



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
المدرسة الوطنية العليا للمناجم و المعادن - عمار العسكري - عنابة
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES ET DE LA METALLURGIE
AMAR LASKRI- ANNABA

Département Génie Minier

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme de MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Genie Miner

Spécialité : Contrôle des Terrains Avancé

Thème

Modélisation numérique de creusement par tunnelier –

Cas de métro d'Alger –Tronçon 05

Présenté par :

-DREHMOUNE Saliha

Encadré par :

DR. MIMOUN Abdelghani

Jury de Soutenance

Sid Madani

Professeur, Université de souk Ahras

Président

Mouna Boughamza

MCB, ENSMM

Examineur Principal

Abdelghani Mimoune

MCB,ENSMM

Encadreur

Novembre 2020



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Supérieure des Mines et de la Métallurgie

Drehmann

Département Génie Minier

AUTORISATION DE DEPOT FINAL DU MEMOIRE DE MASTER

Je soussigné (e) Mr. *S.I.D. Machani*.....
Président(e) du jury de soutenance de mémoire de Master, déclare avoir autorisé
M. *Drehmann Salha*.....
à déposer son mémoire de Master après avoir apporté les corrections signalées
par les membres du jury.

Avis du Promoteur :

Avis favorable

Avis de l'Examineur :

Président du Jury

Dédicaces

Je dédie ce travail

*A ma famille, elle qui ma doté d'une éducation digne, son amour a fait
de moi ce que je suis aujourd'hui,*

*Particulièrement à ma mère pour le gout à l'effort qu'elle a suscité en
moi, de par sa rigueur et ses encouragements,*

*A mon père qui a toujours cru en mes capacités et qui n'a jamais douté
de moi,*

*A mes sœurs et mes frères qui m'ont toujours soutenu et encouragé
durant ces années d'études,*

*A mes copines mes sœurs de cœur OMAIMA, Imane, Dounia et Sara
qui ont été là pour moi dans les bons que dans les mauvais moments,
sans elles mes années universitaire n'auront pas été aussi folle,*

*Un remerciement spécial pour la personne qui m'a permet d'obtenir le
logiciel, vraiment je suis très reconnaissante.*

Drehmoune Saliha

Résumés et mots clés :

Résumé :

La réalisation de tunnels à faible profondeur en site urbain nécessite une évaluation préalable des effets de creusement sur le terrain et les ouvrages existants. Dans le cas de creusement par tunnelier à front pressurisé, le phasage des terrains est un problème d'interaction sol-machine hautement tridimensionnel et les différentes opérations réalisées par le tunnelier rendent très complexe une modélisation numérique complète de problème et donc l'évaluation des mouvements induits. Une procédure de simulation tridimensionnelle utilisant le code de calcul GTS NX basé sur la méthode des éléments finis est proposé.

Elle est illustrée dans le cas particulier du métro d'Alger, creusé à l'aide du tunnelier à pression de terre. L'objectif visé par cette modélisation est de définir les déplacements induit par le creusement au niveau du tunnel pour chaque phase d'excavation.

Mots clés : Tunnelier(TBM), modélisation numérique 3D, GTS NX, Déplacements.

Abstract:

The excavation of shallow tunnels in urban areas requires a previous evaluation of their effects on the ground and on the existing constructions. In the case of shield tunnel boring machines, the different achieved operations are very complex to represent in a complete numerical simulation. Therefore the assessment of the tunneling-induced soil movements is difficult. In the case of shield tunnel boring machines, the different achieved operations is a highly three-dimensional problem of soil/TBM interaction and are very complex to represent in a complete numerical simulation. Therefore the assessment of the tunnelling-induced soil movements is difficult. A three-dimensional simulation procedure, using code GTS NX , is proposed. It is illustrated in the particular case of Algeries subway Tunnel excavated using earth pressure balance TBM.

The objective of this modelling is to define the mouvements induced by the excavation at the tunnel level for each phase of excavation.

KEYWORDS: Tunnel boring machine, 3D numerical simulation, GTS NX, displacements

تلخيص :

يتطلب إنشاء أنفاق قليلة العمق في المواقع الحضرية تقييمًا مسبقًا لتأثيرات الحفر على الأرض وعلى الهياكل القائمة. في حالة الحفر بواسطة آلة حفر الأنفاق ذات الضغط، فإن عملية حفر التربة على مراحل يمثل مشكلة تفاعل التربة والآلة ذو البعد الثلاثي إضافة إلى العمليات المختلفة التي تنفذها آلة حفر الأنفاق التي تجعل النمذجة الرقمية الكاملة للمشكلة وبالتالي تقييم الحركات الناتجة معقدًا للغاية. تم اقتراح إجراء محاكاة ثلاثية الأبعاد باستخدام كود حساب GTS NX بناءً على طريقة العناصر المحدودة تم توضيحه في حالة خاصة لمetro الجزائر الذي تم حفره باستخدام آلة حفر الأنفاق بضغط الأرض.

والهدف من هذه النمذجة هو تحديد تشوهات التربة التي يسببها الحفر على مستوى النفق لكل مرحلة .

الكلمات المفتاحية: آلة حفر الأنفاق ، محاكاة عددية ثلاثية الأبعاد ، GTS NX ، تشوهات ،

Table des matières

Résumés et mots clés :	II
Liste des figures	V
Liste des tableaux	VI
Introduction générale :	1
I. Chapitre 01 : Généralités	3
1. Introduction :	3
2. Boucliers mécanisés à front confiné (bouclier fermé) :	3
2.1. Tunnelier à pression de boue :	4
2.2. Tunnelier à pression d'air :	4
2.3. Tunnelier à pression de terre :	5
3. Fonctionnement du tunnelier à pression de terre :	6
3.1. Abattage du terrain :	6
3.2. Confinement du front de taille :	7
3.3. Marinage des déblais :	7
3.4. Progression dans le terrain :	8
3.5. Soutènement radial :	8
4. La modélisation Numérique de creusement des tunnels par tunnelier :	8
4.1. Les hypothèses d'estimation de mode d'interaction entre le massif et le revêtement :	9
4.2. Les avantages de la modélisation numérique :	9
4.3. Comportement de terrain lors d'excavation par tunnelier :	10
4.4. Aperçu sur la méthode des éléments finis :	11
4.5. Les travaux antérieurs concernant la modélisation de creusement par tunnelier :	14
Conclusion.....	18
II. Chapitre 02 : Modélisation numérique de creusement par logiciel GTS NX	19
1. Introduction :	19
2. Présentation de l'ouvrage :	20
3. Description de sections :	20
4. Présentation de la géométrie :	21
5. Matériaux et propriétés :	22

6. La modélisation :	23
6.1. Crée la géométrie :	24
6.2. Définition des matériaux et des propriétés :	25
6.3. Le maillage :	26
6.4. Les conditions initiales et de contour qui conditionnent le modèle :	27
6.5. Définition des phases de creusement :	28
7. Les résultats :	30
7.1. Phase01 :	30
7.2. Phase 02 :	31
7.3. Phase 03 :	31
7.4. Phase04 :	31
7.5. Phase05 :	32
7.6. Phase 06 :	32
7.7. Phase 07 :	33
7.8. Phase 08 :	33
7.9. Phase 09 :	33
7.10. Phase 10 :	34
7.11. Phase 11 :	34
7.12. Phase 12 :	34
7.13. Phase 13 :	35
7.14. Phase 14 :	35
7.15. Phase 15 :	35
7.16. Phase 16 :	36
7.17. Phase 17 :	36
8. Comparaison avec les résultats de l'entreprise :	41
9. Discussion des résultats :	42
10. Conclusion:	43
Conclusion générale et perspectives :	44
Liste des références bibliographiques	46

Liste des figures

Chapitre 01 : Généralités

Fig.1. 1. Tunnelier à pression de boue, [AFTES (2000)].....	4
Fig.1. 2. Tunnelier à pression d'air comprimé, [AFTES (2000)].	5
Fig.1. 3. Tunnelier à pression de terre.....	6
Fig.1. 4. Source de perte de volume potentiel avec un tunnelier pressurisé (Mair et Taylor 1997) cité par Moller et Vermeet (2008)	10
Fig.1. 5. Exemple de maillage.....	13
Fig.1. 6. Eléments le plus fréquemment employés	13
Fig.1. 7. Modes de chargement considéré pour simuler l'excavation (D'après Kasali, 1982 cité par Athan, 1995).....	14
Fig.1. 8. Effet de la pression d'injection sur la surpression interstitielle autour du tunnel Swoboda & Abu-Krishna (1999)	16
Fig.1. 9. (a) Déformée du maillage en 3D. (b) Comparaison entre les tassements transversaux à une distance 4D derrière le front. (Broere et al., 2002).	17
Fig.1. 10. Suppressions interstitielles calculées dans le sol autour du tunnel et à coté de la jupe du bouclier pour différentes valeurs de la pression d'injection (Kasper et Meschke, 2006) ...	18

Chapitre 02 : La modélisation numérique par GTS NX

Fig.2. 1. Section géotechnique longitudinale Tronçon 5	21
Fig.2. 2. La géométrie de la section	22
Fig.2. 3. La fenêtre initiale du logiciel.	24
Fig.2. 4. Modélisation de la géométrie.....	25
Fig.2. 5. Insertion des matériaux et des propriétés.....	26
Fig.2. 6. Le maillage.	27
Fig.2. 7. les conditions aux limites.....	27
Fig.2. 8. Application des forces agissant sur le modèle,a)Pression de confinement) Jack thrust.c) Pression extérieurs sur les voussoirs et pression extérieure sur le tunnelier.....	28
Fig.2. 9. Définir les phases d'excavation.	28
Fig.2. 10. Analyse de la validité des dimensions.	30
Fig.2. 11. Les déplacements pour la phase 01.	30
Fig.2. 12. Les déplacements pour la phase 02	31
Fig.2. 13. Les déplacements pour la phase 03	31
Fig.2. 14. Les déplacements pour la phase 04.	32
Fig.2. 15. Les déplacements pour la phase 05.	32
Fig.2. 16. Les déplacements pour la phase 06	32
Fig.2. 17. les déplacements pour la phase 07.....	33
Fig.2. 18. les déplacements pour la phase 08.....	33
Fig.2. 19. les déplacements pour la phase 09.....	33
Fig.2. 20. les déplacements pour la phase 10.....	34

Fig.2. 21. les déplacements pour la phase 11.....	34
Fig.2. 22. es déplacements pour la phase 12.....	35
Fig.2. 23. les déplacements pour la phase 13.....	35
Fig.2. 24. les déplacements pour la phase 14.....	35
Fig.2. 25. les déplacements pour la phase 15.....	36
Fig.2. 26. les déplacements pour la phase 16.....	36
Fig.2. 27. les déplacements pour la phase 17.....	37
Fig.2. 28. Les mouvements à la fin de creusement de la section .A) Les tassement au niveau du tunnel. B) Les convergences au niveau du tunnel.	38
Fig.2. 29. Le graphe des déplacements maximaux au niveau des voussoirs pour cette section.	39
Fig.2. 30. Les déplacements dans la direction transversale.	40
Fig.2. 31. Les déplacements dans la direction longitudinale.	40
Fig.2. 32. Les valeurs des tassements maximaux pour chaque phase d'excavation.	41
Fig.2. 33. Une comparaison entre les résultats du tassement au niveau du tunnel entre le logiciel et les mesures in-situ.	42

Liste des tableaux

Tab.2. 1. Caractéristiques de béton de soutènement.....	23
Tab.2. 2. Les caractéristiques géotechniques des couches de tronçon 05.	23
Tab.2. 3. Définir les phases d'excavation.....	28

Liste des abréviations

TBM : Tunnel boring machine
AFTES : Association française des tunnels et de l'espace souterrain
EPB : Earth pressure balance
MEF : Méthode des éléments finis
BC : Boundaries Conditions.
CAL : conditions aux limites
FLAC : Fast Lagrangian Analysis of Continua

Liste des symboles

D : diamètre du tunnel.
C : Cohésion du sol.
K : Coefficient de perméabilité.

Introduction générale :

En Algérie et plus exactement dans plusieurs chef-lieu de wilaya, les agglomérations urbaines se densifient de plus en plus et la réalisation d'ouvrages souterrains, tels que parkings, tunnels métropolitains, routiers, ferroviaires etc., est devenue un enjeu prioritaire dans le cadre des politiques de réorganisation des espaces, d'amélioration de la viabilité et de développement des transports en commun (Métro, etc.). Pour des raisons essentiellement fonctionnelles et économiques, ces ouvrages sont généralement creusés à faible profondeur dans des terrains pouvant présenter une nature hétérogène, et une résistance faible dans ce cas les maintiens frontaux et latéraux de l'excavation et la maîtrise des pressions hydrostatiques sont indispensables.

L'emploi des tunneliers pressurisés est dans de nombreuses cas indispensable , ces dispositifs permettent en effet , d'une part d'assurer la stabilité du front de taille et le maintien des pressions hydrostatiques grâce à l'ajustement de la pression frontale appliquée , et d'autre part de minimiser la convergence après le passage du front grâce à la présence de la jupe métallique et la possibilité d'injecter un mortier de bourrage à l'extrados du revêtement mis en place afin de combler le vide annulaire créée.

Le projet du Metro d'Alger est une extension qui se situe dans la région de Bab-Ezzouar, une ville industrielle, économique et universitaire en plein essor d'où la réalisation de ce projet qui va contribuer à améliorer le quotidien de toutes les franges de population.

Dépendant de la méthode de creusement par tunnelier, des procédures ont été conçues pour la modélisation de l'excavation. De telles procédures ont des effets significatifs sur l'estimation des déformations car la méthode d'analyse doit tenir en compte le phénomène d'interaction machine-sol-ouvrages. Celle-ci s'avère un processus purement tridimensionnel qui présente une complexité et des difficultés de compréhension, raison pour lesquelles s'est crée le besoin de la modélisation.

Le GTS NX est un logiciel qui permet de faire une modélisation selon les besoins, en utilisant un schéma explicite des éléments finis et qui permet de simuler le comportement élasto-plastique des sols, roches ou de tout autre matériau qui peut plastifier lorsqu'il dépasse la limite élastique. En outre, avec GTS NX, des structures peuvent être modélisées telles que les voussoirs, le béton en masse, l'acier ...

Le logiciel fournit plusieurs résultats concernant les phases de creusement par tunnelier (excavation, installation des voussoirs, injection de mortier, avancement du tunnelier) nous visant par cette modélisation de connaître les déplacements au niveau du tunnel.

Ce modeste travail est composé de trois chapitres comme suit :

Chapitre 01 : C'est une partie bibliographique qui traite deux points: le creusement par tunnelier, les différents types de tunneliers et leurs conditions d'utilisation, ensuite on parle de la modélisation de creusement en 3D.

Chapitre 02 : Cette partie est axée sur la modélisation numérique en 3D avec le code GTS-NX d'une section de tronçon 05 de la ligne B1 du métro d'Alger. Les présentations des résultats et leurs interprétations concernant les déplacements et les tassements au niveau du tunnel pour chaque phase d'excavation sont illustrés dans ce chapitre.

Annexe: cette partie est dédiée à la description générale du logiciel MIDAS-GTS NX utilisé dans notre étude et qui peut simuler le creusement de tunnel par la méthode TBM.

Cette étude est achevée par une conclusion générale et perspective.

I. Chapitre 01 : Généralités

1. Introduction :

Aujourd'hui, les tunnels apparaissent comme un élément incontournable de l'aménagement durable des territoires. Ces ouvrages souterrains offrent une solution élégante et avantageuse pour résoudre le problème de la densification de l'occupation en surface des villes.

Dans le même temps, les conditions de creusement des tunnels en sites urbains s'avèrent de plus en plus complexes. D'un point de vue géotechnique tout d'abord, les terrains rencontrés sont souvent meubles (sols sédimentaires), hétérogènes et de faible résistance mécanique. Également la présence d'un bâti de surface dense et sensible avec les ouvrages à proximité des tunnels en construction. Donc dans ce contexte l'utilisation de tunneliers est généralement nécessaire pour garantir la stabilité de l'ouvrage en cours d'excavation, limiter les tassements en surface et réduire l'impact sur les structures avoisinantes.

Une nouvelle méthode de creusement pose une question concernant la compréhension des mouvements résultant de cette excavation et pousse aussi le développement d'outil de calcul adaptés aux situations rencontrées.

Dans ce chapitre, on va présenter quelques types de tunneliers qui garantissent la stabilité frontale et latérale.

2. Boucliers mécanisés à front confiné (bouclier fermé) :

Ce mode de creusement est utilisé pour les terrains à faible résistance, quand le front de taille ne peut pas assurer l'équilibre des pressions hydrostatiques ou de la pression des terres sans soutènement. Dans ce mode, le terrain est excavé en pleine section par des techniques mécanisées qui réalisent l'excavation des terrains et assurent également le soutènement latéral et frontal. Ces étapes peuvent être réalisées par les différents types de tunnelier.

Ce type de bouclier a progressivement remplacé les méthodes de traitement de terrain par congélation ou injection qui s'avéraient nécessaires dans des formations très difficiles, à causes de délais longs et de coûts de réalisation élevés. Par rapport à un bouclier à front non pressurisé, la différence réside dans la présence d'une cloison étanche à l'avant de laquelle est mobilisée en continu et en permanence une pression de confinement [1].

On présente dans les paragraphes suivants les machines qui assurent un soutènement frontal et latéral (à front pressurisé), leurs caractéristiques et leur principe de fonctionnement :

2.1. Tunnelier à pression de boue :

Dans ce type de machine (Figure 1.1), le creusement des terrains s'effectue par une tête d'abattage munie d'outils. L'agent de support du front de taille est un liquide très fluide «la boue » composée d'eau et d'un additif qui forme une couche étanche (le cake) mise en pression sur la surface du front de taille. Cette couche transfère la pression du fluide au terrain pour équilibrer la poussée hydrostatique et supporter la pression des terres. Par la suite, la boue est évacuée avec les déblais de forage puis elle est traitée de manière à permettre sa récupération et son recyclage. Cette méthode de creusement est bien adaptée aux sols pulvérulents et aux terrains hétérogènes. Elle peut également être utilisée pour les autres types de terrain. La présence d'argile dans le sol peut causer quelques difficultés de colmatage et de séparation des déblais des boues. L'hétérogénéité du sol peut aussi présenter quelques problèmes d'extraction et de traitement des déblais.

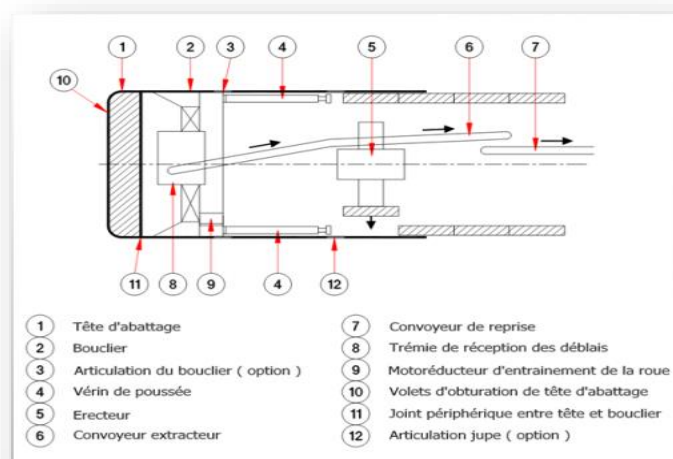


Fig.1. 1.Tunnelier à pression de boue, [2].

Le domaine d'application de cette méthode est très large car elle donne des résultats très satisfaisants. La bonne maîtrise de la qualité de la boue et le contrôle de la pression de confinement permet de diminuer le tassement de surface. Par contre, les désavantages de cette méthode sont les coûts élevés des stations de séparation et de traitement de la boue et la consommation importante de boue.

2.2. Tunnelier à pression d'air :

Ce tunnelier ressemble beaucoup à un bouclier non pressurisé. La seule différence est l'application d'une pression d'air dans la chambre d'abattage qui assure la stabilité du front

pendant le creusement. La pression de confinement par air comprimé est quasi uniforme sur le front. Par contre la poussée de terrain et de l'eau sur le front n'est pas constante sur la hauteur. Pour assurer la stabilité, il faut équilibrer la pression de confinement avec la pression d'eau dans le point le plus bas de la section. Pour cette raison, l'utilisation de cette méthode pour les tunnels à grand diamètre est limitée. Dans le cas des tunnels à faible diamètre, tout le tunnel doit être mis sous pression.



Fig.1. 2.Tunnelier à pression d'air comprimé, [2].

Les tunneliers à air comprimé conviennent très bien aux terrains homogènes, à granulométrie fine et faible perméabilité. Sinon, dans les terrains hétérogènes et à faible couverture, il y a quelques pertes d'air. Dans ce cas, il y a une possibilité de projeter une mousse sur le front de taille pour éviter les fuites d'air et permettre d'appliquer la pression. En général, les terrains traversés doivent avoir une couverture d'une couche imperméable de sol. Cette méthode reste très chère et très dangereuse pour le personnel qui travaille à côté du front de taille.

2.3.Tunnelier à pression de terre :

Parmi les différents modes de confinement disponibles sur tunnelier, le principe du tunnelier à pression de terre et son rôle central qui est cité dans plusieurs travaux de thèse. Le mode de creusement à pression de terre consiste à équilibrer la pression hydrostatique et la poussée des terres au-devant du tunnelier (front de taille) par un confinement du matériau abattu qui contenu dans la chambre d'abattage. La figure suivante montre ces organes principaux :

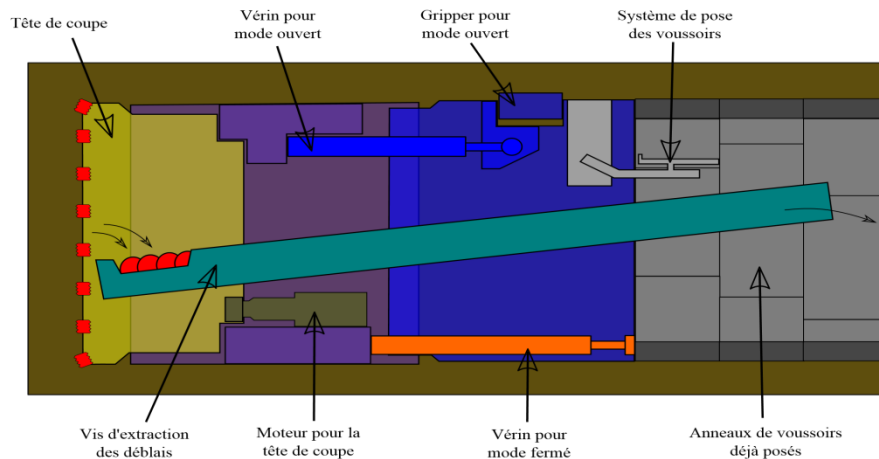


Fig.1. 3.Tunnelier à pression de terre.

L'excavation d'un terrain à l'aide d'un EPBS est régie principalement par trois paramètres: la vitesse de rotation de sa roue de coupe qui permet l'excavation du terrain; la vitesse de rotation de la vis d'extraction et la vitesse d'avancement du tunnelier. Les tunneliers à pression de terre sont dédiés au creusement des tunnels en terrain meuble pour augmenter leurs performances et faciliter le creusement [3].

3. Fonctionnement du tunnelier à pression de terre :

3.1. Abattage du terrain :

L'excavation du terrain commence par la mise en rotation de la roue de coupe .Celle-ci, selon la nature du terrain, peut être équipée de différents types d'outils. Seront privilégiés les molettes dans les terrains durs et les dents ou couteaux pour les terrains meubles. Le sol excavé remplit alors la chambre d'abattage en passant au travers de la roue de coupe par l'intermédiaire d'ouvertures, de taille plus ou moins importante selon la cohésion du terrain et de sa dureté. Afin de permettre au tunnelier de prendre des courbes et de réduire les frottements entre le terrain et le tunnelier, la roue de coupe peut être équipée d'outils de coupe situés sur sa périphérie. Ses outils rétractables entraînent alors une surcoupe du terrain et augmente la taille de la section excavée du terrain. Cette surcoupe permet également de limiter les frottements entre la jupe du tunnelier et le sol. La jupe du tunnelier qui permet d'assurer le soutènement immédiat et de protéger les hommes pendant la pose des voussoirs est de forme conique (1% sur le rayon) afin de limiter les frottements entre le bouclier et le sol, et par conséquent de réduire les risques de blocage du tunnelier. Toutefois, cette conicité de la jupe entraîne la présence d'un vide annulaire entre le sol et la jupe qui favorise les

convergences du terrain, et donc qui est susceptible d'engendrer des déplacements du sol jusqu'à la surface. Dans certains projets où la limitation des déplacements autour du tunnelier est indispensable, des injections de boue bentonitique au travers de la jupe peuvent être mises en œuvre. Celles-ci permettent également de réduire les frottements le long du bouclier.

3.2.Confinement du front de taille :

Le confinement du front de taille est assuré par le terrain naturel excavé et contenu dans la chambre d'abattage. L'extraction de ce matériau de la chambre d'abattage se faisant de manière continue au moyen d'une vis d'extraction, le contrôle du confinement du matériau dans la chambre d'abattage, et donc des pressions exercées au front, se fait par régulation simultanée de la vitesse d'avancement de la machine et de la vitesse de rotation de la vis d'extraction. Le malaxage et le concassage éventuel du matériau abattu garantissent la fluidité du sol dans la chambre d'abattage, et donc l'application d'une pression relativement homogène au front de taille. Cette homogénéité peut être améliorée si nécessaire avec l'ajout d'adjuvants (mousses, polymères).

3.3.Marinage des déblais :

Durant l'avancement, le matériau contenu dans la chambre d'abattage est évacué à l'aide d'une vis d'Archimède (vis d'extraction), permettant d'assurer la décharge continue sans perte de pression au front. Cette vis, qui conditionne entre autres la vitesse maximale d'avancement du tunnelier, doit pouvoir fonctionner quel que soit le type de matériau par conséquent son diamètre ainsi que la puissance de ses moteurs doivent être dimensionnés en fonction de la nature du sol qui sera rencontré.

Toutefois, des concasseurs et des adjuvants peuvent être ajoutés afin de fluidifier et d'homogénéiser le sol. La vis d'extraction est un organe essentiel au maintien et au contrôle de la pression au front tout en permettant l'évacuation des déblais. Elle permet d'établir un gradient de pression entre la chambre d'abattage et l'extérieur du tunnelier qui se trouve sous pression atmosphérique. La longueur de la vis dépend donc de la pression maximale à dissiper. On estime dans des conditions moyennes un gradient hydraulique de l'ordre de 20 à 30 kPa pour chaque pas de vis lequel peut représenter 80% du diamètre de la vis. Pour maintenir une pression constante au front de taille, un tunnelier à pression de terre doit travailler à « débit constant », par conséquent le débit de matériau excavé par la roue de coupe et entrant dans la chambre d'abattage doit être égal au débit du matériau en sortie de vis. Les

déblais seront ensuite évacués vers l'extérieur par l'intermédiaire d'un convoyeur généralement à bande.

3.4. Progression dans le terrain :

Afin de maintenir la pression appliquée au front, un tunnelier avance dans le terrain telle une chenille, la tête du tunnelier (bouclier) prenant appui sur les voussoirs en béton préfabriqués par l'intermédiaire de vérins de poussée. Ces vérins permettent aussi de faire avancer la machine et son train suiveur tout en maintenant la pression frontale pendant la phase d'excavation. La pose d'un nouvel anneau de voussoirs intervient lorsqu'une longueur de terrain égale à celle de l'anneau a été excavée (généralement entre 1 et 2 mètres).

3.5. Soutènement radial :

Lors de la progression du tunnelier, le soutènement radial immédiat est réalisé par la présence du bouclier et de la jupe du tunnelier. Un revêtement composé de voussoirs préfabriqués en béton armé ou fibré est mis en place à l'aide d'un érecteur à l'intérieur de la jupe. Ce revêtement mis en place est souvent considéré comme définitif. Ces anneaux de voussoirs sont posés, assemblés et boulonnés à l'abri de la jupe du tunnelier. Notons que le diamètre d'excavation du tunnel est supérieur à celui des anneaux du tunnel. Par conséquent, cette différence crée un vide annulaire entre les voussoirs et le terrain qui est de l'ordre de 10 à 20 cm. Afin de diminuer le déconfinement du sol et de limiter les tassements de surface, le vide annulaire est rempli et injecté avec du mortier de bourrage. Cette injection se fait le plus rapidement possible une fois le dernier anneau installé. L'injection peut se faire transversalement par l'intermédiaire de tubulures réservées dans la jupe ou radialement par l'intermédiaire d'ouvertures dans les voussoirs. La qualité de cette injection de mortier de bourrage influe directement sur la maîtrise des tassements de surface. Elle joue également un rôle important dans le blocage de l'anneau en limitant sa flottaison sous l'effet de la poussée d'Archimède et dans la redistribution des efforts radiaux repris par le revêtement.

4. La modélisation Numérique de creusement des tunnels par tunnelier :

Les méthodes numériques permettent d'obtenir le champ des déplacements et des contraintes en tout point du massif autour de l'excavation et de traiter une large gamme de problèmes qui sont difficiles voire impossibles à résoudre avec d'autres méthodes. Le principe commun de

ces méthodes réside dans la discrétisation de l'espace du problème étudié et dans la résolution d'un certains nombres d'équations pour obtenir la solution. Ces méthodes représentent le terrain et le soutènement comme des solides et elles permettent de prendre en compte trois aspects majeurs d'une modélisation d'un tunnel : La structure et la géométrie du soutènement avec les lois de comportement des matériaux de cette structure. La géométrie

Des différentes unités géomécaniques identifiées dans la zone d'étude et leur loi de comportement. Les phases d'excavation de l'ouvrage et de mise en place du soutènement.

Les méthodes numériques couramment utilisés sont : La méthode des éléments finis, la méthode des éléments des frontières et la méthode des éléments discontinus.

4.1. Les hypothèses d'estimation de mode d'interaction entre le massif et le revêtement :

- Continuité totale entre le revêtement et le massif
- Glissement, avec ou sans frottement, sans décollement du massif par rapport au revêtement
- Glissement, avec ou sans frottement, et possibilité de décollement du massif par rapport au revêtement

4.2. Les avantages de la modélisation numérique :

- présente l'avantage de prendre en compte directement la réponse du terrain et du soutènement, ainsi que d'une grande partie des spécificités du projet (tant sur le plan géométrique que géotechnique).
- Les méthodes numériques permettent d'obtenir le champ des déplacements, contraintes et des déformations en tout point du massif autour de l'excavation ou le soutènement et de traiter une large gamme de problèmes qui sont difficiles voire impossibles à résoudre avec d'autres méthodes
- L'avantage incontestable des méthodes numériques est d'aborder des problèmes théoriques analytiquement insolubles en les remplaçant par une solution numérique approchée

Pour le cas des tunnels, ces méthodes permettent de tenir compte des facteurs suivants :

- Géométrie complexe (interaction de tunnels, tunnels non circulaires, ... etc)
- Forces de gravité
- Prise en compte de l'eau interstitielle.
- Prise en compte de l'eau interstitielle.
- Comportement non-linéaire du sol et du soutènement (lois élasto-plastiques, viscoplastiques ou élasto-visco-plastiques).
- Anisotropie des terrains et de l'état de contraintes initial

Les difficultés du calcul numérique des tunnels rejoignent en fait les difficultés rencontrées dans tous problèmes géotechniques. Ce sont liées, d'une part, à la modélisation des massifs de sol ou de roche, à la détermination des paramètres de calcul et d'autre part à la bonne représentation des différentes phases de creusement du tunnel.

4.3. Comportement de terrain lors d'excavation par tunnelier :

Les mouvements engendrés par l'excavation sont une convergence au niveau du front, un déconfinement autour du tunnel, une modification des contraintes et un déplacement de sol au niveau du vide annulaire, ces mouvements avec le phénomène de consolidation provoquent une perte de volume de terrain au niveau du tunnel et au niveau de la surface du sol comme on peut voir sur la figure suivante :

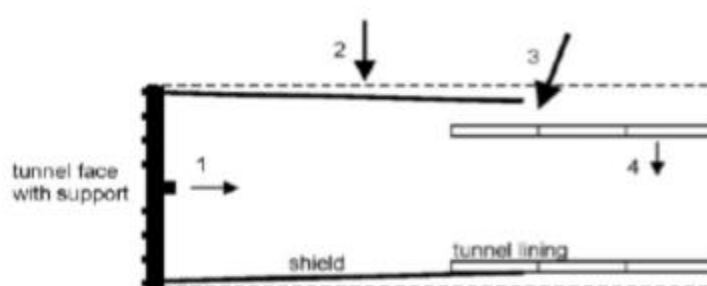


Fig.1. 4.Source de perte de volume potentiel avec un tunnelier pressurisé (Mair et Taylor 1997) cité par Moller et Vermeet (2008)

Le passage du tunnelier est accompagné par quatre catégories de mouvement :

δ_1 : qui commence quelque distance avant le franchissement du front de taille par la tête de tunnelier, ce tassement dépend des conditions géologiques et hydrologiques et de la pression de confinement appliquée sur le front par le tunnelier.

δ_2 : le mouvement qui se produit pendant le passage du tunnelier. Il est provoqué sous l'effet de l'interaction du tunnelier avec le sol, du pilotage du tunnelier et de la surcoupe de sol dans les zones où il y a un virage dans le tracé du tunnel.

δ_3 : engendré par l'échappement de la jupe du tunnelier qui crée des vides annulaires derrière les anneaux du tunnel.

δ_4 : tassement à long terme à cause de la stabilisation du terrain après l'excavation et la consolidation du mortier injecté.

L'étude des tassements peut se faire dans deux directions : dans une section longitudinale qui montre l'évolution du tassement avec l'avancement (le tassement en fonction de temps ou la distance du tunnelier au front de taille), dans une section transversale qui montre l'évolution d'une cuvette de tassement tracée à une certaine distance au front de taille

4.4.Aperçu sur la méthode des éléments finis :

Est une méthode numérique pour résoudre certains problèmes dans différents domaines. Elle consiste à associer au milieu réel un milieu «idéalisé», pour lequel on a fait une hypothèse sur la forme de l'une des inconnues du problème. On peut, par exemple, supposer que le déplacement varie linéairement à l'intérieur d'un triangle, la portion du plan étudié étant décomposée en un nombre fini de triangles.

Ces domaines d'application sont extrêmement variés parmi ceux on peut citer :

- L'élasticité : Déformation plane et axisymétrique ;
- L'élasto-plasticité parfaite et fragile ;
- La viscoplasticité ;
- Les variations et phénomènes dynamiques
- Le fluage ;
- Les écoulements en milieux poreux, stationnaires , et transitoires .

A. Les informations indispensable encas de modélisation par la MEF :

- Caractéristiques mécaniques du terrain :

Dans le cas d'un comportement élastique, les caractéristiques de chaque couche seront définies par son module d'élasticité E et son coefficient de Poisson ν . On notera à ce propos qu'une étude, même sommaire, de ces caractéristiques est préférable dans tous les cas à l'absence totale d'étude, qui conduit au calcul de soutènement dans l'ignorance presque totale du massif!

- Etat initial des contraintes :

Pour des raisons d'ordre géologique, les contraintes initiales peuvent être sensiblement différentes de celles qui seraient dues au seul poids propre du terrain. A défaut de mesures in situ, l'interprétation des résultats devra tenir compte de l'incertitude des données car toute approximation en éléments finis génère de grandes variations dans les résultats.

- Contraintes aux limites du modèle :

Dans le calcul de massifs soumis à des contraintes «naturelles», on impose généralement «assez» loin de la galerie des conditions de déplacements nuls. Dans cette optique, nous avons opté pour un modèle ayant des dimensions de 10 fois le diamètre du tunnel et imposé des déplacements à son extrémité nuls

b. Le processus de calcul :

Après la définition de la géométrie et les propriétés des matériaux, le maillage est l'étape suivante. Elle consiste à discrétiser l'espace du modèle en un nombre fini d'éléments. La finesse du maillage dépend des moyens dont on dispose et de la précision souhaité

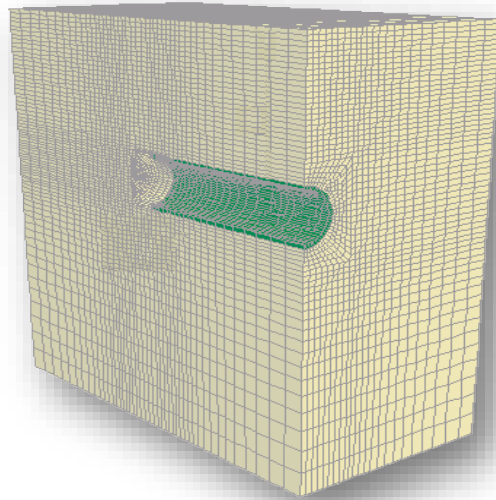


Fig.1. 5.Exemple de maillage

Différents éléments utilisés dans le maillage On distingue :

- Barres, poutres droites et courbes ;
- Plaques ;
- Coques de révolution ;
- Coques de forme quelconque ;

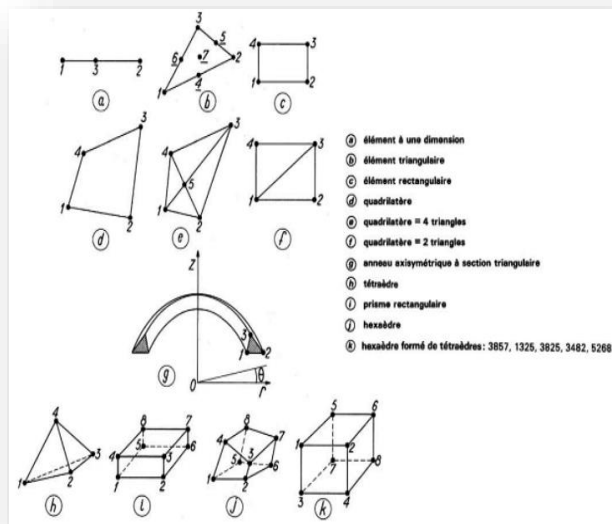


Fig.1. 6.Eléments le plus fréquemment employés

Étape 2 : initialisation des contraintes in situ ;

Étape 3: calcul des réactions nodales au niveau des parois de l'excavation ;

Étape 4: déconfinement du massif pour simuler l'excavation progressive ;

Étape 5: éventuelle pose d'un soutènement / revêtement et fin du déconfinement.

4.5. Les travaux antérieurs concernant la modélisation de creusement par tunnelier :

Le développement des premiers modèles d'éléments finis en 3D en utilisant la technique au bouclier commence au début des années 60, à titre d'exemple les travaux de Chaffois (1985) et Kasali (1982).

L'analyse de Chaffois vise à étudier le comportement au front seulement, et l'étude a été faite en conditions statiques pour l'évaluation de la variation des mouvements au front avec la diminution de la pression au niveau de ce dernier. Tandis que Kasali a traité l'ensemble des problèmes posés par le creusement d'un tunnel par bouclier, la figure (1.7) montre les différents modes de chargements considérés pour simuler le creusement dans cette analyse qui sont

- Les mouvements au front de taille ;
- Les efforts sur la jupe ;
- Les mouvements dans le vide annulaire ;

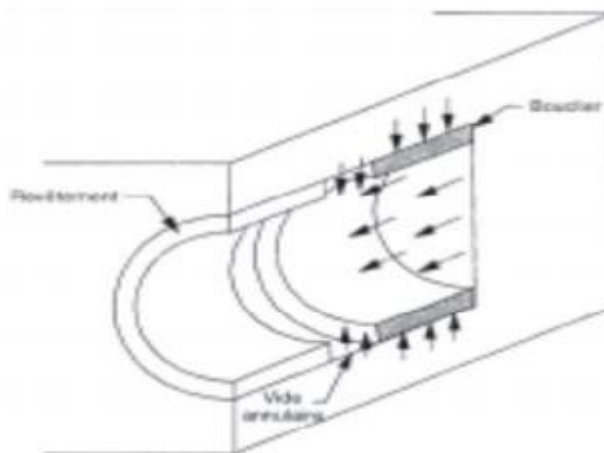


Fig.1. 7. Modes de chargement considéré pour simuler l'excavation [1].

L'étude permet également de tenir compte du poids du bouclier et du soutènement, ainsi que des efforts longitudinaux appliqués au terrain par la machine. Cette étude, qui reste limitée à un comportement purement élastique du terrain, a tout de même permis de donner des résultats satisfaisants sur une application à un ouvrage instrumenté.

Ce n'est qu'au début des années 90 que les modèles 3D du creusement par tunnelier ont pu être développés et accentués et ceci avec l'utilisation des lois de comportements simples comme Mohr-Coulomb (Boubou, 2010). Par la suite, des modèles plus compliqués sont apparus prenant en compte le revêtement du tunnel et le mortier injecté comme des composantes indépendantes, le frottement entre le tunnelier et le sol, la pression du mortier pendant et après son injection (Maghazi, 2001), ainsi que la conicité de la jupe du tunnelier (Demagh, 2008).

En 1996, Mansour a utilisé des conditions drainées et le critère de Mohr Colomb pour évaluer l'effet de bouclier sur le terrain. Après 3 ans, cette étude est appliquée par Swoboda et Abu Krisha pour un tunnel creusé sous la nappe dans des sols argileux afin d'expliquer l'influence de l'écoulement souterrain sur le creusement avec un modèle où le bouclier, le revêtement et le coulis d'injection sont considérés comme étant des composants séparés .

Oreste et al. (1999) ont fait une étude comparative entre les deux analyses, bidimensionnelle et tridimensionnelle, en utilisant le code de calcul différence finis Flac2D ainsi que Flac3D, ils ont abouti à une conclusion évidente celle qu'une modélisation 3D est nécessaire pour évaluer les efforts et déplacements autour des tunnels (Cité par Kaçar, 2007).

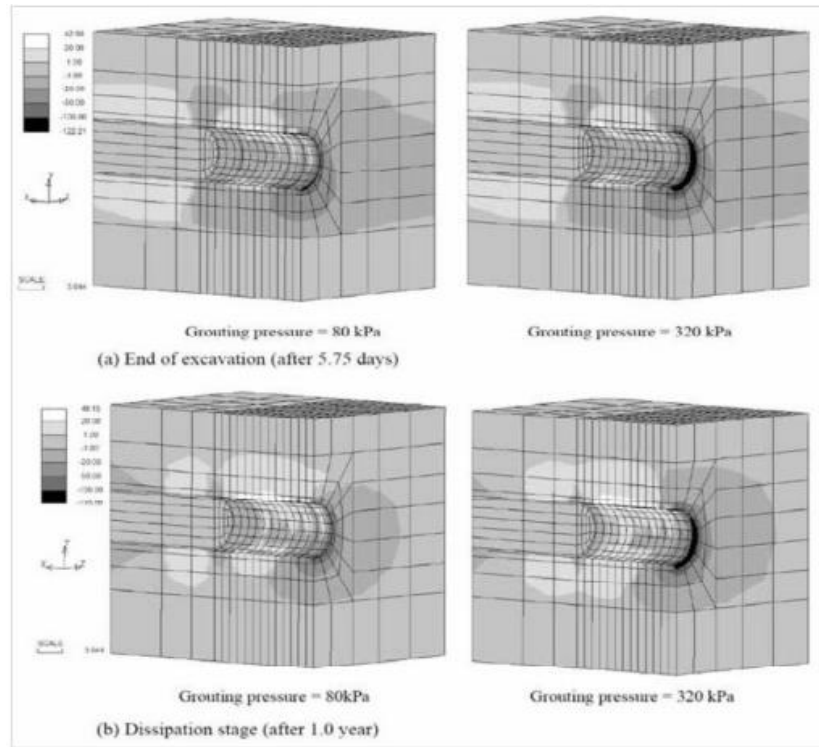


Fig.1. 8. Effet de la pression d'injection sur la surpression interstitielle autour du tunnel Swoboda & Abu-Krishna (1999)

La modélisation tridimensionnelle a montré que dans la première phase de l'excavation, la surpression interstitielle est en fonction de la pression de confinement appliquée par le tunnelier, pendant les phases suivantes, cette surpression atteindra sa valeur maximale à cause de l'injection du mortier.

L'avancement d'un tunnelier dans un massif a été modélisé par Broere et al. (2002) en plusieurs étapes prenant en compte le soutènement du front par boue pressurisée, la conicité du bouclier et les injections. Les résultats numériques sont comparés aux mesures effectuées sur le deuxième tunnel de Heinenoord. D'autres calculs avec simulation d'une rangée de maisons sur pieux ont été menés pour évaluer l'effet des tassements associés à la construction du tunnel (effet d'interaction). Ce calcul a été effectué par le code de calcul PLAXIS. La déformée du maillage est illustrée sur la figure (a), tandis que la figure (b) montre une comparaison effectuée par les auteurs entre les déplacements verticaux. Les résultats étaient en bonne concordance ce qui a mené les auteurs à certifier l'importance d'une configuration tridimensionnelle par rapport à celle en 2D surtout que ces auteurs ont effectué un calcul similaire en utilisant un code de calcul 2D.

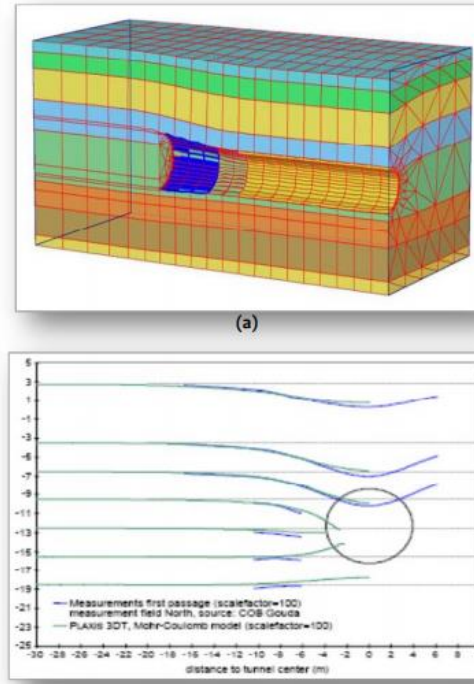


Fig.1. 9.(a) Déformée du maillage en 3D. (b) Comparaison entre les tassements transversaux à une distance 4D derrière le front. (Broere et al., 2002).

De même, dans leurs publications (2006a, 2006b), Kasper & Meschke ont conduit une large étude où ils ont étudié l'influence de divers paramètres de la TBM (longueur, poids et conicité du bouclier, pression frontale, pression d'injection, caractéristiques mécaniques du mortier d'injection; angle de frottement, perméabilité du sol; hauteur de couverture) sur l'amplitude des tassements en surface et sur les efforts axiaux et radiaux dans le revêtement. Leurs résultats ont abouti à ce que tous les paramètres étudiés ont une influence non négligeable sur les tassements de surface et que les efforts radiaux dans le revêtement sont fortement régis par la longueur du bouclier, la pression d'injection dans le vide annulaire et la hauteur de couverture et que les efforts axiaux sont fortement corrélés à la pression frontale et à la longueur.

En outre, les résultats obtenus avec le modèle de Kasper & Meschke (2006) montraient que l'augmentation de la pression d'injection augmente la pression interstitielle autour du tunnel (Figure1.10).

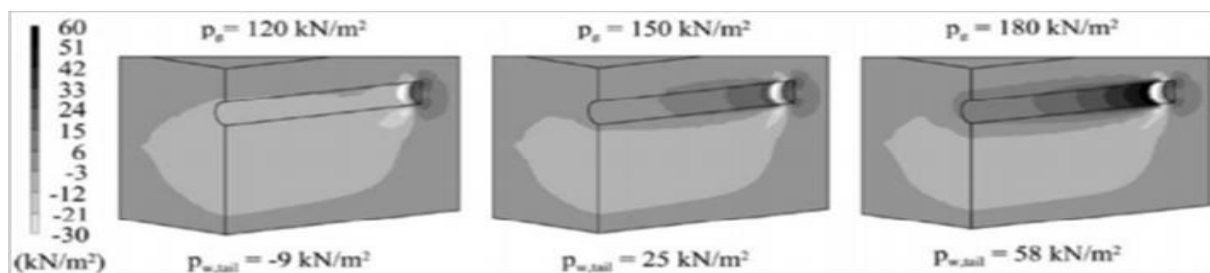


Fig.1. 10.Suppressions interstitielles calculées dans le sol autour du tunnel et à coté de la jupe du bouclier pour différentes valeurs de la pression d'injection (Kasper et Meschke, 2006)

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des aspects généraux sur les tunneliers surtout à front pressurisé, utilisé dans le projet du métro d'Alger, afin d'avoir une idée sur la technique.

Un tunnelier est une machine réalisant en continu le creusement d'un tunnel on utilisant plusieurs techniques, Le choix entre ces techniques de creusement de tunnel nécessite la prise en compte de nombreux paramètres, principalement le type de sol. Aujourd'hui, le creusement par tunnelier est largement adapté alors que les méthodes conventionnelles sont plutôt utilisées dans les conditions difficiles comme les sols hétérogènes et pour les tunnels courts ou avec une section transversale variée.

II. Chapitre 02 : Modélisation numérique de creusement par logiciel GTS NX

1. Introduction :

Dépendent de la méthode de creusement par tunnelier, des procédures ont été conçues pour la modélisation de l'excavation. De telles procédures ont des effets significatifs sur l'estimation des déformations car la méthode d'analyse doit tenir en compte le phénomène d'interaction machine-sol-ouvrages, celle-ci s'avère un processus purement tridimensionnel qui présente une complexité et des difficultés de compréhension, les raisons pour lesquelles la modélisation est devenue un passage obligatoire.

Le GTS NX est un logiciel qui permet de faire une modélisation selon les besoins en utilisant un schéma explicite des éléments finis qui permet de simuler le comportement élasto-plastique des sols, roches ou de tout autre matériau qui peut plastifier lorsqu'il dépasse la limite élastique. En outre, avec GTS NX, des structures peuvent être modélisées telles que les voussoirs, le béton en masse, l'acier ...

Le logiciel fournit plusieurs résultats concernant les phases de creusement par tunnelier (excavation, installation des voussoirs, injection de mortier, avancement du tunnelier). Nous visons par cette modélisation de connaître les déplacements au niveau du tunnel (sur les voussoirs, et après injection de mortier).

Le procédé de simulation d'un calcul est le suivant :

- ✓ Création de la géométrie et insertion des matériaux et les propriétés de ces matériaux.
- ✓ Génération d'un maillage composé d'éléments permettant de diviser le milieu continu en un ensemble de zones d'éléments finis.
- ✓ Définitions des conditions initiales et aux limites qui conditionnent le modèle.
- ✓ Définir les phases de creusement.
- ✓ Phasage de calcul.
- ✓ Sorties graphiques et analyse des résultats pour chaque phase.

2. Présentation de l'ouvrage :

Le tunnel de notre cas d'étude fait partie de l'extension B1 de métro d'Alger pour la liaison entre la commune d'El Harrach et l'Aéroport international Houari Boumediene.

Il débute de **PK 0+000,00** au **PK 9+575,00** sur une longueur totale de **9 km 575**. Le creusement se fait par la technique de tunnelier en 2 phases:

-Phase 01 :

- Tronçon d'Oued Smar au Puits de ventilation n°10
- Longueur de tunnel : **5 680 m**
- Diamètre interne de soutènement : **9,30 m**
- Diamètre externe de soutènement : **10,5 m**
- Diamètre d'excavation **10,5 m**
- Nb de stations à traverser : 5

-Phase 02 :

- Tronçon d'Oued Smar jusqu'à El Harrach
- Longueur de tunnel : **3 895 m**
- Diamètre interne de soutènement : **9,30 m**
- Diamètre externe de soutènement : **10,5 m**
- Diamètre d'excavation **10,5 m**
- Nb de stations à traverser : 3

3. Description de sections :

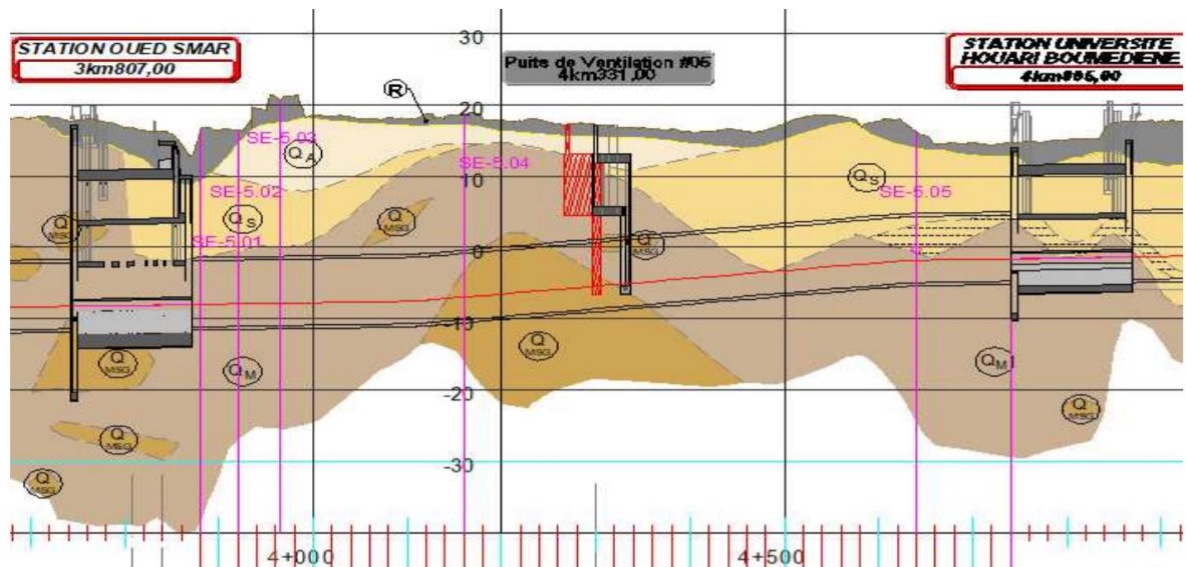


Fig.2. 1. Section géotechnique longitudinale Tronçon 5

- ✚ Entre le Pk 3+860 et Pk 3+900, trois couches principaux de sol composent la géologie du site (R, QS et QM), le profondeur du tunnel est de 18 m, sera excavé dans la formations de QM, caractérisé par Marnes jaunes ou argile marneuse, ce que peut contenir par niveaux des éléments sableux et graveleux.
- ✚ Entre le Pk 3+900 et Pk 4+120, quatre couches principaux de sol composent la géologie du site (R, QA, QS et QM), le profondeur du tunnel est de 17 m, sera excavé dans la formations de QM,
- ✚ Entre le Pk 4+120 et Pk 4+300, quatre couches principaux de sol composent la géologie du site (R, QA, QM et QMMsg), le profondeur du tunnel est varie entre 17 m et 15 m, sera excavé dans la formations de QM et QMMsg, caractérisé par Sables limono-argileux avec présence de cailloux,
- ✚ Entre le Pk 4+300 et Pk 4+460, cinq couches principaux de sol composent la géologie du site (R, QS et QM), le profondeur du tunnel est de 15 m, sera excavé dans la formations de QS et QM, caractérisé par Sable limono-argileuse, parfois plus ou moins mêlés de cailloux, avec présence de grés et conglomérat.
- ✚ Entre le Pk 4+460 et Pk 4+800, trois couches principaux de sol composent la géologie du site (R, QA, QS, QM et QMMsg), le profondeur du tunnel est varie entre 15 m et 10 m, sera excavé dans la formations de QS et QM.

4. Présentation de la géométrie :

Il s'agit d'un tunnel peu profond creusé à la TBM (tunnelier à pression de terre), son diamètre est ($D=10.5\text{m}$), le centre de tunnel se trouve à 25 m au dessous de la surface et à

1.66 m au dessous de la nappe phréatiques .Le modèle est de 50 m de large et se prolonge de 36 m dans la direction de Y et il est de 50 m de profondeur.

Aves ces dimensions, le modèle est suffisamment grand pour tenir compte d'un éventuel mécanisme de rupture et afin d'éviter l'influences des limites de modèle (effet de bord).

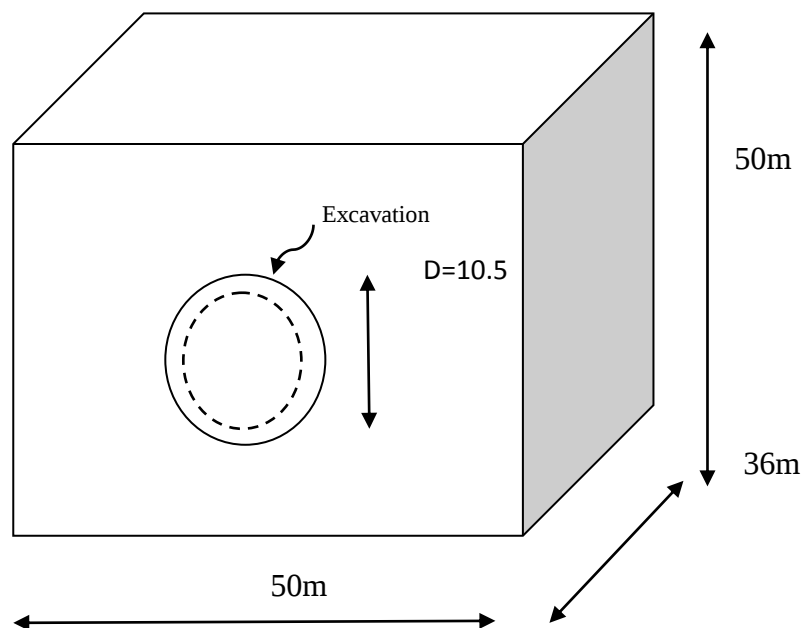


Fig.2. 2.La géométrie de la section

5. Matériaux t propriétés :

Le sol est hétérogène et se compose de 4 couches ; dont toutes étaient modélisées en utilisant le critère de Mohr-Colomb. La couche supérieure est constituée de remblais avec une épaisseur de 2 m. Cette couche surmonte une autre couche d'argile limoneuse peu sableuse (QA) avec 10m d'épaisseur. Cette dernière surmonte à son tour une couche de sable limoneux-argileux avec présence des grès (QS) dont l'épaisseur est de 8m. La couche

inférieure est l'argile marneuse à marne où le tunnel est creusé. Son épaisseur est de 30 mètres.

Les caractéristiques mécaniques des matériaux mis en œuvre lors des études sont regroupées dans le tableau suivant :

Tab.2. 1.Caractéristiques de béton de soutènement..

Paramètre	Nom	Valeur	Unité
Type de comportement	Types de matériaux	Élastique	-
Rigidité Normale	EA	$7,6 \cdot 10^7$	KN
Rigidité à la flexion	EI	$1,013 \cdot 10^6$	KN.m
Épaisseur Équivalente	D	0,40	mv
Poids volumique	W	25	kN
Coefficient de poisson	N	0,20	-

Tab.2. 2.Les caractéristiques géotechniques des couches de tronçon 05.

Unité géotechnique	Remblais (R)	Argile limoneuse peu sableuse (QA)	Sables limoneux-argileux avec présence des grés (Qs)	Argile Marneuse a Marne (QM)	Sable limoneux – argileux avec présence de cailloux (QM _{SG})
Poids vol. humide γ_h (kN/m ³)	20,0	21,00	21,0	20	21
Poids vol. sec γ_d (kN/m ³)	17,0	17,00	18,00	17,00	18,00
Cohésion non-drainée s_u (kPa)	30,0	99	--	144	101
Module de déformabilité non-drainé E_u (MPa)	12,0	42	--	87	70
Angle de frottement effectif ϕ'	20°	21°	35°	20°	27°
Cohésion effective c' (kPa)	0	31	10	53	31
Module de déformabilité drainé E' (MPa)	10,0	37	73	76	61
Coefficient K_0	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6
Perméabilité k (m/s)	-	10^{-8}	10^{-4}	10^{-8}	10^{-7}

6. La modélisation :

La fenêtre initiale de logiciel permet d'insérer le type du modèle, la direction de la gravité et les conditions initiales et de vérifier les unités des paramètres à utiliser pour les calculs. Pour les unités, il y'a une possibilité de modification au cours de la modélisation ou après l'évaluation des résultats.

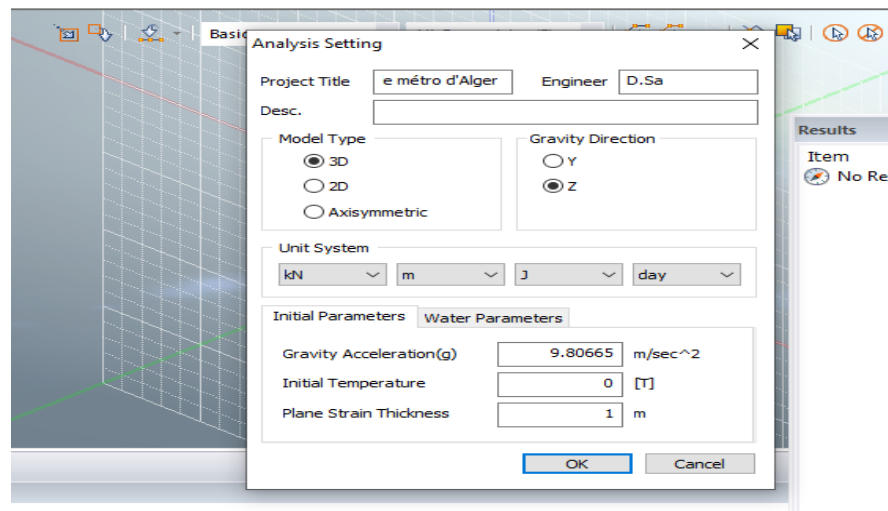
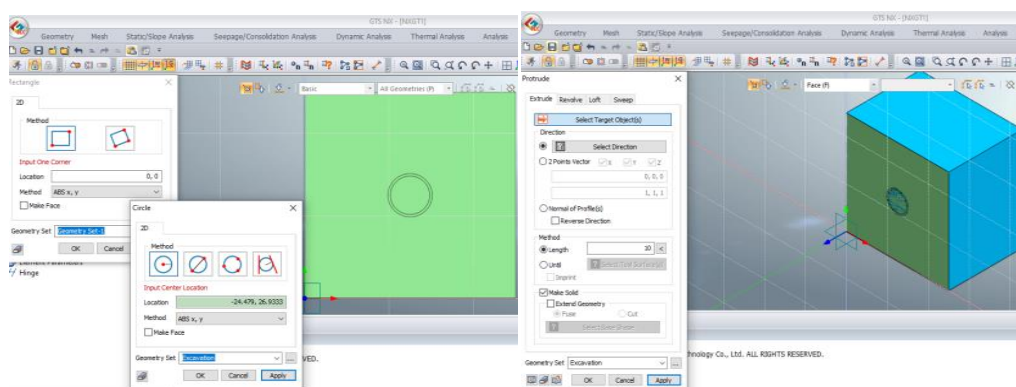


Fig.2. 3.La fenêtre initiale du logiciel.

6.1.Crée la géométrie :

La génération du modèle d'éléments finis commence par la création du modèle géométrique qui est la représentation réelle du modèle à étudier incluant la modélisation de la géométrie du tunnel ainsi de Revêtement :



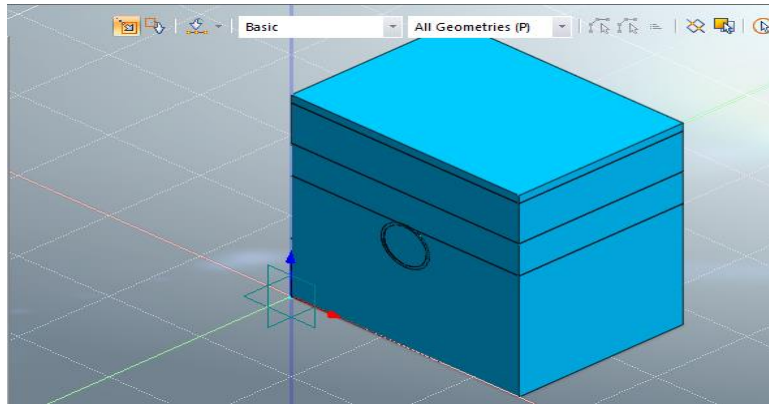


Fig.2. 4.Modélisation de la géométrie

6.2.Définition des matériaux et des propriétés :

L'étape suivante est de définir les caractéristiques des couches traversées ainsi que les éléments structuraux. Pour le sol, les données sont résumées dans le (tab2.1) pour les segments : ils sont représentés par des anneaux continus de matériel élastique linéaire, avec un module d'élasticité approprié à la qualité du béton utilisé, et le coefficient de Poisson du béton de 0,2. En outre, une masse volumique de 2,500 N / m³ a été considérée.

Le mortier a été inclus dans le modèle avec des éléments qui ont été assignés un modèle de comportement élastique et pour lesquels a été adoptée une loi d'endurcissement de sorte que lors de l'activation, se comportent comme un fluide et la solidification se produit dans le temps (selon la machine avance).

La suivante loi d'évolution du module de Young a été considérée, (Sezaki et al. 1992, en Thomas et al. 2001):

$$E_t = E_{28} (1 - e^{-\alpha t})$$

Tel que :

E_t Modulé élastique pour un temps t .

E_{28} Module élastique à 28 jours = 1 GPa

α Cst de temps = 0.2

t en heure

Pour le coefficient de Poisson, l'hypothèse assume qu'au début de l'injection, le mortier se comporte pratiquement comme un fluide, avec un module volumétrique K qui peut être

assumé égal à celui de l'eau et un module de cisaillement $G = 0$, et au cours de son endurcissement, la valeur du module de cisaillement augmente à sa valeur finale. Cela revient à dire qu'au début de l'injection, le coefficient de Poisson est de 0,5 (celui d'un liquide) et pendant le processus d'endurcissement, il est réduit à sa valeur finale.

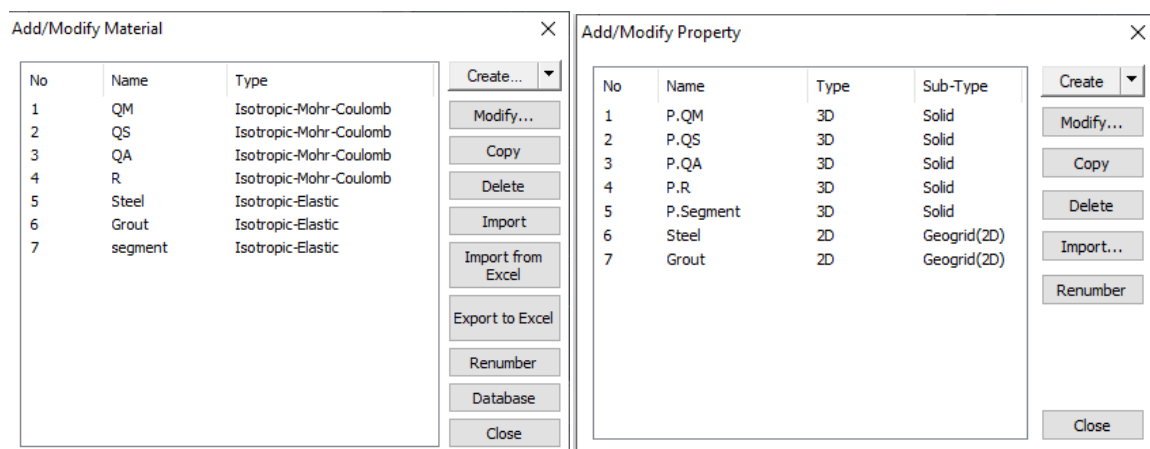


Fig.2. 5.Insertion des matériaux et des propriétés.

6.3.Le maillage :

Le maillage retenu présenté dans la figure suivante (de type Hybrid mesher) :

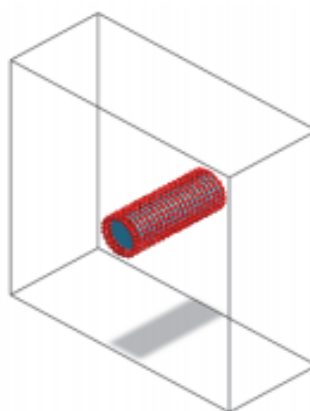
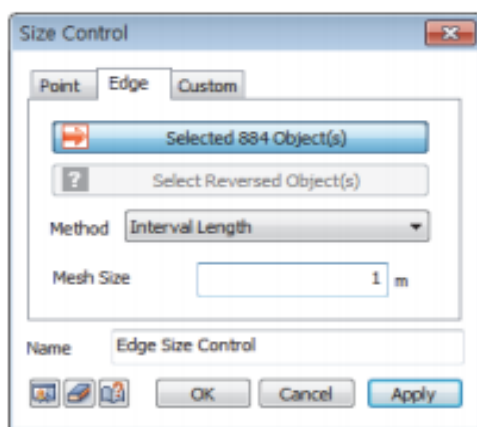




Fig.2. 6.Le maillage.

6.4.Les conditions initiales et de contour qui conditionnent le modèle :

Le logiciel impose automatiquement un réglage standard des conditions aux limites générales du modèle (La gravité et les conditions aux limites)

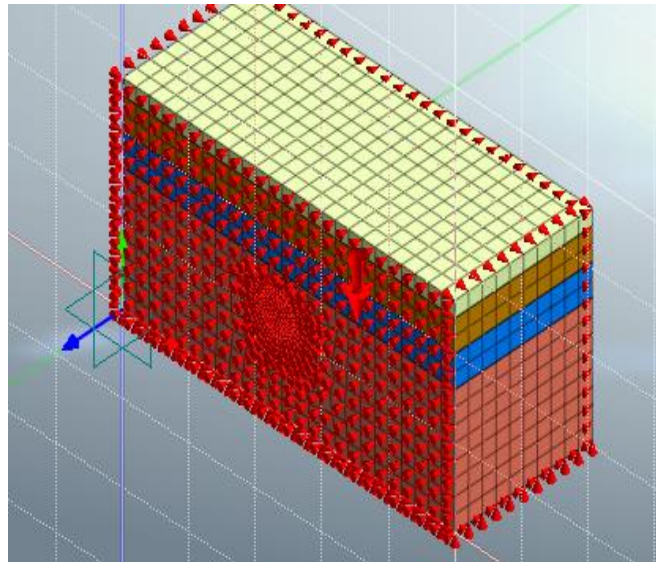


Fig.2. 7.les conditions aux limites.

Pour les forces agissant sur le modèle :

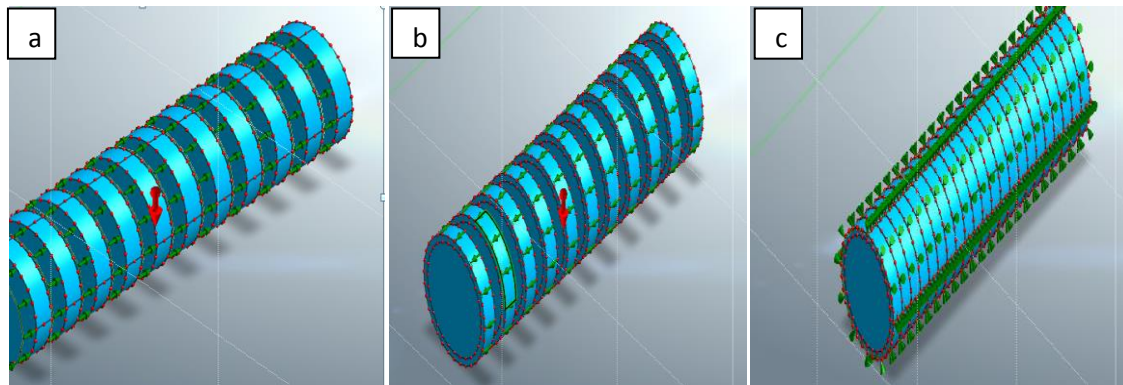


Fig.2. 8.Application des forces agissant sur le modèle,a)Pression de confinement b) Jack thrust.c) Pression extérieurs sur les voussoirs et pression extérieure sur le tunnelier

6.5.Définition des phases de creusement :

Les phases d'excavation dans notre cas pour un modèle de 36 m de largeur constitué de 20 anneaux avec 1.8 m de longueur et 90 cm d'épaisseur sont montrées dans la figure suivante :

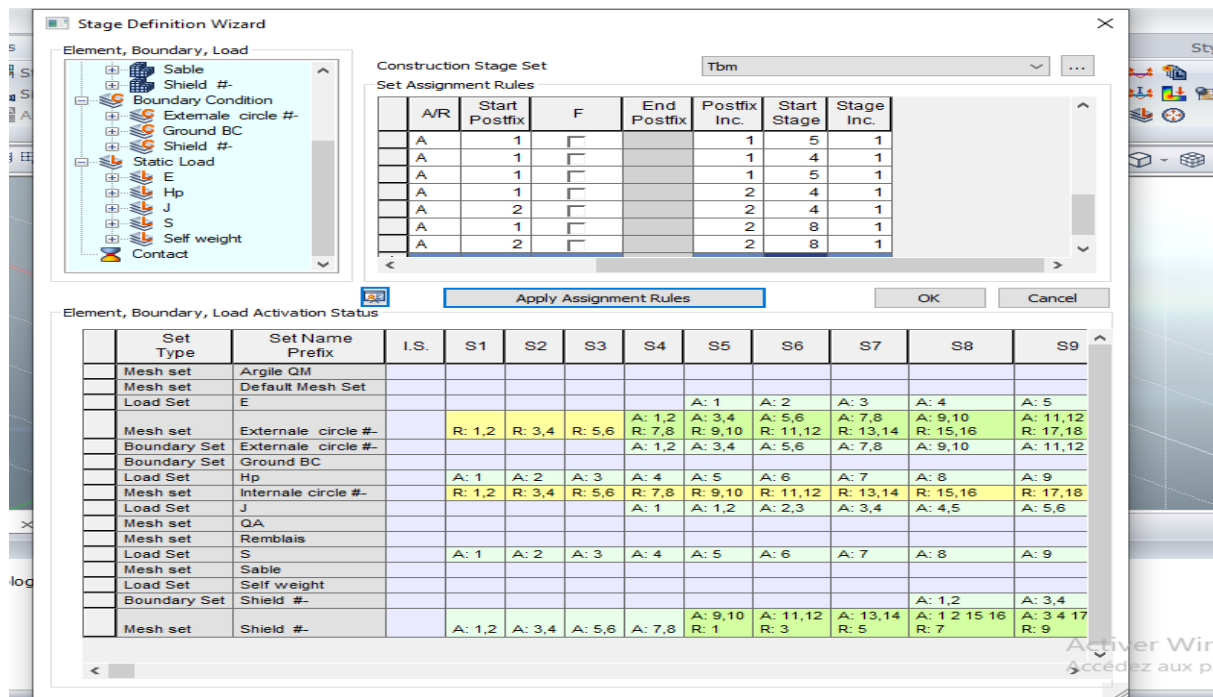


Fig.2. 9.Définir les phases d'excavation.

On peut faire le résumé suivant pour mieux comprendre les opérations concerné chaque phase :

Tab.2. 3.Définir les phases d'excavation.

Phase	Les opérations	Les forces
-------	----------------	------------

01	-Creusement du tunnel.	Hp,S
02	-Creusement du tunnel.	Hp,S
03	-Creusement du tunnel.	Hp,S
04	-Creusement du tunnel -Avancement du tunnelier.	Hp,J,S
05	-Creusement du tunnel. -Avancement du tunnelier. -Installation des anneaux (1 ,2)	HP,J,S,E
06	-Creusement du tunnel. -Avancement du tunnelier. -Installation des anneaux (3,4)	HP,J,S,E
07	-Creusement du tunnel. -Avancement du tunnelier. -Installation des anneaux (5,6)	HP,J,S,E
08	-Creusement du tunnel. -Avancement du tunnelier. -Installation des anneaux (7,8)	HP,J,S,E
09	-Creusement du tunnel. -Avancement du tunnelier. -Installation des anneaux (9,10) -Injection de mortier jusqu'à l'anneau 2.	HP,J,S,E
10	-Avancement du tunnelier. -Installation des anneaux (11,12) -Injection de mortier jusqu'à l'anneau 4.	J,S,E
11	-Avancement du tunnelier. -Installation des anneaux (13,14) -Injection de mortier jusqu'à l'anneau 6.	E,J
12	-Avancement du tunnelier. -Installation des anneaux (15,16) -Injection de mortier jusqu'à l'anneau 8.	E ,j
13	-Installation des anneaux (17,18) -Injection de mortier jusqu'à l'anneau 10.	E
14	-Installation des anneaux (19,20) -Injection de mortier jusqu'à l'anneau 12.	E
15	-Injection de mortier jusqu'à l'anneau 14.	-
16	-Injection de mortier jusqu'à l'anneau 16.	-
17	-Injection de mortier jusqu'à l'anneau 20.	-

Tel que :

HP : La force de confinement appliquée par la tête du tunnelier sur le sol

J : Juck thrust force qui est la force appliquée par les vérins de poussé sur les voussoirs pour assuré l'avancement du tunnelier.

S : La force appliquée par le sol sur les parois du tunnelier.

E : force appliquée par les voussoirs sur les anneaux .

7. Les résultats :

Notre objectif est d'analyser les déplacements au niveau du tunnel pour chaque phase d'excavation pour pouvoir faire une synthèse sur l'influence d'excavation par tunnelier sur le sol.

Avant d'analyser les résultats des phases d'excavation, le logiciel permet de vérifier si les dimensions sont suffisantes pour pouvoir éliminer l'influence sur les limites du modèle. Selon le travail que nous avons fait, on obtient comme résultats la figure suivante :

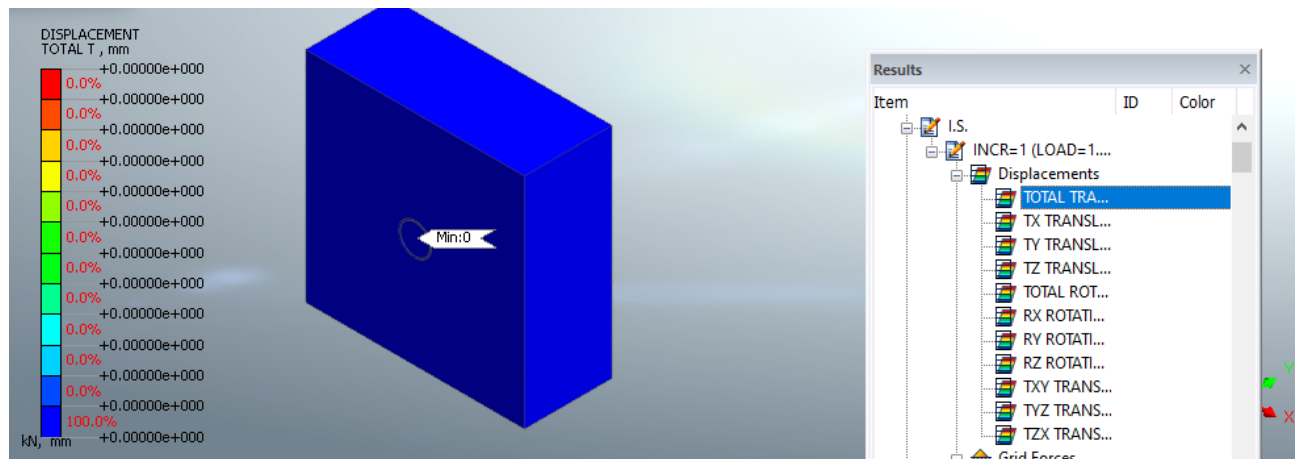


Fig.2. 10. Analyse de la validité des dimensions.

Pour les résultats suivants : la figure à gauche concerne les déplacements au niveau des voussoirs, la figure à droite concerne les déplacements au niveau du mortier

7.1.Phase01 :

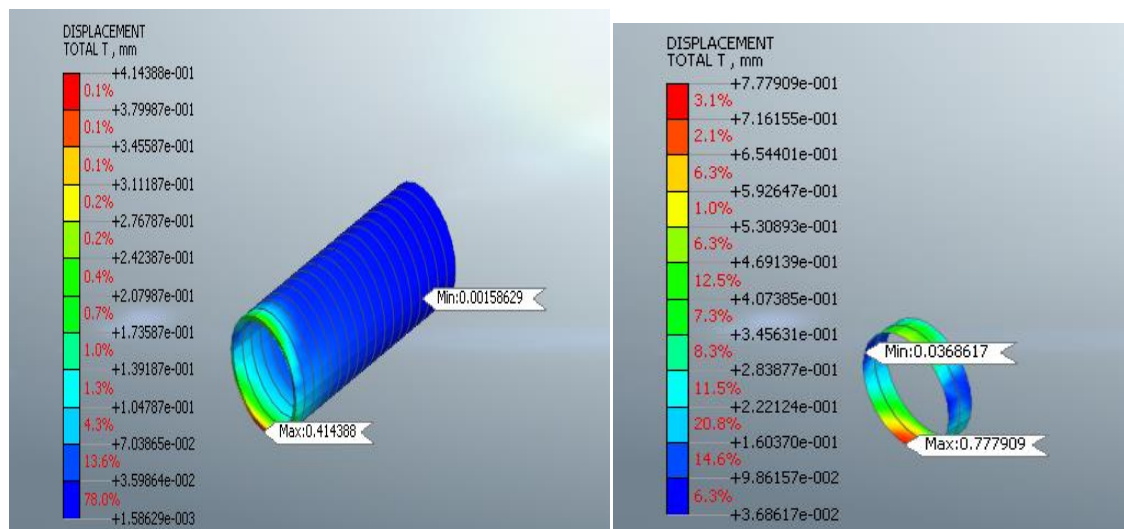


Fig.2. 11. Les déplacements pour la phase 01.

7.2.Phase 02 :

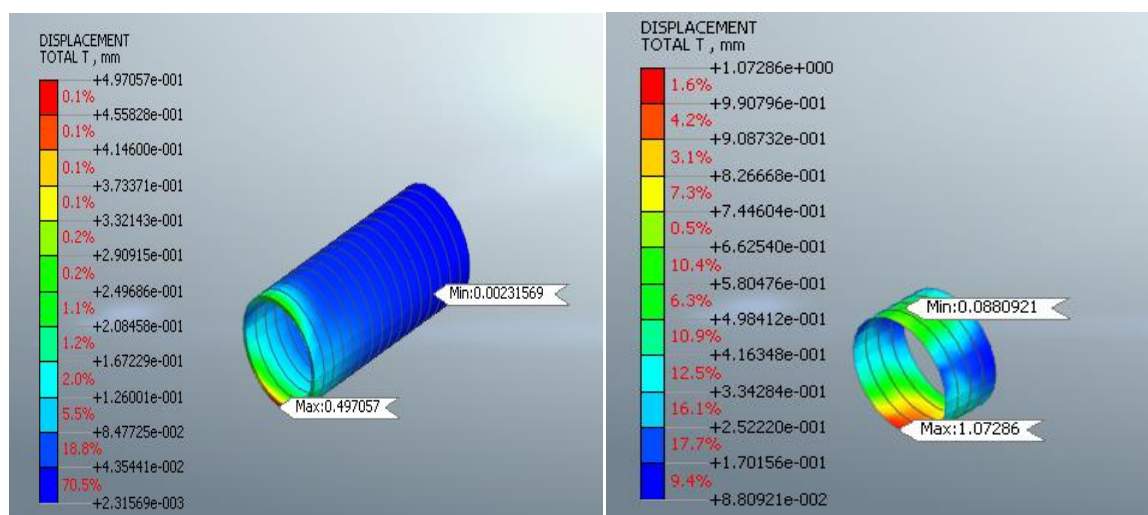


Fig.2. 12.Les déplacements pour la phase 02 .

7.3.Phase 03

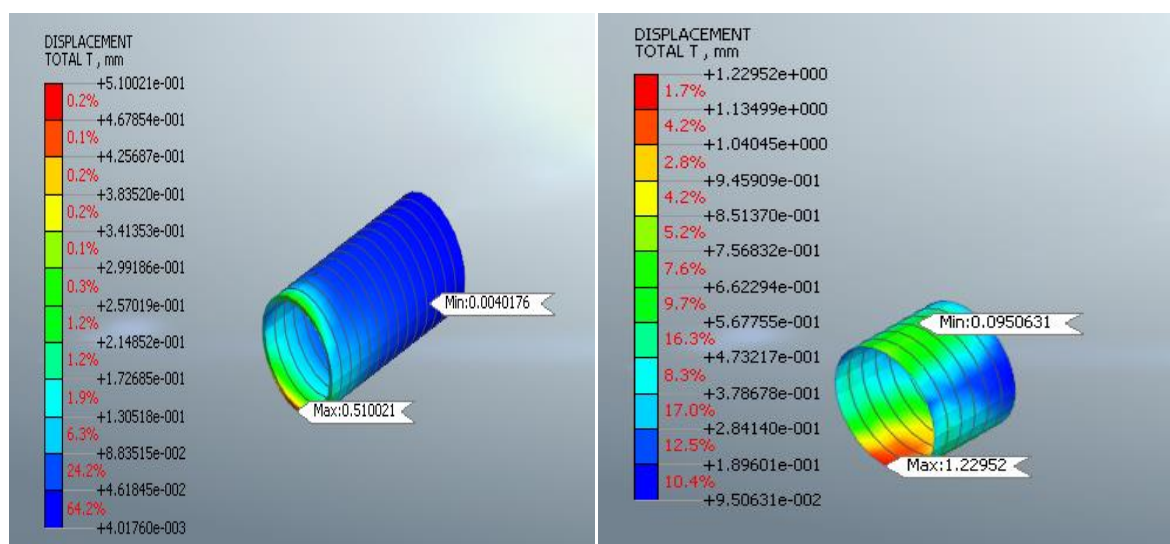


Fig.2. 13.Les déplacements pour la phase 03

7.4.Phase04

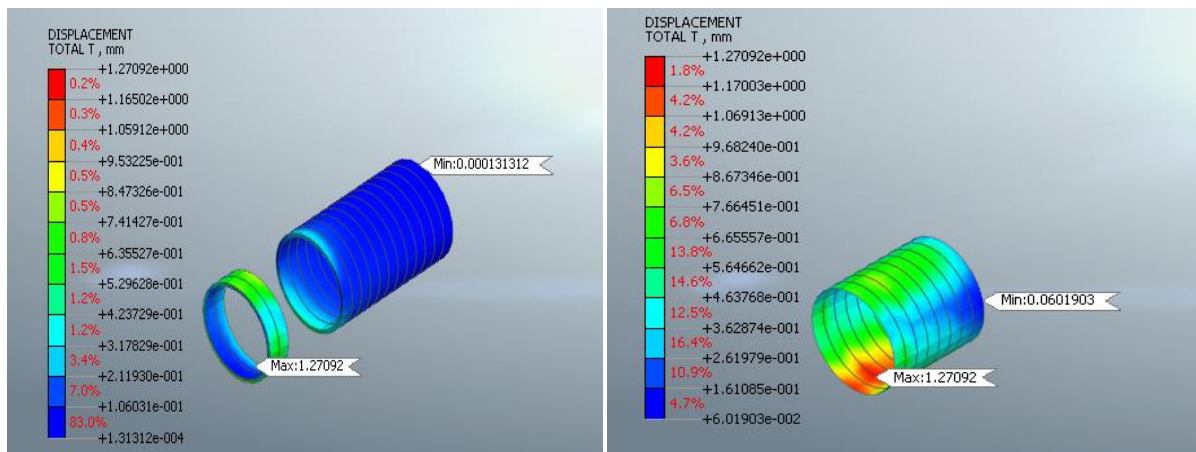


Fig.2. 14.Les déplacements pour la phase 04.

7.5.Phase05 :

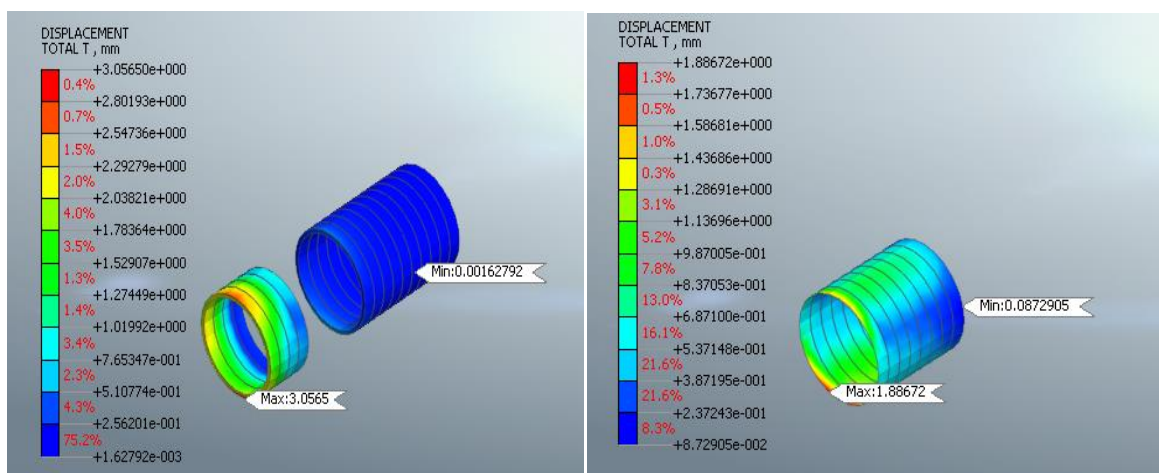


Fig.2. 15.Les déplacements pour la phase 05.

7.6.Phase 06 :

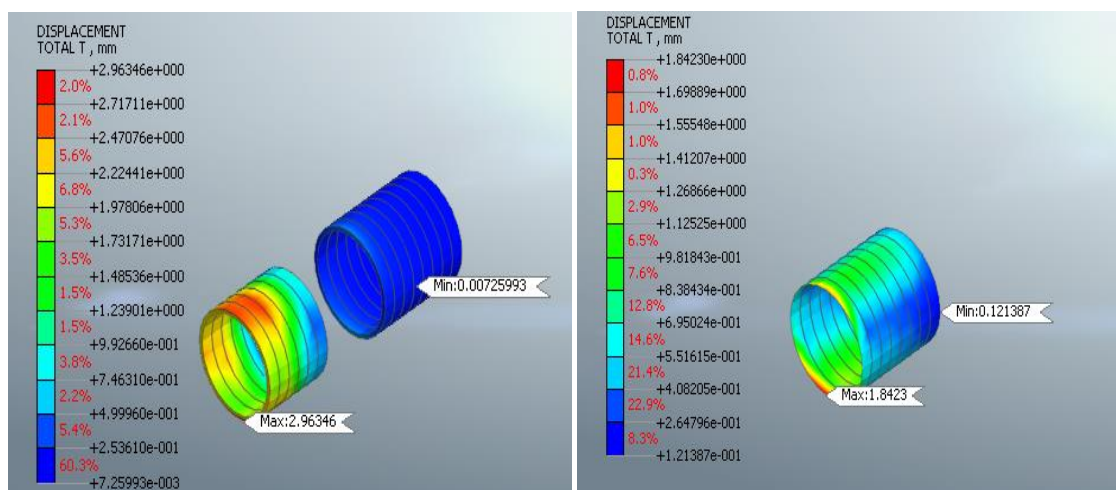


Fig.2. 16.Les déplacements pour la phase 06

7.7.Phase 07 :

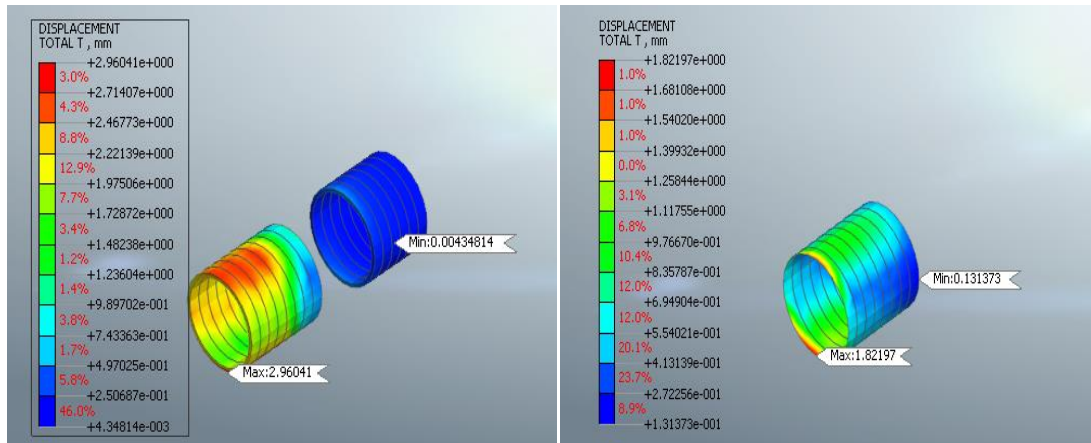


Fig.2. 17.les déplacements pour la phase 07.

7.8.Phase 08 :

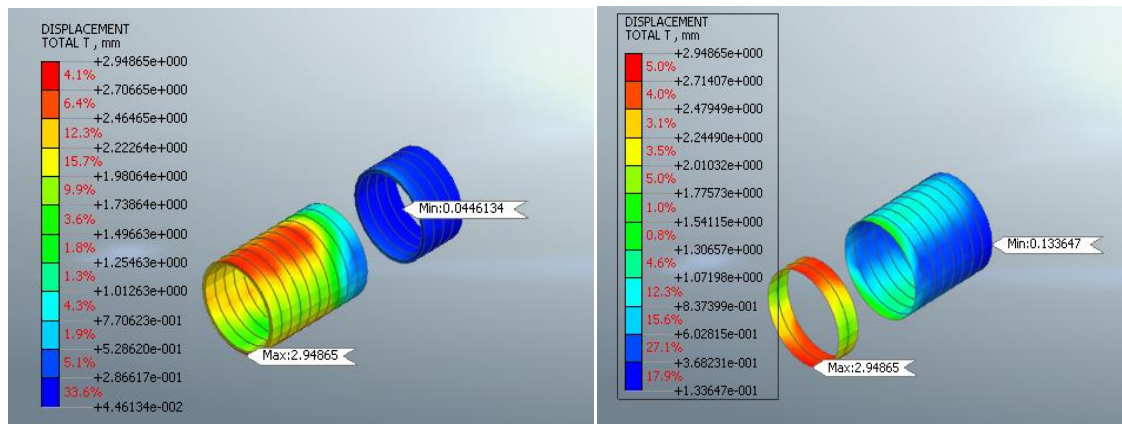


Fig.2. 18.les déplacements pour la phase 08.

7.9.Phase 09 :

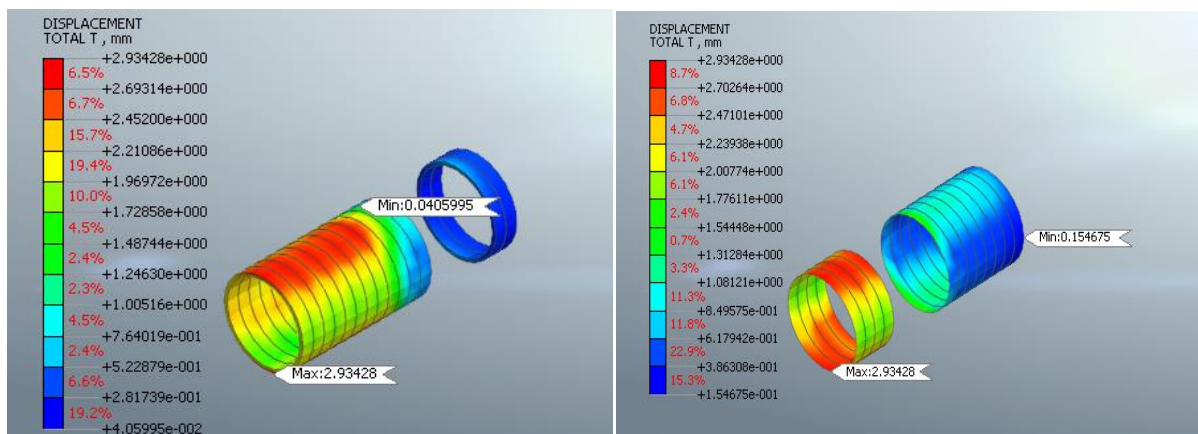


Fig.2. 19.les déplacements pour la phase 09.

7.10. Phase 10 :

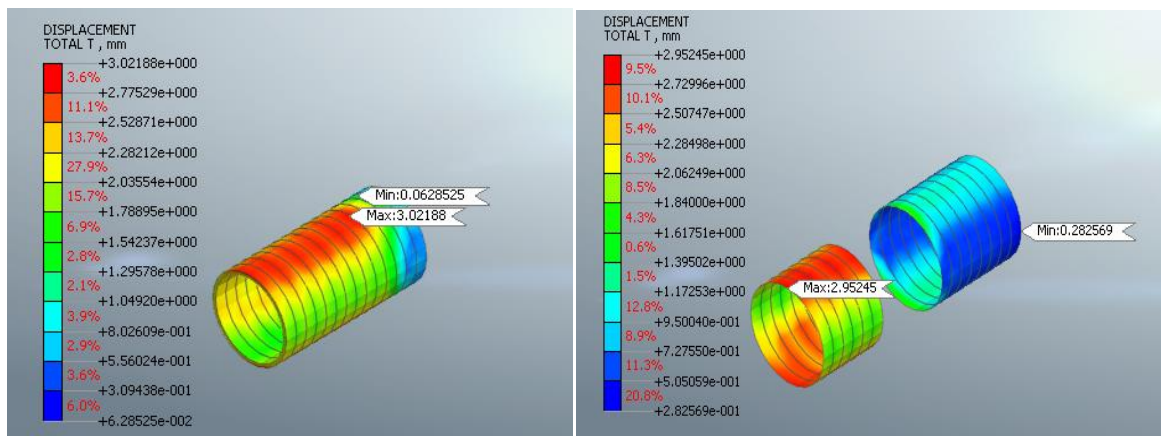


Fig.2. 20.les déplacements pour la phase 10.

7.11. Phase 11 :

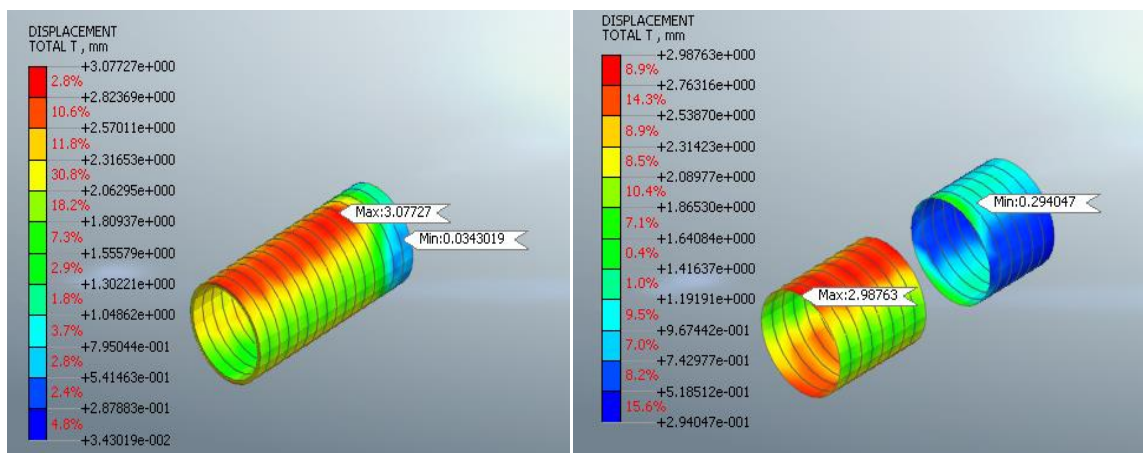


Fig.2. 21.les déplacements pour la phase 11.

7.12. Phase 12 :

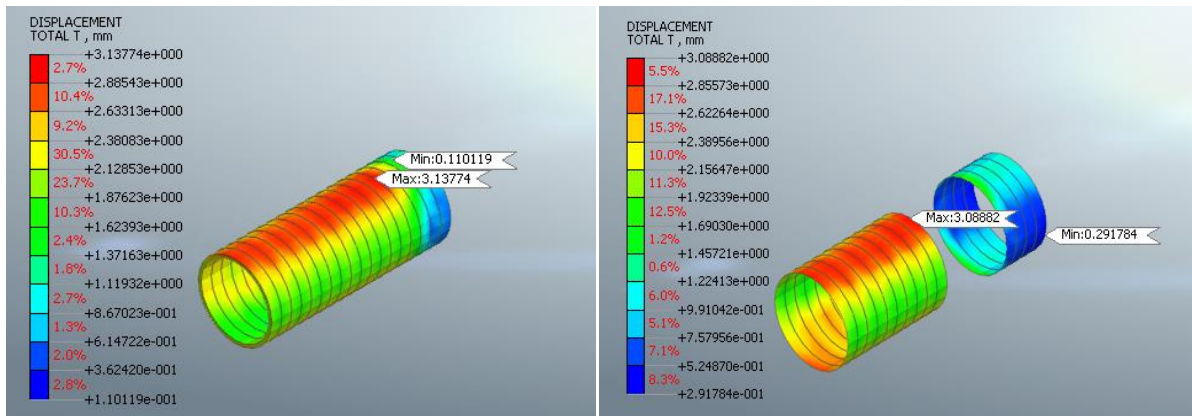


Fig.2. 22.es déplacements pour la phase 12.

7.13. Phase 13 :

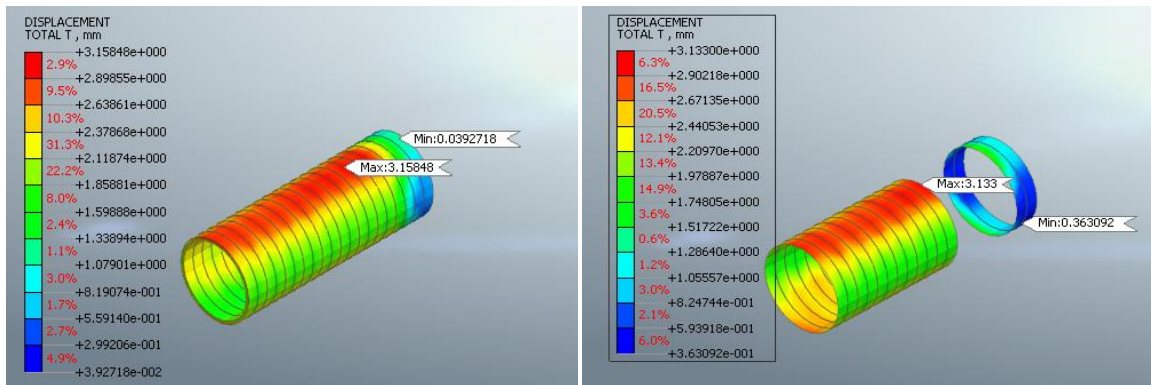


Fig.2. 23.les déplacements pour la phase 13.

7.14. Phase 14

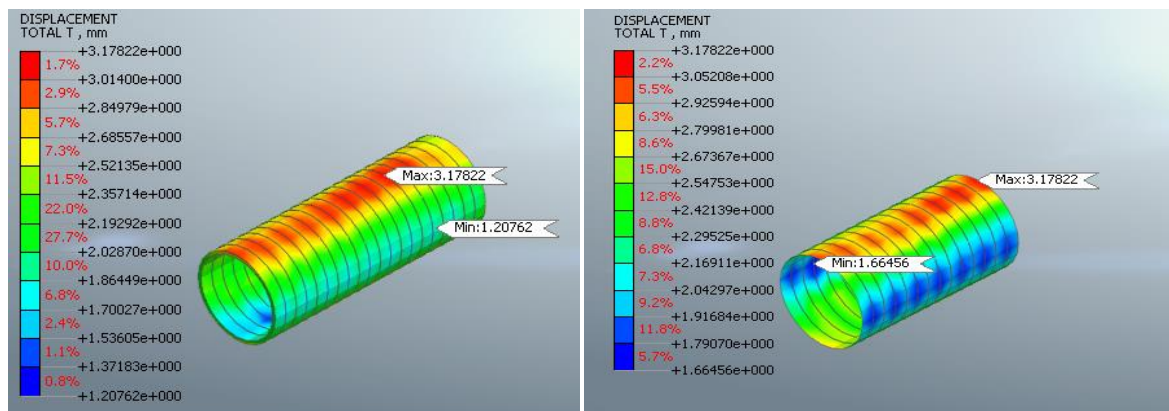


Fig.2. 24.les déplacements pour la phase 14.

7.15. Phase 15 :

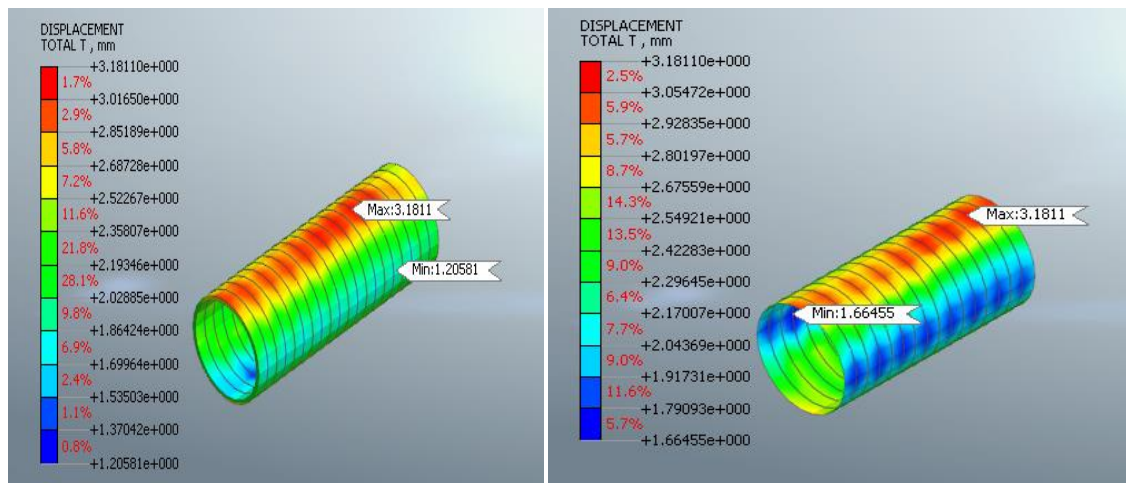


Fig.2. 25.les déplacements pour la phase 15.

7.16. Phase 16 :

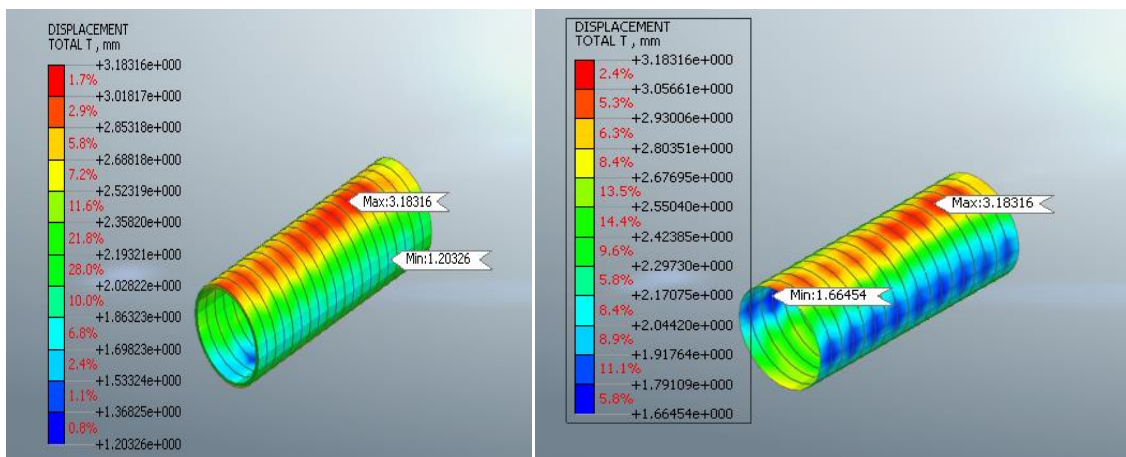
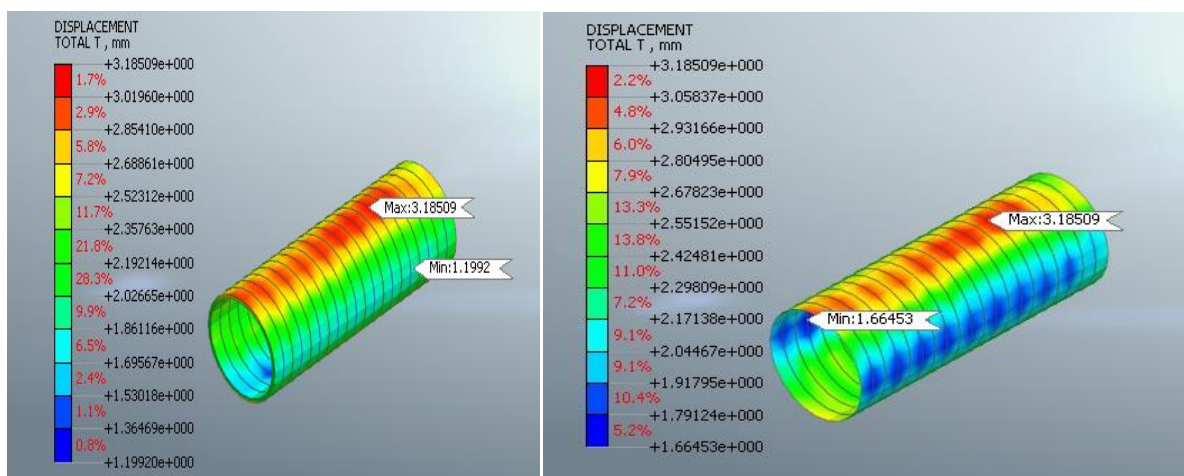


Fig.2. 26.les déplacements pour la phase 16.

7.17. Phase 17 :



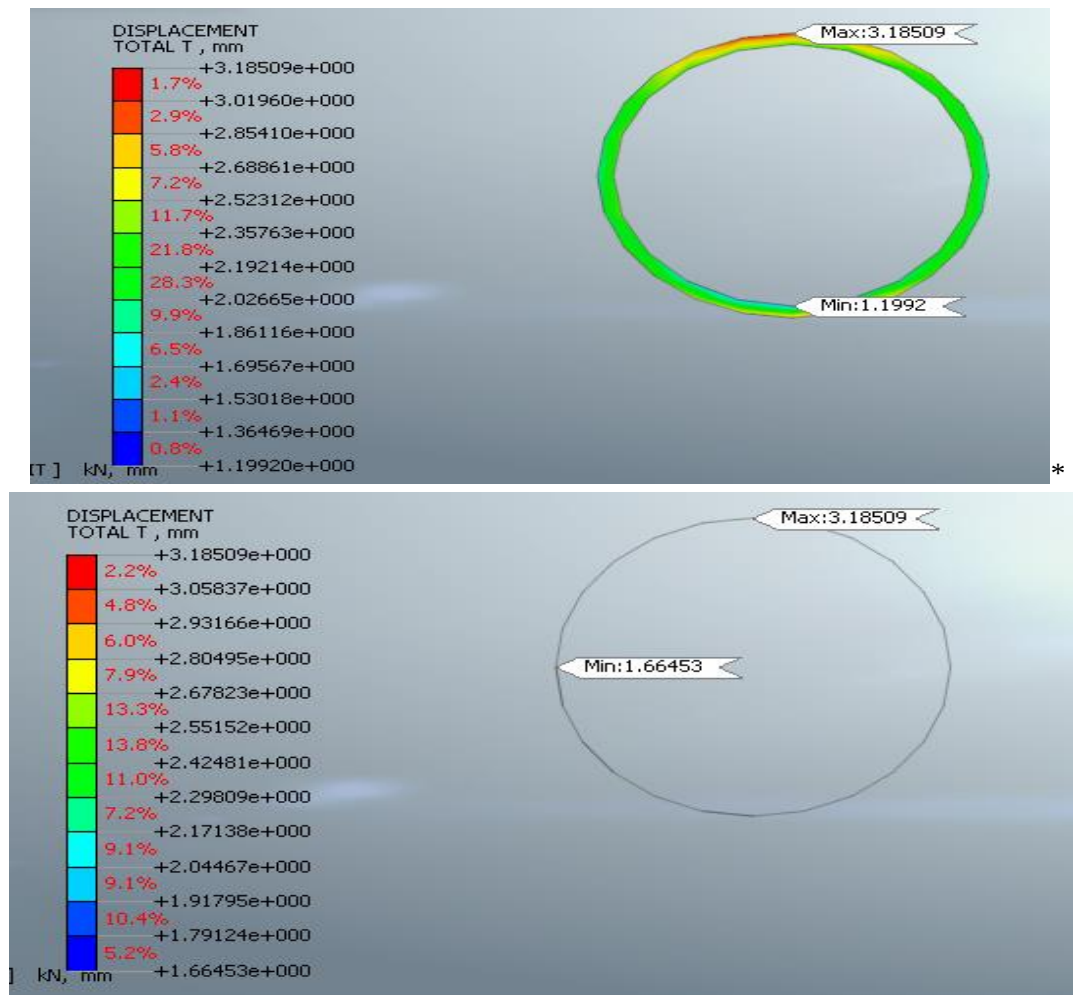


Fig.2. 27.les déplacements pour la phase 17.

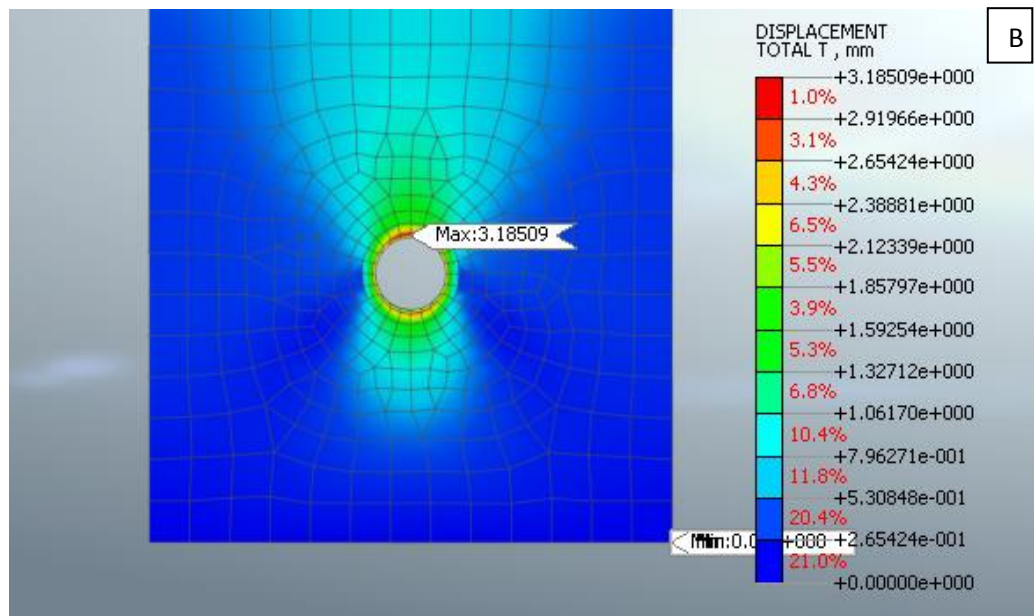
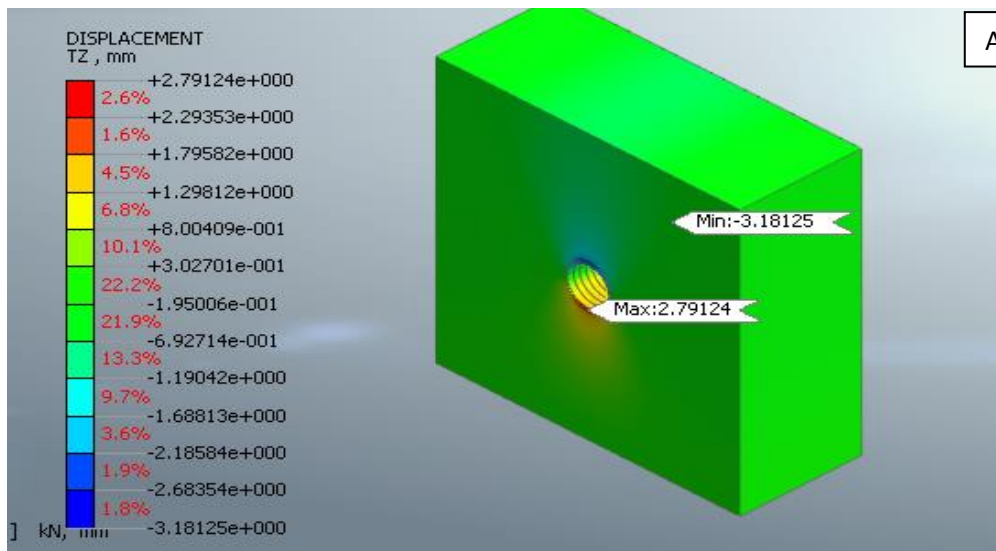


Fig.2. 28. Les mouvements à la fin de creusement de la section .A) Les tassement au niveau du tunnel. B) Les convergences au niveau du tunnel.

Les résultats de déplacements maximum suivant les trois directions à la fin de creusement de la section, la mise des voussoirs et l'injection de mortier seront représentés dans les graphes suivants :

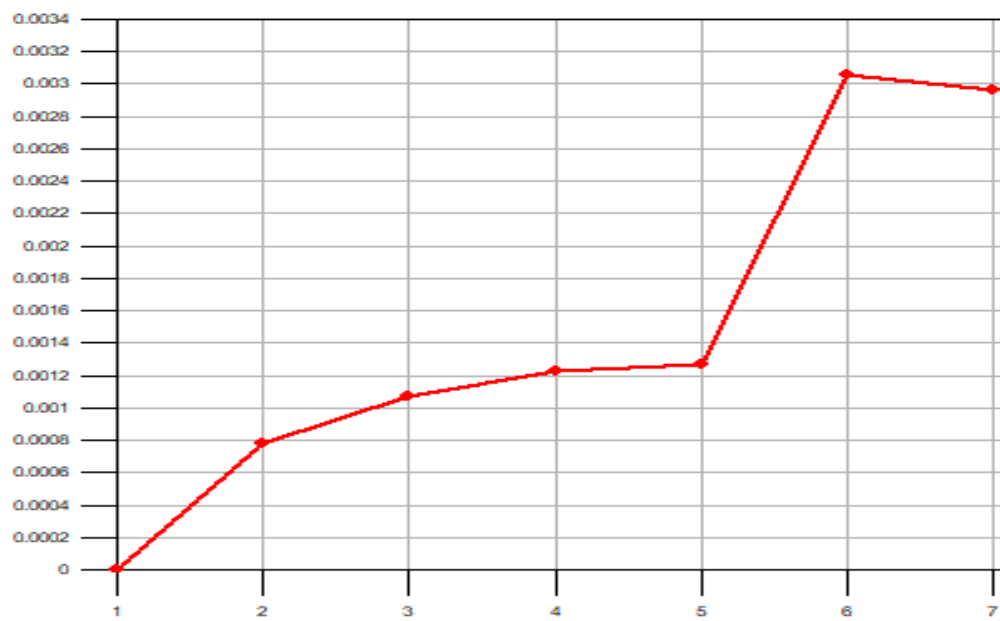
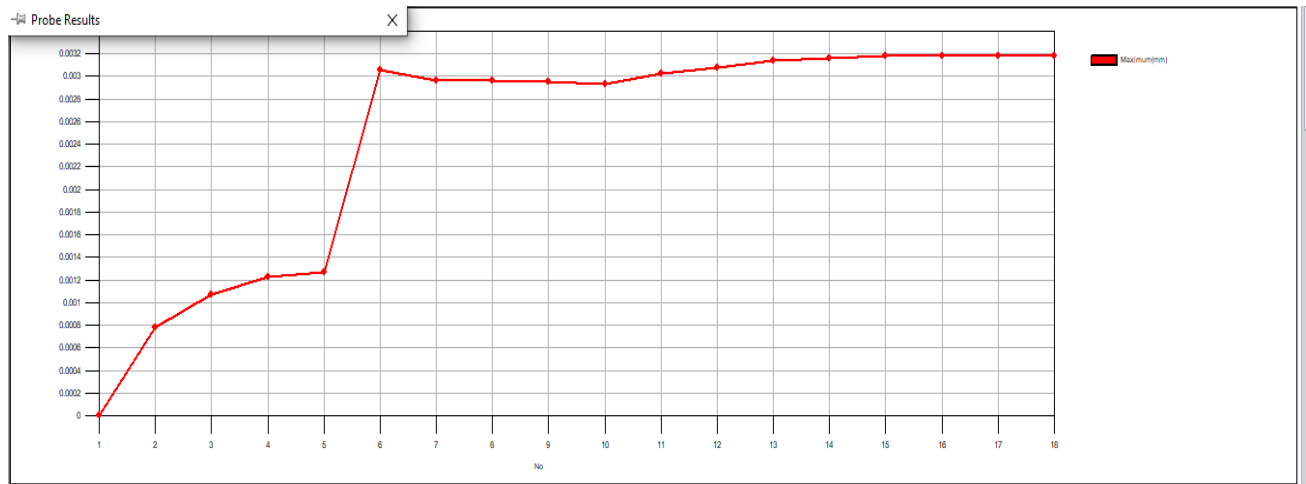


Fig.2. 29.Le graphe des déplacements maximaux au niveau des voussoirs pour cette section.

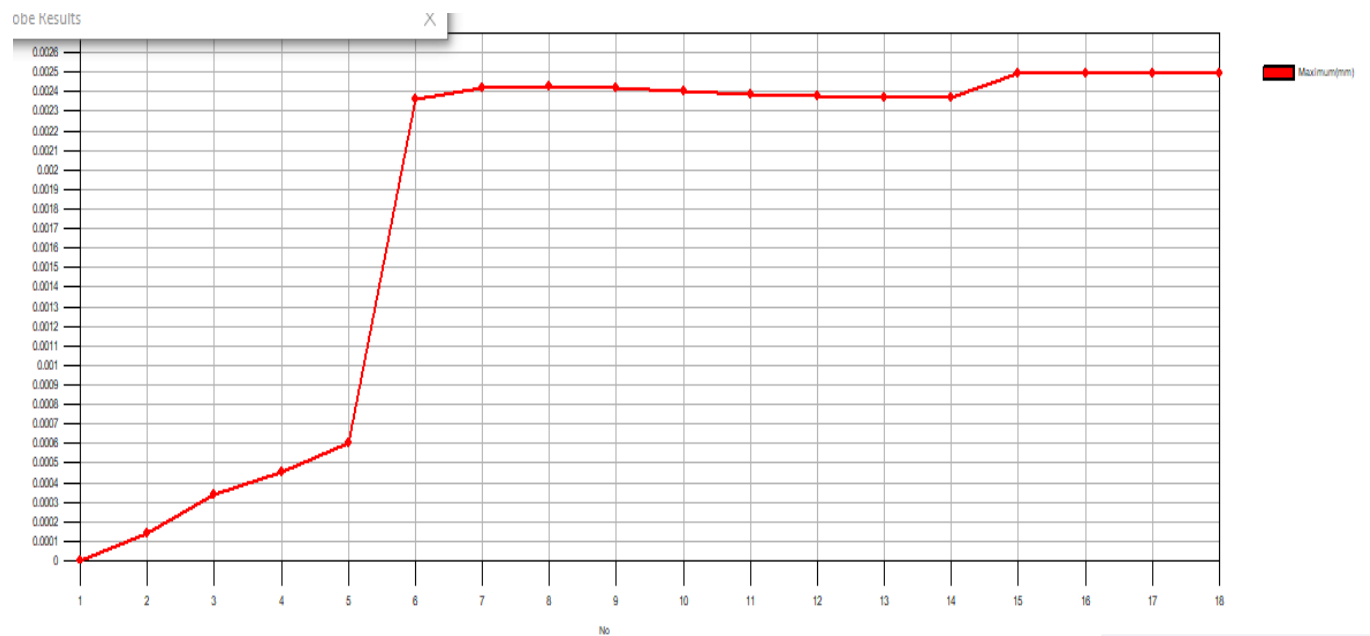


Fig.2. 30.Les déplacements dans la direction transversale.

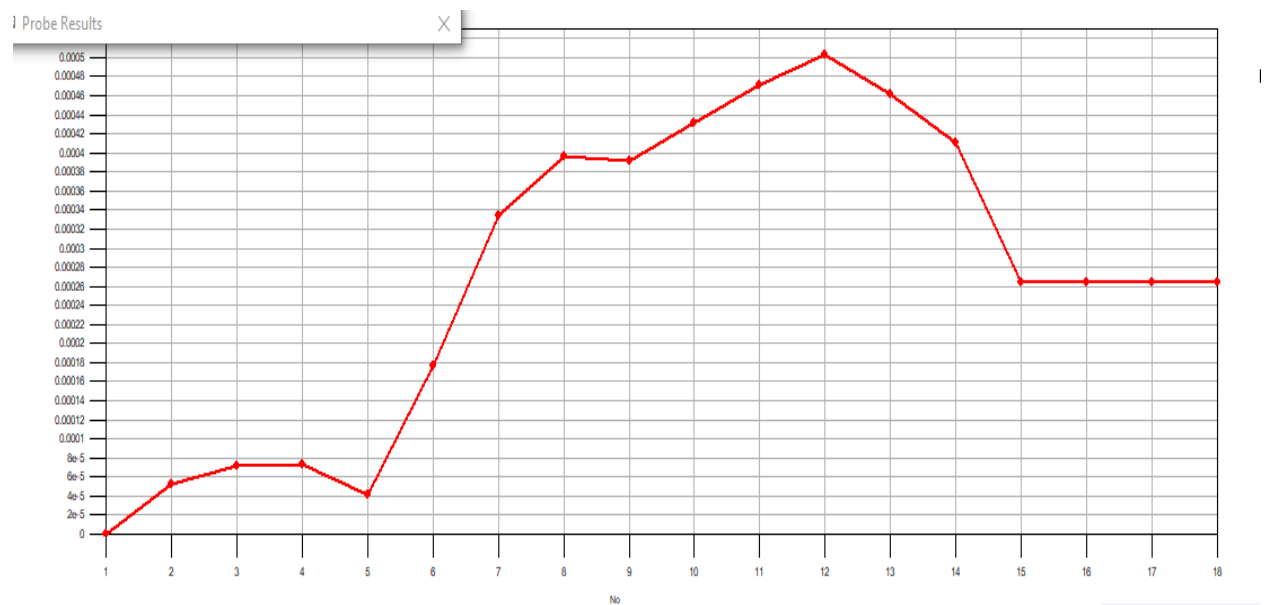


Fig.2. 31.Les déplacements dans la direction longitudinale.

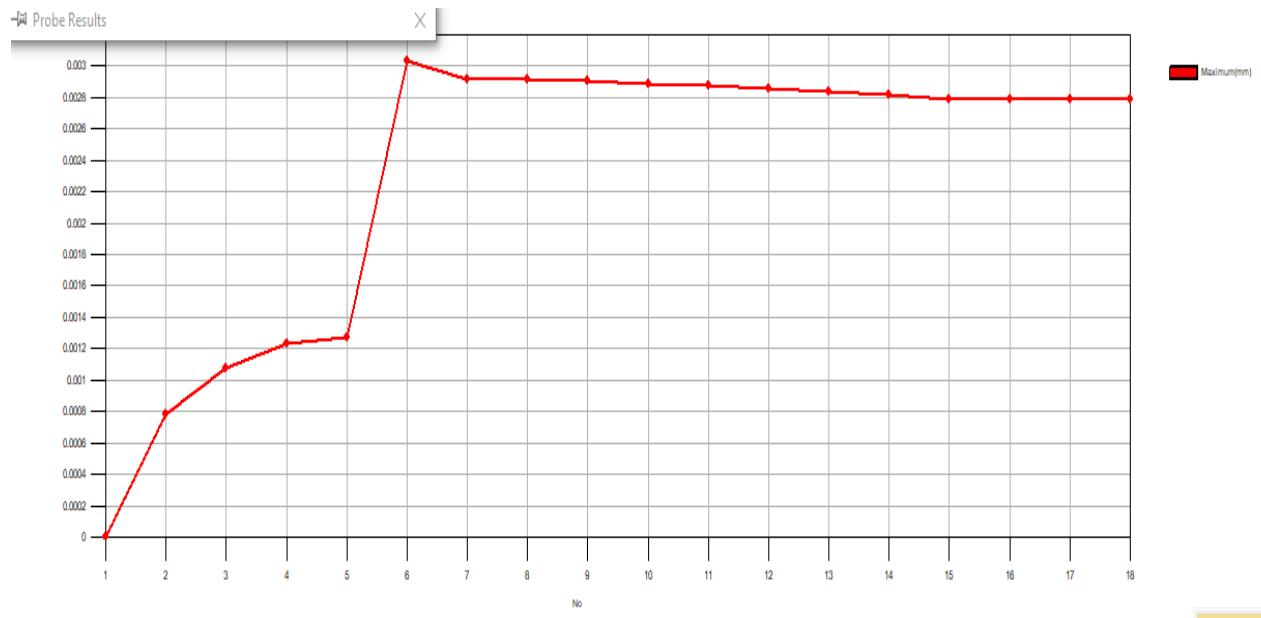


Fig.2. 32. Les valeurs des tassements maximaux pour chaque phase d'excavation.

8. Comparaison avec les résultats de l'entreprise :

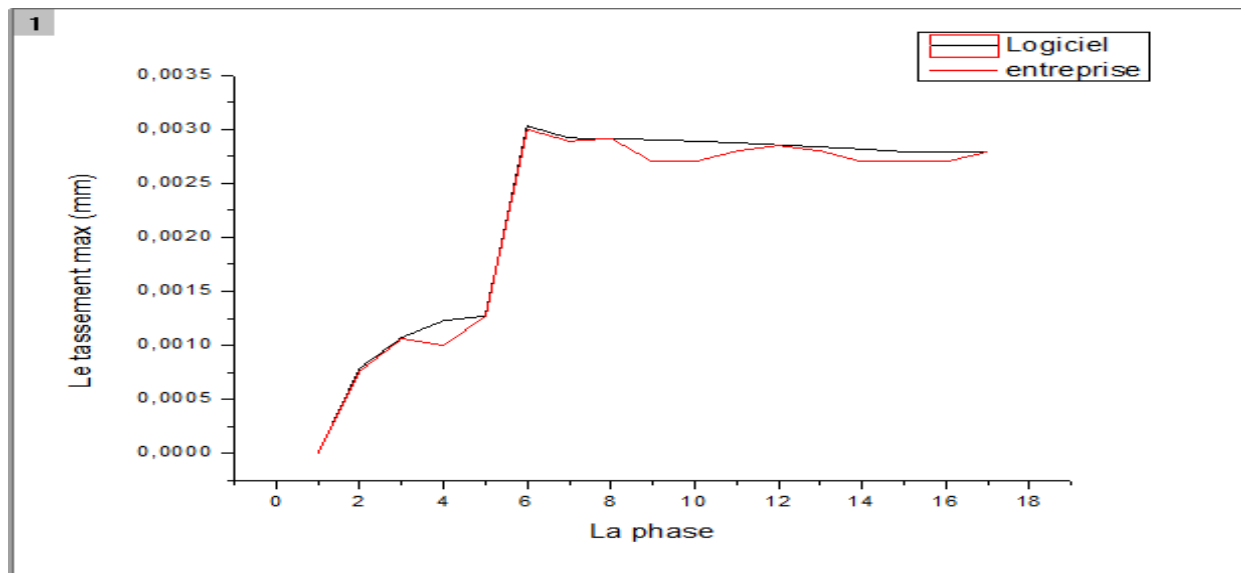


Fig.2. 33.Une comparaison entre les résultats du tassement au niveau du tunnel entre le logiciel et les mesures in-situ.

9. Discussion des résultats :

L'objectif de notre étude est d'étudier les mouvements dus à l'excavation en analysant les déplacements au niveau du tunnel lors de la réalisation d'une section de 36 m de longueur incluant la pose de 20 anneaux, devisée en 17 phases d'excavation. Chaque phase inclue un ou plusieurs opérations au moment des calculs :

- Phase de creusement : Cette phase, se caractérise par l'application d'une force de confinement et une force due à la rotation de la tête de coupe .
- Phase de l'installation des voussoirs : Dans cette étape, il y'a deux choses à prendre en considération: la force de fixation des voussoirs et la convergence de sol vers le vide créé entre le revêtement et le sol.
- Phase de l'injection de mortier : La pression d'injection de mortier pour le remplissage du vide annulaire a une grande influence sur les déplacements de sol.
- Phase de l'avancement du tunnelier : Elle se caractérise par la pression des vérins sur les voussoirs et le phénomène de frottement entre le tunnelier et le sol.

- Pour la première étape, on obtient une valeur de ($u=0\text{mm}$) suivant toutes les directions donc les dimensions du modèle sont suffisantes pour tenir en compte d'un éventuel mécanisme de rupture et permettent d'éviter l'influence des limites de modèle.

- On remarque que les déplacements augmentent avec l'avancement du tunnelier, cela revient à la perturbation de l'état des contraintes autour du tunnel et l'application des forces de pression au niveau du front et au niveau des parois latérales. Et aussi la convergence de sol vers le vide entre le tunnel et le sol avant l'injection de mortier qui influe aussi sur les déplacements de sol.
- On peut ajouter que les déplacements dans la direction transversale (figure 3.30) seront négligeables à partir de la phase numéro 14, même chose pour la section longitudinale à partir de la phase 15 qui correspond à l'installation des voussoirs et l'injection de mortier qui assure un soutènement définitif du tunnel.
- On compare les résultats de calcul avec les mesures in-situ disponibles (Tassement au niveau du tunnel) montrés sur la figure (3.33) qui correspond au tassement au niveau de clés du tunnel, on remarque que les valeurs sont très proches. Ce qui donne une confirmation sur la validité de notre approche.

10. Conclusion

La modélisation est une étape très nécessaire pour analyser tous les facteurs lors de la réalisation d'un ouvrage souterrain. Désormais, les calculs en trois dimensions comprenant plusieurs centaines des milliers de nœuds sont devenus courants. Ils permettent d'avoir accès au champ de déplacements, de déformations, de contraintes, à la fois dans le terrain et dans différents éléments structurels.

Conclusion générale et perspectives :

Ce travail qu'on a élaboré a été axé sur l'analyse numérique des déplacements au niveau du tunnel d'un tronçon de la ligne B1 de métro d'Alger. En effet, ces travaux m'ont permis de prendre conscience de la variabilité des sols dans les calculs des ouvrages, de travailler. Le code de calcul GTS NX nous a permis aussi de simuler le creusement par tunnelier en prenant en considération les différentes phases de creusement qui sont spécifiques au creusement par tunnelier telles l'injection du mortier, préssirisation, soutènement par voussoirs ..., chose que beaucoup de logiciels de savent pas faire.

Dans le cadre de ce modeste travail deux parties on été traitées :

- Une partie bibliographique qui nous a permis de connaître :
- La méthode de creusement par tunnelier.
- Les types des tunneliers.
- La modélisation de creusement des tunnels par TBM.

Une deuxième partie a été consacrée à la modélisation du creusement par tunnelier. En utilisant le code de calcul GTS NX, on a réalisé un modèle pour étudier le comportement de sol autour du tunnel lors de l'avancement du tunnelier.

Dans cette étude on a présenté une démarche de simulation tridimensionnelle de creusement de tunnel par tunnelier à pression de terre. La modélisation est appliquée sur un cas réel (Tronçon N° 05 du métro d'Alger). La confrontation des résultats de simulation (évaluation des tassements et des déplacements au niveau du tunnel) avec les mesures réelles ont montré que la démarche de modélisation adoptée est pertinente.

Comme perspective à ce travail, on cite :

- Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude doivent être étendus à l'analyse de l'interaction avec d'éventuelles constructions subjacentes (superstructures, fondations profondes ou superficielles, réseaux enterrés...) ceci semble être une perspective intéressante.
- Exploiter les résultats de cette modélisation pour autre objectifs tel que :
L'optimisation des paramètres de revêtement, analyse des forces et des contraintes

autour du tunnel, prédire les déplacements et les tassements à l'avancement des tunneliers dans des formations similaires ...

- Faire une étude paramétrique pour connaître l'influence de certains facteurs tels que la profondeur, la vitesse de tunnelier, la pression d'injection du mortier pour une utilisation rationnelle du tunnelier.

Liste des références bibliographiques

- [1] **ATAHAN C. (1995)**. Modélisation numérique du creusement d'un tunnel à l'aide d'un bouclier à pression de boue. Thèse de doctorat : Ecole Nationale des ponts et chaussées
- [2] **AFTES**. GT4. Recommandations relatives au choix des techniques d'excavation mécanisée. Tunnel et ouvrages souterrains, n° 157, 2000, p. 7-31.
- [3] **Milligan G.,(2000)**., Lubrication and soil conditioning in tunneling, pipe jacking and microtunneling. A state of the art review. Technical report .Geotechnical-consulting group.p 46
- [04] **Boubou, R. (2010)**. Prise en compte du mode de pressurisation du front et de la géologie dans l'étude de l'impact du creusement de tunnels. Thèse de doctorat : INSA de Lyon. France
- [051] Abdel-Meguid M., Rowe R.K., Lo K.Y. (2002)**, 3D Effects of Surface Construction over Existing Subway Tunnels, The International Journal of Geomechanics , Vol. 2 Number 4, pp. 447-469
- [05] Demagh, R., Emeriault F. et Kastner R. (2008)**. Modélisation 3D du creusement de tunnel par tunnelier à front pressurisé dans les sols surconsolidés. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur (JNGG'08) Nantes, 18-20 juin 2008, 305-312.
- [06] Abu-Krishna A. (2006)**. Analysis of TBM tunnelling using the Convergence-Confinement method. International Symposium on: Utilization of underground space in urban areas. 6-7 November 2006, Sharm El-Sheikh, Egypt.& Francis Group, London, ISBN 978-0-415-40807-3
- [07] Abu-Krishna A. (2007)**. Numerical modeling of face stability for TBM tunneling. Underground Space – the 4th Dimension of Metropolises – Barták, Hrdina, Romancov & Zlámál (eds) 2007 Taylor

[08] Broere. W, Brinkgreve R.B.J. (2002). Phased simulation of a tunnel boring process in soft soil. Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Mestat (ed.) 2002, Presses de l'ENPC/ LCPC, Paris, pp. 529-536.

[09] El Houari N., Allal M. A., Abou-Bekr N. (2012). Modélisation Numérique de la Réponse Mécanique Autour des Tunnels by Nesrine El Houari . Paperback, 188 Pages, Published 2012. ISBN-13: 978-3-8381-8498-2, ISBN: 3-8381-8498-X.
http://www.isbns.net/author/Nesrine_El_Houari.

[10] Kaçar O. (2007). 3d finite element modelling of surface excavation and loading over existing tunnels. Thesis (PhD). Middle east technical university. Graduate school of natural and applied sciences.

[11] Kasper T., Meschke G. (2004). A 3D finite element simulation model for TBM tunneling in soft ground. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol. 28, pp. 1441-1460.

[12] Kasper T., Meschke G. (2006a). On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunnelling. Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 21, pp.160-171. 92. Kasper T., Meschke G. (2006b). A numerical study of the effect of soil and grout material properties and cover depth in shield tunnelling. Computers and Geotechnics, vol.33, pp.234-247.

[13] METRO D'ALGER Cahier d'éléments géotechniques et géologiques. Documents N=° L1BGCGA1NT2.

[14] METRO D'ALGER cahier de l'étude géotechnique de tunnel. Documents N=°L1B1-GCGCOSM28- 3000 -A10 -40 -002- A

[15]Moller S.C., Vermeer P.A. (2008). On numerical simulation of tunnel installation. Tunneling and Underground Space Technology, vol. 23, pp. 461-475.

Annexe

Présentation de logiciel MIDAS GTS-NX

01. Introduction :

Pour le creusement des tunnels, la simulation numérique en configuration tridimensionnelle est une étape indispensable pour le dimensionnement des tunnels et nécessitant un outil numérique bien adapté. Ceci dit à l'état actuel, les améliorations des performances informatiques permettent d'accéder à une plus grande mémoire vive et à une puissance de calcul importante, ce qui permet (dans une certaine mesure) de réaliser un modèle numérique de grande dimension. Dans ce chapitre, les principes du code de calcul utilisé (MIDAS GTS-NX) pour les simulations tridimensionnelles seront exposés.

02. Description générale :

GTS NX (Geo-Technical Analysis System New Experience) est un logiciel d'analyse géotechnique de nouvelle génération qui présente les derniers développements en matière d'infographie et de technologie d'analyse de pointe. GTS NX supporte entièrement la dernière interface utilisateur graphique 64-bit OS. L'interface intuitive permettra aux nouveaux utilisateurs d'intégrer facilement le logiciel dans leur processus de travail. La vitesse d'analyse rapide, les graphiques exceptionnels et les capacités de sortie fourniront aux utilisateurs un nouveau niveau avancé de conception géotechnique.

GTS NX est un progiciel complet d'analyse par éléments finis qui est équipé pour traiter toute la gamme des applications de conception géotechnique, y compris les fondations profondes, les excavations, les systèmes de tunnels complexes, l'analyse des infiltrations, l'analyse de consolidation, la conception des remblais, l'analyse dynamique et l'analyse de stabilité des pentes. GTS NX dispose également d'une plate-forme de modélisation conviviale qui permet des niveaux inégalés de précision et d'efficacité.

03. Solveur intégré optimisé pour les plates formes 64 bits :

La restriction sur la taille du fichier traité a été supprimée et, par conséquent, la gestion d'un grand modèle n'est plus un problème dans la pratique. En raison de la moindre utilisation de la mémoire et de l'amélioration des performances de sélection / addition / suppression, même une modélisation 3D peut être traitée rapidement et facilement. Le système d'exploitation PC de transfert de masse 64bits, qui fournit un environnement multi-tâches, a connu un développement rapide. Pour suivre le rythme des changements rapides, un nouveau cadre qui

supporte parfaitement le système 64bits a été développé, offrant un nouveau moteur graphique optimisé même pour les grands modèles.

04. La modélisation complexe et la modélisation simple par GTS NX :

Les sites de projets qui contiennent des courbes topographiques complexes peuvent prendre des heures à être modéliser avec des commandes basiques basées sur la CAO. Cela entrainera donc un souci de gain de temps et de facilitation de la modélisation et une diminution de la précision de l'analyse finale. Alors que GTS NX dispose d'un programme de géométrie de terrain (TGM) haut de gamme qui convertit automatiquement les cartes topographiques en surfaces modifiables, il est également équipé d'un assistant lecture qui permet de modéliser facilement les couches de sol inégales. Vous pouvez utiliser directement votre profil de sol en entrant les données du journal des sondages pour plusieurs coordonnées. Le programme vas ensuite extrapoler automatiquement les changements dans les niveaux de sol entre chaque point.



Fig. 1. la rapidité de l'analyse avec GTS NX .

- Modélisation de monde réel :

Le logiciel Midas GTS- NX permet la modélisation de quasiment tous les problèmes géotechnique avec une très grande fidélité au monde réel d'un point vue aussi bien physique que géométrique.

05. Génération de rapports d'analyses complets :

Les rapports d'analyse des éléments finis peuvent prendre autant de temps que les modèles d'éléments finis eux- mêmes. Ceci est dû à la large gamme de résultats générés à partir de l'analyse des éléments finis qui se composent d'un large éventail de modèles de contour, de feuilles de calcul et de graphiques. GTS NX dispose d'une nouvelle fonction novatrice qui

permet de générer des rapports en format PDF directement à partir du menu des résultats de traitement post- programme. Cette fonctionnalité élimine la nécessité d'utiliser abondamment l'écran d'impression ou de copier et coller des fonctions pour générer des rapports sur des documents Word. Les fonctions d'extraction des résultats permettent de sélectionner en toute transparence le modèle de contour 3D d'intérêt, de modifier la taille et l'angle d'affichage, et d'ajouter des notes, des dimensions et des graphiques et des feuilles de calcul correspondants au besoin.

06. Les caractéristiques de logiciel :

Le GTS NX peut simuler des conditions in-situ en tenant compte de la non-linéarité des matériaux et des contraintes initiales du sol. Le logiciel prend en charge tous les types d'analyse, y compris les analyses statiques, dynamiques, d'infiltration, d'infiltration sous contraintes couplée, de consolidation, l'étape de construction et de stabilité des pentes .

En analyse dynamique, l'analyse non linéaire de l'historique temporel prenant en compte le niveau de l'eau et le poids propre est soutenue. Tout comportement du sol qui est lié à l'écoulement des eaux souterraines (infiltration /stress /consolidation) peut être simulé grâce à une analyse de contraintes et d'infiltration entièrement couplée. Grâce à ce couplage, le GTS NX fournit des résultats très fiables pour l'analyse et la conception géotechniques complexes.

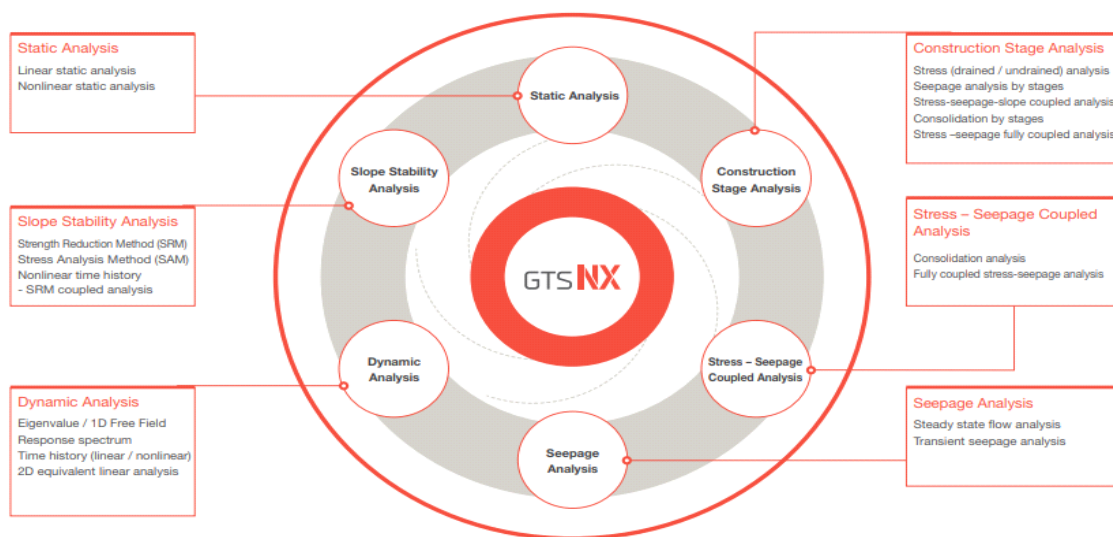


Fig. 2. Les caractéristiques de GTS NX.

07. Interface conviviale :

GTS NX fournit une interface utilisateur graphique conviviale grâce à un moteur graphique de pointe.

- Multi-fenêtres :

L'interface graphique multi-fenêtres permet de développer plusieurs fichiers modèles simultanément au même temps il y'a une possibilité de consulter et modifier le même modèle pendant l'analyse .Il est également possible de visualiser et de comparer simultanément plusieurs résultats d'analyse.

- Menu en ruban pour une organisation pratique des outils :

Le menu a été conçu pour s'adapter au flux de travail de modélisation .Les fonctions et commandes similaires sont regroupées intuitivement pour une reconnaissance plus facile .La description des commandes, les conseils et les diagrammes guident l'utilisateur explicitement dans le processus de travail dans les fenêtres de saisie correspondantes.

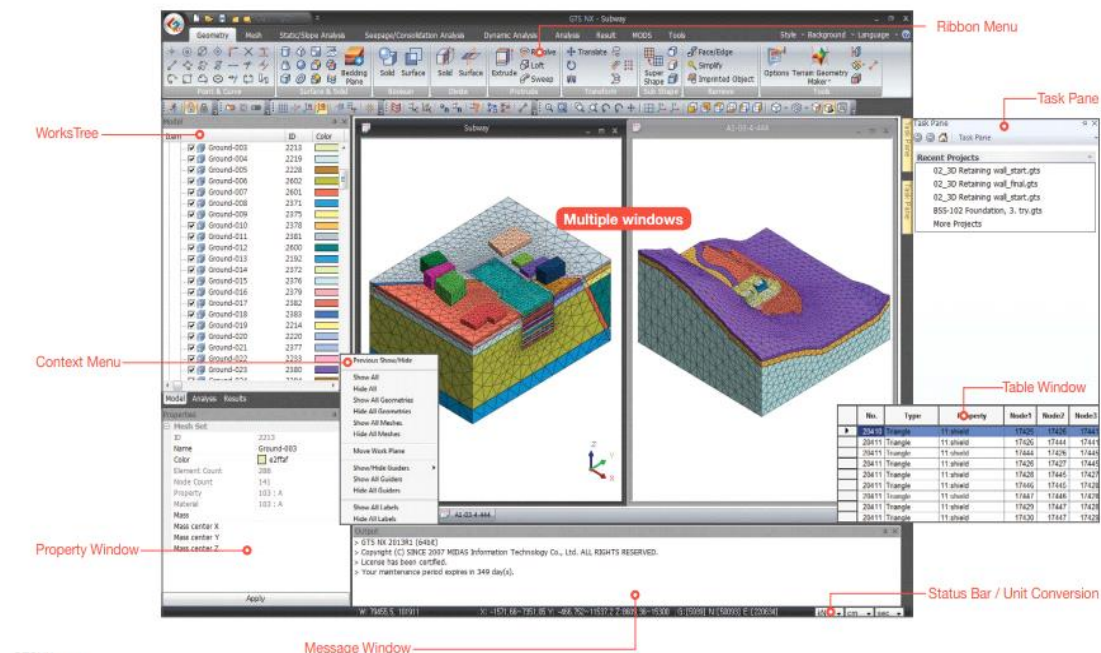


Fig. 3.L'utilisation de l'option mlti-windows

08. Modélisation de la géométrie :

- **Modélisation basée sur la CAO :**

Les utilisateurs peuvent rapidement maîtriser la modélisation dans GTS NX , parce que l'hommage aux commandes de modélisation 2D et 3d est basée sur la CAO.

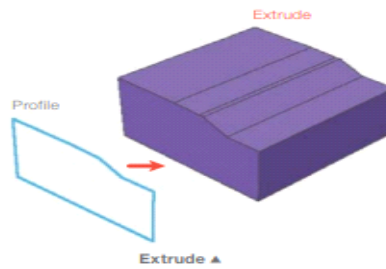


Fig. 4. Import une géométrie depuis l'autocad.

- **La géométrie de terrain :**

Les cartes numériques aide à faire des modèles 3D qui rassemblent à des conditions in situ et donneront par conséquent des résultats plus réalistes .La modélisation en 3D des contours de surface et des strates de sol peut être lourde ou impraticable dans d'autres logiciels, mais GTS NX ne prend que quelques étapes.

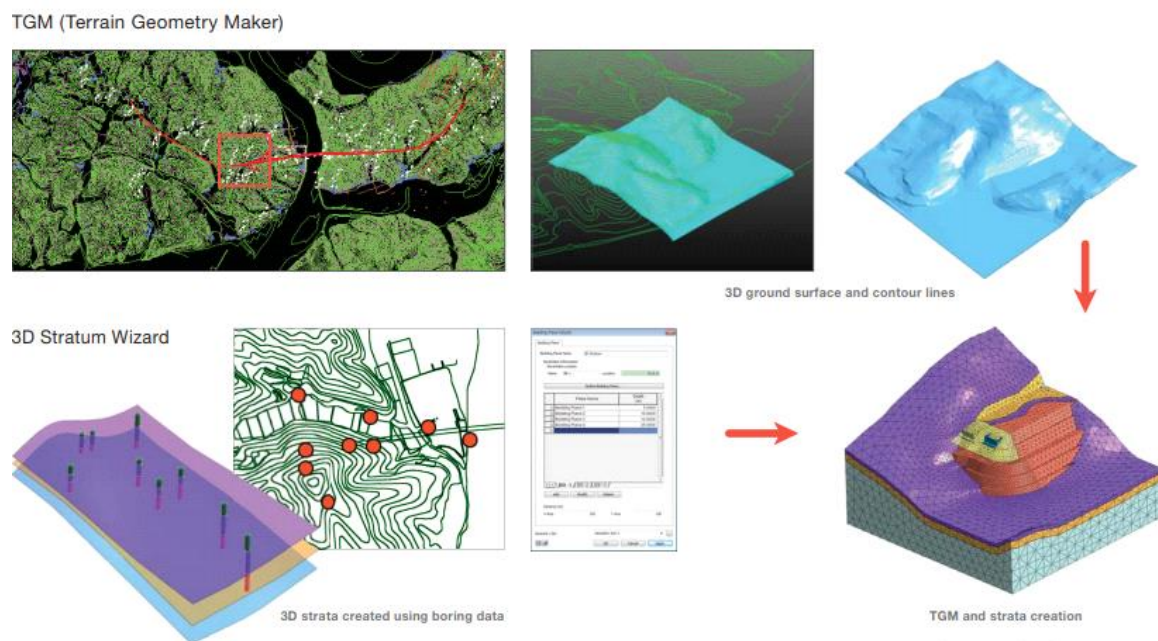


Fig. 5. Simulation d'une géométrie complexe selon la topographie réelle du terrain.

- **Automatisation de la modélisation géométrique :**

Il génère automatiquement des géométries telles que des faces partagées et les empreintes .Ces fonctions assurent la connectivité nodale entre tous les ensembles de mailles, assurant ainsi une analyse fiable de la structure du sol et de l'interaction sol-sol.

Les erreurs de modélisation peuvent également être détectées et corrigées automatiquement donc empêcher l'analyse de s'exécuter avec des avertissements de défaillance.

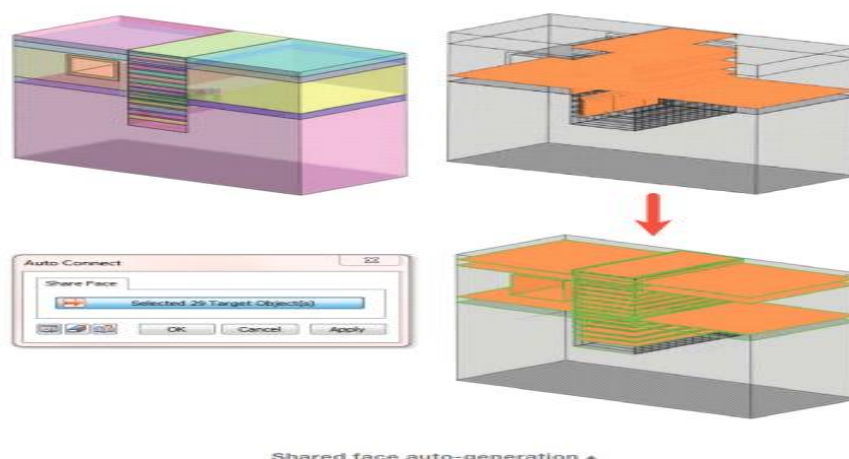


Fig. 6.Un exemple de l'utilisation de l'option auto-connexion

09. Compatibilité CAO/Interface avec d'autres logiciels MIDAS

GTS NX importe des informations de modèles d'autres logiciels MIDAS (Gen, Civil, et SoilWorks). L'interface CAO transfère les données du projet pour une analyse plus poussée nécessitant une interaction sol-structure et une investigation 3D détaillée, comme la pile d'un pont et les fondations d'un grand bâtiments. Les modèles de structures du sol en 2D peuvent également être transférés au GTS NX pour une analyse en 3D des problèmes d'ingénierie du sol tels que les systèmes de tunnels avec des galeries de liaison.

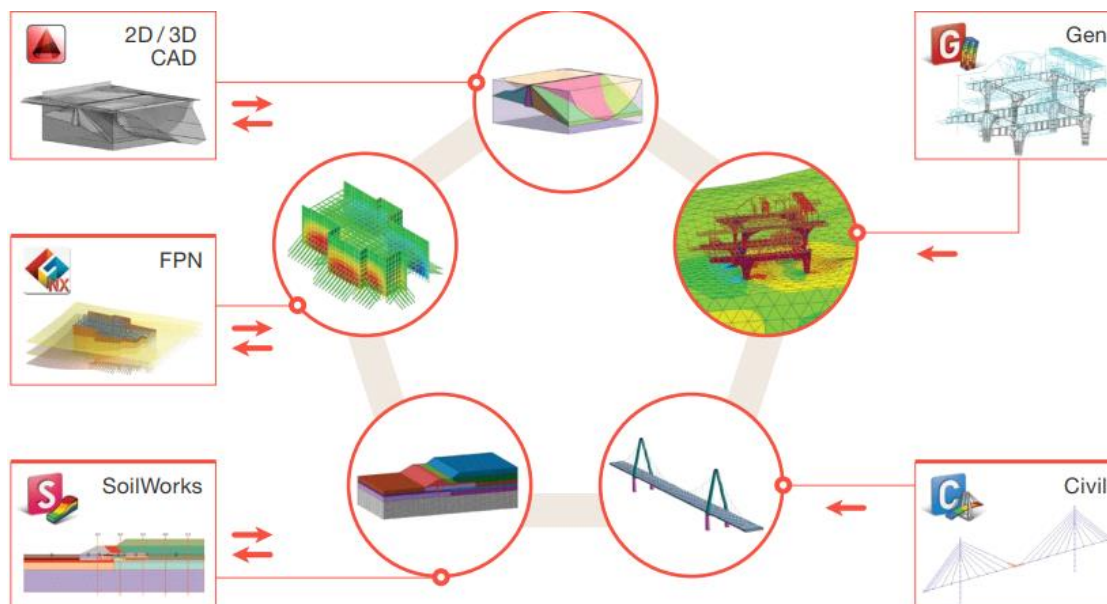


Fig. 7.Interface commun entre les logiciels MIDAS et GTS NX.

10. Génération de maillage :

- Génération optimisée de maillages de divers types d'éléments :

Des fonctions de modélisation conviviales permettent de générer facilement des géométries complexes et des ensembles de maillages de divers types. Ces capacités permettent aux ingénieurs de générer rapidement un maillage de haute qualité même s'ils n'ont qu'une expérience limitée ou nulle en matière de modélisation par éléments finis.

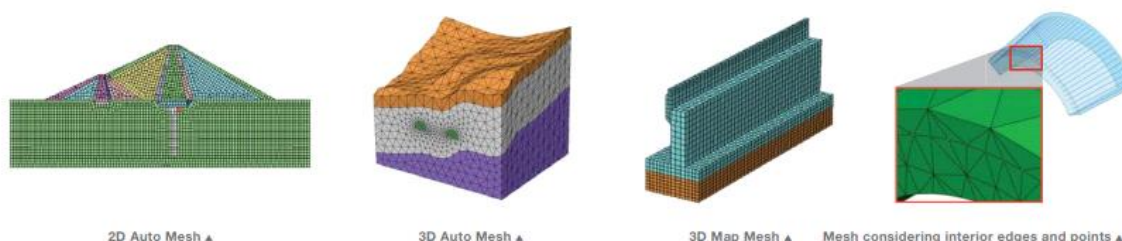


Fig. 8. La génération optimisée de maillage de divers types d'éléments.

- Assurance de la qualité et contrôles de vérification :

La qualité des mailles peut être automatiquement contrôlée et gérée. Cela permet de générer un maillage de haute qualité avec minimum d'effort, même pour des modèles structuraux complexes du sol, ce qui permet d'optimiser le temps d'analyse et de produire des résultats fiables et complets.

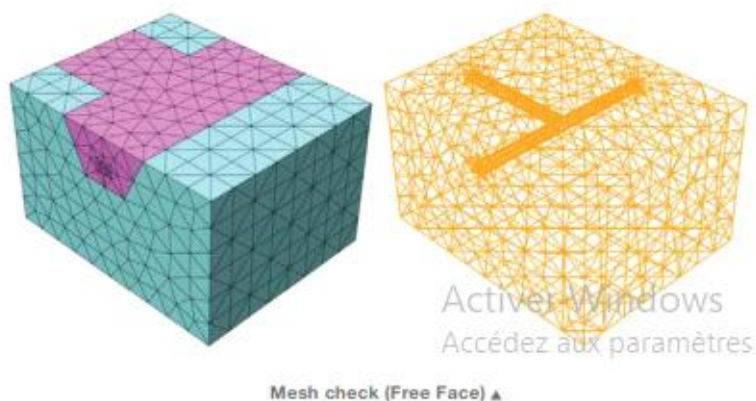


Fig. 9. Contrôle de la qualité de maillage

11. La bibliothèque des éléments :

Elle comprend divers éléments pour la structure et le sol. Ces éléments sont convenablement classés en fonction de la présente directive. Terrain, structure, liaisons

différentes, ressorts et interfaces peuvent être sélectionné et modélisé à partie de cette vaste bibliothèque.

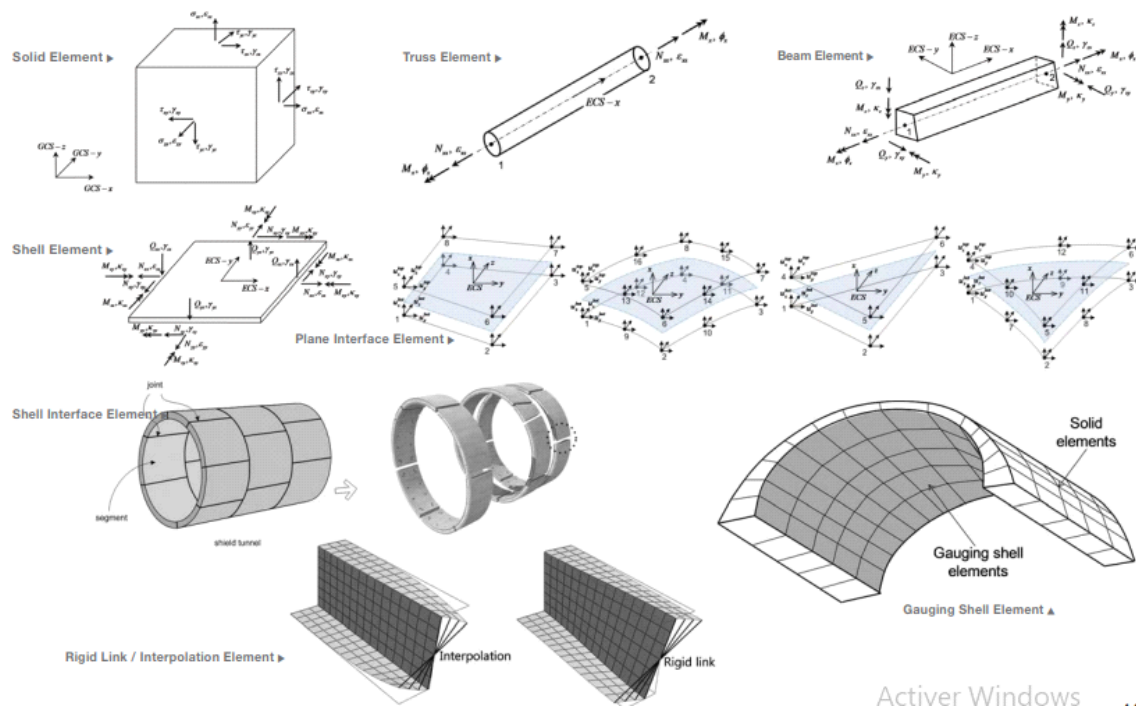


Fig. 10.Exemple des éléments dans la bibliothèque des éléments.

12. Matériaux et propriétés :

Le logiciel contient une base complète de modèles de matériaux pour simuler le comportement de divers types de sol. Ils sont classés selon les catégories suivantes :

- Matériaux élastiques :
 - Linéaires élastique isotopique ;
 - Elastique linéaire ;
 - Interface élastique ;
 - Transversale isotopique ;
 - Elastique non linéaire (1D) .
 - Jardine ;
 - D-min ;
 - Hyperbolique (Chang Duncan) ;

- Matériaux plastiques :
 - Von mises ;
 - Tresca
 - Mohr-Colomb ;
 - Drucker-Prager ;
 - Cam-Clay modifié ;
 - Jointed Rock
 - Mohr-Colomb modifié
 - Hoek and Brown
 - Rankine inverse
 - Janssen
 - Friction de Colomb(Interface)
- Matériaux non drainés :
 - Une rigidité efficace /Une force efficace
 - Raideur efficace /Force non drainée
 - Raideur non drainé /Force non drainée
- Fonctions :
 - Fonctions générales non spatiales (pieux/Pieux)
 - Fonctions élastiques non linéaires ;
 - Fonctions de comptabilité de déformation ;
 - **Application des charges :**
- Attribution des charges reflétant les conditions sur le terrain :

Il peut simuler différentes conditions de chargement in-situ, la fonction dynamique incluse une base de données qui comprend une variété de spectres de réponses et de temps .Les détonations et les séismes peut également être généré.

- Les charges statiques :
 - Le poids ;
 - Charge concentrée ;
 - Charge instantanée ;
 - Charge sous pression ;
 - Pression d'eau (Option d'auto consolidation)
 - Charge linéaire de faisceau ;
 - Charge des éléments de faisceau ;
 - Charge de la température ;
 - Charge de pression ;
 - Charge d'équilibre initiale ;
 - Charge combinée ;
- Les charges dynamiques :
 - Spectre de réponse ;
 - Accélération au sol ;
 - Charge statique de l'historique de temps ;
 - Charge dynamique de surface ;
 - Conversion Charge-Masse ;
 - Tableau de charge dynamique des chemins de fer ;

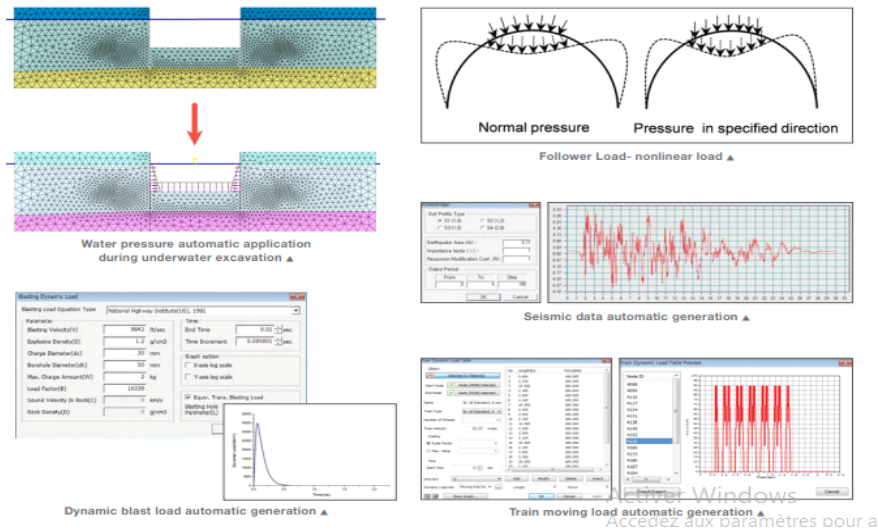


Fig. 11.Exemple d'application des charges.

13. Les conditions aux limites :

Différentes conditions aux limites peuvent être générées pour simuler des conditions in-situ , le logiciel fournit différentes conditions aux limites pour tous les types d'analyse .Les CL essentielles pour l'analyse peuvent être définies automatiquement .En définissant la surface du niveau de l'eau , la pression de l'eau interstitielles peut être prise en compte dans l'analyse des contraintes .Les niveaux d'eau en fonction du temps peuvent être définis pour simuler une baisse rapide ainsi qu'une hausse progressive du niveau d'eau en raison des précipitations .La fonction de changement des propriété peut simuler une modification des propriétés d'un matériau au fil du temps .Cette fonction est utile pour simuler le durcissement du béton ainsi que les projets d'excavation dans lesquels les couches de sol sont remplacées par des éléments structuraux .Les conditions aux limites pour l'analyse linéaire équivalente en 2D et l'analyse dynamique linéaire ou non linéaire peuvent également être générées automatiquement.

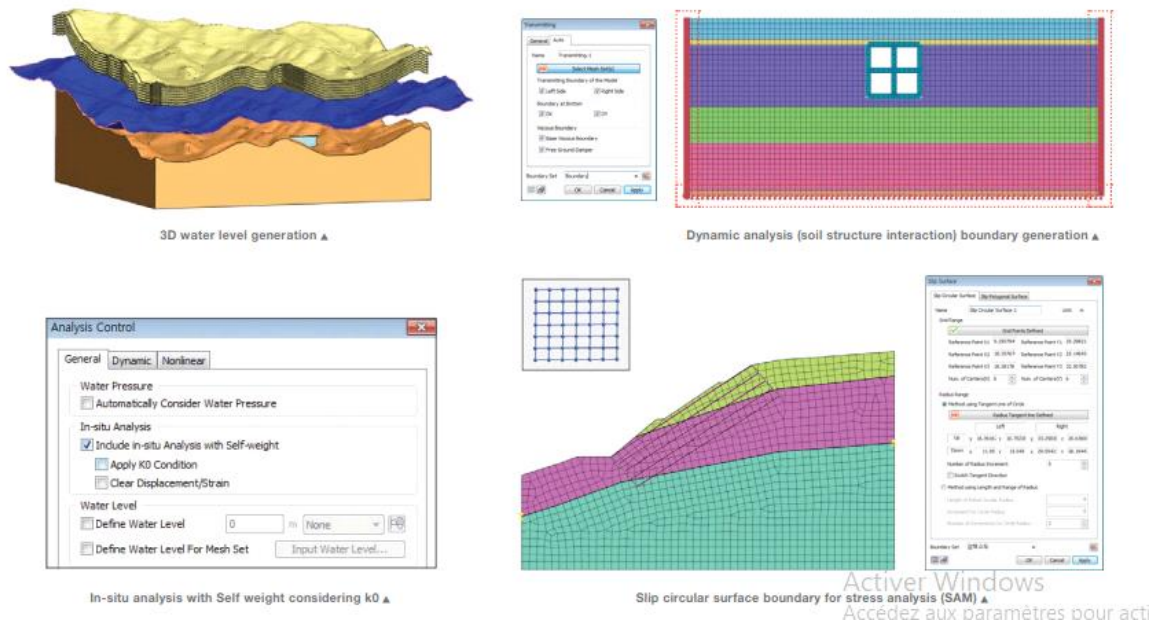


Fig. 12. Application des conditions aux limites.

14. Les résultats :

Excellents résultats d’affichage supportés par un nouveau et puissant moteur graphique donc le GTS NX fournit une variété des méthodes de sortie permettant aux utilisateurs de visualiser et d’extraire leurs résultats d’analyse. Les nombreuses options de sortie présentent des résultats élégants avec une forme claire.

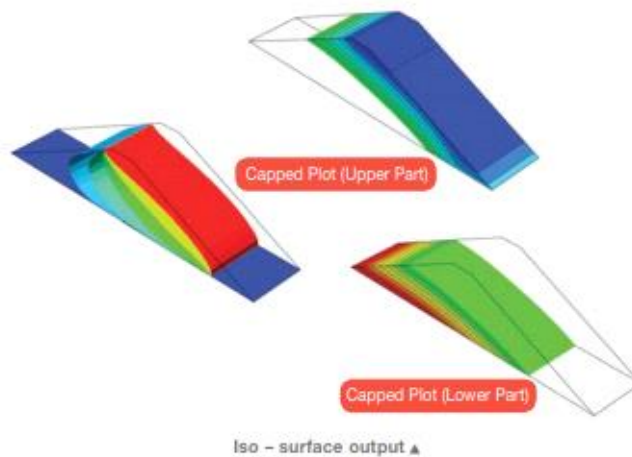


Fig. 13. Exemple des résultats d’une analyse de la stabilité d’une pente

Les fonctions de résultats permettent aux utilisateurs de combiner différents résultats et extraire sélectivement seulement les résultats pertinents .Le générateur de rapport 3D PDF exporte directement les résultats du modèle et de l'analyse 3D dans un fichier PDF .La Génération de rapports crée des rapports esthétiques et complets dans une fraction du temps qu'il faudrait pour copier et coller manuellement les feuilles de calcul et images.

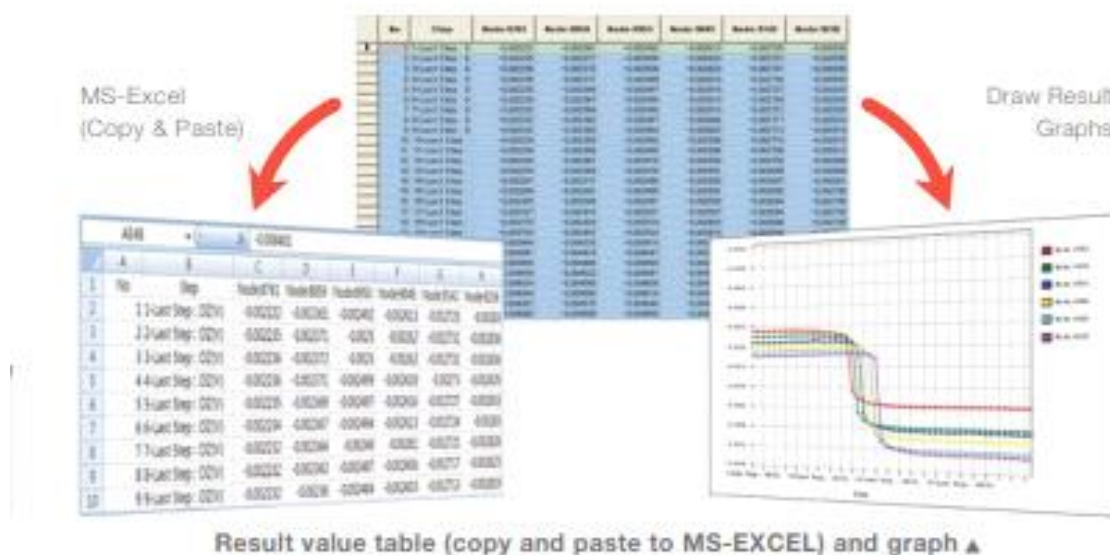


Fig. 14.L'affichage des résultats

Les domaines d'application :

GTS NX est un logiciel de modélisation numérique éprouvé , il est utilisé par de nombreuses entreprises géotechniques internationales pour :

- La modélisation des tunnels ayant un modèle standard ayant une méthode d'excavation définie (pleine section, demi section, ...).Pour la charge dans ce cas elle peut être appliquée automatiquement avec un FDR (Facteur de répartition de la charge).

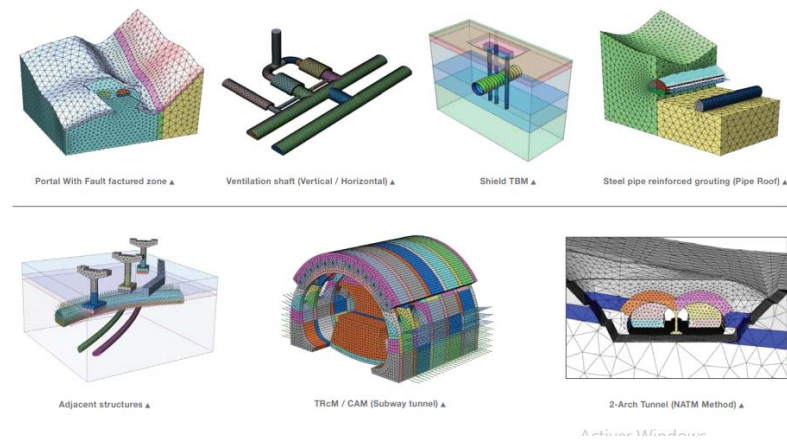


Fig. 15.Utilisations de GTS NX pour l'analyse géotechnique des tunnels.

- GTS NX donne une solution totale pour l'analyse géotechnique : il analyse la stabilité des pentes 2D/3D selon la méthode de réduction (SRM) et aussi il calcule le facteur de sécurité de la pente selon la méthode d'équilibre limite des surfaces coulissantes potentielles.

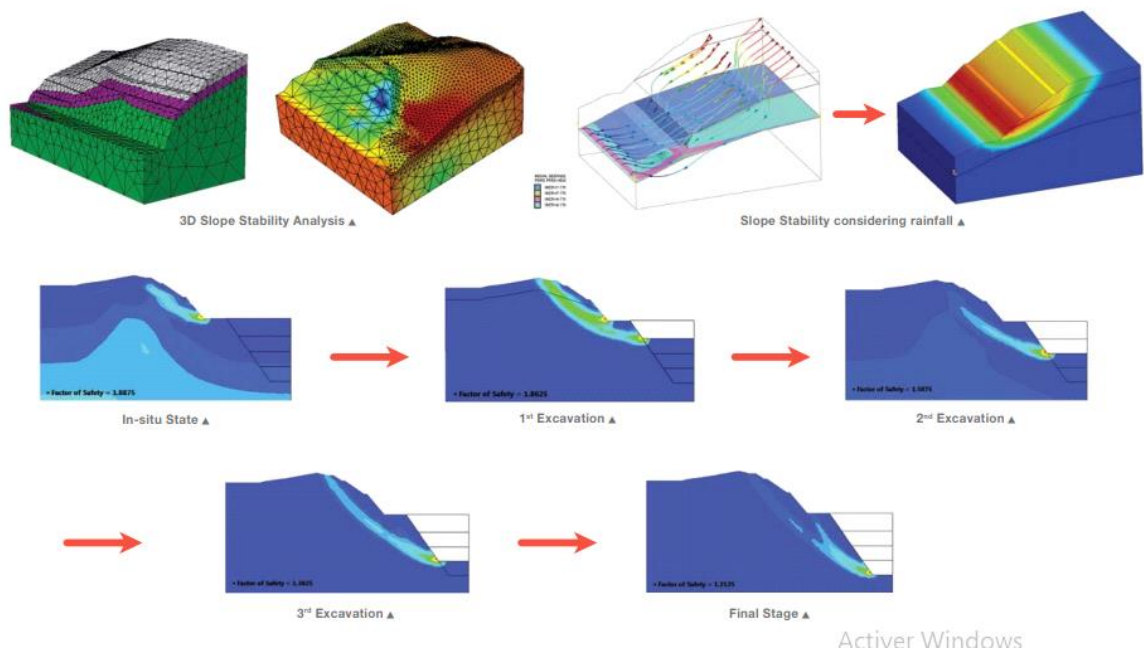


Fig. 16.Analyse des pentes en 2D/3D et avec les différentes conditions.

- Il est utilisé aussi pour l'analyse de la stabilité des piliers soumis à une pression latérale et à des tassements différentiels .Aussi il permet d'analyser la capacité portante des pieux de manière paramétrique pour les différents matériaux et méthodes de construction.

- GTS NX simule l'installation de murs de rétention pour l'excavation de structures au sol telles que les stations de métro, les fondations de grands bâtiments.

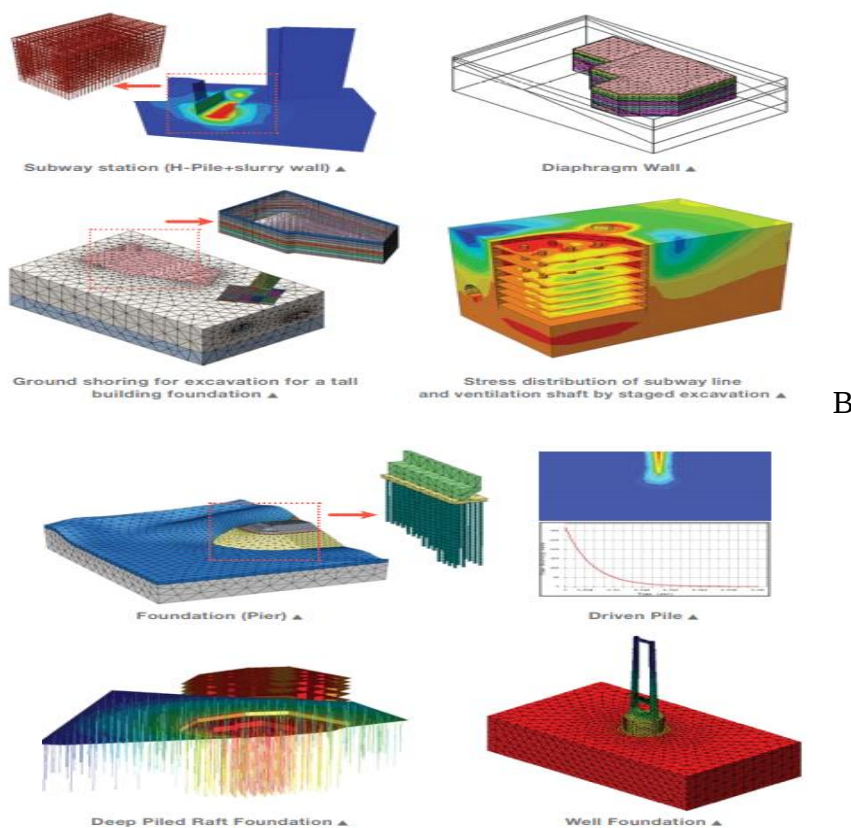


Fig. 17. Des exemples d'étude (A) installation d'un mur de soutènement, (B) Fondation profonde

- GTS NX est utilisé pour le calcul de la dissipation et de la pression interstitielle excessive et règlement de consolidation au moyen d'une analyse échelonnée.
- Il analyse l'état d'équilibre et de l'infiltration transitoire pour les barrages , les remblais , les tunnels ...etc
- Aussi il est pratique pour analyser les eaux usées dans une zone en appliquant la loi de Darcy

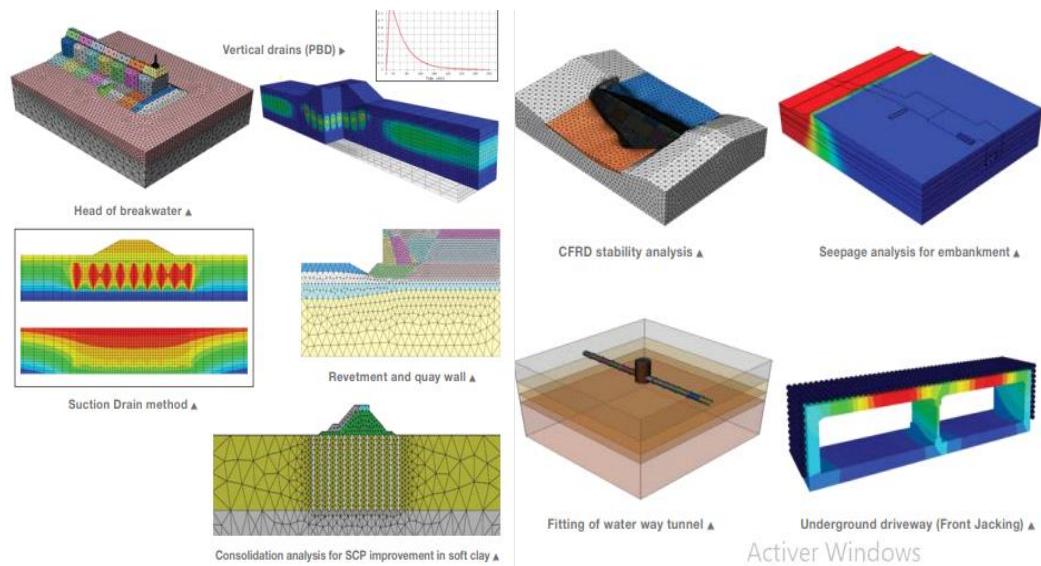


Fig. 18. Analyse d'un sol mou renforcé par des CCP (A) et un barrage (B).