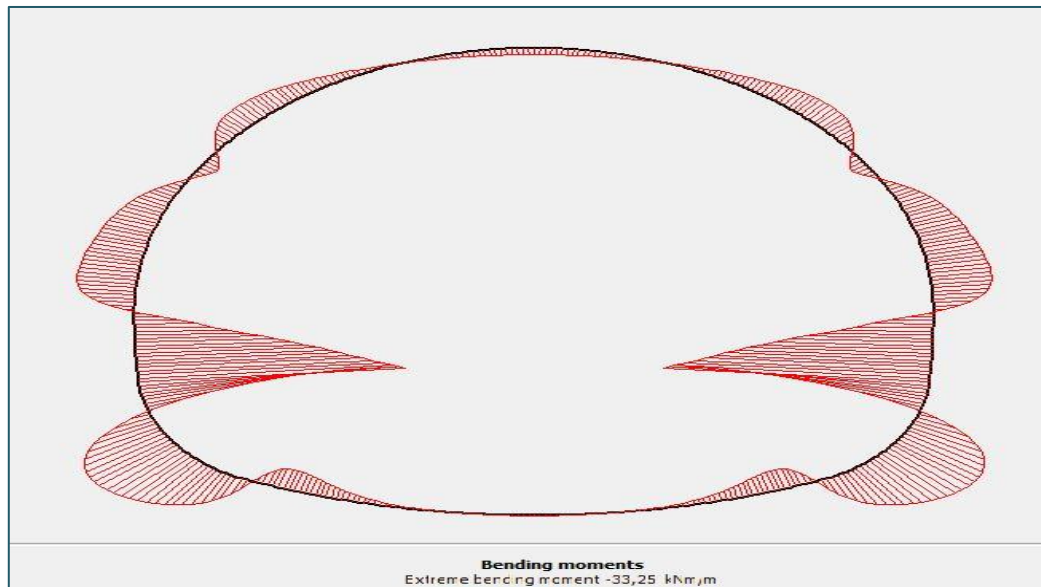


Figure 3.8. Diagramme du moment fléchissant ($\lambda_d = 0,25$)

Les résultats de calcul (champ de déplacements induits par l'excavation et les efforts exercés sur le soutènement) pour les différentes valeurs du coefficient de déconfinement $\lambda_d = (0,25 ; 0,34 ; 0,42 ; 0,48 ; 0,54 ; 0,58 ; 0,62)$ sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 3.2. Résultats du calcul pour les différentes valeurs du coefficient de déconfinement λ

Distance non soutenue[m]	Taux de déconfinement λ_d	Convergence des parois [mm]	Tassement en surface [mm]	Effort normal [KN/m]	Moment fléchissant [KN.m/m]	Effort tranchant [KN/m]
0	$\lambda = 0,25$	3,77	1,14	1240	33,25	84,67
0,25	$\lambda = 0,34$	4,02	1,20	1090	29,18	71,5
0,50	$\lambda = 0,42$	4,26	1,27	962,2	25,52	61,09
0,75	$\lambda = 0,48$	4,44	1,31	865,44	23,14	54,04
1,00	$\lambda = 0,54$	4,63	1,36	768,48	20,77	47,18
1,25	$\lambda = 0,58$	4,75	1,39	703,78	19,1	42,61
1,5	$\lambda = 0,62$	4,88	1,42	638,97	17,63	38,58

Chapitre 3 Etude de l'influence du choix de λ_d par un modèle numérique basé sur la méthode Convergence-Confinement

Variation du champ de déplacements induits par l'excavation en fonction de λ_d :

- Tassement en surface de sol :

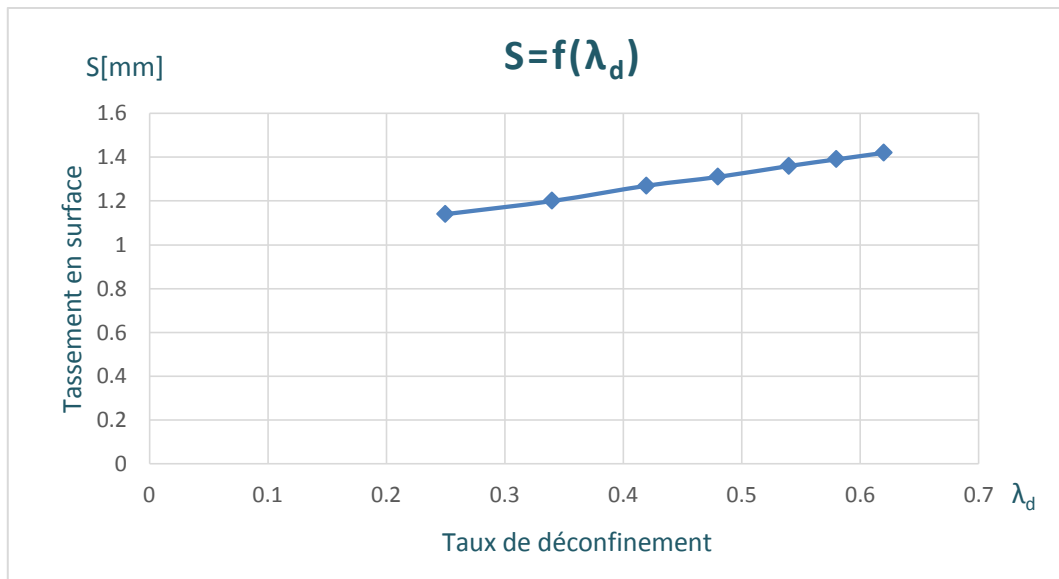


Figure 3.9. Variation du tassement en surface de sol en fonction du taux de déconfinement λ_d

- Convergence des parois du tunnel:

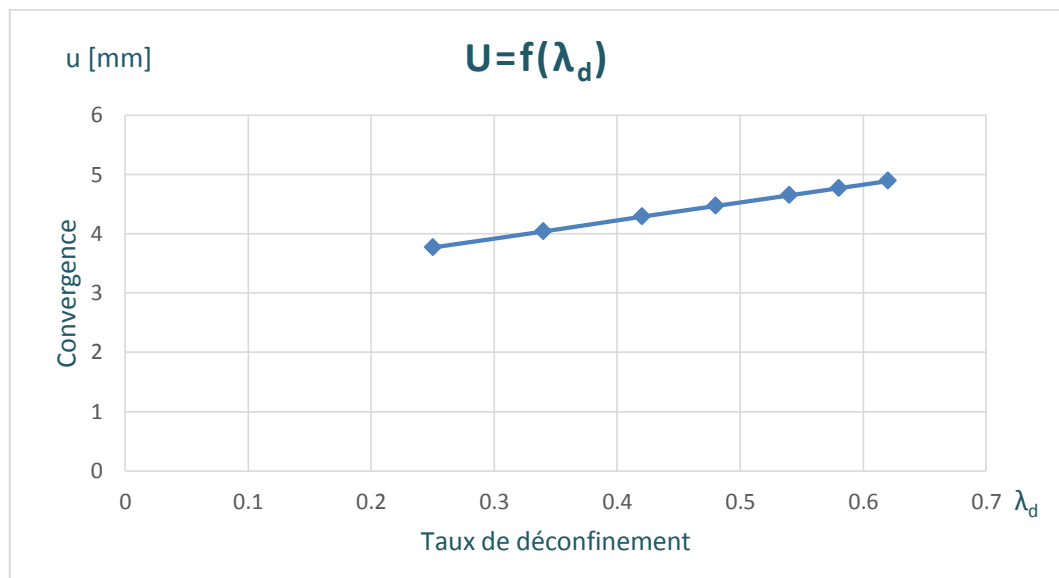


Figure 3.10. Variation de la convergence des parois en fonction du taux de déconfinement λ_d

Les figures ci-dessus montrent l'évolution du champ des déplacements induits par l'excavation en fonction de la valeur du taux de déconfinement λ_d au moment de pose de soutènement. On remarque que plus le taux de déconfinement λ_d est élevé c'est-à-dire plus la

Chapitre 3 Etude de l'influence du choix de λ_d par un modèle numérique basé sur la méthode Convergence-Confinement

distance d de pose du soutènement par rapport au front de taille est grande plus la valeur du tassement en surface de sol et de la convergence des parois est importante.

Variation des sollicitations dans le soutènement en fonction de λ_d :

- Effort normal :

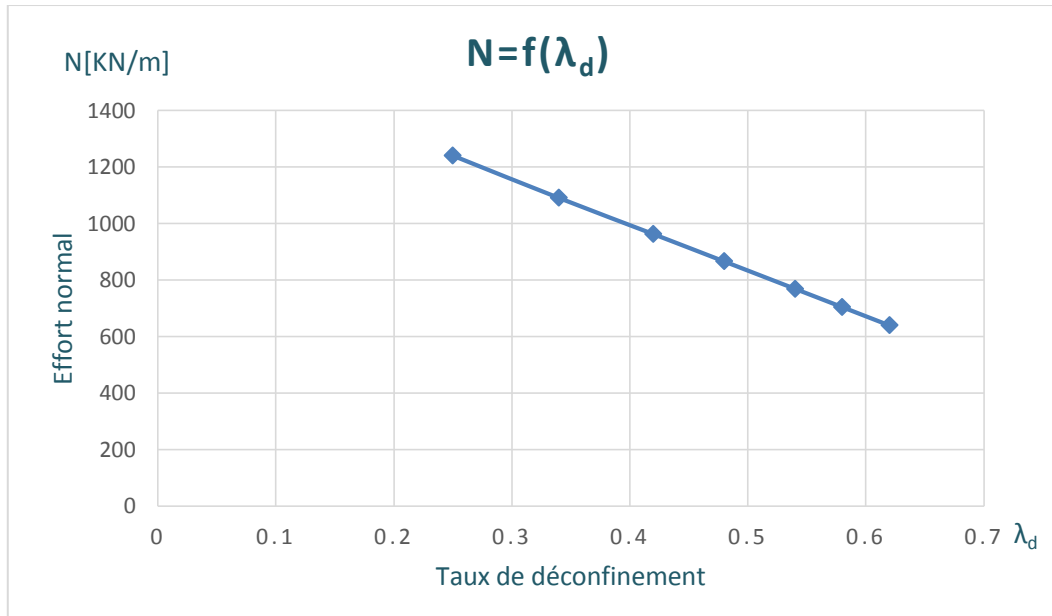


Figure 3.11. Variation de l'effort normal en fonction du taux de déconfinement λ_d

- Effort tranchant :

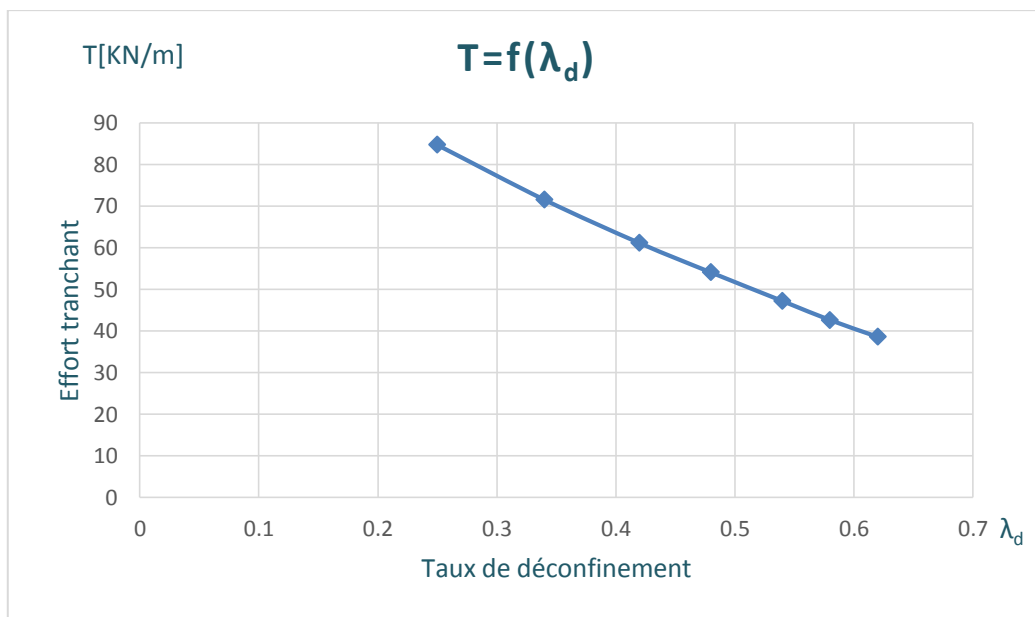


Figure 3.12. Variation de l'effort tranchant en fonction du taux de déconfinement λ_d

Chapitre 3 Etude de l'influence du choix de λ_d par un modèle numérique basé sur la méthode Convergence-Confinement

- Moment fléchissant :

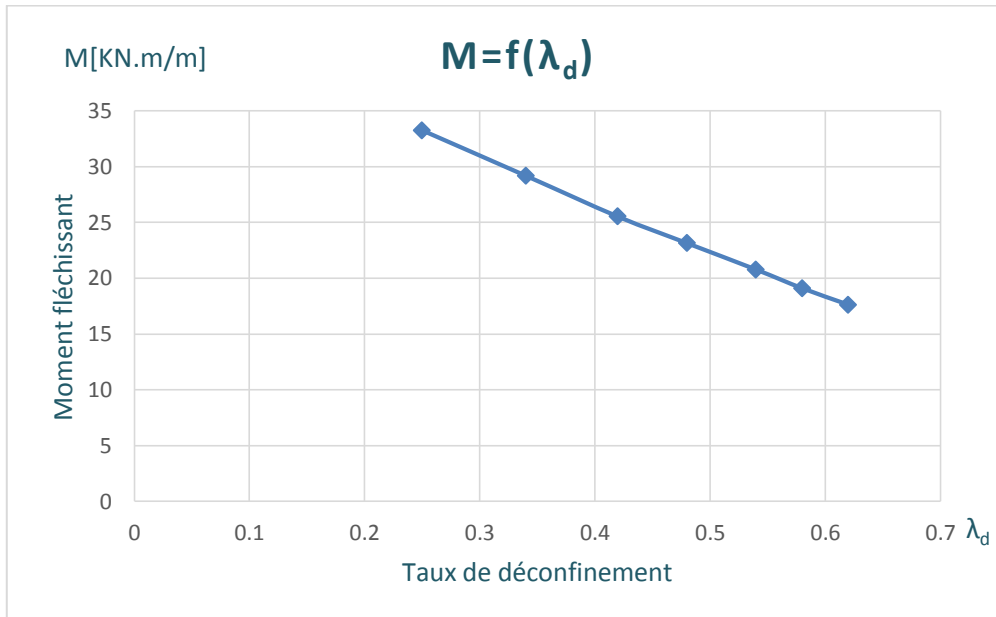


Figure 3.13. Variation du moment fléchissant en fonction du taux de déconfinement λ_d

Les figures ci-dessus montrent l'évolution des efforts exercés sur le soutènement (effort normal, effort tranchant et moment fléchissant) en fonction de la valeur du taux de déconfinement λ_d , on remarque que plus la valeur du taux de déconfinement λ_d est élevée plus la valeur des efforts repris par le soutènement sont faibles.

3.4. Conclusion :

L'utilisation d'un modèle numérique pour l'application de la méthode Convergence-Confinement nous a permis de simuler chacune des étapes du creusement/soutènement et de déterminer l'effort de poussée du massif sur le revêtement à l'équilibre; qui est le paramètre dimensionnant le plus significatif.

Les résultats obtenus montrent clairement l'influence du choix du taux de déconfinement sur le champ de déplacements induits par l'excavation et les efforts exercés sur le soutènement. Des valeurs du taux de déconfinement élevés conduisent à des convergences plus importantes et à une sous-estimation de la pression que doit reprendre le soutènement ce qui peut conduire à la rupture de l'ouvrage.

Un soutènement placé trop près du front de taille sera chargé prématurément et arrivera donc plus rapidement à la rupture. A l'opposé, un soutènement placé trop loin du front n'aura aucun effet, car le terrain se sera déjà presque entièrement déconfiné.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire de Master avait pour finalité d'étudier l'influence du choix du taux de déconfinement λ_d à la pose du soutènement sur les calculs de dimensionnement des tunnels.

Cette étude montre l'importance qu'il faut accorder au choix du taux de déconfinement pour l'estimation des efforts repris par le revêtement des tunnels et la prévision des déformations du massif encaissant, Le choix de ce dernier est sans doute le point crucial du projet. Il doit être le fruit d'un long processus de réflexion dont le résultat est un compromis entre les exigences économiques et techniques.

Les résultats obtenus montrent clairement que le paramètre clé qui conditionne l'interaction massif-soutènement est le taux de déconfinement λ_d à la pose du soutènement (ou la convergence U_d à la pose). Des valeurs du taux de déconfinement élevés conduisent à des convergences plus importantes et à une sous-estimation de la pression que doit reprendre le soutènement ce qui peut conduire à la rupture de l'ouvrage.

L'utilisation d'un modèle numérique pour l'application de la méthode Convergence-Confinement nous a permis de simuler chacune des étapes du creusement/soutènement et de déterminer l'effort de poussée du massif sur le revêtement à l'équilibre; qui est le paramètre dimensionnant le plus significatif.

Le champ de déplacements induits par l'excavation et les efforts exercés sur le soutènement dépendent fortement du choix du taux de déconfinement à la pose du soutènement. On constate que plus la valeur de ce dernier est élevée plus la valeur du tassement en surface de sol et de la convergence des parois sont importantes et la valeur des efforts repris par le soutènement sont faibles.

Cette méthode permet l'optimisation des caractéristiques et du coût du soutènement. En faisant varier la distance de pose on peut déduire le soutènement optimal compte tenu des convergences maximales acceptables. Un soutènement placé trop près du front de taille sera chargé prématurément et arrivera donc plus rapidement à la rupture. A l'opposé, un soutènement placé trop loin du front n'aura aucun effet, car le terrain se sera déjà presque entièrement déconfiné.

La méthode Convergence-Confinement est sans doute la méthode la plus souple qui apporte à l'ingénieur de chantier le support théorique dont il peut avoir besoin qui associée à l'auscultation pendant les travaux permet le calage des modèles théoriques de calcul aux observations faites in situ.

Références bibliographiques

- [1] Recommandation de l'AFTES : Réflexion sur les méthodes usuelles de calcul du revêtement des souterrains.
- [2] Anne BOUVARD-LECOANET. Guy COLOMBET. François ESTEULLE (1998), Ouvrages souterrains (conception – réalisation – entretien), Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, France
- [3] Marc PANET (1995), Calcul des tunnels par la méthode Convergence-Confinement, Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, France.
- [4] Entreprise Métro d'Alger, Rapport géologique et géotechnique(2010).
- [5] Manuel d'utilisation PLAXIS V8.2.

