



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Ministère de l'Enseignement Supérieure
et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de Technologie



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Département de GENIE CIVIL

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : Géotechnique

THEME

**Contribution à l'étude numérique du
comportement d'une paroi moulée tirantée**

Dirigé par :
Mr. Lahmadi Azzeddine

Présenté par :
Chouiter Amar

Promotion : 2015/2016.

Remerciements

Je remercie en premier Dieu pour tout.

Nous tenons à remercier :

*Monsieur : Lahmadi Azzeddine Professeur à l'Université de M'sila,
qui a encadré ce travail.*

*Je remercie également le président et les membres de jury d'avoir
accepter d'examiner mon travail.*

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à :

*Je tiens à exprimer toute ma gratitude à toutes les personnes ayant
contribuée de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

Dédicacəs

« Je dédie ce modeste travail :

à toute la famille, mon père, ma mère ,ma femme, et mes frères et sœurs,

à toute les amis et proches et

à tous personne ayant contribué à ce travail de près ou de loin. »

Résumé :

Les parois moulées offrent un large champ d'application dans le domaine de réalisation de fouilles en déblai, pour les fouilles de grande profondeur et en site urbain.

Le présent travail s'intéresse à l'étude de l'effet des paramètres géotechniques (modèle de comportement, les interfaces et les écoulements) et de modélisation (géométrie du problème, maillage et tolérance) sur le comportement d'une paroi moulée.

Le modèle de référence c'est une paroi moulée périphérique rectangulaire, et qui a été réalisé pour le soutènement de trois niveaux en sous-sols surmontant par une tour, l'ensemble constitue le nouvel immeuble d'Algérie Poste.

La modélisation numérique est réalisée à l'aide du code d'éléments finis Plaxis.

Les résultats obtenus montrent l'influence importante de variation de certains paramètres sur le calcul.

Mots-Clefs :

Paroi moulée, modélisation, éléments finis, paramètre géotechnique.

Abstract:

The diaphragm walls offer a broad field of application in the field of realization of excavations out of cut, for the excavations of great depth and in urban site.

This work is interested in the study of the effect of the geotechnical parameters (model of behavior, interfaces and flows) and of modeling (geometry of the problem, grid, and tolerance) on the behavior of a diaphragm wall.

The model of reference it is a rectangular peripheral diaphragm wall, and which was carried out for the supporting of three levels in basements surmounting by a tower, the unit constitutes the new building of Algeria Mail.

Numerical modeling is carried out using the code of finite elements Plaxis. The results obtained show the important influence of variation of certain parameters on calculation.

Key-Words:

Diaphragm wall, modeling, finite elements, geotechnical parameter.

ملخص:

الجدران الحاجزة توفر نطاق واسع في مجال إجراء البحوث في قطاع الحفر العميق في المواقع الحضرية ويركز هذا العمل على دراسة تأثير عوامل الجيوتقنية (سلوك النموذج، واجهات والتدفقات) والنمذجة (شبكة و التسامح) على سلوك جدار الحاجز.

النموذج المرجعي للجدار الحاجز مستطيل الذي انجز لدعم ثلاثة مستويات تحت الارض للمبنى الجديد لبريد الجزائر

وتم تنفيذ النماذج العددية باستخدام plaxis

وأظهرت النتائج اللتي تم الحصول عليها عن وجود اختلاف في التأثيرات عند تغيير بعض الإعدادات على الحساب

Sommaire

ملخص

Résumé

Abstract

Introduction	01
Chapitre I Etude bibliographique d'une parois moulée et Technique de réalisation	
1.1 Généralité	03
1.2 Différents types de parois moulées.....	03
1.2.1 Paroi d'étanchéité.....	03
1.2.2 Paroi de soutènement simple	04
1.2.3 Les parois moulées classiques	06
1.2.4 Les parois caissons	08
1.2.5 Les parois préfabriquées	08
1.3 Technique de réalisation des parois moulées	10
1.3.1 Introduction	10
1.3.2 Méthode d'exécution de la paroi moulée	10
1.3.2.1 Perforation	10
1.3.2.2 Méthodes de forage	12
1.3.2.3 Les cages d'armatures	12
1.3.2.4 Le béton et le bétonnage	13
1.3.2.5 Les joints entre panneaux	14
1.3.2.5.1 Utilisation de tubes joints	15
1.3.2.5.2 Joints en polystyrène	15
1.3.2.5.3 Tubes à ailettes	15
1.3.2.5.4 Joints à clavettes	15
1.3.2.5.5 Joints à l'hydro fraise	16
1.3.2.5.6 Coffrage joint	16
1.4 Interaction sol-soutènement	16
1.4.1 point de vue de la structure et point de vue du sol	18
1.4.2 Mouvement du sol autour d'une excavation	18
Chapitre II Pratique des éléments finis en géotechnique	
2.1 Bref aperçu de la méthode des éléments finis.....	19
2.1.1 Introduction	19
2.1.2 Bref historique	19
2.1.3 Concepts de base	20

2.1.4 Calculs par la MEF	20
2.2 Formulation d'interaction par la MEF.....	21
2.2.1 -Position et formulation locale	21
2.2.2- Formulation variationnelle	22
2.2.3 - Discrétisation du domaine Ω	22
2.3 Présentation de PLAXIS	25
2.3.1 Le code éléments finis PLAXIS	25
2.3.2 Options par défaut et solutions approchées [Annexe A]	25
2.4 Les modèles de comportement utilisés dans PLAXIS.....	27
2.4.1 Introduction	27
2.4.2 Contraintes totales, effectives et pressions interstitielles	28
2.4.3 Comportement élastoplastique	29
2.4.4 Modèle élastique linéaire	30
2.4.5 Modèle de Mohr-Coulomb	31

Chapitre III Établissement d'un modèle de calcul de reference

3.1 Introduction	36
3.2 Définition des données	36
3.2.1 Hypothèses et géométrie	36
3.2.2 Caractéristiques des matériaux	39
3.2.3 Génération du maillage	40
3.2.4 Conditions initiales	41
3.3 Phasage de calculs.....	42
3.4 Les principaux résultats	43
3.4.1 Résultats de la phase 2	43
3.4.2 Résultats de la phase 6.....	44
3.5 Conclusions.....	46

Chapitre IV Étude Paramétrique

4.1 Introduction	47
4.2 Effet des paramètres de calculs	47
4.2.1 Maillage	47
4.2.2 Précision des calculs	51
4.3 Effet des paramètres géotechniques	54
4.3.1 Effet des paramètres du sol	54
4.3.1.1 Cohésion c	54
4.3.1.2 Angle de frottement ϕ	57
4.3.1.3 Module d'Young E	60

4.3.1.4 Coefficient de Poisson ν	63
4.3.2 Effet du modèle de comportement	66
4.3.3 Effet des interfaces.....	69
4.4 Conclusion	72
Conclusion	73
Bibliographie	74
Annexe	75

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

1- Index des Tableaux :

N ^o Tableau	Intitulé	N ^o Page
	Chapitre III : Établissement d'un modèle de calcul de référence	
Tableau 3-1	Propriétés des couches de sols et des interfaces.	39
Tableau 3-2	Propriétés mécaniques de la paroi moulée.	40
Tableau 3-3	Propriétés des ancrages (éléments noeud à noeud).	40
Tableau 3-4	Résumé des résultats de deux phases 2et 6 avec comparaison	46
Chapitre IV : Étude paramétrique		
Tableau 4-1	Résumé des résultats de l'étude paramétrique	72

2- Index des Figures :

N ^o Figure	Intitulé	N ^o Page
	Chapitre I : Etude bibliographique d'une parois moulée et Technique de réalisation	
Figure 1-1	Schéma de principe parois moulée d'étanchéité (présentation du N.N.P.)	3
Figure 1-2	Schéma de principe d'une paroi moulée en place avec une nappe de tirants	5
Figure 1-3	Schéma montre les parois moulées de tranchée couverte avec planché qui sert à buter les parois	6
Figure 1-4	Montre la différence entre paroi moulée jambe de pantalon et paroi simple	7
Figure 1-5	Principe de construction d'une paroi moulée	9
Figure 1-6	Parois composite	10
Figure 1-7	Vue schématique d'un atelier hydro fraise.	11
Figure 1-8	Schéma de réalisation du panneau.	12
Figure 1-9	Ferraillage	13
Figure 1-10	Bétonnage	14
Figure 1-11	Analyse du comportement d'un écran de soutènement :	17
Chapitre II : Pratique des éléments finis en géotechnique		
Figure 2-1	Système de deux corps en contact	21
Figure 2-2	Discretisation du domaine Ω et de l'interface Γ_i	23
Figure 2-3	Modèle monodimensionnel du comportement élastoplastique	29
Figure 2-4	Représentation du comportement élastique parfaitement plastique	29
Figure 2-5	Représentation du comportement élastoplastique avec écrouissage.	30
Figure 2-6	Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire.	31

Figure 2-7	Fenêtre des paramètres avancés du modèle élastique linéaire.	31
Figure 2-8	Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb.	32
Figure 2-9	Pyramide de Mohr-Coulomb tracée pour $c=0$.	32
Figure 2-10	Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb	33
Figure 2-11	Définition du module à 50 % de la rupture	33
Figure 2-12	Fenêtre des paramètres avancés du module Mohr-Coulomb.	35
Chapitre III : Établissement d'un modèle de calcul de référence		
Figure 3-1	La coupe du projet	37
Figure 3-2	Modèle géométrique du projet.	37
Figure 3-3	Maillage du projet.	41
Figure 3-4	Conditions hydrauliques initiales.	41
Figure 3-5	Génération des pressions interstitielles initiales.	42
Figure 3-6	Génération des contraintes initiales.	42
Figure 3-7	Phase 2 : déformation de maillage ($\times 200$)	43
Figure 3-8	<i>Paroi moulée : résultats de la phase 2.</i>	44
Figure 3-9	<i>Phase 6: déformation de maillage ($\times 100$).</i>	44
Figure 3-10	Figure 3.10 Phase 6: répartitions des contraintes principales.	45
Figure 3-11	Paroi moulée : résultats de la phase 6.	45
Chapitre IV : Étude paramétrique		
Figure 4-1	Position des noeuds et des points de contrainte dans les éléments de sol.	48
Figure 4-2	influence de maillage sur les déplacements horizontaux.	49
Figure 4-3	Paroi : influence de maillage sur les moments fléchissant.	50
Figure 4-4	Comparaison de la solution exacte avec la solution numérique.	51
Figure 4-5	influence de la précision des calculs sur les déplacements horizontaux.	52
Figure 4-6	Paroi : influence de la précision des calculs sur les moments fléchissant	53
Figure 4-7	Paroi : influence de la cohésion sur les déplacements horizontaux.	55
Figure 4-8	Paroi : influence de la cohésion sur les moments fléchissant.	56
Figure 4-9	Paroi : influence de l'angle de frottement sur les déplacements horizontaux.	58
Figure 4-10	Paroi : influence de l'angle de frottement sur les moments fléchissant.	59
Figure 4-11	Paroi : influence du module d'élasticité sur les déplacements horizontaux.	61
Figure 4-12	Paroi : influence du module d'élasticité sur les moments fléchissant.	62
Figure 4-13	Paroi : influence du coefficient de Poisson sur les déplacements verticaux.	64
Figure 4-14	Paroi : influence du coefficient de Poisson sur les moments fléchissant.	65
Figure 4-15	Paroi : influence du modèle de comportement sur les déplacements verticaux.	67
Figure 4-16	Paroi : influence du modèle de comportement sur les moments fléchissant.	68
Figure 4-17	Paroi : influence des interfaces sur les déplacements verticaux.	70
Figure 4-18	Paroi : influence des interfaces sur les moments fléchissant.	71

Principale notation

Lettres latines

C	Cohésion de la couche de sol
E	le module de young
EA	raideur normale des tirants
EI	rigidité flexionnel du paroi
E_{50}^{ref}	La rigidité sécante dans la norme d'essai triaxiale drainée
E_{ur}^{ref}	Déchargement / rechargement rigidité ($E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref}$)
E_{oed}^{ref}	La rigidité tangente pour le chargement oedométrique primaire
Fmax	la force de précontrainte maximale
G	le module de cisaillement
Kx	la perméabilité dans le sens X
Ky	la perméabilité dans le sens Y
Ls	espacement entre les tirants
R inter	coefficient de raideur de l'interface
Pref	contrainte de référence pour les raideurs
Z0	niveau de la nappe phréatique,
Z	niveau de la couche de sol

Lettre grec

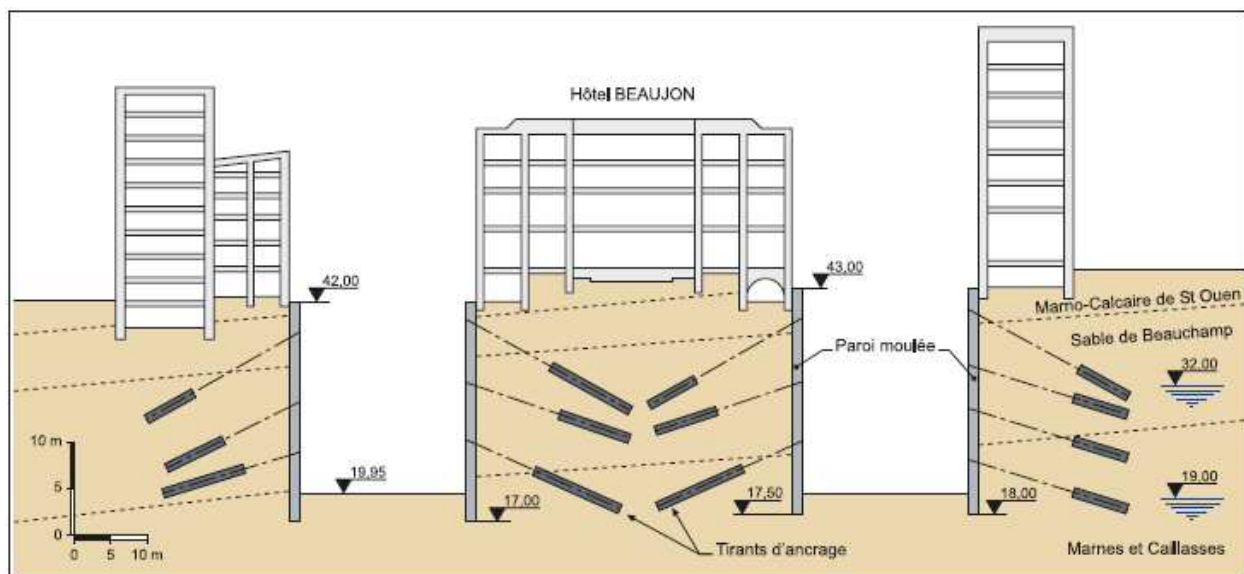
γ_h	Poids volumique humide
γ_d	Poids volumique sec
φ	Angle de frottement de la couche de sol
ψ	Angle de dilatance
ν	Coefficient de poisson
σ_n	Contrainte normale dans le sol
τ	Contrainte tangentiel dans le
$\varepsilon_{x,y,z}$	La déformation dans les différent sens

Introduction :

Lors de l'examen de profondes excavations étant prises en charge par parois moulées, il est bien connu qu'il est d'une grande importance de considérer les effets du processus de la construction. La réalisation des excavations profondes dans les zones urbaines suppose l'utilisation des structures de soutènement afin de protéger les constructions existantes avoisinantes. Même si ces structures sont souvent utilisées en génie civil ; le calcul et le dimensionnement ne sont pas simples ; les interactions entre le sol, la paroi et les structures avoisinantes étant importantes, ainsi leur prise en compte étant difficile.

Pourquoi une paroi moulée ?

Pour le choix des parois moulées, on ne peut pas vraiment parler d'avantage mais de nécessité. En effet, pour construire sous le niveau naturel du terrain, une autre solution envisageable aurait été de terrasser sur une surface beaucoup plus grande et de réaliser ensuite la paroi extérieure. Mais ce cas de figure n'était pas envisageable sur un chantier à cause de son implantation au centre-ville qui ne laisse pas assez de place en périphérie de l'ouvrage pour la réalisation. La solution envisageable des parois moulées fut donc adoptée.



Exemple de soutènement complexe en site urbain au moyen de paroi moulée et ancrages précontraints

L'idée consiste à réaliser le mur d'enceinte du bâtiment avant le terrassement. C'est ce mur qui soutient ensuite les terres; Alors, le mur d'enceinte du bâtiment fut réalisé.

La pelle hydraulique déblaye le sol dans l'enceinte qui maintient les terres périphériques.

Cette technique offre l'avantage de faire l'économie d'une paroi provisoire en réalisant directement l'enceinte du bâtiment, le parement du mur ne sera pas de bonne qualité et des irrégularités suivent les imprécisions du terrassement de la tranchée.

Cette technique est toutefois souvent utilisée pour réaliser des parkings sous terrains pour lesquels les parements lisses des murs ne sont pas recherchés. Dans ce travail de recherche les effets tridimensionnels d'installation d'une paroi moulée sont à discuter.

Afin de valider la stabilité cette paroi moulée, des calculs standards et des analyses numériques avec la méthode des éléments finis sont conduits à examiner les effets spatiaux.

Etude bibliographique d'une parois moulée et Technique de réalisation

1.1 Généralité :

La paroi moulée en béton armé consiste en un voile coulé dans les terres, comme une sorte de pieu continu, ceinturant l'emprise des sous-sols futurs (parking souterrain à plusieurs niveaux par exemple).

Le terrassement se fait ensuite à l'intérieur de l'enceinte ainsi délimitée, pratiquement sans interruption, sauf le temps d'exécuter des tirants d'ancrage à différents niveaux. Aucun étaieement n'encombre le volume de l'excavation pendant les travaux (à part des butons dans les angles : voir plus loin). La paroi moulée permet la réalisation, en site construit dans la nappe phréatique, de terrassements profonds et étendus. Des profondeurs de plus de 20 m sont de pratique courante. Le procédé n'est en principe rentable qu'à partir de deux niveaux de sous-sol.

La paroi moulée sert :

de fondation : lorsqu'elle est descendue jusqu'aux couches porteuses profondes

de soutènement : en maintenant les terres et les surcharges sur la périphérie

de paroi étanche : en protégeant de l'eau extérieure le volume enclos : sa base est ancrée dans les couches imperméables assez profondément pour isoler de la nappe la plate-forme inférieure du terrassement. De ce fait il y a différents type de parois moulées :

1.2 Différents types de parois moulées

1.2.1 Paroi d'étanchéité :

Destiné à créer une barrière étanche dans l'épaisseur du sol (par exemple pour protéger une nappe), ce type de paroi ne comporte pas de terrassement après son exécution.

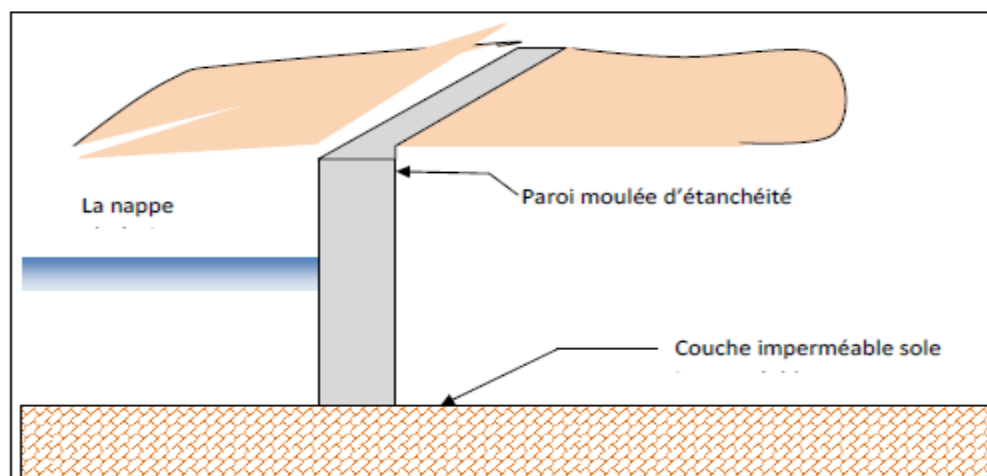


Figure1.1 : Schéma de principe parois moulée d'étanchéité (présentation du N.N.P.)

N'étant pas armée, la paroi est coulée soit avec un mélange de boue de bentonite et de graviers (épaisseur importante, d'au moins 1,50 m). Soit en béton de ciment plastique à dosage de ciment réduit, introduit au tube plongeur sous boue de bentonite (épaisseur variable de quelques centimètres à une soixantaine, suivant le dosage) ; soit avec un mélange de bentonite, de ciment et d'adjuvants assurant son auto durcissement (épaisseur 50 à 60 cm)

Les parois d'étanchéité à base d'un liant spécial offrent une solution idéale pour maîtriser les fluctuations de la nappe phréatique. Les parois peuvent être placées à la verticale et à l'horizontale. Elles assurent une résistance durable à l'eau. Les applications possibles sont:

- excavations
- digues, tunnels et parkings souterrains
- chemins creux
- sites pollués
- Mise en œuvre :

Pour mettre en place une paroi en ciment-bentonite, une tranchée est creusée sans vibrations et de façon insonore, jusqu'à la couche imperméable. Les tranchées jusque 100 m de profondeur sont réalisables. Le mélange à base de liant spécial, d'eau et de terre, assure la stabilité de la tranchée. Après durcissement, il forme une paroi étanche et Suffisamment résistante. Pour mettre en place une paroi d'étanchéité par injection de coulis sous pression, le coulis à base d'un liant spécial et d'eau est introduit à la profondeur souhaitée, au moyen d'un tube d'injection. La tête d'injection tournante permet de recouper le sol sous pression de l'injection de coulis. Lors de la remontée de la tête d'injection tournante, une paroi étanche est créée sous forme d'une colonne de terre et de Ciment.

1.2.2 Paroi de soutènement simple :

Cas où il n'est pas prévu de construction dans l'excavation après terrassement.

La paroi, en béton armé, est alors maintenue par des tirants d'ancrage permanents, ou par des contreforts, intérieurs ou extérieurs, réalisés par le même procédé que la paroi proprement dite Le fonctionnement des parois Paroi moulée classique est celui d'une structure chargée par la poussée des terre et de l'eau soutenue et résistant en flexion pour mobiliser des appuis constitués, d'une par, par le solen fiche et d'autre part par des tirant ou butons disposés dans la partie libre de l'écran.

L'écran est généralement fiché de façon significative dans le terrain : de façon typique, la fiche pour une paroi ancrée varie de 30% à 50% de la hauteur de fouille, en permettant la mobilisation d'un appui au sein du terrain, cette fiche joue un rôle déterminant dans l'équilibre de l'ouvrage.

La nature de cette appuis est variable selon les propriétés de terrain, la longueur en fiche de l'écran et sa rigidité et la distribution des autres appuis, tirant ou butons en partie aérienne. Elle peut se réduire à un appui simple pour des écran très rigide, ancrés en partie supérieur et dont la fiche est courte tandis que pour des écrans ne possédant pas d'appuis en partie supérieur l'encastrement en fiche devra être totale. Dans le cas générale l'écorant se trouve partiellement encastré dans le terrain

Les appuis en partie supérieur de l'écran sont présents dès que la hauteur libre dépasse environ 5m, de façon à limité les déplacements de renvoyer les efforts d'appuis suffisamment loin en arrière de l'écran, au sein d'une partie stable de massif de sol.il peut également s'agir de butons, dans le cas ou l'effort être renvoyé à une structure faisant face à l'écran (cas des tranchées c ouvert, par exemple)

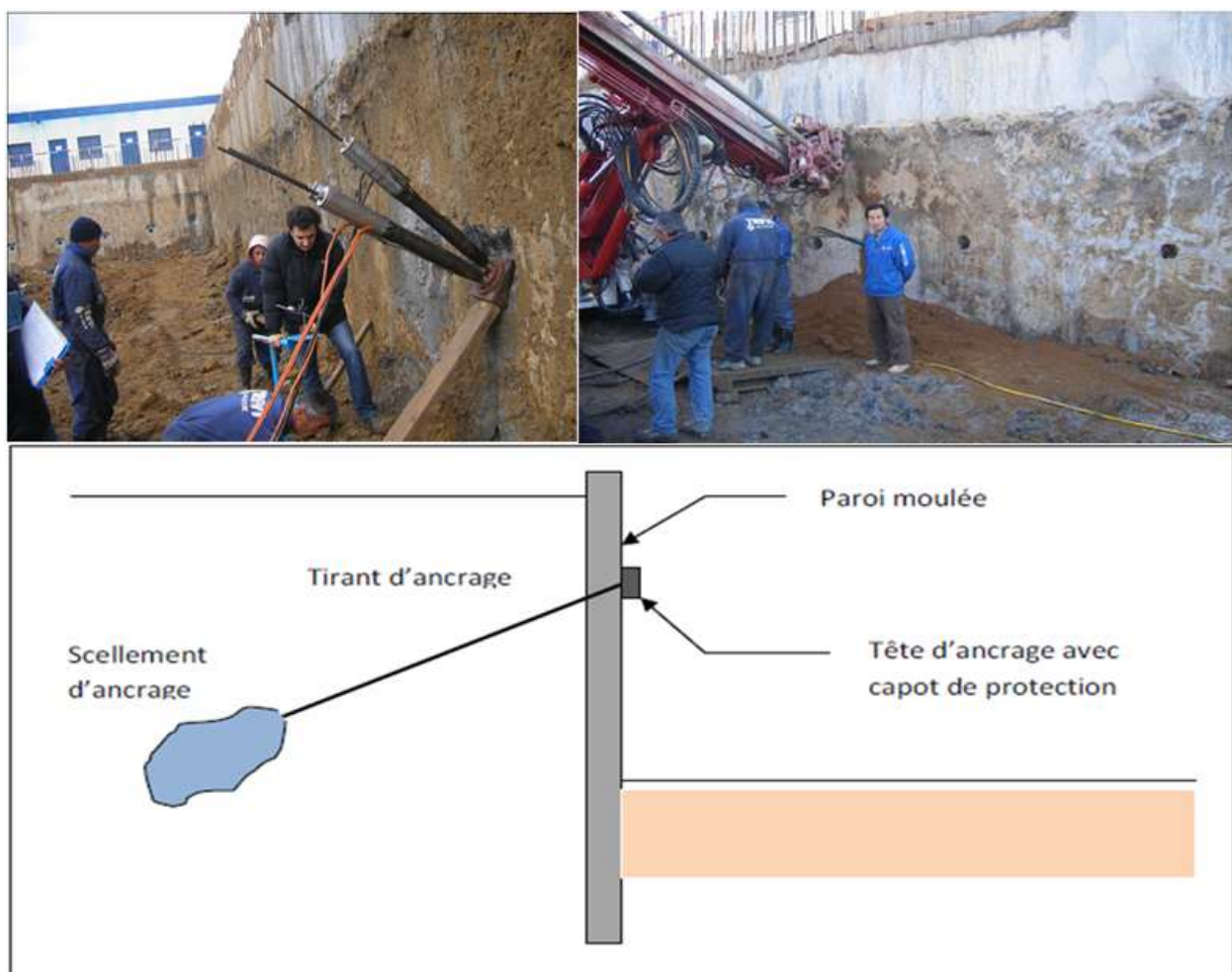


Figure 1.2 : Schéma de principe d'une paroi moulée en place avec une nappe de tirants

La répartition des appuis pour chaque niveau est variable suivant la nature des appuis et l'intensité des efforts à reprendre. L'espacement horizontale est plus important dans le cas des butons que dans celui des tirants.[01]

- Domaine d'emplois :

Soutènement notamment pour les fouilles de grande profondeur (usine, centrale ...) Ouvrage hydraulique tel que les quais Fondation profonde qui transmette aux sols sous-jacents des charges permanentes et d'exploitations Dans les zones urbaines pour protéger les structures proximité de la fouille.

1.2.3 Les parois moulées classiques :

À côté de la technique classique déjà décrite, à triple fonction (fondation, soutènement, écran étanche), on trouve aussi.

A- la paroi de tranchée couverte :

Surtout utilisée en travaux publics pour les voies de circulation : routes, chemins de fer, métro, canaux souterrains, parkings à niveaux multiples.

On coule les parois moulées de rive en béton armé (éventuellement celles formant appuis intermédiaires), puis le plancher de couverture au niveau du sol, qui sert à buter les parois en tête.

Le terrassement est ensuite effectué en souterrain, sous ce plancher sur la hauteur du premier sous-sol. Plusieurs planchers successifs peuvent être coulés au cours du terrassement.

Cette technique a deux avantages :

libération immédiate de la surface pour la circulation au niveau du sol existant suppression des tirants et des butons.

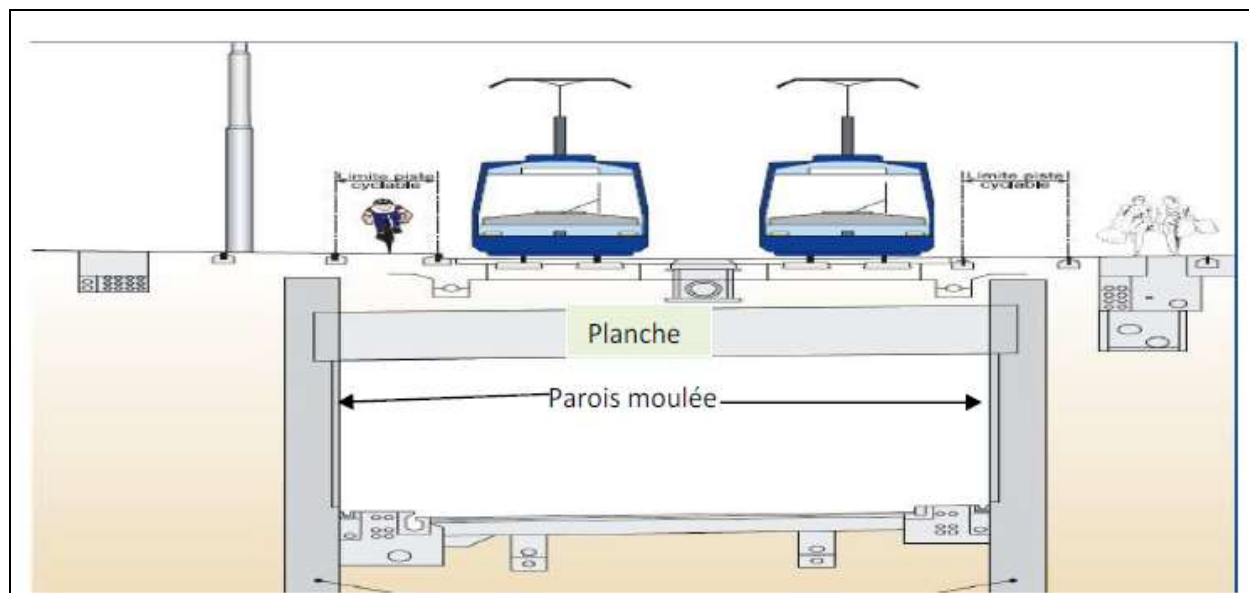


Figure1.3 : Schéma montre les parois moulées de tranchée couverte avec planché qui sert à buter les parois

La méthode de "tranchée couverte" :

La méthode de "tranchée couverte" est généralement choisie pour procéder à la réalisation d'un ouvrage dans un environnement urbanisé et sous faible couverture.

La méthode consiste à créer :

deux murs de soutènements parallèles en parois moulées : parois en béton armé moulées dans le sol ; une dalle de couverture reposant sur ces parois.

B - Les "jambes de pantalon" :

Dans le cas d'une paroi à fonction porteuse, la couche d'assise peut être située beaucoup plus bas que le dernier sous-sol et que les couches imperméables sous la nappe : la paroi de soutènement et d'étanchéité continue n'a pas besoin d'être prolongée jusqu'à l'assise de fondation.

On la prolonge seulement sous une partie des panneaux de la paroi. On obtient ainsi une disposition dite "en jambes de pantalon".

Parois en jambe de pantalon à deux fonctions : une fonction vis-à-vis de la stabilité et une fonction hydraulique, les panneaux les plus longs assurant la stabilité de l'ouvrage tandis qu'un meilleur écoulement de l'eau est assuré sous les panneaux adjacent plus court ; cette disposition se

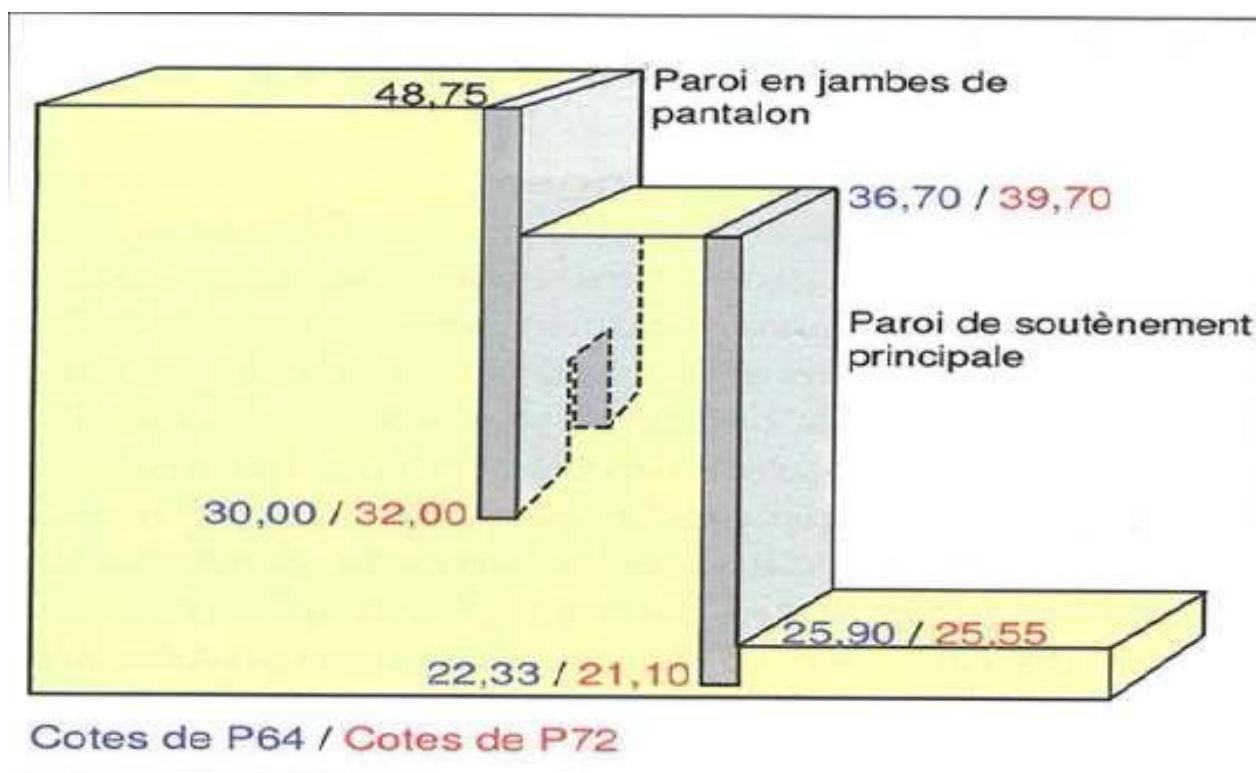


Figure 1.4 : Montre la différence entre paroi moulée jambe de pantalon et paroi simple

1.2.4 Les parois caissons :

Autre mode d'utilisation de la technique de la paroi moulée, la paroi caisson consiste en une enveloppe, en béton armé, que l'on remplit de béton cyclopéen après avoir retiré les terres contenues à l'intérieur.

Elle remplace, pour de très grandes dimensions et de grandes profondeurs, la technique des caissons havés

Caissons havés ("ouverts") Les extrémités inférieure et supérieure sont ouvertes.

Le caisson est foncé, en place Lorsque la cote finale est atteinte on assèche le caisson et on le remplit de béton Pour faciliter la pénétration du caisson dans le sol, les extrémités inférieures des parois latérales du caisson sont façonnées en biseau ; sur cette partie biseautée, ou "crinoline", est fixée une "trousse coupante" munie d'un "couteau" prolongeant la paroi extérieure du caisson;

Elle permet de fonder des charges ou d'ancrer des efforts de traction considérables.

1.2.5 Les parois préfabriquées :

La finition d'une paroi moulée présente toujours une certaine grossièreté du fait de son moulage dans le sol : inégalités de la face visible après terrassement, joints entre panneaux imparfaits, mauvaise position de l'armature, etc.

La paroi préfabriquée est un perfectionnement de la paroi moulée : le béton n'est plus coulé au tube plongeur sous une boue de bentonite, mais introduit dans celle-ci sous forme de panneaux de béton armé entiers, fabriqués à l'avance en atelier

****Simple :***

Le forage est fait comme pour une paroi moulée, mais un peu plus large que la future paroi, avec remplissage de boue de bentonite. Les panneaux préfabriqués, en béton armé, sont descendus à la suite les uns des autres dans le forage et calés sur les parois de la pré-saignée. Ils sont centrés de manière à laisser une épaisseur de boue de chaque côté. Un coulis de sable et ciment est ensuite injecté par le bas, qui prend la place de la boue sur les deux faces des panneaux. Il existe des mélanges autodurcissants qui font office à la fois de boue de forage et de coulis, ce qui simplifie les opérations. Les extrémités des panneaux préfabriqués sont façonnées en forme de joints, de manière à assurer la liaison de panneau à panneau, le coulis de ciment assurant le scellement. Au moment du terrassement le coulis durci est enlevé sur la face de la paroi qui devient apparente.

Les dimensions des panneaux préfabriqués sont conditionnées par leur poids qui ne doit pas être prohibitif vis-à-vis de la manutention et de l'appui sur les murettes de la pré-saignée. La longueur est en général comprise entre 2 et 4 m. Les épaisseurs sont un peu inférieures à celles des parois moulées, la préfabrication autorisant des contraintes du béton plus élevées. Des passages sont

réservés dans les panneaux pour les tirants d'ancrage qui seront mis en place au cours du terrassement.

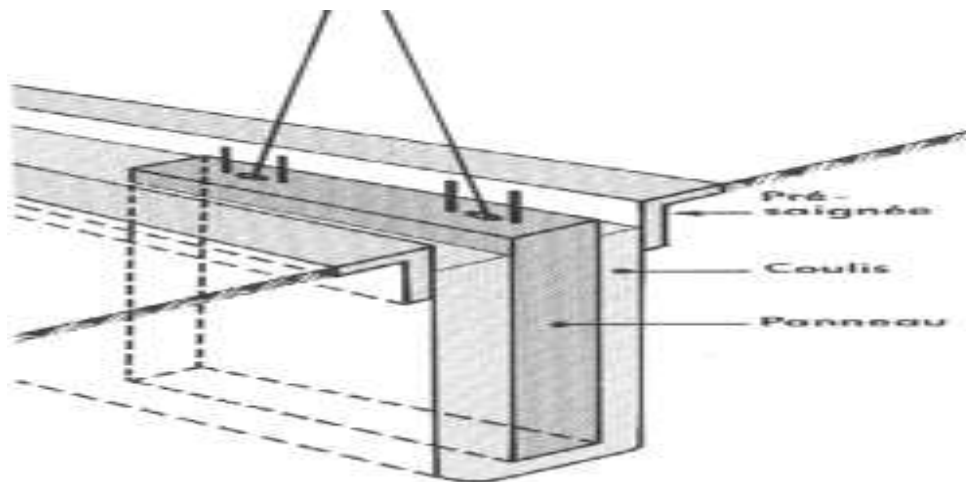


Figure 1.5 : Principe de construction d'une paroi moulée

*** Les parois mixtes (ou composites) :**

On citera, pour mémoire, les techniques ainsi appelées, qui associent les procédés de la paroi moulée et de la paroi préfabriquée. Par exemple : une paroi préfabriquée armée, en partie haute, sur la hauteur des sous-sols à terrasser et de la nappe phréatique (rôle triple : porteur, de soutènement et d'étanchéité), encastree au pied dans une paroi moulée non armée, descendant plus profondément jusqu'au substratum porteur (rôle porteur simple).

- Domaine d'emploi :

- * ouvrages de déblai
- * en site terrestre
- * hors d'eau
- * dans pratiquement tous les terrains
- * très utilisées en site urbain
- * hauteur moyenne à forte

- Constitution :

Pieux isolés:

- entraxe 2,5 à 4 m - pieux métalliques (h) ou préfabriqué en béton armé - mis en place et scellés (à l'aide de béton) dans un forage

- Voile réalisé entre les pieux au fur et à mesure du terrassement: béton projeté ou coulé en place, armé

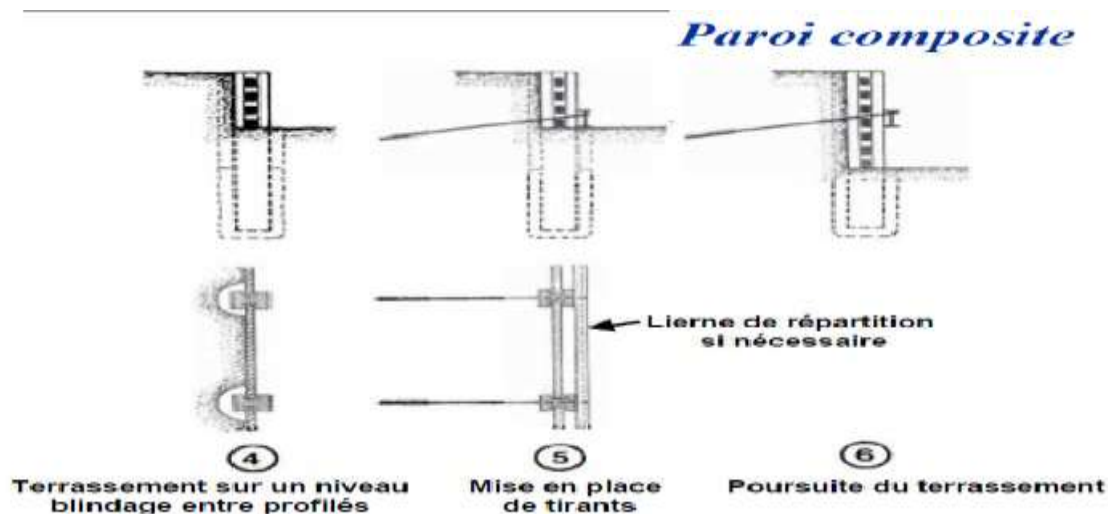


Figure1.6 : Parois composite

1.3 Technique de réalisation des parois moulées :

1.3.1 Introduction :

Avant d'exécuter la paroi moulée nous sommes confrontés de résoudre le problème de la stabilité de la tranche lors de l'excavation. En effet, si on exécute sans précaution particulière d'une fouille verticale à grande profondeur, des effondrements de paroi se produisent inévitablement. Le miracle de la paroi moulée c'est que le tranché est stable sans blindage grâce à une simple boue à bentonites on peut facilement après l'achèvement de l'excavation, remplacer la boue par le béton à l'aide d'un tube plongeur il est ainsi possible de couler un béton en la moule exactement dans le volume excavé dans le sol la boue étant récupérée au fur et à mesure de l'introduction du béton .

1.3.2 Méthode d'exécution de la paroi moulée :

Les méthodes d'exécution nécessitent d'être rappelées, car elles sont la cause de nombreux défauts.

1.3.2.1 Perforation :

Outre la fonction de la boue comme soutènement des parois de l'excavation, les principaux problèmes liés à l'exécution de fouille concernant sa verticalité et la traversée des horizons durs. Le maintien de verticalité est obtenu en réalisant des murettes guide en béton armé, guidant l'engin de perforation qui s'ajuste entre elles durant sa descente dans les sols meubles, l'excavation est traditionnellement réalisée à l'aide d'un outil travaillant en rotation ou en roto-percussion, en association avec une circulation inverse de la boue permettant la remontée des sédiments ; au besoin un trépan peut être à cet dispositif. L'hydro fraise (ou hydro haveuse),

technique datant de 1975 et constamment améliorée, permet une plus grande précision et le passage des horizons durs épais.

Cette technique est par contre sensible à certains sols et à la présence de gros blocs qui bloquent les tambours de l'engin. Les grandeurs d'outils varient de 0,52m à 1,52m ; dans le génie civil routier, les épaisseurs courantes varient de 0,52m à 0,80m des profondeurs de 35 à 50 m sont atteintes couramment et peuvent exceptionnellement atteindre 100 m avec une hydro fraise.

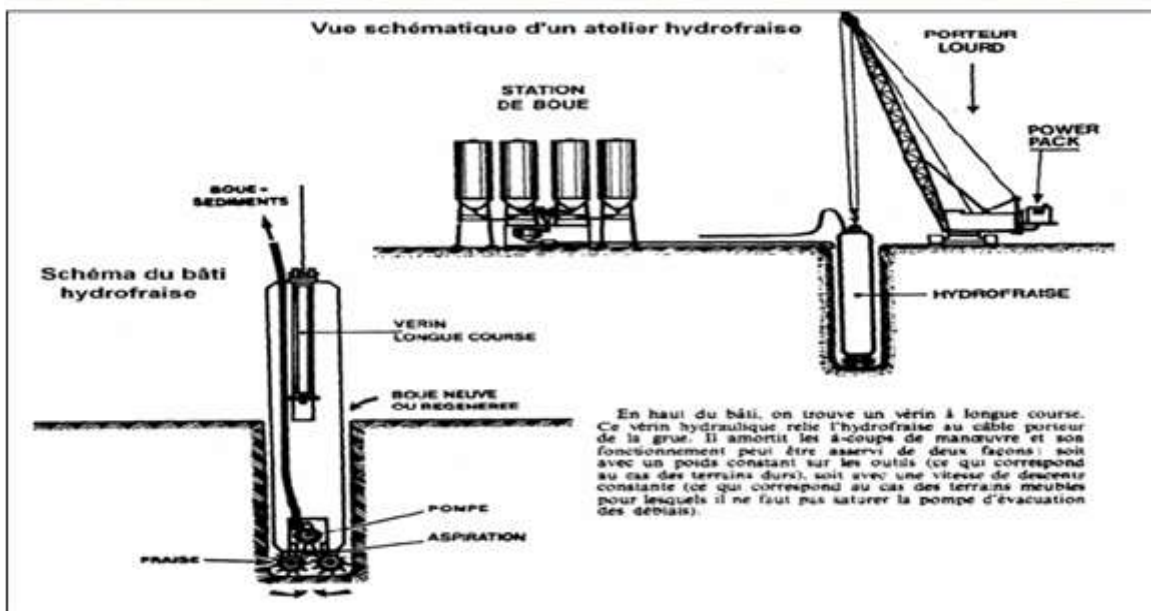
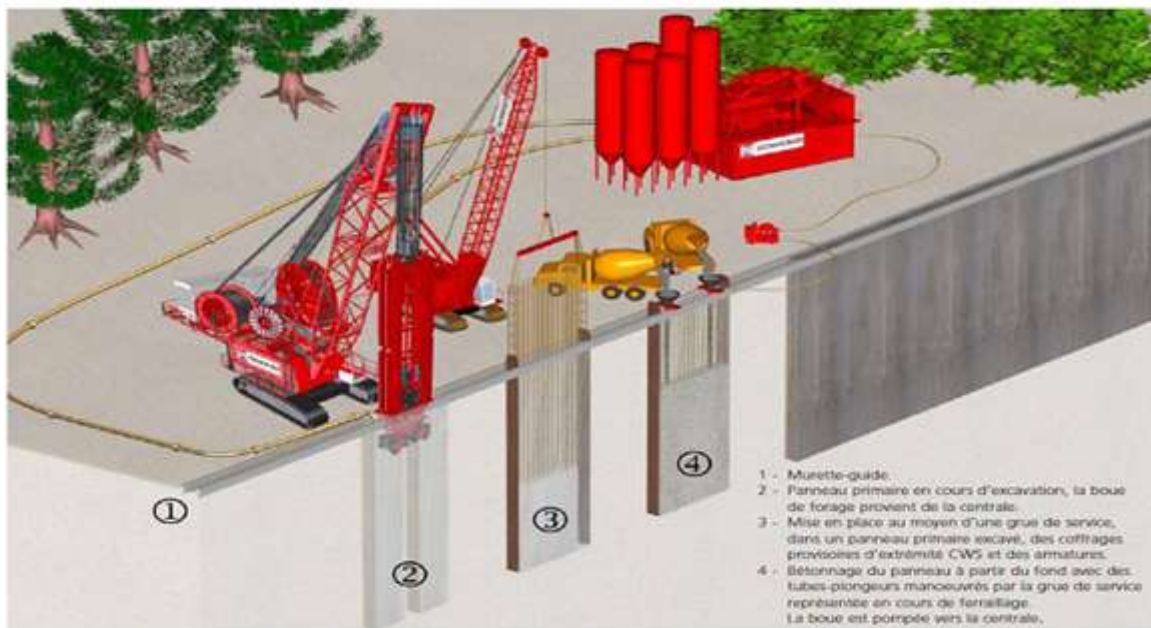
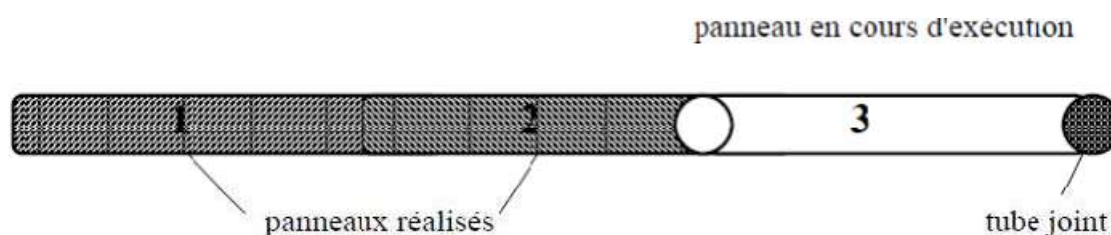


Figure1.7 : Vue schématique d'un atelier hydrofraise.

1.3.2.2 Méthodes de forage :

Le forage est réalisé par panneaux de longueur limitée, en tenant compte de la cohésion du terrain en place et des contraintes extérieures au voisinage de la paroi (mur mitoyen, surcharges, ...). Il se fait soit en continu ou soit par panneaux alternés (méthode des panneaux primaires et secondaires).

a) Forage en continu:



b) Forage par panneaux alternés:

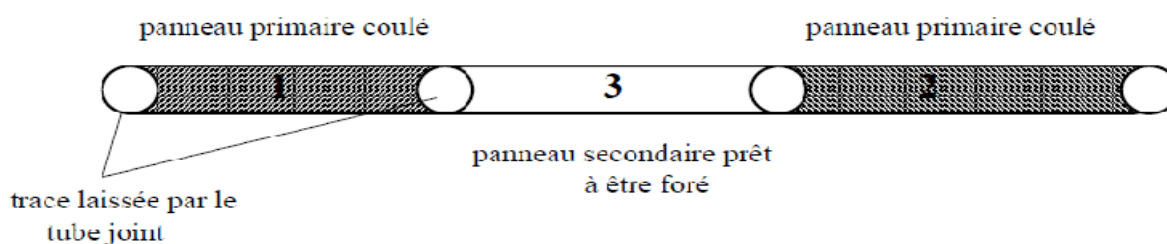


Figure 1.8 Schéma de réalisation du panneau.

Suivant la méthode en continu, un seul tube joint suffit à l'extrémité de chaque panneau foré, tandis que suivant la méthode en alterné, deux tubes joints sont nécessaires dans chaque panneau primaire foré. Le tube joint peut être remplacé par un profilé spécial comportant un dispositif de maintien du joint *water-stop*.

1.3.2.3 Les cages d'armatures :

Les cages d'armatures, pour les parois moulées, sont mises en place dans la tranchée pleine de boue, avant le bétonnage. Elles doivent être suffisamment rigides pour ne pas se déformer durant les phases de manutention. L'espacement des aciers doit être suffisant pour que le béton qui arrive puisse être correctement mis en œuvre (20 cm sont recommandés). D'autre part, les cages sont soumises à une pression importante du béton lors des phases de bétonnage et doivent donc comporter beaucoup d'aciers horizontaux. Compte tenu de la présence du cake de bentonite et des incertitudes sur le positionnement des cages (équipées de cales), l'enrobage de projet des aciers est supérieur à celui en vigueur pour les autres ouvrages en béton. Toutes les réservations diverses, pour les dispositifs d'auscultation des parois ou les passages de tirants, doivent être disposées à l'avance dans les éléments de cages d'armatures. De même, un renforcement de la cage est prévu au niveau des tirants dans le cas des parois ancrées, pour assurer la répartition des efforts d'ancrage. En cas de mise en œuvre de la cage en plusieurs éléments verticaux, la

continuité du ferrailage est assurée généralement par recouvrement des éléments et, dans certains cas particuliers, par ancrage.

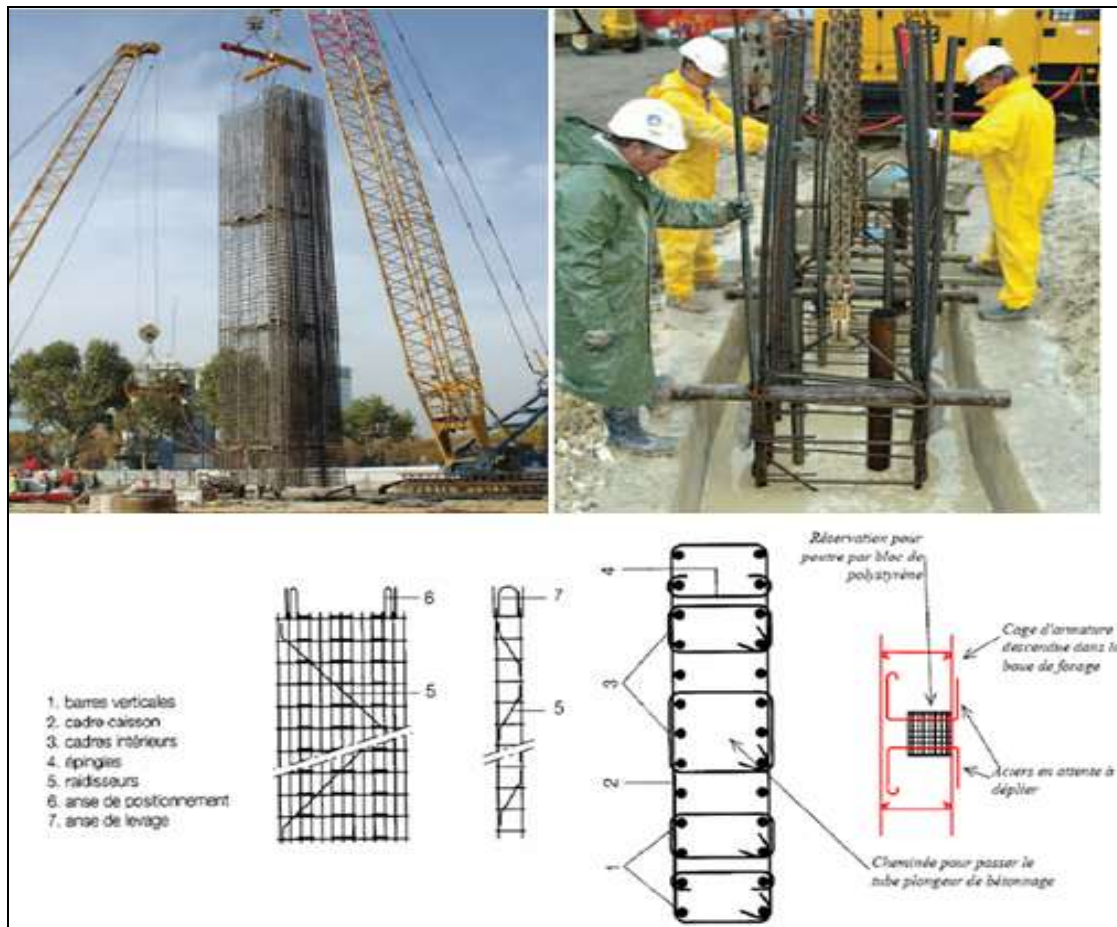


Figure 1.9 : Ferrailage

1.3.2.4 Le béton et le bétonnage :

Le béton de paroi moulée n'est jamais vibré. Le bétonnage s'effectue au tube plongeur, depuis le bas de la fouille jusqu'en haut. C'est une opération délicate :

_ le bétonnage doit s'effectuer régulièrement de façon à ce que la boue et les éléments dont elle s'est chargée soient correctement chassés par le béton,

_ Le tube plongeur doit rester engagé de plusieurs mètres dans le béton frais, trois

mètres étant considéré comme un minimum,

_ Des retardateurs de prise sont incorporés au béton afin que la prise du béton mis en œuvre en premier n'intervienne pas avant la fin du bétonnage de l'ensemble du panneau,

_ le béton doit être suffisamment liquide et non ségrégeable pour occuper correctement tout le volume de la fouille ; il doit cependant être suffisamment compact par simple mise en œuvre gravitaire. Le béton doit faire l'objet d'une étude au niveau de sa formulation et de sa maniabilité.

Le béton doit répondre aux spécifications réglementaires avec des caractéristiques néanmoins légèrement inférieures à celles des ouvrages en élévation. La composition du ciment retenu doit être conditionnée par le niveau d'agressivité du milieu. La protection des armatures contre la corrosion est assurée à la fois par la qualité du béton et par une épaisseur d'enrobage adaptée.

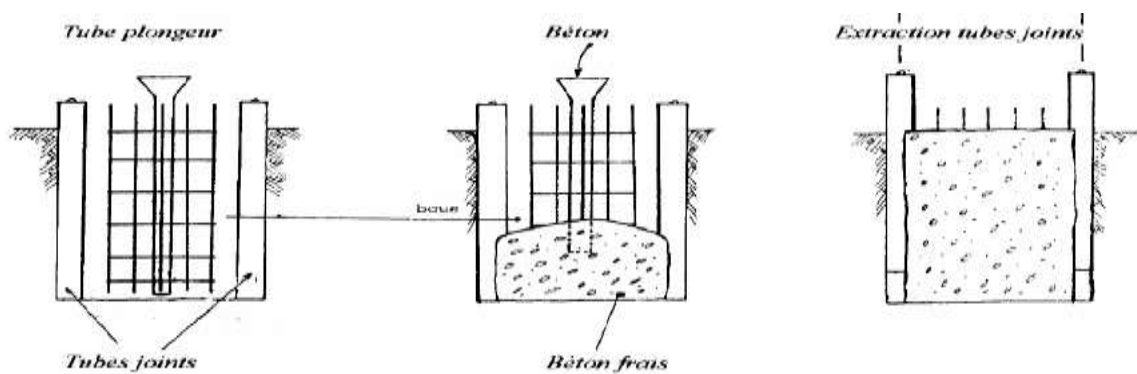


Figure1.10 Bétonnage

1.3.2.5 Les joints entre panneaux :

Les joints sont des points délicats de jonction entre panneaux qui, s'ils n'ont pas dans le cas général de fonction structurelle proprement dite, sont par contre très souvent amenés à assurer une continuité vis-à-vis des aspects hydrauliques. La technologie de coffrage des joints a été sans cesse améliorée ; l'époque de construction d'un ouvrage et la connaissance de l'entreprise qui en a assuré la construction peuvent utilement renseigner sur le type de joint On cite, ci-après,

les principaux types qui ont été ou sont encore utilisés, les techniques actuelles se limitant à deux ou trois procédés.

1.3.2.5.1 Utilisation de tubes joints :

C'est la première technologie employée.

Chaque extrémité libre des panneaux est équipée avant bétonnage d'un tube circulaire de diamètre égal à l'épaisseur de la paroi (Fig1.8). Ce tube sert de coffrage et permet d'obtenir une surface d'arrêt de bétonnage semi-circulaire assurant une bonne reprise avec le panneau suivant. Les tubes sont extraits dès que le béton a atteint une rigidité suffisante.

L'avantage de l'exécution par panneaux successifs est de ne nécessiter qu'un seul tube par panneau ; par contre, elle présente le risque que l'excavation d'un panneau soit exécutée avant durcissement suffisant du panneau précédent et ne dégrade l'extrémité de celui-ci. L'exécution par panneaux alternés nécessite deux tubes par panneau primaire mais permet d'éviter le risque précédent.

1.3.2.5.2 Joints en polystyrène :

Le polystyrène a été utilisé pour donner au joint un profil en V. Ce système, s'il a présenté globalement un avantage en ce qui concerne sa facilité d'extraction, a entraîné plus d'inconvénients liés à la fragilité du matériau, à sa faible densité et à la difficulté de le dégager correctement du fond de joint à la fin du forage du panneau adjacent. Il n'est plus utilisé.

1.3.2.5.3 Tubes à ailettes :

Ce procédé a pour but d'éviter le contournement du tube-joint par le béton. Le tube-joint a alors un diamètre réduit par rapport à l'épaisseur de la paroi et deux ailettes soudées diamétralement opposées constituent une barrière pour le béton. Il n'est plus utilisé.

1.3.2.5.4 Joints à clavettes :

Ce système utilisé en complément du tube-joint consiste à réserver au bétonnage un vide dans le plan du joint entre deux panneaux et à « claveter » le joint en injectant dans ce vide un coulis renforçant l'étanchéité. Le vide est réalisé par un tube de réservation ou par un tube en plastique servant de guide à une perforation ultérieure. Plusieurs variantes existent :

_ clavette simple constituée d'un tube mis en place le long du joint du premier panneau coulé.

_ clavette double constituée de la juxtaposition d'un tube fixé au tube-joint et d'un tube tangent

au précédent mis en place avant le coulage du deuxième panneau,

_ clavette simple ou double complétée par un joint water stop.

1.3.2.5.5 Joints à l'hydro fraise :

Il ne s'agit pas à proprement parler d'une technique de réalisation des joints mais d'un procédé d'exécution des parois moulées assurant à la fois la perforation, l'extraction des matériaux et la réalisation des joints entre panneaux. Le joint est réalisé par fraisage du béton déjà durci à l'extrémité du panneau en place, créant une surface de reprise crénelée assurant en principe un excellent contact avec le béton du panneau adjacent. Cette technique a subi des améliorations qui augmentent les performances obtenues au niveau des joints.

1.3.2.5.6 Coffrage joint :

Il est constitué par une poutre caisson en acier haute résistance, mise en place, une fois l'excavation terminée. Il n'est pas extrait comme un coffrage glissant avant la prise complète du béton mais laissé en place jusqu'à l'excavation du panneau suivant. Il est ensuite décoffré latéralement par l'outil même d'excavation spécialement équipé.

Le joint étant maintenu en place pendant toute l'excavation d'un panneau suivant, il peut être utilisé comme guidage de l'outil d'excavation, apportant ainsi la garantie de la continuité géométrique de la paroi. Le décoffrage latéral permet en outre la mise en place courante dans le joint d'organes d'étanchéité complémentaires tels que des lames (ou bandes) d'arrêt d'eau.

Le coffrage joint comporte à cet effet un caisson auxiliaire rainuré dans lequel peuvent être insérés, sur leur demi-largeur, à frottement doux en jouant sur l'élasticité de leur tube central, une ou plusieurs lames d'arrêt d'eau en élastomère ou en PVC. La demi-largeur libre de ces lames se trouve enrobée par le béton au moment du bétonnage du panneau. Le décoffrage latéral libère la partie des lames protégée par le caisson qui pourra ainsi être enrobée par le béton du panneau suivant. Le dispositif comportant une lame double constitue la configuration normalement utilisée

1.4 Interaction sol-soutènement :

On peut faire des commentaires analogues sur le calcul des ouvrages de soutènement et, de façon générale, sur tous les calculs où du béton ou du métal sont en contact avec le sol. Ainsi, pour les rideaux de palplanches ou parois moulées devant lesquels une excavation est réalisée (figure 1.11.a), coexistent une approche de type calcul des structures et une approche de type mécanique des sols. Pour le calcul des structures, le sol en contact avec l'écran est réduit à un coefficient de réaction k (et, dans certains cas, une pression limite) (figure 1.11.b), ce qui permet de calculer les efforts (effort tranchant, effort normal et moment fléchissant) dans la structure en fonction de k et des coefficients aux limites du problème. Le calcul se réduit alors à

la résolution d'une équation différentielle du quatrième ordre du déplacement $u(z)$, de la forme :

$$\frac{d^4 u}{dz^4} = k \cdot u(z)$$

que l'on résout pour des conditions aux limites adaptées (point fixe imposé par un tirant ou un butons, encastrement à la base ou en tête, ... etc.). Cette fois aussi, la pression de contact, dont on peut choisir l'inclinaison, peut être limitée aux pressions limites de poussée ou de butée, qui résultent de l'analyse du fonctionnement mécanique du massif de sol .[02]

Si l'on aborde le calcul des écrans de soutènement du point de vue du sol, l'écran lui-même est traité comme une condition à la limite, qui se réduit en fait à une hypothèse sur le sens de déplacement de l'écran par rapport au sol (figure 1.11.c). Cette hypothèse permet de définir les parties du sol en état de butée et en état de poussée et, moyennant une hypothèse sur l'inclinaison des forces de contact, de calculer les efforts appliqués à l'écran par le sol.

Ce calcul sert à vérifier l'équilibre général de l'écran, indépendamment de son dimensionnement interne, à déterminer sa fiche et, si nécessaire, à calculer la répartition des efforts dans l'écran.

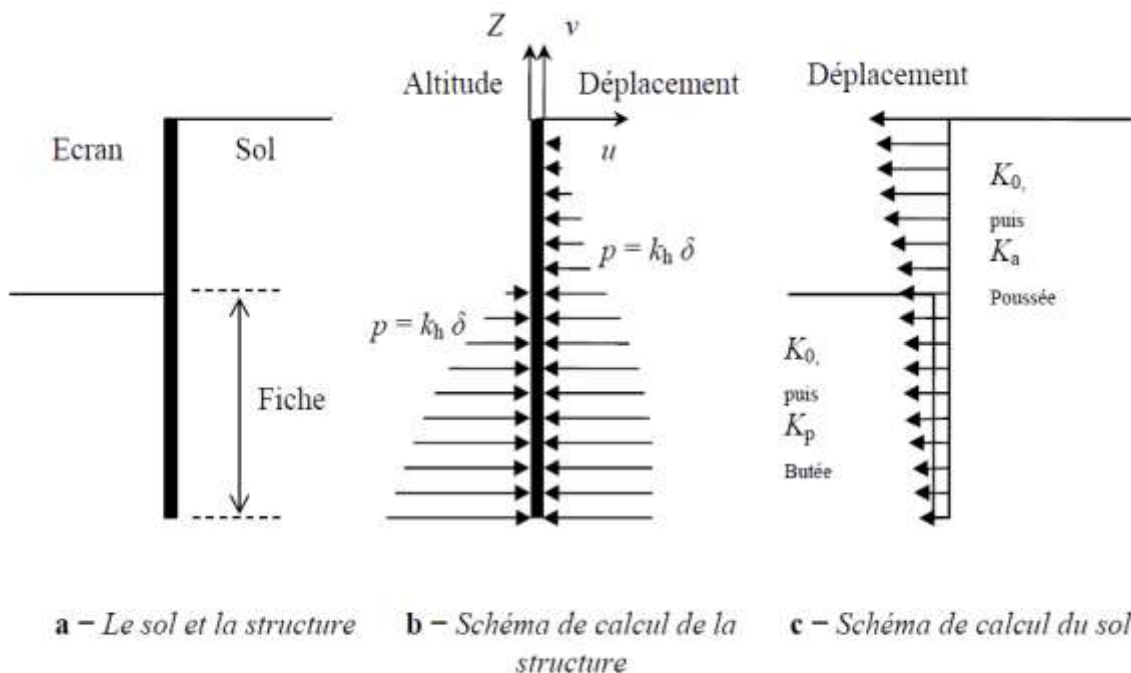


Figure 1.11 Analyse du comportement d'un écran de soutènement

1.4.1 point de vue de la structure et point de vue du sol :

L'idéal serait bien sûr de calculer simultanément les efforts et les déformations dans le sol et dans l'écran, sous les charges de service, en recourant le moins possible aux coefficients de réaction, qui ne sert pas des caractéristiques mécaniques intrinsèques des sols. Néanmoins, cette perspective reste éloignée et les deux approches de l'interaction sol-structure devront encore coexister en respectant les caractéristiques essentielles de chacun des matériaux en contact.

1.4.2 Mouvement du sol autour d'une excavation :

la diminution des contraintes totales pendant une excavation et la mise en place du soutènement entraînent des mouvements du sol vers la fouille (déplacements latéraux généralement confinés par l'ouvrage), des tassements en surface derrière le soutènement, une déformation du soutènement et un soulèvement du fond de fouille.

Les principaux facteurs qui affectent les mouvements d'un sol et de son système de soutènement sont, d'après Clough et Schmidt (1977) :

- la nature et les propriétés des sols ;
- la forme et la profondeur de l'excavation ;
- le type de soutènement, sa rigidité et son degré d'encastrement ;
- la méthode de construction du soutènement, la durée et le phasage des travaux ;
- l'intensité des surcharges d'exploitation et la présence de structures voisines ;
- les conditions météorologiques.

Pratique des éléments finis en géotechnique

2.1 Bref aperçu de la méthode des éléments finis

2.1.1 Introduction :

L'évolution de la technologie amène l'ingénieur à réaliser des projets de plus en plus complexes, coûteux et soumis à des contraintes de sécurité de plus en plus sévères. Pour réaliser ces projets et vu la complexité des méthodes analytiques de la résistance des matériaux, l'ingénieur a recours aux méthodes qui lui permettent de simuler le comportement des systèmes physiques complexes. Conditionnée par les progrès effectués dans le domaine informatique et les acquis des mathématiques dans la théorie de l'énergie, des méthodes de projection et des méthodes d'approximation, la méthode des éléments finis est devenue éventuellement la plus performante des méthodes numériques vu son grand champ d'application où elle est utilisée dans de nombreux secteurs de l'industrie : aérospatiale, nucléaire, génie civil, construction navale, mécanique, technique off-shore, ... etc. **[03]**

En pratique, les logiciels de calcul par éléments finis sont devenus des outils pour l'ingénieur, au même titre que les méthodes de calcul traditionnelles de la mécanique des sols. L'utilisation d'un code de calcul a été rendue très facile par le développement de pré- et de post-processeurs conviviaux et simples d'emploi **[04]**.

La méthode des éléments finis est donc une technique récente à caractère pluridisciplinaire car elle met en œuvre les connaissances de trois disciplines de base :

1. La mécanique des structures : élasticité, résistance des matériaux, dynamique, plasticité, ... etc..
2. L'analyse numérique : méthodes d'approximations, résolution des systèmes linéaires, des problèmes aux valeurs propres, ... etc..
3. L'informatique appliquée : techniques de développement et de maintenance de grands logiciels.

2.1.2 Bref historique :

L'histoire de la MEF a commencé en 1819, quand Navier définit une méthode d'étude des systèmes hyperstatiques basés sur l'application des conditions d'équilibre et de compatibilité, puis Maxwell en 1864 et Castigliano en 1878 établissent d'une façon complète les théorèmes de l'énergie. Au début du 20^{ème} siècle, des résultats fondamentaux dans le domaine des méthodes d'approximation ont été établis en effectuant une discrétisation spatiale du domaine tout en utilisant les méthodes d'approximation variationnelles. En 1955, Argyris présente une approche unifiée des méthodes des déplacements et des forces, l'année suivante Turner et Clough publient une présentation systématique de la méthode des déplacements. Ces deux publications sont particulièrement importantes et représentent véritablement le début de la MEF comme technique de calcul des structures complexes.

2.1.3 Concepts de base :

La MEF consiste à remplacer la structure physique à étudier par un nombre finis d'éléments ou de composants discrets qui représentent un maillage. Ces éléments sont liés entre eux par un nombre de points appelés nœuds. On considère d'abord le comportement de chaque partie indépendante, puis on assemble ces parties de telle sorte qu'on assure l'équilibre des forces et la compatibilité des déplacements réel de la structure en tant qu'objet continu.

La MEF est extrêmement puissante puisqu'elle permet d'étudier correctement des structures continues ayant des propriétés géométriques et des conditions de charges compliquées. Elle nécessite un grand nombre de calculs qui, cause de leur nature répétitive, s'adaptent parfaitement à la programmation numérique.

2.1.4 Calculs par la MEF :

La méthode aux éléments finis est théoriquement, la plus satisfaisante puisqu'elle permet la modélisation des problèmes géotechniques complexes.

➤ **Elle nécessite :**

- La définition de la géométrie du problème, pour que les frontières du calcul n'influencent pas sur les résultats.
- Le choix d'une loi de comportement du sol, de type Mohr-Coulomb, Duncan, Cam-Clay, ... etc..
- Les caractéristiques des ouvrages et des éléments d'interface pour introduire l'interaction sol-structures et les conditions hydrauliques.
- Les caractéristiques des butons ou des tirants d'ancrage.
- L'état initial des contraintes et des pressions interstitielles.

➤ **Elle permet :**

- d'effectuer les calculs d'écoulement ;
- de simuler toutes les phases de travaux ;
- de prendre en compte les variations des caractéristiques : des ouvrages, des couches de terrain et des lits de butons ou de tirants ;
- de calculer un coefficient de sécurité.

➤ **Les sorties fournissent pour les ouvrages sont :**

- les déplacements des ouvrages ;
- les sollicitations internes des ouvrages ;
- les efforts dans les butons ou tirants.

Et pour le sol :

- les déplacements du sol ;
- les déformations du sol ;

- les contraintes totales et effectives dans le sol ;
- les pressions interstitielles ;
- de calculer un coefficient de sécurité.

Et donc la possibilité d'étudier l'interaction de l'exécution d'un écran sur des ouvrages existants.

➤ **Les principaux logiciels utilisés en France, sont :**

1. **CESAR** (LCPC) : Logiciel 2D ou 3D, spécialement utilisé pour les tunnels.
2. **PLAXIS** (logiciel hollandais développé par l'équipe du Pr. Vermeer) : Logiciel 2D dédié à la géotechnique.

Pour notre problème, on utilise PLAXIS.

2.2 Formulation d'interaction par la MEF :

Nous présentons ci-dessous un bref rappel de l'écriture de la MEF, sous sa forme la plus simple, lors d'une étape de chargement statique non linéaire ; au demeurant, cette présentation est extrêmement classique.

2.2.1 -Position et formulation locale

On considère deux corps en contact, un corps A occupant un domaine Ω_A et de frontière Γ_A et un corps B occupant un domaine Ω_B et de frontière Γ_B . La surface de contact entre les deux corps est Γ_i (figure 2.1).[05]

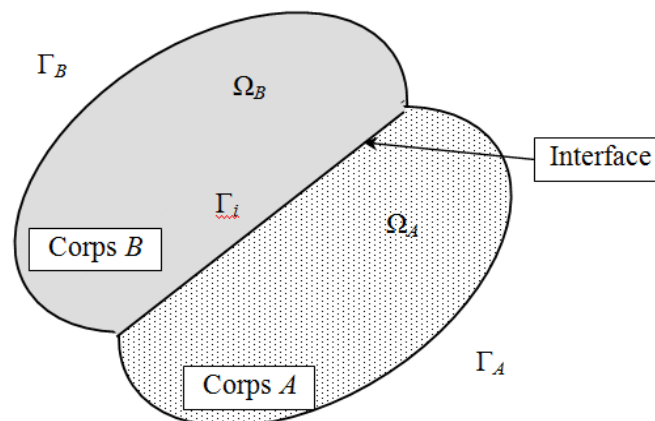


Figure 2.1 – Système de deux corps en contact.

En général, le système des deux corps peut être soumis aux sollicitations et aux conditions suivantes :

- force de volume f_i dans : $\Omega = \Omega_A \cup \Omega_B$;
- force de surface T_i le long de : $\Gamma_T = \Gamma_T^A \cup \Gamma_T^B$;
- déplacement imposé $U_i = \overline{U}_i$ sur : $\Gamma_U = \Gamma_U^A \cup \Gamma_U^B$;
- conditions de contact sur Γ_i ;

avec : $\Gamma_U \cup \Gamma_T = \Gamma$ et $\Gamma_U \cap \Gamma_T = \Phi$.

La formulation du problème par la méthode des éléments finis type déplacement consiste à former les équations régissant ce problème, à partir des équations locales. Celles-ci sont données par : les équations d'équilibre, les équations de la cinématiques, les conditions aux limites et les conditions sur l'interface.

2.2.2- Formulation variationnelle :

L'application du théorème des travaux virtuels implique que pour tout champ de déplacements virtuel, la somme des travaux des forces internes, des forces extérieures et des forces de liaison est égales à zéro.

On considère l'espace V_t des champs de déplacements cinématiquement admissibles. L'application du principe des travaux virtuels donne :

$$\forall V \in V_t : W_e(V) + W_i(V) + W_l(V) = 0 ; \quad (2.1)$$

avec :

W_e : travail des forces extérieures ;

W_i : travail des forces intérieures ;

W_l : travail des forces de liaison.

En remplaçant W_e , W_i et W_l par leurs expressions, nous obtenons l'équation suivante :

$$\int_{\Omega} \varepsilon_{ij}(V) \sigma_{ij} d\Omega - \int_{\Omega} f_i V_i d\Omega - \int_{\Gamma_T} T_i V_i d\Gamma + \int_{\Gamma_i} \varepsilon^i(V) \sigma^i d\Gamma_i = 0 ; \quad (2.2)$$

où :

ε^i : désigne les déformations ou déplacements relatifs ;

σ^i : étant les contraintes ou forces de liaison à l'interface.

2.2.3 - Discrétisation du domaine Ω

On effectue une division du domaine Ω en petits éléments Ω^e , appelés éléments de base, et par conséquent l'interface est divisée en éléments Γ_i^e appelés éléments d'interface (figure 2.2).

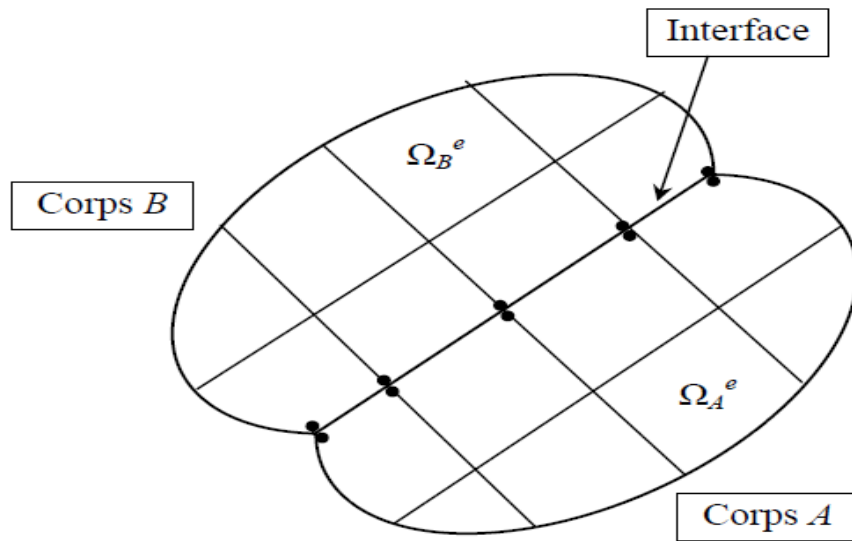


Figure 2.2 Discrétisation du domaine Ω et de l'interface Γ_i .

Après la discrétisation du domaine Ω et l'approximation du déplacement en un point de Ω^e à l'aide des déplacements des points nodaux du même élément, on aboutit à l'équation suivante :

$$\int_{\Omega} B^T \sigma d\Omega - \int_{\Omega} N^T f d\Omega - \int_{\Gamma_T} N^T T d\Gamma + \int_{\Gamma_i} D^T \sigma^i d\Gamma_i = 0 ; \quad (2.3)$$

où :

B : est la matrice de déformation pour les éléments massifs ;

D : est la matrice de déformation des éléments d'interface ;

N : désigne la matrice des forces d'interpolation.

Après cette discrétisation géométrique, nous proposons de faire intervenir les comportements des corps solides et de l'interface dans la formulation.

De façon générale, les lois de comportement des matériaux constituant les corps et de l'interface s'écrivent sous forme incrémentale de la manière suivante :

$$\left. \begin{array}{l} \dot{\sigma} = C \dot{\varepsilon} \quad \text{pour les corps ;} \\ \dot{\sigma}^i = C^i \dot{\varepsilon}^i \quad \text{pour l'interface.} \end{array} \right\} ; \quad (2.4)$$

où : C et C^i représentent respectivement les matrices de comportement des éléments volumiques et des éléments d'interface.

Etant donné la forme incrémentale des lois de comportement de l'interface et des corps solides (cas d'un sol élastoplastique, par exemple), le système d'équations (2.3 et 2.4) régissant l'interaction entre matériaux solides est non linéaire. La matrice incrémentale de résolution des systèmes non linéaires est la plus appropriée à ce type de problèmes.

La matrice incrémentale consiste à discrétiser les sollicitations en petits incréments. Ainsi, à l'incrément k , les sollicitations s'écrivent :

$$\left. \begin{aligned} f^k &= f^{k-1} + \Delta f^k && \text{Dans } \Omega ; \\ T^k &= T^{k-1} + \Delta T^k && \text{Sur } \Gamma_T ; \\ \bar{U}^k &= \bar{U}^{k-1} + \Delta \bar{U}^k && \text{Sur } \Gamma_U. \end{aligned} \right\} . \quad (2.5)$$

Dans ce cas, les déplacements, les contraintes et les déformations à la fin du $k^{\text{ième}}$ incrément d'expriment par :

$$\left\{ \begin{aligned} U^k &= U^{k-1} + \Delta U^k \\ \sigma^k &= \sigma^{k-1} + \Delta \sigma^k \\ \varepsilon^k &= \varepsilon^{k-1} + \Delta \varepsilon^k \end{aligned} \right. \text{ pour les massifs ;} \quad (2.6)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma^{i^k} &= \sigma^{i^{k-1}} + \Delta \sigma^{i^k} \\ \varepsilon^{i^k} &= \varepsilon^{i^{k-1}} + \Delta \varepsilon^{i^k} \end{aligned} \right. \text{ pour l'interface.}$$

En reportant les expressions (2.5) et (2.6) dans l'équation (2.3), on obtient :

$$\int_{\Omega} B^T \Delta \sigma^k d\Omega - \int_{\Omega} N^T \Delta f^k d\Omega - \int_{\Gamma_T} N^T \Delta T^k d\Gamma + \int_{\Gamma_i} D^T \Delta \sigma^{i^k} d\Gamma_i + FR = 0 ; \quad (2.7)$$

avec :

$$FR = \int_{\Omega} B^T \sigma^{k-1} d\Omega - \int_{\Omega} N^T f^{k-1} d\Omega - \int_{\Gamma_T} N^T T^{k-1} d\Gamma + \int_{\Gamma_i} D^T \sigma^{i^{k-1}} d\Gamma_i .$$

FR : représente les forces non équilibrées des incréments précédents.

Les lois de comportement des matériaux constituant les corps et de l'interface à l'incrément k , s'expriment par :

$$\left. \begin{aligned} \Delta \sigma^k &= CB \Delta U^k \\ \Delta \sigma^{i^k} &= C_i D \Delta U^k \end{aligned} \right\} ; \quad (2.8)$$

En remplaçant $\Delta \sigma^i$ et $\Delta \sigma^{i^k}$ par leur expression dans la relation (2.7), on aboutit à l'équation suivante :

$$R \Delta U^k = \Delta F^k ; \quad (2.9)$$

avec :

$$R = \int_{\Omega} B^T C B d\Omega + \int_{\Gamma_i} D^T C_i d\Gamma_i;$$

$$\Delta F^k = - \int_{\Omega} N^T \Delta f^k d\Omega - \int_{\Gamma_r} N^T \Delta T^k d\Gamma + FR.$$

R : étant la matrice de rigidité globale du système y compris l'interface.

A l'incrément de charge k, le problème est régi donc par le système (2.9) et par le comportement des milieux continus et de l'interface.

2.3 Présentation de PLAXIS :

L'analyse de projets géotechniques est possible grâce à de nombreux codes éléments finis. L'ingénieur ayant de l'expérience en ce domaine sait que le poids des hypothèses permettent le passage de la réalité au modèle est difficile à évaluer. Il sait que le jargon éléments finis est parfois rebutant-il souhaiterait ne pas avoir à intervenir sur la numérotation des noeuds, des éléments, sur certains choix réservés au numéricien. Il voudrait disposer du code sur le PC gérant sa bureautique et sa technique quotidiennes, afin de faire une étude paramétrique des problèmes délicats. Il exige avant tout que ses journées ne soient pas encombrées par de laborieuses entrées de données et interprétations de fichiers .[06]

2.3.1 Le code éléments finis PLAXIS :

Conçu par des géotechniciens numériciens, le code éléments finis PLAXIS représente certainement un optimum actuel sur les plans scientifique et pratique en l'analyse pseudo-statique 2D. Scientifiquement, c'est un outil d'analyse non linéaire en élasto-plasticité non standard (5 paramètres), avec prise en compte des pressions interstitielles (et même consolidation linéaire), doté de méthodes de résolution et d'algorithmes robustes, éprouvés, ainsi que de procédures de choix automatique évitant des choix délicats à l'opérateur peu averti. Bien que très fiable sur le plan numérique, le code fait appel à des éléments de haute précision (triangles à 15 noeuds), ainsi qu'à des processus de pilotage de résolution récents (méthode de longueur d'arc). Du point de vue pratique, le système de menus arborescents à l'écran rend l'utilisation souple et agréable, car l'opérateur ne s'encombre pas l'esprit outre mesure. Le recours aux manuels devenant rare, ceux-ci sont de volumes réduits, faciles à consulter. L'ensemble des options par défaut (condition aux limites) rend la mise en données aisée et rapide. Enfin, les options simplifiées (initiation des contraintes, pressions interstitielles) permettent d'aller droit au but (prévoir le comportement d'un ouvrage), quitte à réaliser ultérieurement, avec le même code et les mêmes données, un calcul affiné .[06].

2.3.2 Options par défaut et solutions approchées [Annexe] :

Le système d'options par défaut et de solutions approchées spécifiques, qui est un des fers de lance de l'outil de projet pour la géotechnique, est destiné à faire gagner du temps à l'opérateur, à lui éviter de devoir faire des choix tracassant, et enfin à améliorer la convivialité du logiciel. Ce système est inséparable du traitement à partir d'un menu arborescent. Chaque

branche du menu est évidemment figée, car elle réalise une tâche précise, bien définie, mais la diversité des branches en fait globalement un outil extrêmement souple.

Les options par défaut commencent dès le maillage : L'opérateur peut bien entendu spécifier un maillage très détaillé, mais si seules les grandes lignes de celui-ci importe, le détail des éléments, agencé de manière optimale du point de vue numérique, sera entièrement généré par le logiciel à partir d'un petit nombre de noeuds-clé, avec contrôle permanent à l'écran. Le meilleur est d'ailleurs en cours de refonte en vue d'accroître son efficacité.

De même en ce qui concerne les conditions aux limites en déplacements : Si celles-ci sont complexes, l'ingénieur devra en spécifier les subtilités d'une manière précise, face de bloc par face de bloc. Par contre, si elles ont un caractère standard (vecteur déplacement nul à la base du domaine étudié et vecteur déplacement horizontal nul sur ses faces latérales), l'application peut être réalisée automatiquement (par défaut) à partir du menu avec contrôle immédiat du résultat à l'écran.

L'application des contraintes initiales dues au poids des terres peut être réalisée de manière exacte par activation du multiplicateur de chargement relatif au poids propre. Par contre, si comme bien souvent en géotechnique on connaît ou on sait estimer un état K_0 donné, celui-ci peut être spécifié directement. Dans ce cas, le massif est souvent en léger déséquilibre (incompatibilité entre K_0 et les autres caractéristiques mécaniques). Le menu permet alors, par un changement fictif nul, de rééquilibrer le massif, puis de réinitialiser à zéro le champ de déplacement de manière à prendre comme nouvelle origine l'état du matériau après application de la gravité. L'option K_0 est particulièrement intéressante (et réaliste) dans le cas d'un modèle hétérogène de surface libre presque horizontale (paroi moulée dans un sol mou par exemple).

Les pressions interstitielles ont été l'objet d'un soin particulier dans PLAXIS : Pour qui souhaite faire un calcul précis du champ de pressions interstitielles en régimes permanent ou transitoire, c'est possible grâce au module d'écoulements en milieu poreux. Mais bien sûr, cette opération demande du temps (d'opérateur et de machine). Si la nappe phréatique n'est pas trop éloignée de l'horizontale, dans ses états initial et final, on sait que la pression diffère peu de la pression hydrostatique ; si l'on adopte ce champ de pression approchée, les calculs deviennent très simples puisqu'il s'agit seulement de manier les variations de la poussée d'Archimède ; PLAXIS offre cette possibilité qui est souvent très appréciable.

La conduite des calculs non linéaires constitue un autre exemple de la souplesse d'utilisation que procure ce logiciel : L'opérateur peut évidemment faire lui-même ses choix de taille d'étape de chargement, de nombre d'étapes, de rigidité d'interface, de méthode de résolution, ... etc. ; s'il ne désire pas assumer ces choix, le logiciel peut les décider à sa place, compte tenu de l'expérience des numériciens en la matière. Pour les calculs de consolidation, réalisés en différences finies explicites sur le temps, le choix du pas de temps peut également être décidé par l'utilisateur, ou bien calculé dans l'option par défaut, selon les critères numériques connus.

Le coefficient de sécurité est une notation un peu magique en géotechnique, puisqu'il résume en une seule information une quantité considérable de données. L'approche classique

évalue généralement ce nombre selon la théorie de l'équilibre limite, supposant une réduction proportionnelle généralisée de la résistance mécanique des matériaux impliqués, ce qui ne constitue manifestement pas un scénario réel de rupture. C'est la même approche, adaptée aux éléments finis élasto-plastiques, qui préside à l'évaluation du coefficient de sécurité dans PLAXIS. Le critère de rupture est ici qualitatif, et laissé à l'appréciation de l'observateur ; en tout état de cause, il est fondé sur le niveau de déplacement d'un point de contrôle lié à l'ouvrage étudié. Le champ de déplacement obtenu est évidemment tout à fait fictif.

Un calcul par élément finis fournit une masse imposante de résultats : Des résultats directement utiles au projeteur : déplacements, contraintes, pressions interstitielles à un stade donné du chargement, et des résultats plus mathématiques concernant le déroulement du processus de calcul proprement dit. L'ensemble de ces résultats est accessible, selon que l'on est intéressé par l'un ou l'autre aspect ; c'est également un système de menu arborescent qui permet de sélectionner les informations souhaitées.

2.4 Les modèles de comportement utilisés dans PLAXIS

2.4.1 Introduction :

Les modèles de comportement de sols sont très nombreux : depuis le modèle élasto-plastique de Mohr-Coulomb jusqu'aux lois de comportement les plus sophistiquées permettant de décrire presque tous les aspects du comportement élasto-visco-plastique des sols, aussi bien sous sollicitation monotone que cyclique. Ces modèles ont été développés dans le but d'être intégrés dans des calculs par éléments finis. Dans ce schéma, la modélisation par élément finis permet de résoudre le problème aux limites en tenant compte, par une loi de comportement réaliste, du comportement réel du sol. Deux difficultés majeures ont empêché la réalisation complète de ce schéma : d'une part les lois de comportement qui décrivent bien le comportement des sols sont complexes et demande, pour la détermination des paramètres qu'elles contiennent, des études spécifiques lourdes sortant du cadre des projets d'ingénierie même complexe. La validation des lois de comportement a fait l'objet, dans les années 80 de plusieurs ateliers pour comparer les réponses des différents modèles sur différents chemins de sollicitation. La seconde difficulté a été l'intégration de ces lois de comportement dans des codes par éléments finis, bi ou tridimensionnels. Peu de codes sont opérationnels actuellement, avec des lois sophistiquées. Le coût de ces calculs est généralement important .[06]

La démarche suivie dans le développement du code PLAXIS est différente. Un des objectifs de PLAXIS est de fournir à l'utilisateur un code d'éléments finis qui soit à la fois robuste et convivial, permettant de traiter des problèmes géotechniques réels, dans un délais raisonnable en utilisant des modèles de comportement de sols dont les paramètres puissent être déterminés à partir d'une étude géotechnique normale. En ce sens, PLAXIS peut apparaître comme une règle à calcul de l'ingénieur géotechnicien, ou le micro-ordinateur a remplacé la règle. C'est pourquoi les différents modèles de comportement utilisés dans PLAXIS sont des modèles qui peuvent apparaître simple, voire simplistes, mais qui sont efficaces quand ils sont utilisés dans des cas adaptés.

Pour traiter un problème de soutènement (paroi moulée, palplanche, ... etc.), il est tout à fait adapté de considérer le sol comme élastoplastique et le modèle de Mohr-Coulomb sera bien adapté dans ce cas ; on rejoint ici le calcul des soutènements par les méthodes élastoplastiques de coefficient de raideur. Mais pour traiter d'une construction de remblai sur sols mous, avec chargement par étapes et consolidation, il faut tenir compte de l'écroutissement. Le matériau se consolide et il est plus adapté d'utiliser le Soft Soil Model qui prend en compte cette évolution du matériau. Pour un calcul d'écoulement, il suffit de prendre un matériau élastique, mais on peut avoir à coupler écoulement et déformation ; dans ce cas un modèle élastoplastique peut être justifié.

Les règles d'or dans le domaine de la simulation du comportement d'un ouvrage sont :

- quel est le comportement principal à modéliser ?
- utiliser un modèle qui décrive ce comportement ;
- interpréter les résultats, notamment en fonction des paramètres de la modélisation.

En ce sens, la modélisation numérique ne fournit sous une autre forme que les données du problème posé.

2.4.2 Contraintes totales, effectives et pressions interstitielles :

Le comportement des sols est régi par les propriétés du squelette ; il est donc nécessaire d'utiliser des contraintes effectives et d'écrire des lois de comportement en contraintes effectives. La pression interstitielle générée dans les ouvrages est une conséquence de la non variation de volume ; celle ci est elle même dépendante de la perméabilité du sol. Un sable peut être non drainé in situ sous des sollicitations sismiques (rapides) de même qu'une argile est toujours non drainée à court terme. Les variations de volumes empêchées par les perméabilités créent des pressions interstitielles ; en fait, celles ci dépendent des variations de volume ; en élasticité, si les grains de sols sont incompressibles, on démontre que :

$$\Delta u_w = \frac{K_w}{n} \Delta \varepsilon_v ; \quad (2.10)$$

où Δu_w est la surpression interstitielle, n la porosité, K_w le module volumique de l'eau et $\Delta \varepsilon_v$ est un incrément de déformation volumique.

Des calculs en contraintes totales sont possibles. Ils permettent par exemple, des calculs de tassements et de stabilité de remblai après construction. Ces calculs ignorent la génération de pressions interstitielles. Ils présentent l'avantage d'être simples et de se recalculer par rapport à des calculs plus classiques de stabilité à court terme.

Leur inconvénient majeur est d'ignorer les pressions interstitielles, quand on connaît leur rôle majeur sur la stabilité de remblai .[06]

2.4.3 Comportement élastoplastique :

Le comportement élastoplastique peut être représenté par un modèle monodimensionnel, en série un ressort de raideur K , pour symboliser l'élasticité du matériau, à un patin de seuil S_0 (figure 2.3).

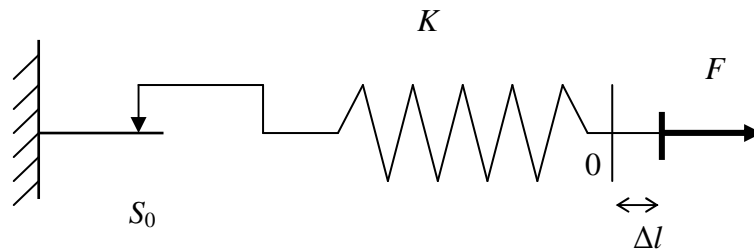


Figure 2.3 Modèle monodimensionnel du comportement élastoplastique.

La courbe effort-déplacement ou contrainte-déformation que l'on trouve est présentée sur la figure 2.4.

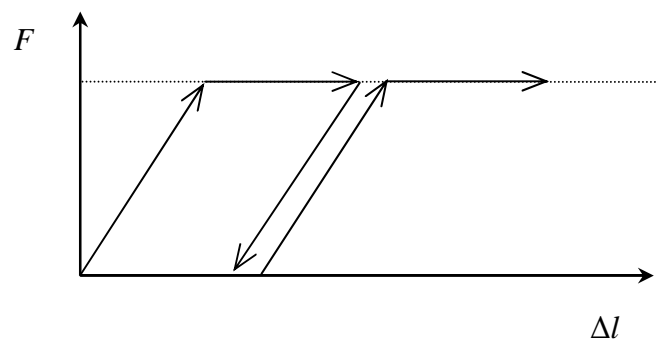


Figure 2.4 Représentation du comportement élastique parfaitement plastique.

Lors d'une décharge, le comportement est élastique et réversible. La longueur de la déformation plastique est a priori indéterminée.

Le type de comportement représenté par les figures 2.3 et 2.4 est un comportement élastique-plastique sans écrouissage. La figure 2.5 représente un comportement élastique-plastique avec écrouissage .[07]

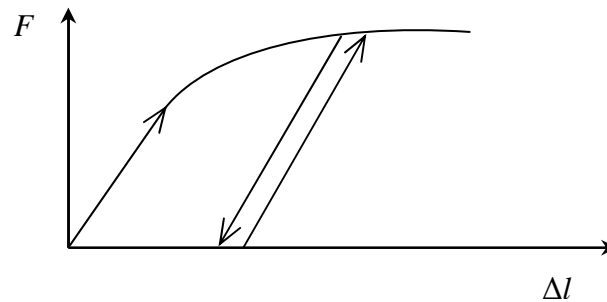


Figure 2.5 Représentation du comportement élastoplastique avec écrouissage.

2.4.4 Modèle élastique linéaire :

Le modèle élastique linéaire utilisé dans PLAXIS est classique. Les tableaux de rentrée des données demandent le module de cisaillement G et le coefficient de Poisson ν . l'avantage de G est d'être indépendant des conditions de drainage du matériau ($G_u = G'$), ce qui n'est pas le cas des modules d'Young : le module d'Young non drainé est supérieur au module d'Young drainé. Il aurait pu sembler logique, si G est utilisé comme paramètre élastique, d'utiliser K comme second paramètre. D'une part K_u est infini (correspondant à $\nu_u = 0.5$) et il est moins courant d'emploi. G est en fait le module mesuré dans les essais pressiométriques .[08]

La relation entre le module d'Young E et les autres modules sont données par les équations :

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} ; \quad (2.11)$$

$$K = \frac{E}{3(1 + \nu)} ; \quad (2.12)$$

$$E_{oed} = \frac{(1 - \nu)E}{(1 - 2\nu)(1 + \nu)} . \quad (2.13)$$

Le modèle élastique linéaire de PLAXIS peut être employé surtout pour modéliser les éléments de structures béton ou métal en interaction avec le sol. Il peut aussi être intéressant pour certains problèmes de mécanique des roches.

Les paramètres de ce modèle sont représentés sur la (figure 2.6) :

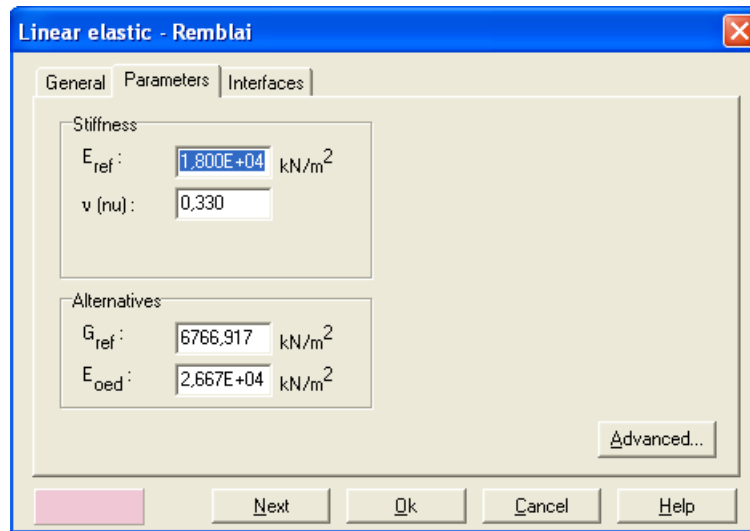


Figure 2.6 Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire.

Et les paramètres avancés sur la figure 2.7 :

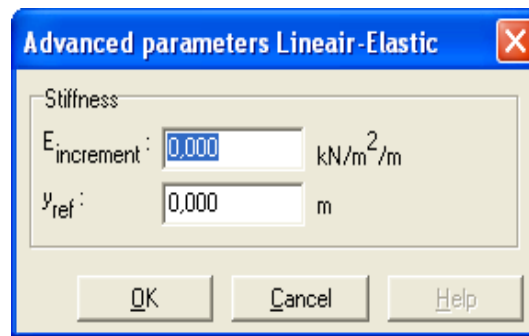


Figure 2.7 Fenêtre des paramètres avancés du modèle élastique linéaire.

Les paramètres avancés sont reliés par l'équation :

$$E_{actual} = E_{ref} + (y_{ref} - y)E_{increment} \quad \text{avec} \quad y < y_{ref} \quad (2.14)$$

$E_{increment}$: Augmentation de la rigidité [kN/m²/m]

y_{ref} : Unité de profondeur [m]

2.4.5 Modèle de Mohr-Coulomb :

Le comportement de Mohr-Coulomb présente un comportement élastique parfaitement plastique sans écrouissage. Il a une grande utilisation dans la géotechnique vu les résultats obtenus dans les calculs.

Dans le plan de Mohr, la droite intrinsèque est représentée par :

$$\tau = \sigma_n \tan\phi + c ; \quad (2.15)$$

où σ_n et τ sont respectivement les contraintes normales et de cisaillement, et c et φ respectivement la cohésion et l'angle de frottement du matériau (figure 2.8).

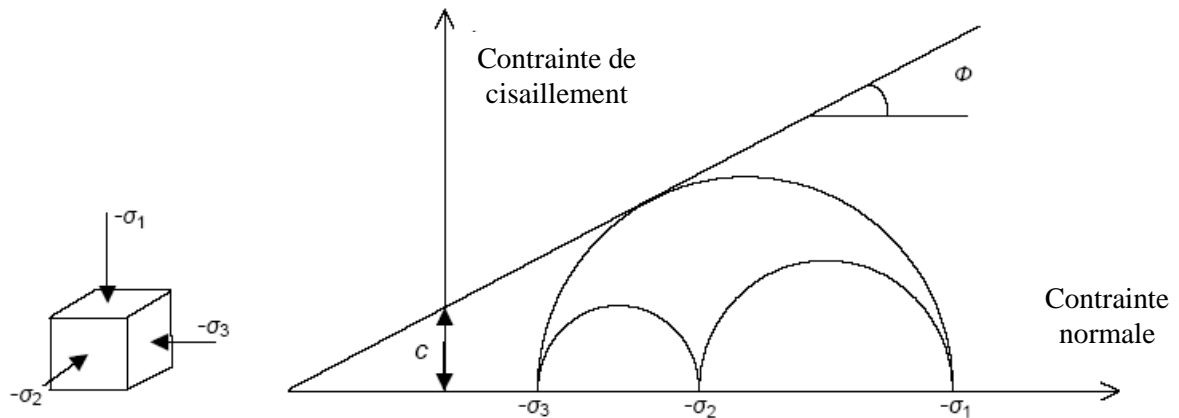


Figure 2.8 Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb.

Le critère de Coulomb à trois dimensions suppose que la contrainte intermédiaire n'intervient pas. La forme du critère est celle d'une pyramide irrégulière construite autour de la trisectrice (figure 2.9) sur l'hexagone irrégulier de Mohr-Coulomb.

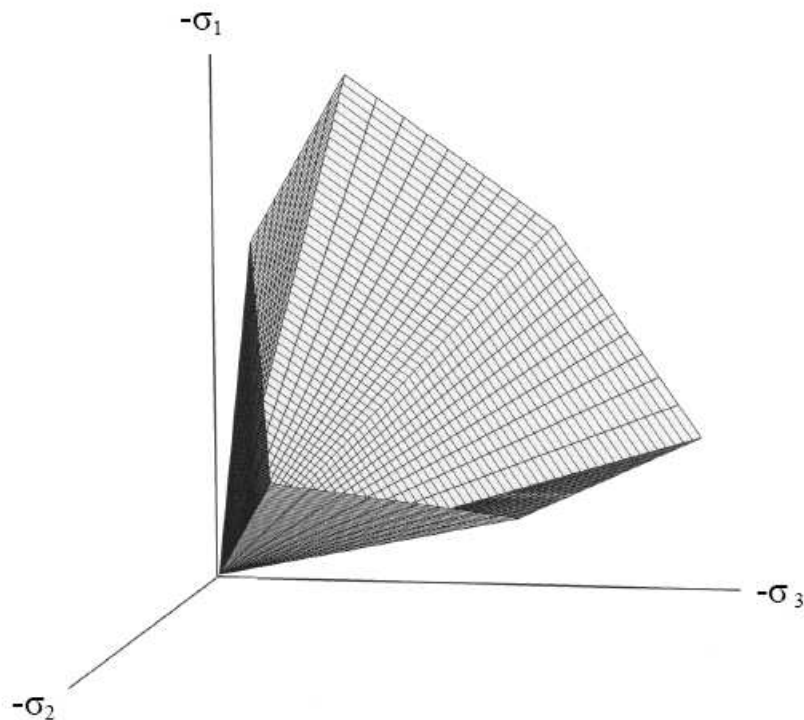


Figure 2.9 Pyramide de Mohr-Coulomb tracée pour $c=0$.

Le modèle demande la détermination de cinq paramètres (figure 2.10). Les deux premiers sont E et ν (paramètres d'élasticité). Les deux autres sont c et φ , respectivement. Ce sont des paramètres classiques de la géotechnique, certes souvent fournis par des essais de laboratoires, mais nécessaires à des calculs de déformation ou de stabilité.

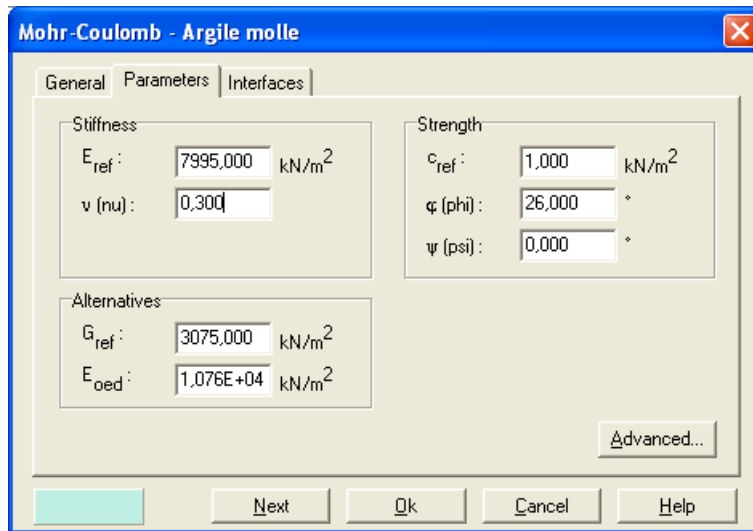


Figure 2.10 Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb.

a) Module d'Young :

Le choix d'un module de déformation est un des problèmes les plus difficiles en géotechnique. Le module de déformation varie en fonction de la déformation et en fonction de la contrainte moyenne. Dans le modèle de Mohr-Coulomb, le module est constant. Il paraît peu réaliste de considérer un module tangent à l'origine (ce qui correspondait au G_{max} mesuré dans des essais dynamiques ou en très faibles déformations). Ce module nécessite des essais spéciaux. Il est conseillé de prendre un module moyen, par exemple celui correspondant à un niveau de 50 % du déviateur de rupture (figure 2.11).

L'utilisateur doit rester conscient de l'importance du choix du module qu'il prendra en compte. Il n'y a là rien d'étonnant et la même question se retrouve par exemple dans tout calcul classique de fondation, par exemple.

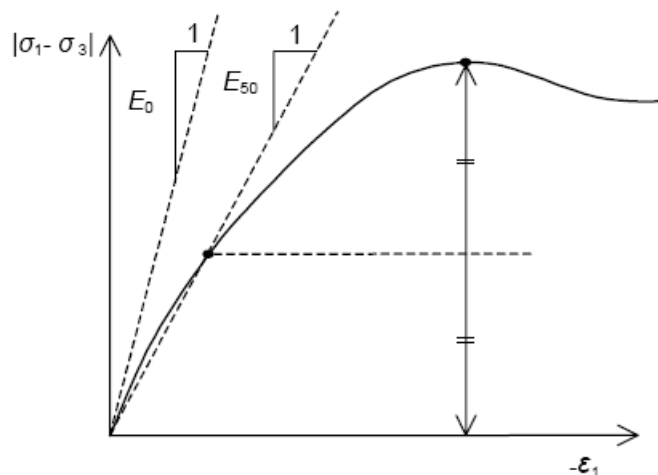


Figure 2.11 Définition du module à 50 % de la rupture.

Dans la boîte de dialogue des paramètres avancés, on peut aussi rentrer un gradient donnant la variation du module avec la profondeur.

b) Coefficient de Poisson :

On conseille une valeur de 0,2 à 0,4 pour le coefficient de Poisson. Celle-ci est réaliste pour l'application du poids propre (procédure K_0 ou chargement gravitaires). Pour certains problèmes, notamment en décharge, on peut utiliser des valeurs plus faibles. Pour des sols incompressibles, le coefficient de Poisson s'approche de 0,5 sans que cette valeur soit utilisable.

c) Angle de frottement :

PLAXIS ne prend pas en compte une variation d'angle de frottement avec la contrainte moyenne. L'angle de frottement à introduire est soit l'angle de frottement de pic soit l'angle de frottement de palier. On attire l'attention sur le fait que des angles de frottement supérieurs à 35° peuvent considérablement allonger les temps de calcul. Il peut être avisé de commencer des calculs avec des valeurs raisonnables d'angle de frottement, quitte à les augmenter dans la suite. Cette valeur de 35° est compatible avec les angles de frottement φ_{cv} (à volume constant, au palier).

En peut déterminer l'angle de frottement à partir de la courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb (figure 2.8).

d) Cohésion :

Il peut être utile d'attribuer, même à des matériaux purement frottants, une très faible cohésion (0,2 à 1 kPa) pour des questions numériques. Pour les analyses en non drainé avec $\varphi_u = 0$, PLAXIS offre l'option de faire varier la cohésion non drainée avec la profondeur : ceci correspond à la croissance linéaire de la cohésion en fonction de la profondeur observée dans des profils au scissomètre ou en résistance de pointe de pénétromètre. Cette option est réalisée avec le paramètre c-depth. Une valeur nulle donne une cohésion constante. Les unités doivent être homogènes avec ce qui a été choisi dans le problèmes (typiquement en kPa/m).

e) Angle de dilatance :

Le dernier paramètre est l'angle de dilatance noté ψ ; c'est le paramètre le moins courant. Il peut cependant être facilement évalué par la règle (grossière) suivante :

$$\psi = \varphi - 30^\circ \quad \text{pour } \varphi > 30^\circ.$$

$$\psi = 0^\circ \quad \text{pour } \varphi < 30^\circ.$$

Le cas où $\psi < 0^\circ$ correspond à des sables très lâches (état souvent dit métastable, ou liquéfaction statique). La valeur $\psi = 0^\circ$ correspond à un matériau élastique parfaitement plastique, ou il n'y a donc pas de dilatance lorsque le matériau atteint la plasticité. C'est souvent

le cas pour les argiles ou pour les sables de densité faibles ou moyenne sous contraintes assez fortes.

f) Les contraintes de traction :

La pyramide de Mohr-Coulomb permet des contraintes de traction (figure 2.9). Celles-ci sont souvent peu réalistes pour les sols et il est possible de couper ces contraintes de traction (tension cut-off) ou de les diminuer (Tensile strength).

g) Les paramètres avancés :

Pour tenir compte des variations avec la profondeur, on utilise les paramètres avancés (figure 2.12).

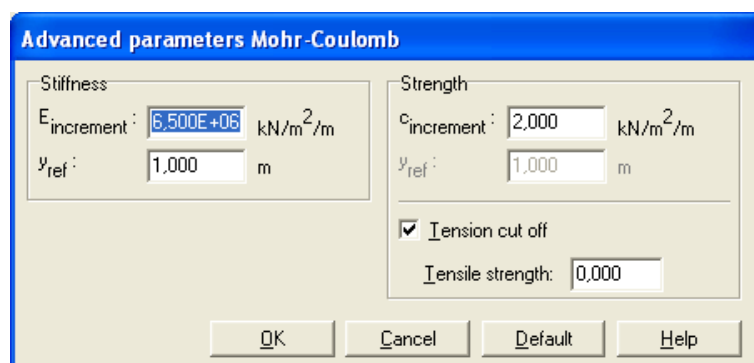


Figure 2.12 Fenêtre des paramètres avancés du module Mohr-Coulomb.

Établissement d'un modèle de calcul de référence

3.1 Introduction :

Le but de cette étude est de déterminer un modèle géotechnique, dit de référence, pour notre projet. Le projet est une étude de réalisation d'un paroi moulée, le rabattement de la nappe phréatique met en oeuvre un calcul d'écoulement pour définir après chaque phase d'excavation sous le niveau de la nappe, la nouvelle distribution de pression interstitielle .

Le modèle de référence a été établi et calculé avec le logiciel *PLAXIS* 8.2. Il sera utilisé comme base de comparaison lors de l'étude paramétrique qui suivra.

3.2 Définition des données :

Pour que le logiciel *PLAXIS* puisse faire les calculs correctement et complètement, on doit lui saisir toutes les données du projet suivantes :

3.2.1 Hypothèses et géométrie :

a) Les hypothèses générales données :

- Les déformations sont considérées planes.
- Les ouvrages sont modélisés comme des poutres ou des éléments continus.
- Définition d'une interface entre les ouvrages est le sol.
- Présence d'un bouchon en pied de la paroi (sans effet, mêmes caractéristiques mécaniques que le sol).
- Rabattement hydrostatique tenant compte du bouchon (rabattement avant chaque excavation).
- Modélisation des tirants : la partie libre par élément noeud à noeud (*node-to-node*) ; et la partie scellée par un géotextile (représenté par un segment jaune).
- Prise en compte de la précontrainte dans les tirants.
- Domaine d'analyse : (figure 3.1) .

b) La géométrie du modèle :

Le projet symétrique (figure 3.1), il sera modélisé par un modèle géométrique plan (2D) de 85,5 m de largeur sur 30 m de profondeur. Ce modèle est présenté sur la (figure 3.2).

Conditions aux limites : on choisit les conditions aux limites par défaut, déplacements libres sur les deux cotés verticaux et bloqués au fond.

Trois couches de sol composent la géologie du site :

- une couche de remblai en surface de 1.2 m de profondeur ;
- une couche Argile marno-graveleuse de 10.3 m d'épaisseur ;
- enfin une couche Sable graveleux et argileux de 18.5 m d'épaisseur.

En dessous, on trouve le substratum rocheux pour lequel les déformations sont nulles.

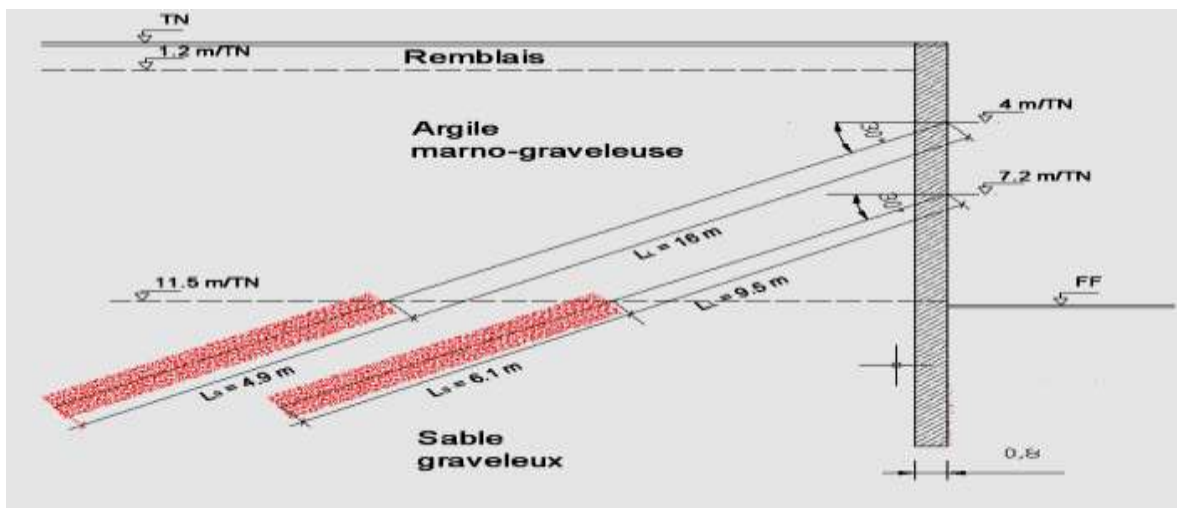


Figure 3.1 La coupe du projet (d'après chouikha [09])

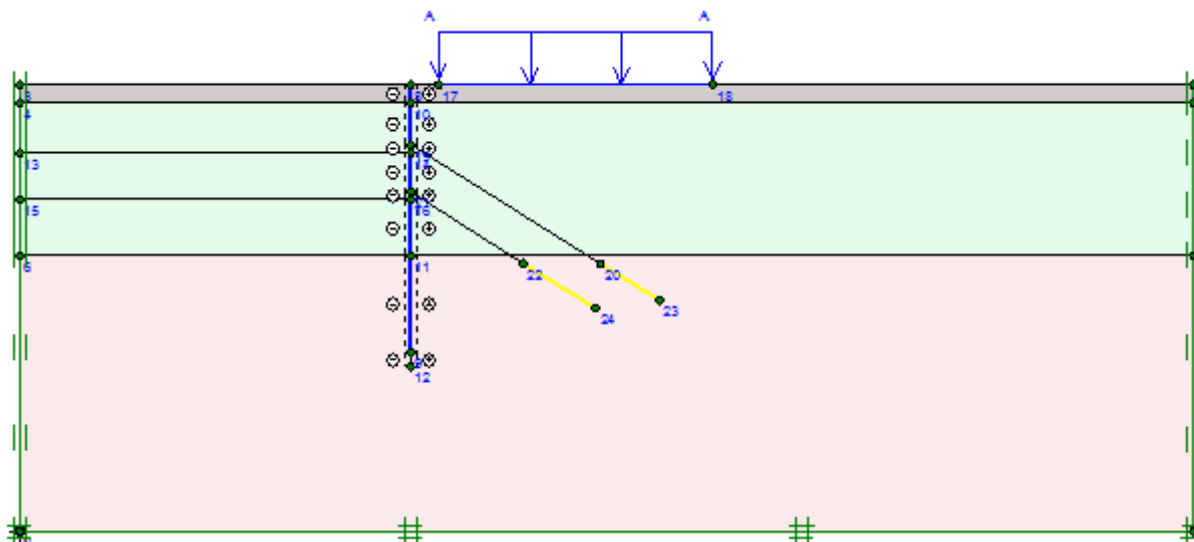


Figure 3.2 Modèle géométrique du projet.

La fouille fait 57 m de largeur sur 76m de longueur et 11.5 m de profondeur ; le soutènement est assuré par une paroi moulée de 18 m de profondeur et 0,80 m d'épaisseur, soutenue par un niveau de butons entête et deux lits de tirants d'ancrage de part et d'autre de l'excavation ; ceux-

ci sont inclinés de 30° par rapport à l'horizontale.

Des interfaces sont utilisées pour produire les effets d'interaction entre le sol et les structures. Pour la paroi, elles s'étendent jusqu'à 1 m sous le mur. In ne faut pas utiliser d'interface autour des géotextiles représentant les bulbes d'ancrage.

L'excavation est symétrique; aussi, seule la moitié du problème est modélisée .[10]

Une surcharge répartie (deCaquot) est appliquée au niveau de terrain naturel (surface derrière la paroi) , égale à 10 kN/m^2

Remarque :

Il est recommandé de prolonger les interfaces dans les angles de structures de manière à assurer une liberté suffisante aux déformations et à obtenir une meilleure distribution de l'état de contrainte.

Il est toutefois nécessaire de s'assurer que la raideur de la partie de l'interface étendue est égale à celle du sol et que, la perméabilité de ce bout d'interface n'influence pas le champ d'écoulement.

3.2.2 Caractéristiques des matériaux :

a) Propriétés des couches de sols et des interfaces :

Les propriétés des couches de sols et des interfaces sont résumées dans le (tableau 3.1):

Paramètres	Nom	Remblai 0-1,2 m	Argilemarno-graveleuse 1,2-11,5 m	Sablegraveleux 11,5-30 m	Unité
Modèle type	Model	Mohr-Coloumb	Mohr-Coloumb	Mohr-Coloumb	-
Type de comportement	Type	Drainé	Drainé	Drainé	-
Poids volumique humide	γ_{unsat}	18	18	19	kN/m ³
Poids volumique saturé	γ_{sat}	20	20,6	21,4	kN/m ³
Perméabilité horizontale	K_x	10^{-1}	10^{-2}	1	m/jour
Perméabilité verticale	K_y	10^{-1}	10^{-2}	1	m/jour
Module d'Young	E_{ref}	8.10^3	2.10^4	$4,8.10^4$	kN/m ²
Coefficient de Poisson	ν	0,3	0,3	0,3	-
Cohésion	c_{ref}	1	71	9	kN/m ³
Angle de frottement	ϕ	25	6	31	°
Angle de dilatation	ψ	0	2	2	°
Facteur de rigidité (l'interface)	R_{inter}	0,33	0,67	0,5	-

Tableau 3.1 Propriétés des couches de sols et des interfaces.

Le paramètre R_{inter} , est défini ci-dessous :

$$\tan \phi_{interface} = R_{inter} \tan \phi_{sol} \text{ et } c_{interface} = R_{inter} c_{sol}.$$

Avec : $c_{sol} = c_{ref}$.

b) Paroi moulée :

Pour la paroi moulée, on saisi les propriétés présentées dans le (tableau 3.4) :

Paramètre	Nom	valeur	Unité
Type de comportement	Matériel type	Elastique	-
Rigidité normale	EA	3.10^7	kN/m
Rigidité de flexion	EI	$1,6.10^6$	kNm ² /m
Epaisseur équivalente	d	0,8	m
Poids	w	15	kN/m/m
Coefficient de Poisson	v	0,2	-

Tableau 3.2 – Propriétés mécaniques de la paroi moulée.

c) Ancrages (éléments noeud à noeud) :

	Paramètre	Nom	Valeur	Unité
Tirants (éléments noeud à noeud)	Type de comportement	Material type	Elastique	-
	Rigidité normale	EA	$1,8.10^5$	kN
	Espacement	L _s	1,5	m
	Précontrainte de tirant 1	F	200	kN/m
	Précontrainte de tirant 2	F	250	kN/m
Bulbes d'ancrage (géotextiles)	Rigidité normale	EA	$1,12.10^4$	kN/m

Tableau 3.3 Propriétés des ancrages (éléments noeud à noeud).

3.2.3 Génération du maillage :

Le modèle de référence se fait par des éléments à 15 noeuds. Le nombre d'éléments est de 730 éléments et le nombre des noeuds est de 6093 noeuds.

On règle la finesse du maillage (global Coarseness) sur «fine », puis, on le raffine localement au niveau des éléments structuraux, comme indiqué sur la (figure 3.3).

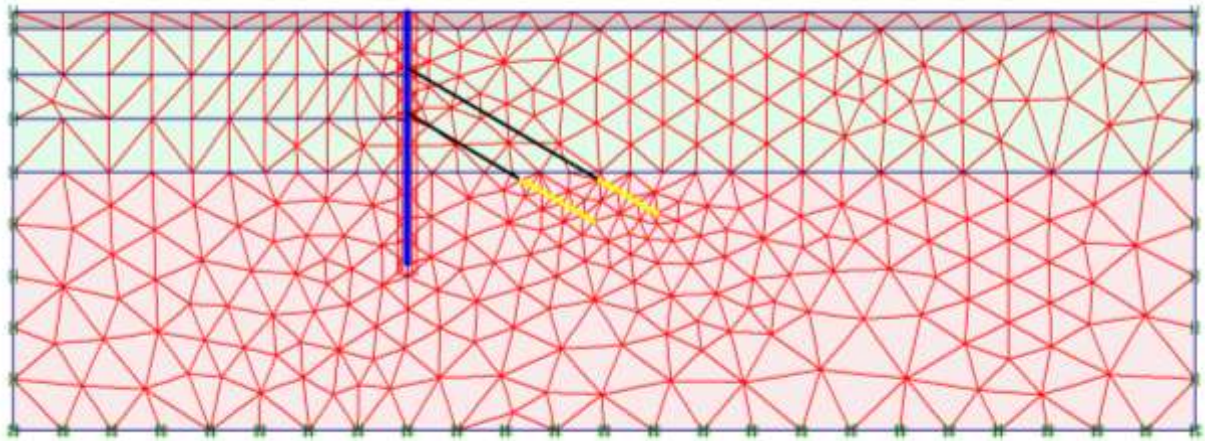


Figure 3.3 Maillage du projet.

3.2.4 Conditions initiales :

Les conditions initiales nécessitent la génération des pressions interstitielles initiales ainsi que des contraintes initiales.

a) Conditions hydrauliques (figure 3.4) :

Le niveau de la nappe phréatique initiale est à $-1,0$ m de la surface.

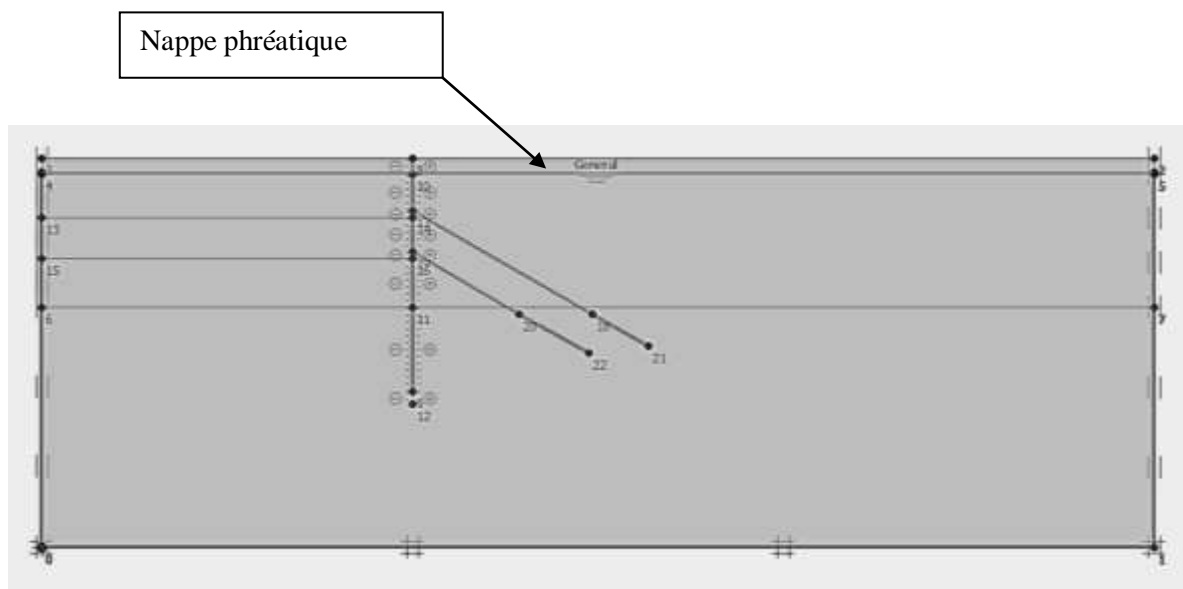


Figure 3.4 Conditions hydrauliques initiales.

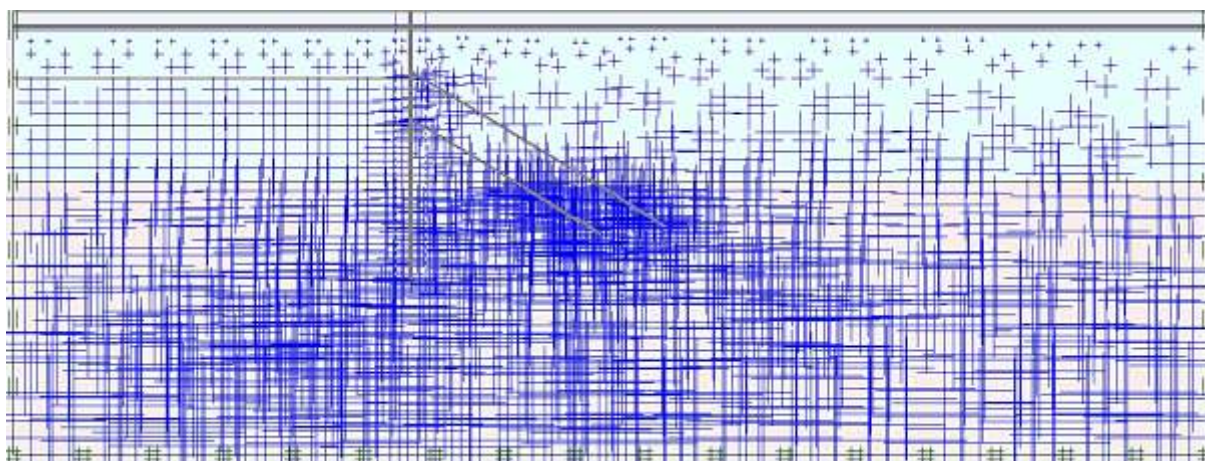


Figure 3.5 Génération des pressions interstitielles initiales.

b) Contraintes initiales (figure 3.6) :

Pour le calcul des contraintes initiales, il faut désactiver les éléments structuraux . On génère alors les contraintes initiales en prenant les valeurs de $K0$ par défaut. La valeur de $K0$ est proposée automatiquement d'après la formule de Jaky. On garde le poids du sol à 1, ce qui correspond à une application totale de la gravité.

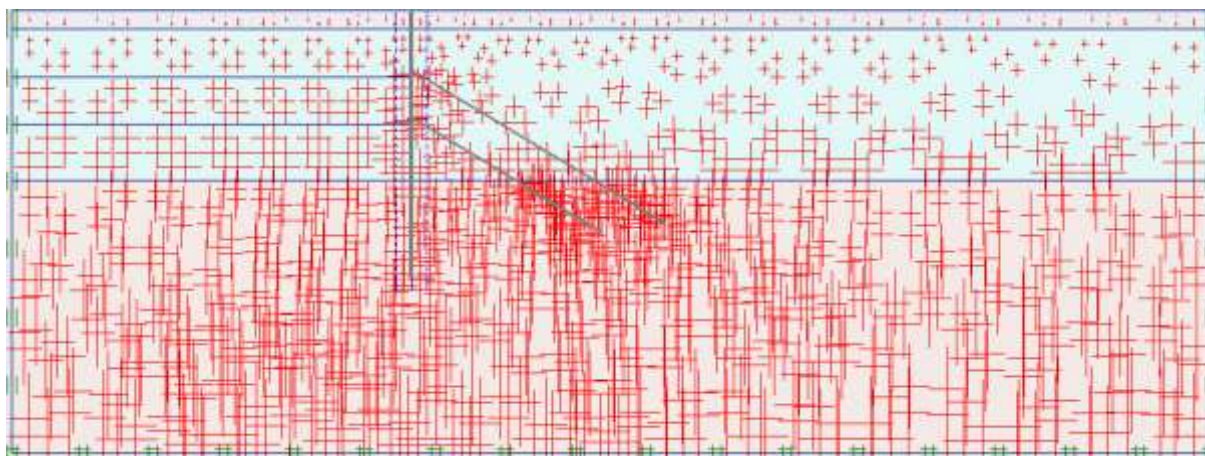


Figure 3.6 Génération des contraintes initiales.

3.3: Procédure de calcul : le calcul complet se décompose en 6 phases :

- Phase 0 : initiation des contraintes (procédure $K0$) ; on détermine les contraintes effectives initiales.

- Phase 1 : Réalisation de la paroi moulée.

- Phase 2 : 1^{ère} tranche de l'excavation jusqu'à la profondeur -4,5 m et rabattement de la nappe .

- Phase 3 : Mise en place du premier lit de tirant à la profondeur -4 m/ Tirant précontrainte une traction de service $F = 200$ kN/m .

- Phase 4 : 2^{ème} tranche de l'excavation jusqu'à la profondeur -7,7m et rabattement de la nappe
- Phase 5 : mise en place du deuxième lit de tirant à la profondeur -7,2 m/ Tirant précontrainte une traction de service $F = 250$ kN/m.
- Phase 6 : 3^{ème} tranche de l'excavation jusqu'à la profondeur -11,5 m et rabattement de la nappe.

3.4 Les principaux résultats :

On s'intéressera à deux types de déformation : déformation de forme et déformation interne telle que :

1. Déformation de maillage.
2. Déformation des éléments structuraux indiquée par :
 - La courbe de déplacement.
 - La courbe de cisaillement.
 - La courbe du moment.

Nous allons donner les résultats de la deuxième et la dernière phase seulement.

3.4.1 Résultats de la phase 2 :

a) Déformation de maillage :

La déformation de maillage et des éléments structuraux sont représentés sur la figure 3.7.

On note un déplacement total maximum de $32,24 \cdot 10^{-3}$ m

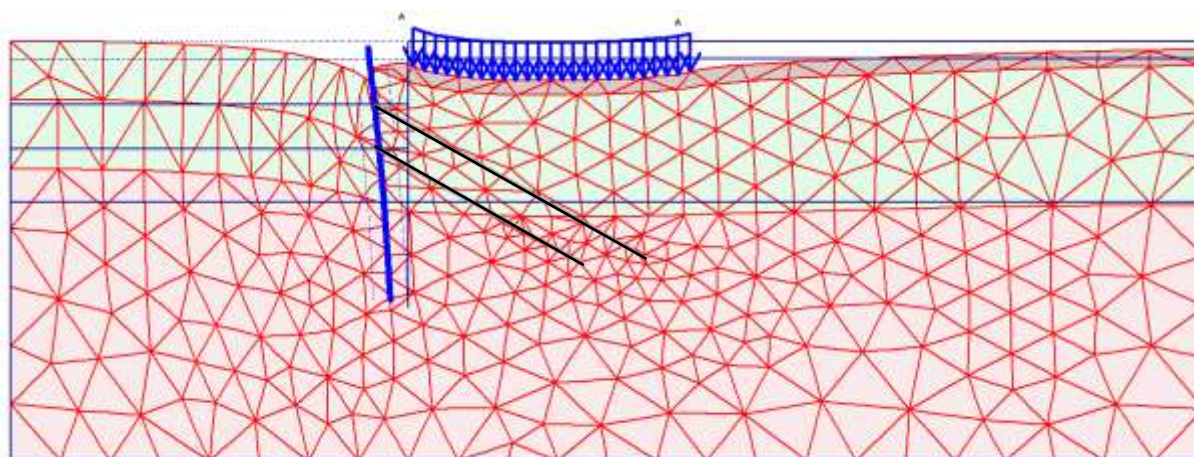
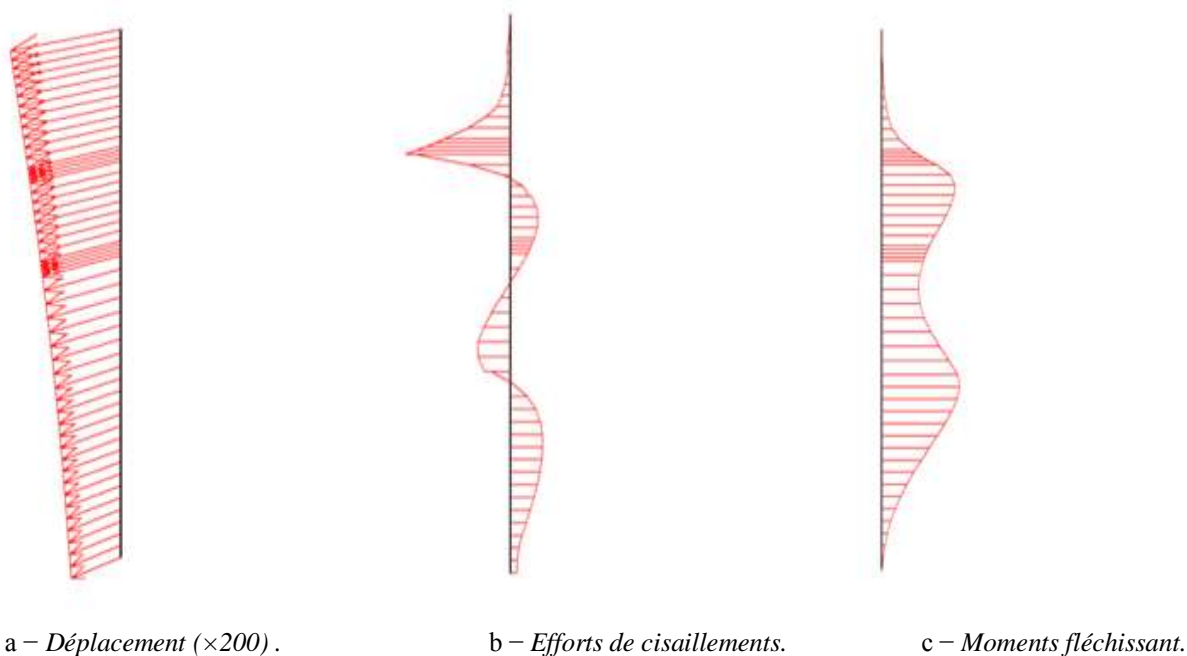


Figure 3.7 Phase 2 : déformation de maillage ($\times 200$).

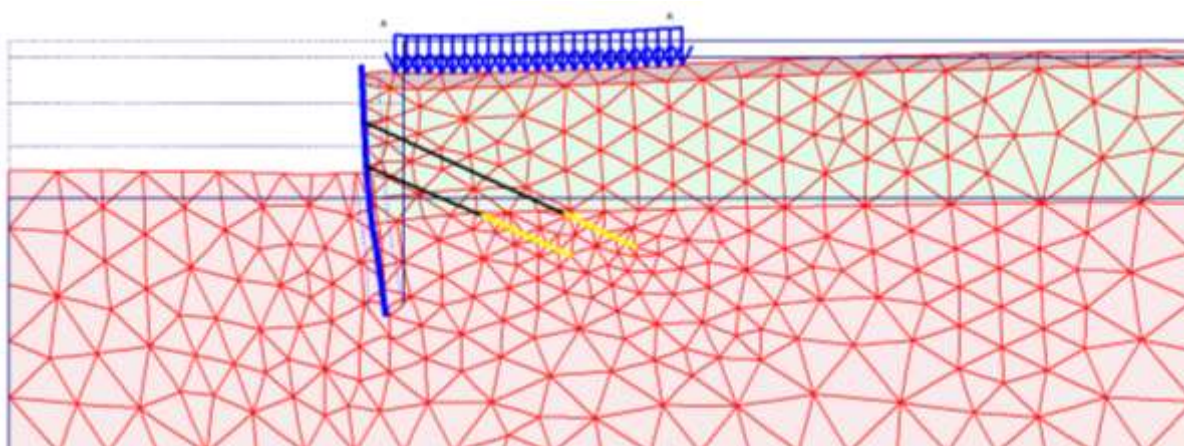
b) Paroi moulée :

- Le déplacement maximum est de $20,82 \cdot 10^{-3}$ m et l'effort de cisaillement max est de 63,46 kN/m (figure 3.8 a et b).
- Le moment fléchissant maximum est de -76,94 kNm/m (figure 3.8 c).

**Figure 3.8 Paroi moulée : résultats de la phase 2.****3.4.2 Résultats de la phase 6 :****a) Déformation de maillage :**

La déformation de maillage et des éléments structuraux sont représentés sur la (figure 3.9).

On note un déplacement total maximum de $78,66 \cdot 10^{-3}$ m.

**Figure 3.9 Phase 6: déformation de maillage ($\times 100$).**

b) Contraintes principales :

La contrainte principale maximum est de $-900,82 \text{ kN/m}^2$ (figure 3.10).

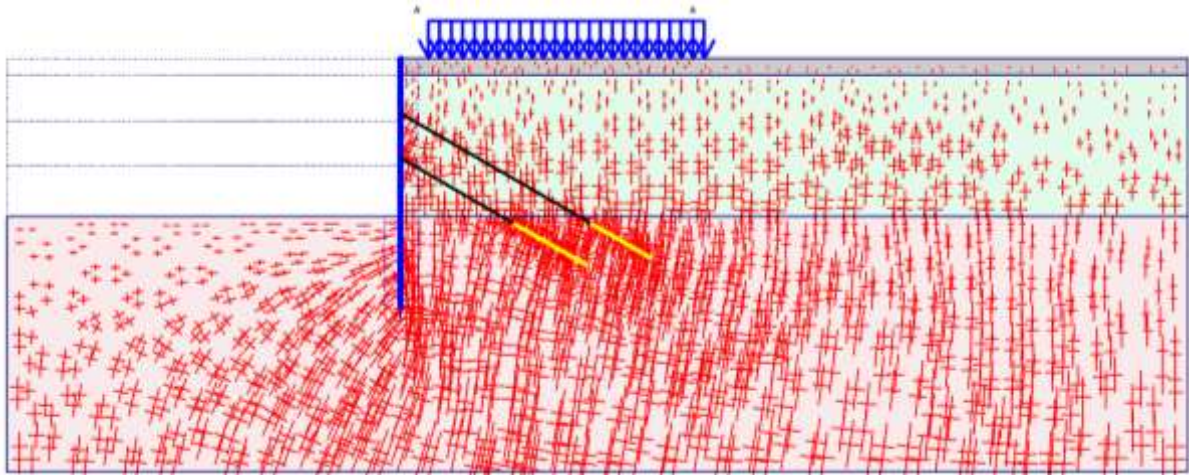
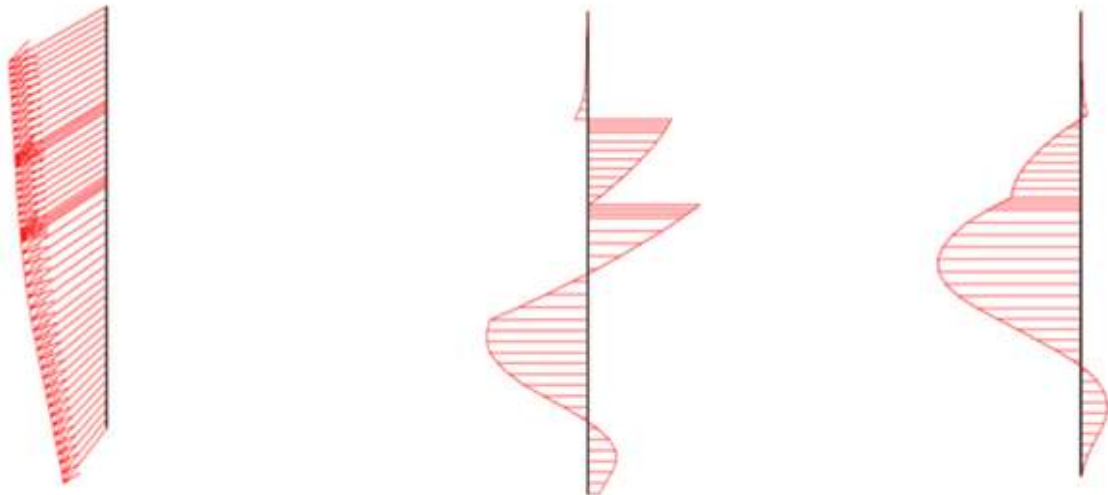


Figure 3.10 Phase 6: répartitions des contraintes principales.

c) Paroi moulée :

– Le déplacement maximum est de $71,94 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ et l'effort de cisaillement max est de $-245,36 \text{ kN/m}$ (figure 3.11 a et b).

– Le moment fléchissant maximum est de $642,38 \text{ kNm/m}$ (figure 3.11 c).



a – Déplacements ($\times 100$).

b – Efforts de cisaillements.

c – Moments fléchissant.

Figure 3.11 Paroi moulée : résultats de la phase 6.

		Phase 2	Phase 6	Comparaison
Maillage	Déplacement (m)	$32,24 \cdot 10^{-3}$	$78,66 \cdot 10^{-3}$	<i>Augmentation</i> , à cause de pression des terres latérales.
Paroi moulée	Déplacement (m)	$20,82 \cdot 10^{-3}$	$71,94 \cdot 10^{-3}$	<i>Augmentation</i> , à cause des fouilles et de pression des terres latérales.
	Effort de cisaillement (kN/m)	63,46	-245,36	<i>Augmentation</i> , à cause des fouilles et de pression des terres latérales.
	Moment (kNm/m)	-76,94	642,38	<i>Augmentation</i> , à cause des fouilles et de pression des terres latérales.

Tableau 3.4 – Résumé des résultats de deux phases 2 et 6 avec comparaison

3.5 Conclusions :

- Le fond de fouille se soulève sous l'action de la pression des terres latérales, la paroi se déplace latéralement vers la fouille et le charge subit des tassements.
- D'après les résultats de calculs et les courbes présentées, l'état de contraintes du modèle changé sous l'effet des fouilles et de l'interaction entre les ouvrages.
- La comparaison entre les deux phases montre que ce modèle de référence constitue effectivement une approximation raisonnable du comportement réel des structures.

Étude Paramétrique

4.1 Introduction :

Après l'établissement du modèle de référence et les résultats obtenus, l'étude paramétrique sera effectuée. Il sera question de montrer l'effet de différents paramètres sur les résultats. On utilise la même coupe du projet, avec les mêmes données et on change chaque fois le paramètre à comparer (les paramètres ont été modifiés un par un), et toujours dans des fourchettes raisonnables.

On a deux types de paramètres :

- Les paramètres de calculs (modélisation).
- Les paramètres géotechniques.

Dans cette étude, la comparaison sera faite sur deux types de résultats :

- Les déplacements.
- Les moments fléchissant.

4.2 Effet des paramètres de calculs :

Parmi les paramètres de modélisation, on propose l'étude de l'effet des deux paramètres suivants :

- Le maillage.
- La précision des calculs (tolérance).

4.2.1 Maillage :

L'utilisateur de *PLAXIS* doit sélectionner des éléments triangulaires à 6 ou 15 noeuds pour modéliser les couches de sol et autres éléments de volume. L'élément par défaut de *PLAXIS* est le triangle à 6 noeuds. Il fournit des interpolations du second ordre pour les déplacements. La matrice de rigidité des éléments est évaluée par intégration numérique en utilisant au total trois points de Gauss (points de contrainte). Pour le triangle à 15 noeuds, l'interpolation est d'ordre quatre, et l'intégration nécessite douze points de contrainte. Le type d'éléments pour les éléments de structure est automatiquement compatible avec le type d'éléments de sol choisi [11].

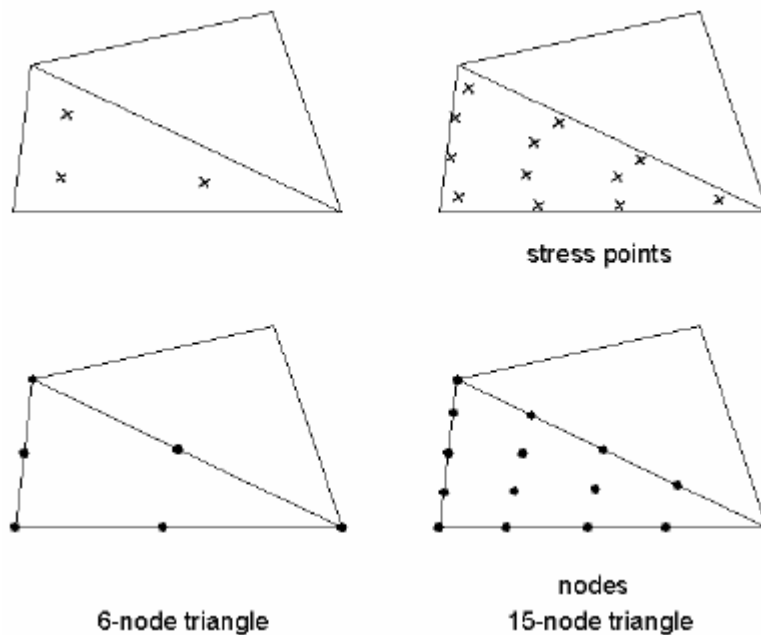


Figure 4.1 – Position des noeuds et des points de contrainte dans les éléments de sol.

Le triangle à 15 noeuds est un élément très précis qui a produit des résultats en contraintes de haute qualité sur différents problèmes, comme par exemple le calcul de la rupture de sols incompressibles. L'utilisation des triangles à 15 noeuds implique une consommation de mémoire assez élevée, et les calculs et la manipulation sont donc un peu ralentis. C'est pour cela qu'un type d'éléments plus simple est également disponible.

Le triangle à 6 noeuds est un élément relativement précis donnant de bons résultats pour les analyses standard en déformation, à condition d'utiliser un nombre suffisant d'éléments.

Cependant, il faut être prudent dans le cas de modèles axisymétriques ou dans des situations où une rupture (possible) est à prendre en compte, comme un calcul de capacité portante ou le calcul de coefficient de sécurité selon la méthode de phi-c réduction. Les charges à la rupture et les coefficients de sécurité sont généralement surévalués avec des éléments à 6 noeuds. Pour ces calculs, il convient d'utiliser plutôt des éléments à 15 noeuds.

On change le maillage des éléments de 6 noeuds à 15 noeuds et on compare les résultats obtenus aux résultats du modèle de référence. Les résultats obtenus sont :

a) Paroi moulée :

La comparaison des résultats est présentée par les courbes sur les (figures 4.2 et 4.3) suivantes :

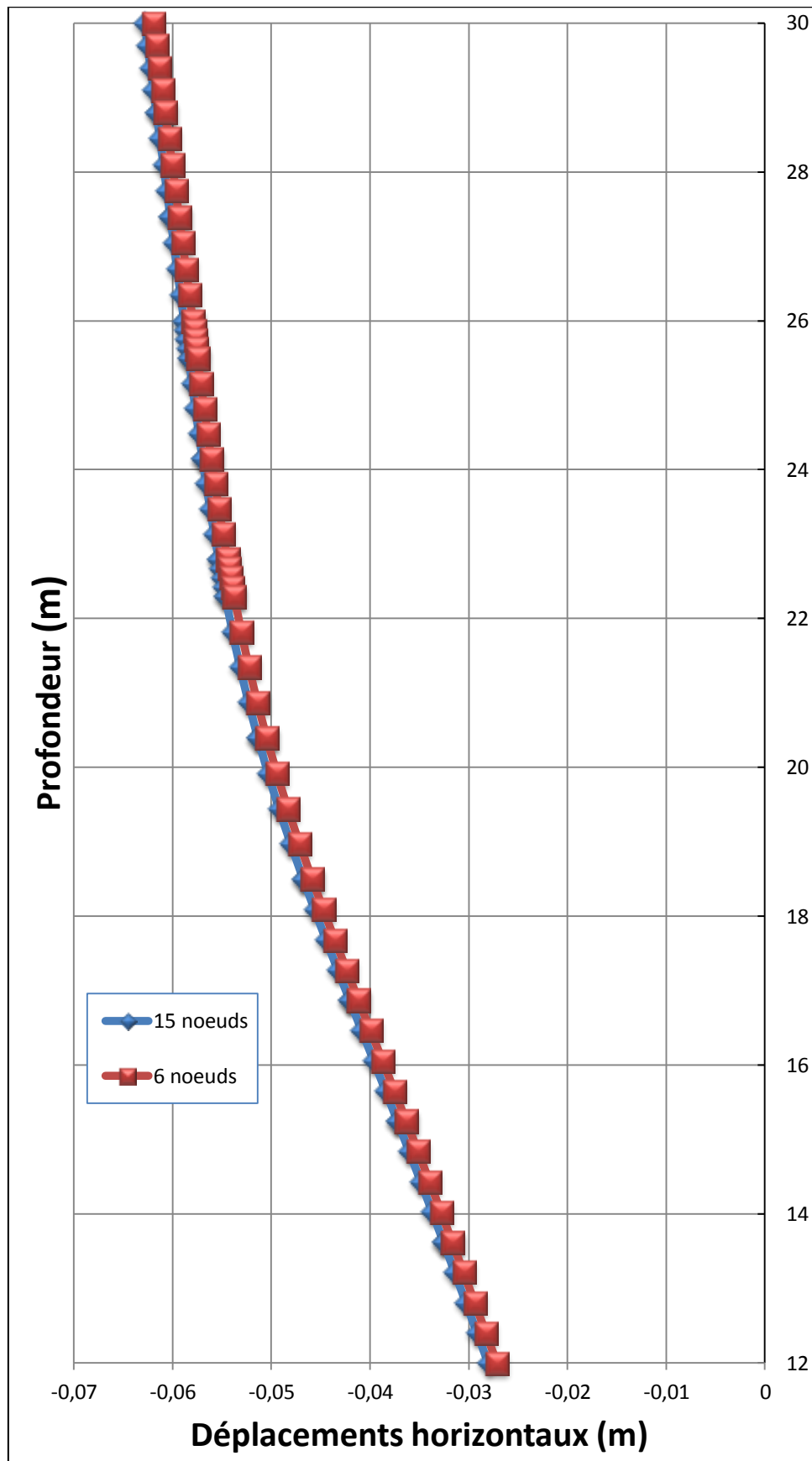


Figure 4.2 Paroi : influence de maillage sur les déplacements horizontaux.

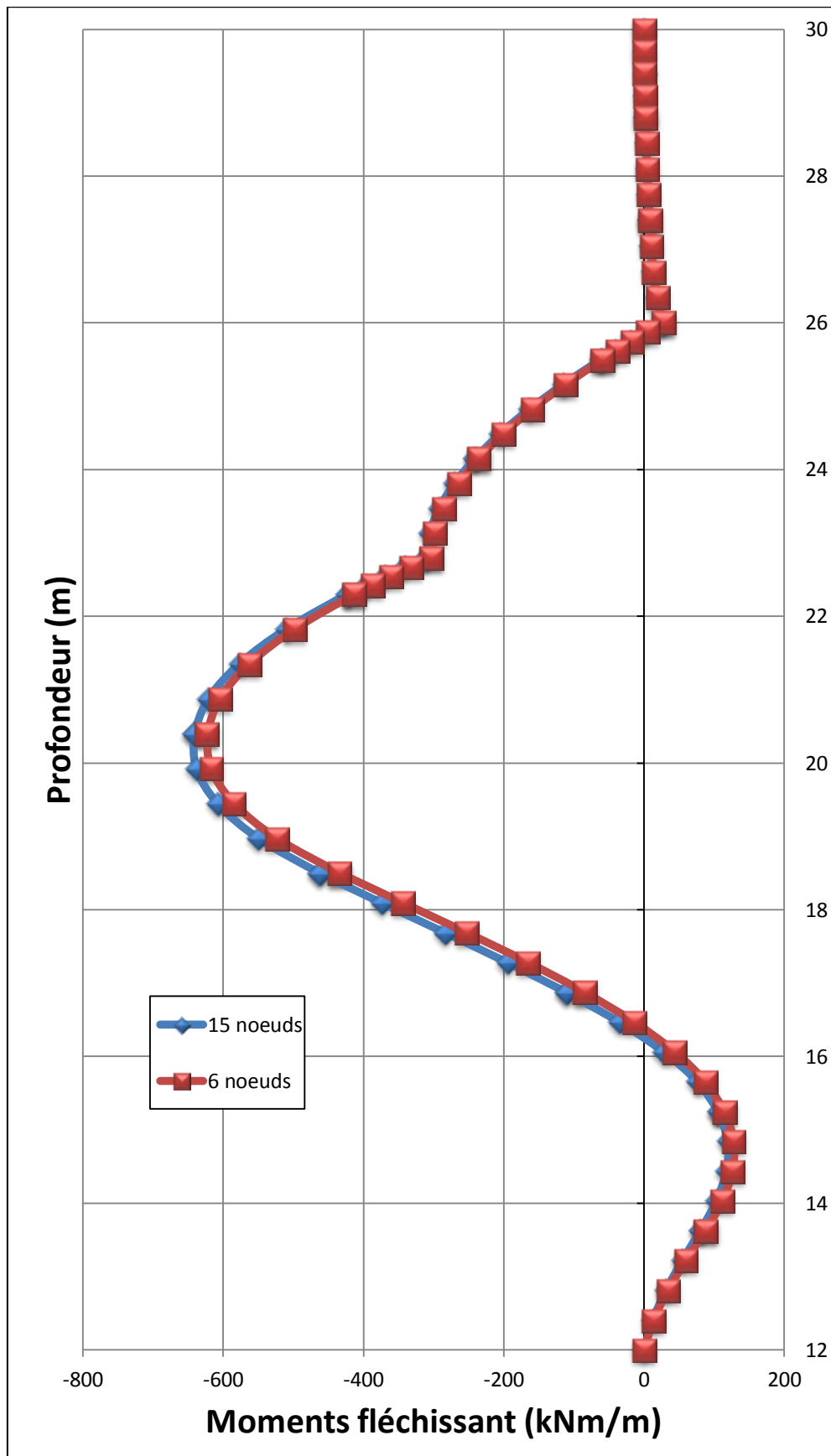


Figure 4.3 Paroi : influence de maillage sur les moments fléchissant.

b) Conclusion :

Pour le maillage : on passe de 6 noeuds au 15 noeuds . on remarque une peu augmentation des déplacements est des moments de la paroi.

4.2.2 Précision des calculs :

Dans toutes les analyses non linéaires où un nombre défini de pas de calcul est utilisé, un décalage avec la solution exacte apparaît, comme présenté sur la figure 4.4 Un algorithme de résolution doit s'assurer que les erreurs d'équilibre restent localement et globalement dans des limites acceptables. Les seuils d'erreur adoptés par PLAXIS sont liés directement à la valeur spécifiée de l'erreur tolérée (toleratederror) [11].

A l'intérieur de chaque pas, le programme de calcul continue les itérations jusqu'à ce que les erreurs calculées soient inférieures à la valeur spécifiée. Si l'erreur tolérée est réglée sur une valeur élevée, le calcul sera relativement rapide mais peut s'avérer inexact ; si elle est petite, le temps de calcul peut être très long. En général, le réglage standard de 0,03 est acceptable dans la plupart des calculs.

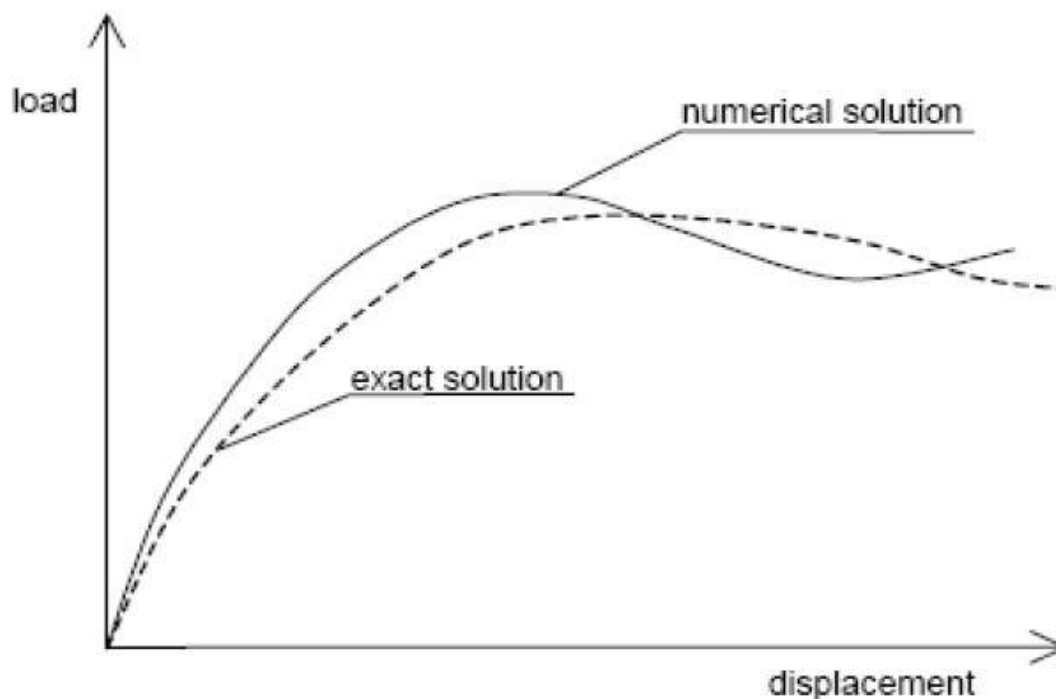


Figure 4.4 Comparaison de la solution exacte avec la solution numérique.

La précision des calculs est définie par la tolérance sur la convergence des calculs. Par défaut la tolérance est de 3 %, celle utilisée pour le calcul du modèle de référence.

Pour étudier l'effet de ce paramètre on fait le calcul pour :

- Tolérance de 1 %.
- Tolérance de 6 %.

Les résultats obtenus sont :

a) Paroi moulée : La comparaison des résultats est présentée par les courbes sur les (figures 4.5 et 4.6) suivantes :

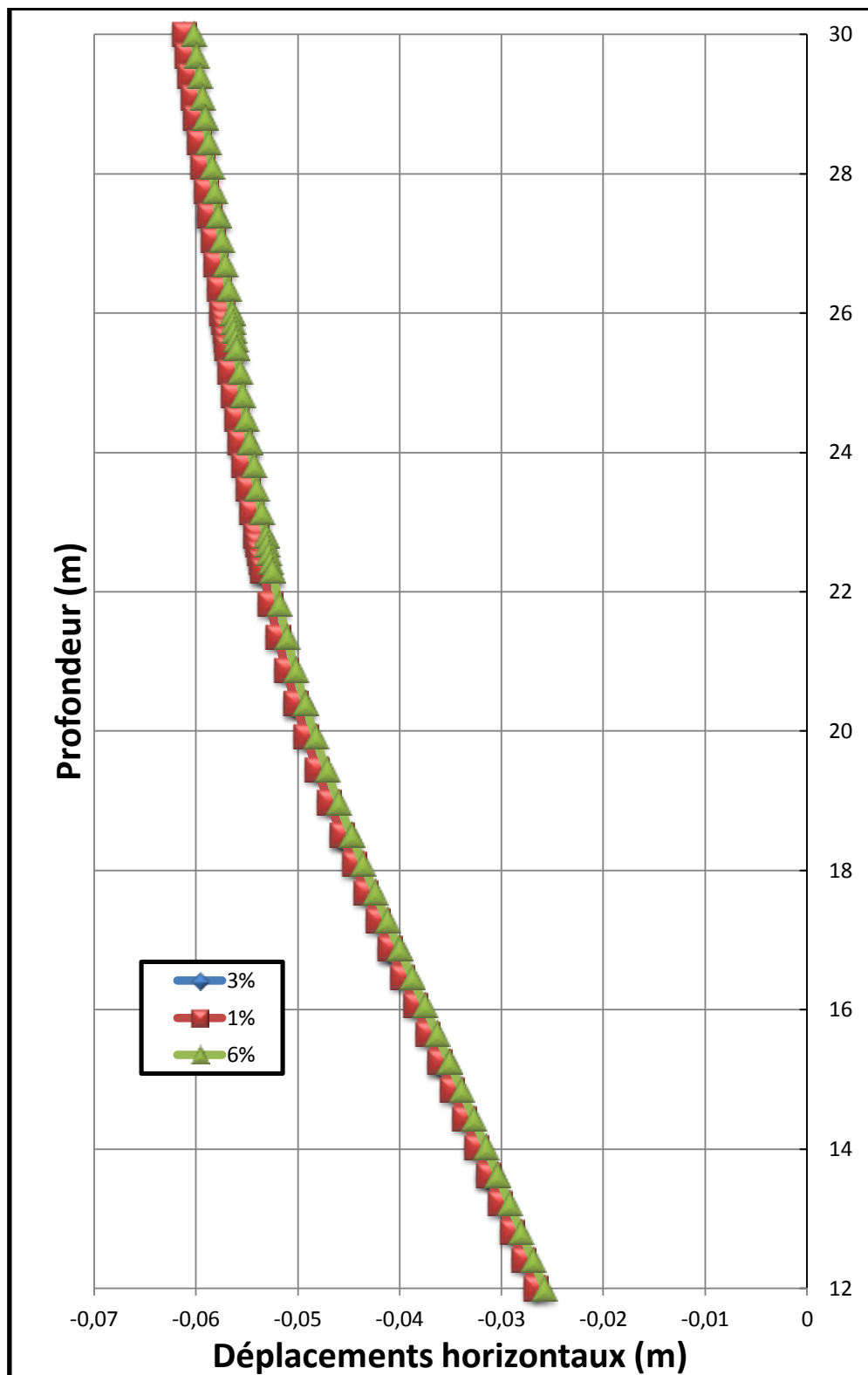


Figure 4.5 Paroi : influence de la précision des calculs sur les déplacements horizontaux.

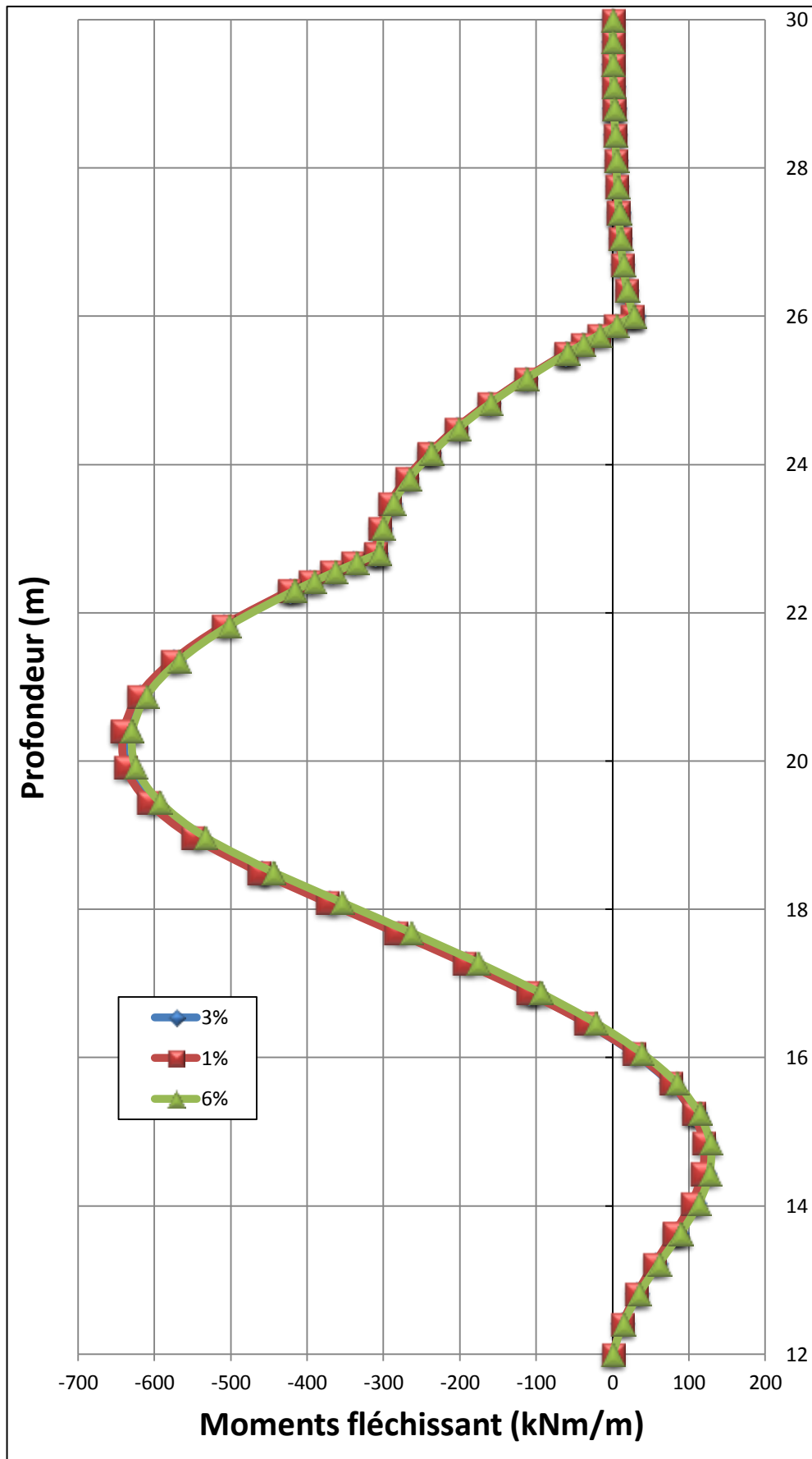


Figure 4.6 Paroi : influence de la précision des calculs sur les moments fléchissant.

b) Conclusion :

Une augmentation de tolérance conduit à :

- une légère diminution des déplacements de la paroi .
- une légère diminution des moments dans la paroi.

4.3 Effet des paramètres géotechniques :

Pour ce qui concerne les paramètres géotechniques on va étudier l'influence de quatre types de paramètres.

4.3.1 Effet des paramètres du sol :

Les paramètres du sol sont : la cohésion, l'angle de frottement, le module d'Young (module d'élasticité) et le module de Poisson.

4.3.1.1 Cohésion c :

Dans le modèle de référence la cohésion $c = 1$ kPa pour la 1ère couche, $c = 71$ kPa pour la 2ème couche et $c = 9$ kPa pour la 3ème couche. Pour l'étude paramétriques on fait les calculs pour :

- $c+5$ kPa ;
- $c-5$ kPa.

Pour toutes les couches simultanément.

Remarque :

PLAXIS peut manipuler des sables sans cohésion ($c=0$), mais certaines options ne fonctionneront pas bien. Pour ne pas avoir de complication, il est conseillé d'entrer au moins une valeur faible (prendre $c \geq 0,2$ kPa) [11].

Les résultats des calculs sont :

a) Paroi moulée :

La comparaison des résultats est présentée par les courbes sur les figures 4.7 et 4.8 suivantes :

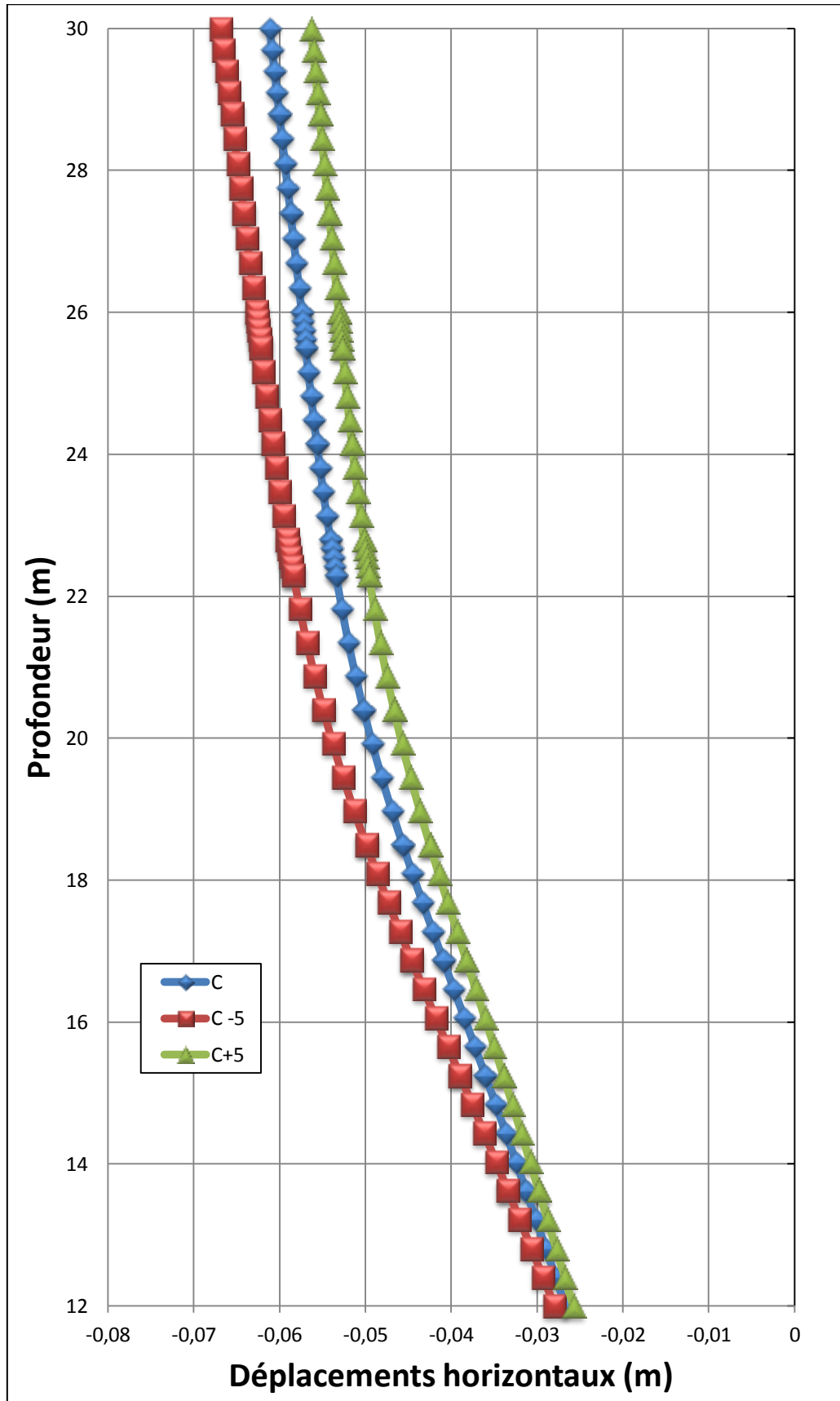


Figure 4.7 Paroi : influence de la cohésion sur les déplacements horizontaux.

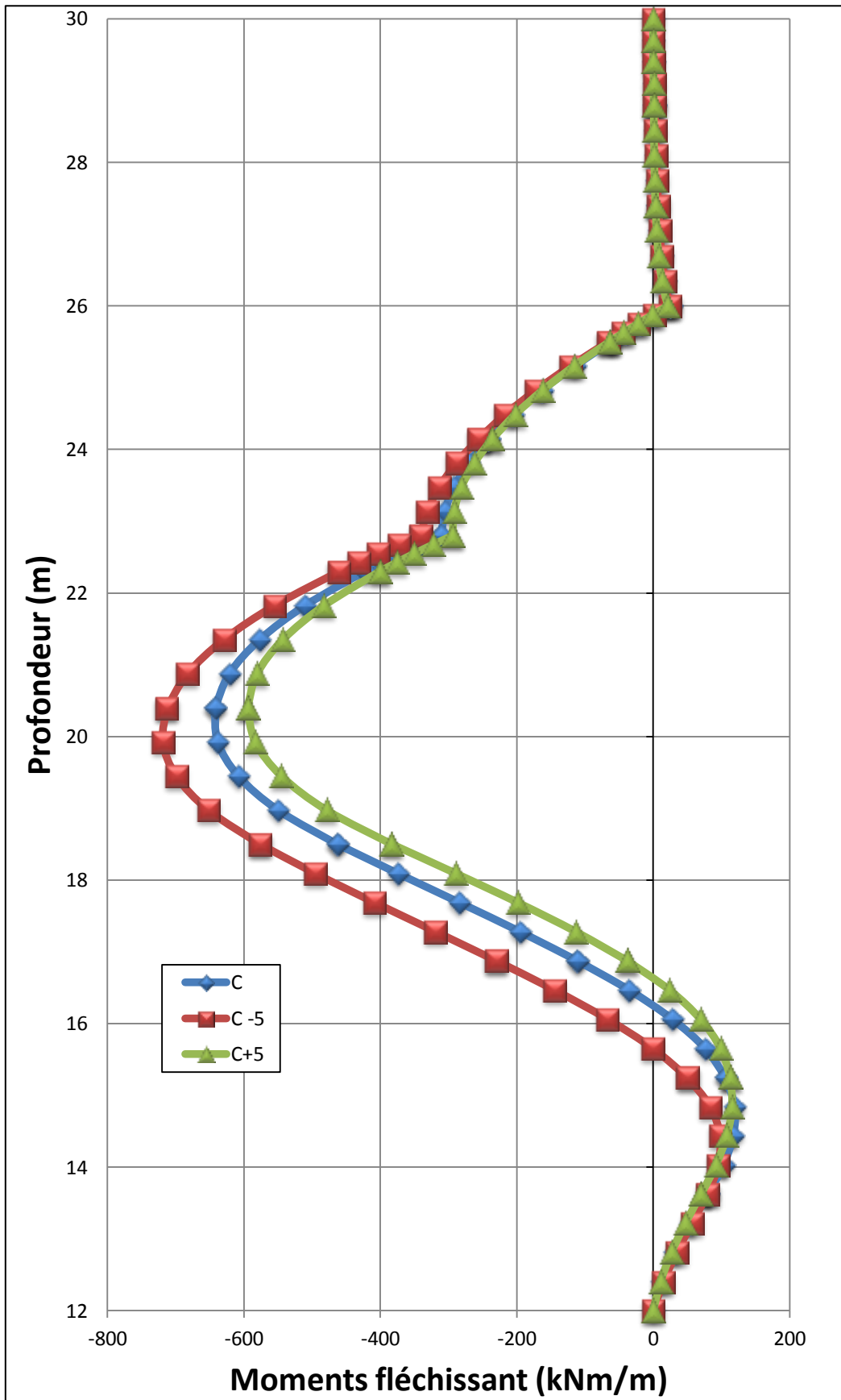


Figure 4.8 Paroi : influence de la cohésion sur les moments fléchissant.

b) Conclusion :

Une augmentation de la cohésion conduit à :

- une diminution des déplacements de la paroi.
- une diminution des moments dans la paroi.

L'influence de ce paramètre est d'autant plus importante que ses valeurs sont plus faibles.

4.3.1.2 Angle de frottement ϕ :

L'angle de frottement ϕ (phi) est entré en degrés. Des angles de frottement élevés, obtenus parfois pour des sables denses, augmenteront de manière substantielle la difficulté numérique des calculs plastiques [11].

Le temps de calcul varie exponentiellement avec de l'angle de frottement. Par conséquent, les angles de frottement élevés devraient être évités lors des calculs préliminaires pour un projet.

Le temps de calcul deviendra important si des angles de frottement supérieurs à 35 degrés sont utilisés.

Dans le modèle de référence l'angle de frottement est pris entre 6° et 31° . $\phi = 25^\circ$ pour la première couche, $\phi = 6^\circ$ pour la deuxième couche et $\phi = 31^\circ$ pour la troisième couche.

Pour l'étude paramétrique, on fait les calculs pour :

- $\phi - 5^\circ$.
- $\phi + 5^\circ$.

Pour toutes les couches simultanément.

On obtient les résultats suivants :

a) Paroi moulée :

La comparaison des résultats est présentée par les courbes sur les figures 4.9 et 4.10 suivantes :

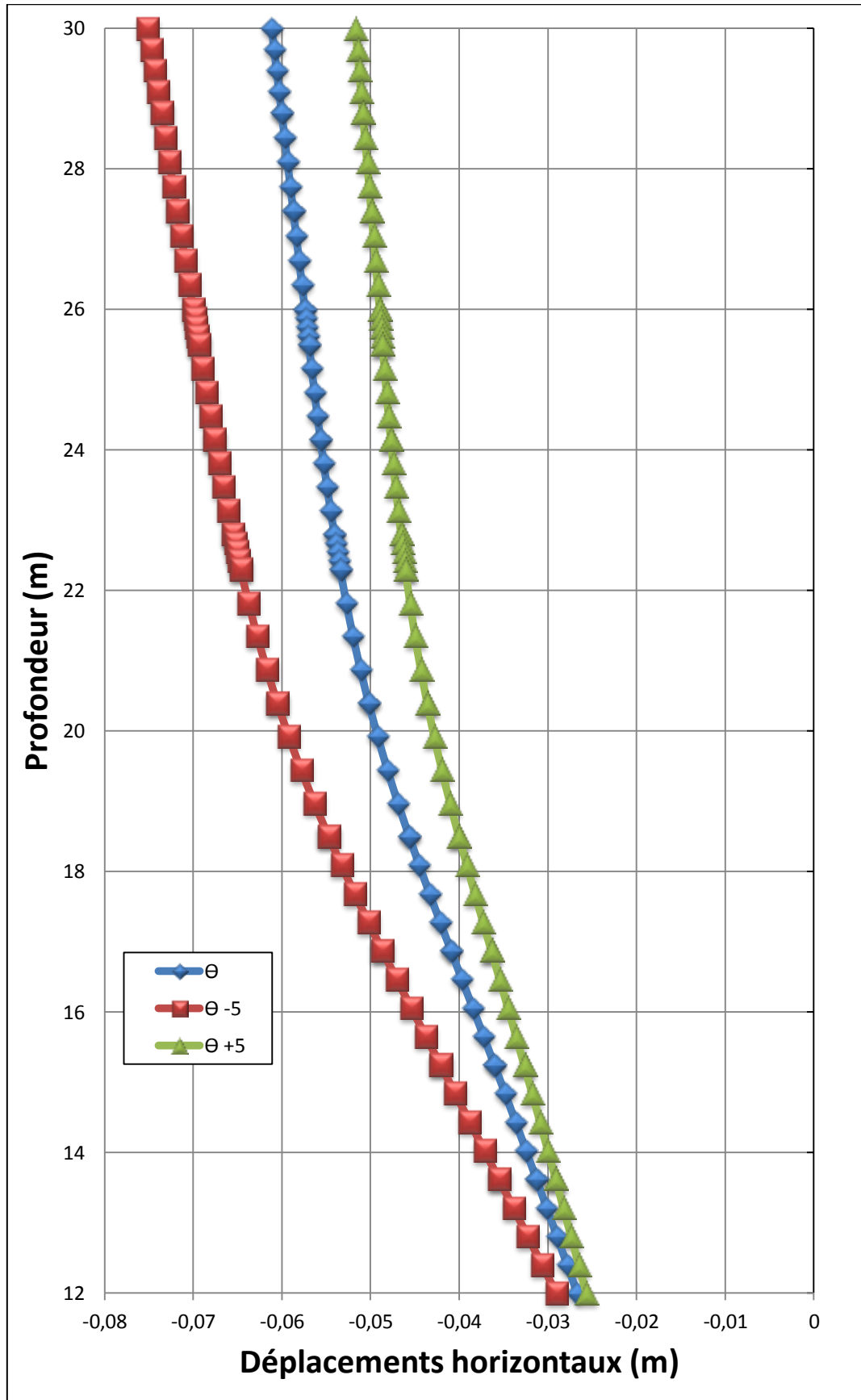


Figure 4.9 Paroi : influence de l'angle de frottement sur les déplacements horizontaux.

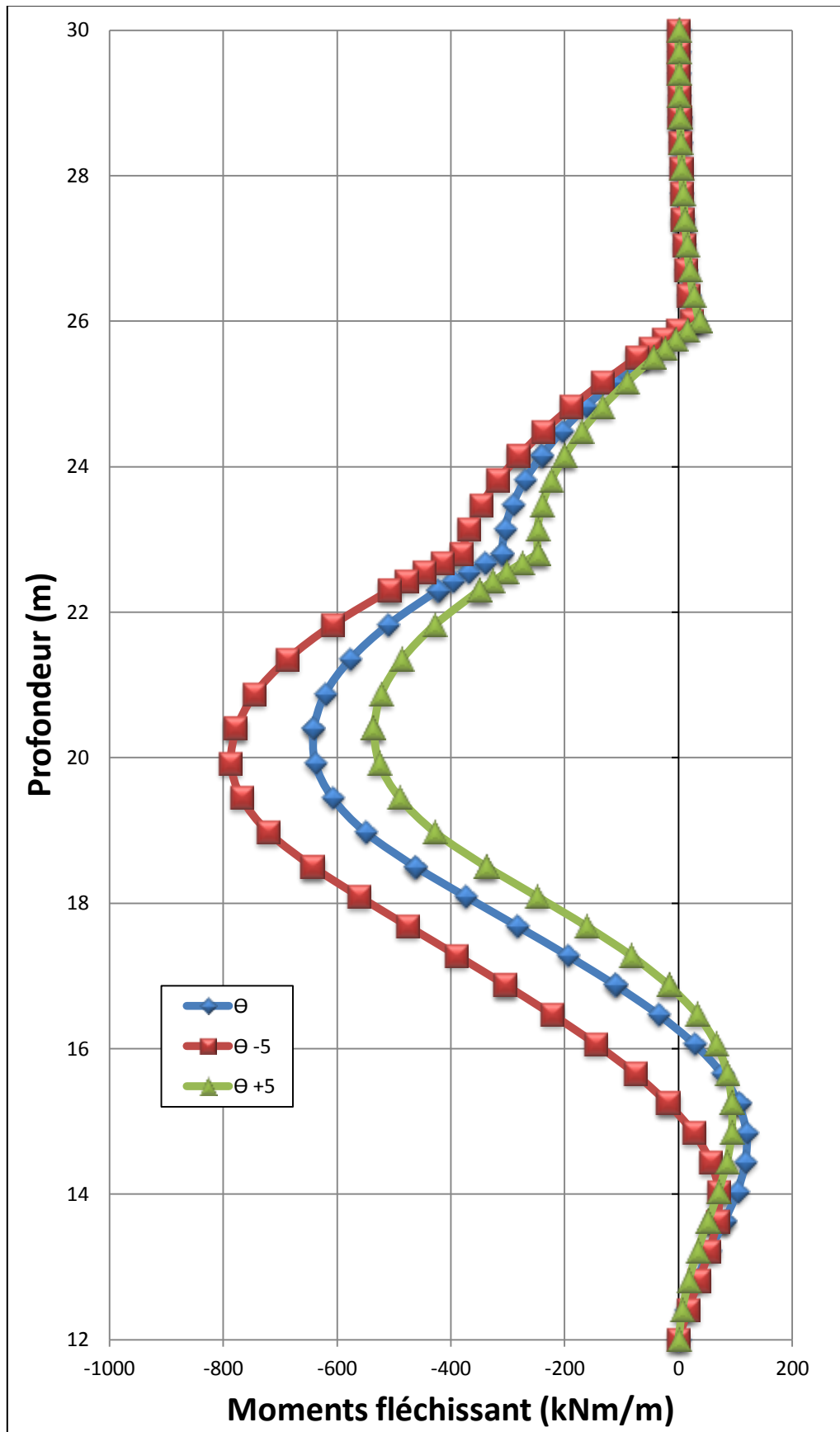


Figure 4.10 Paroi : influence de l'angle de frottement sur les moments fléchissant.

b) Conclusion :

Une augmentation de l'angle de frottement conduit à :

- une diminution des déplacements de la paroi .
- une diminution des moments dans la paroi.

Une diminution des angles de frottement de 5° a une influence beaucoup plus importante qu'une augmentation de ceux-ci de 5°.

4.3.1.3 Module d'Young E :

PLAXIS utilise le module d'Young comme module de déformation de référence dans le modèle élastique et le modèle de Mohr-Coulomb, mais d'autres modules de déformation sont également considérés. Un module de déformation a la dimension d'une contrainte (force par unité de surface). Les valeurs de raideur adoptées dans un calcul demandent une attention particulière parce que la plupart des géomatériaux présente un comportement non linéaire dès le début du chargement [11].

En mécanique des sols, la pente initiale est appelée E_0 et le module sécant à 50% de la résistance en compression est noté E_{50} (voir figure 2.11). Pour des argiles très surconsolidées et quelques roches avec un large domaine élastique, il est réaliste d'utiliser E_0 alors que pour les sables et les argiles normalement consolidées, il est préférable de prendre E_{50} .

Pour les sols, le module initial et le module sécant tendent à augmenter avec la pression de confinement. Par conséquent, les couches de sol en profondeur ont souvent une raideur plus élevée que les couches en surface. De plus, la raideur apparente dépend du chemin de contrainte suivi. La raideur durant les cycles charge-décharge est supérieure à celle durant un chargement primaire. En outre, la raideur observée pour un sol en terme de module d'Young est généralement plus petite pour des compressions drainées que pour du cisaillement. Donc, en choisissant un module de déformation constant pour représenter le comportement du sol, l'utilisateur devra retenir une valeur qui prenne à la fois en compte le niveau de contrainte et le chemin de contrainte. Remarquons que des comportements de sols dépendant des contraintes sont pris en compte dans les modèles avancés de *PLAXIS*. Dans le modèle de Mohr-Coulomb,

PLAXIS propose une option spéciale pour définir une rigidité variable avec la profondeur (voir *Paramètres avancés*).

Dans le modèle de référence on a pris un module pour chaque couche :

- $E = 8.10^3$ kPa pour la 1ère couche ;
- $E = 2.10^4$ kPa pour la 2ème couche ;
- $E = 4,8.10^4$ kPa pour la 3ème couche.

Pour les calculs de l'étude paramétrique on utilise :

- $E -25\%$;
- $E +25\%$.

Pour tous les modules simultanément.

On obtient les résultats suivants :

a) Paroi moulée :

La comparaison des résultats est présentée par les courbes sur les (figures4.11 et .12) suivantes :

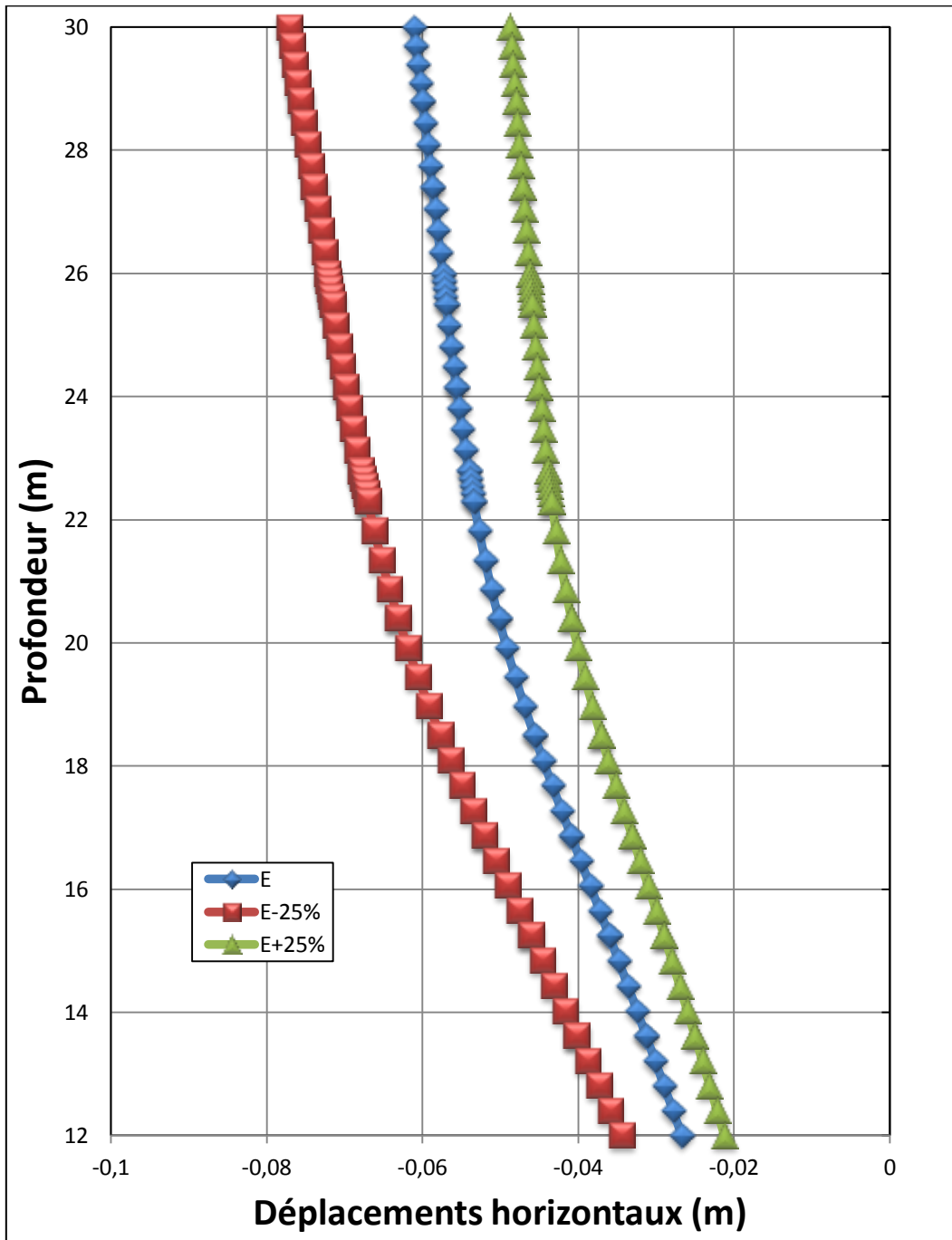


Figure 4.11 Paroi : influence du module d'élasticité sur les déplacements horizontaux.

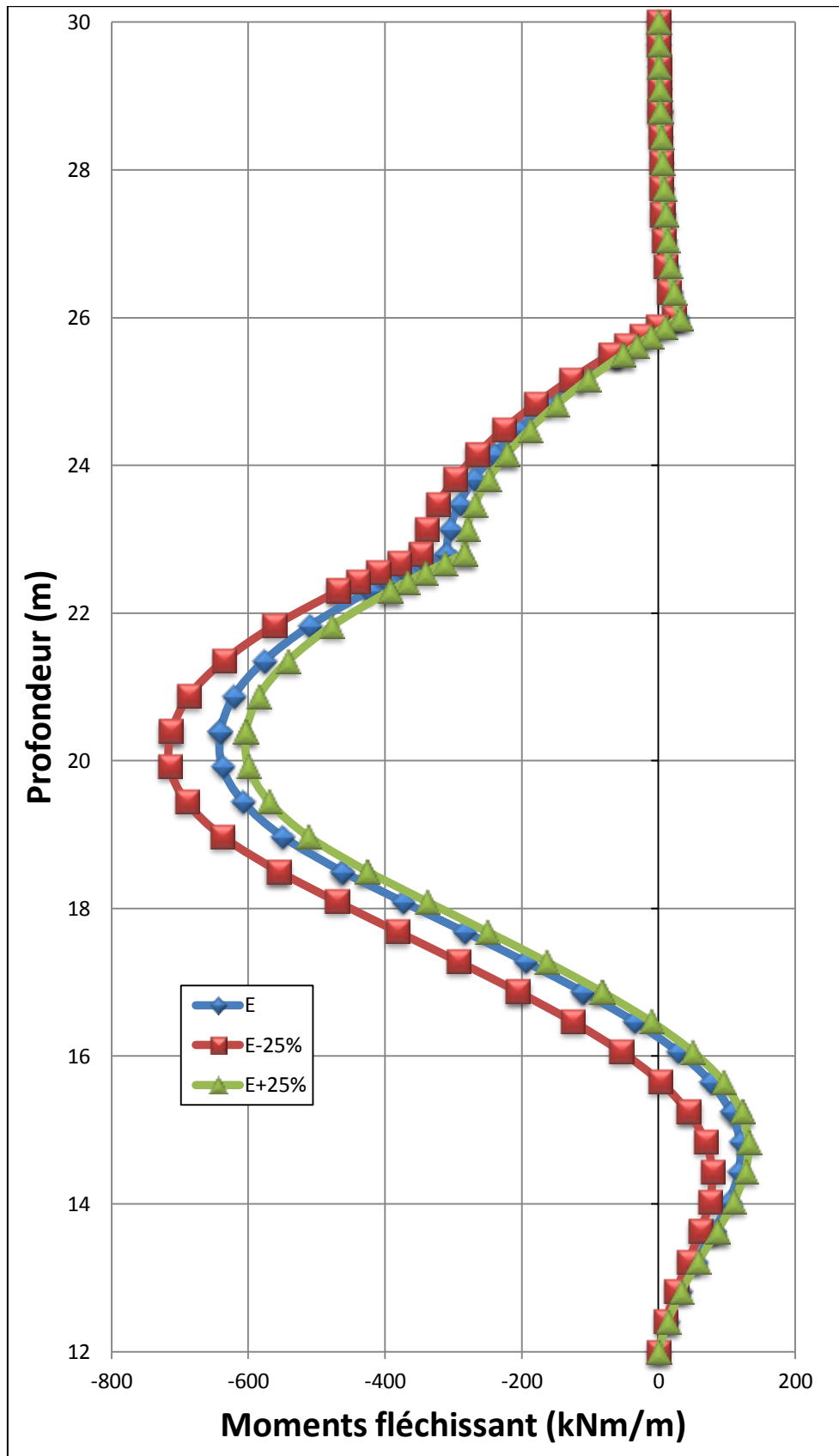


Figure 4.12 Paroi : influence du module d'élasticité sur les moments fléchissant.

b) Conclusion :

Une augmentation du module d'élasticité conduit à :

- une diminution des déplacements de la paroi .
- une diminution des moments de la paroi .

L'influence de ce paramètre est d'autant plus importante que ses valeurs sont plus faibles.

4.3.1.4 Coefficient de Poisson ν :

Des essais triaxiaux standards drainés peuvent montrer une diminution significative de volume au tout début du chargement et révéler ainsi une faible valeur du coefficient de Poisson (ν_0) [06].

Dans certains cas, comme des problèmes de déchargement particuliers, il peut être réaliste d'employer une valeur initiale aussi faible, mais en général, pour le modèle de Mohr-Coulomb, l'utilisation d'une valeur plus élevée est recommandée.

Le choix d'une valeur pour le coefficient de Poisson est particulièrement simple dans le cas du modèle élastique ou du modèle de Mohr-Coulomb avec un chargement gravitaire.

Dans ces types de chargement, *PLAXIS* devrait fournir des valeurs réalistes pour le rapport $K_0 = \sigma_h / \sigma_v$. Comme les deux modèles donneront le rapport bien connu de $\sigma_h / \sigma_v = \nu / (1 - \nu)$ pour une compression unidimensionnelle, il est facile de choisir un coefficient de Poisson qui donne une valeur réaliste pour K_0 . Ainsi, ν est évalué par l'intermédiaire de K_0 .

Dans la plupart des cas, les valeurs de ν seront comprises entre 0,3 et 0,4. En général, de telles valeurs peuvent être aussi utilisées pour des conditions de chargement autres que la compression unidimensionnelle. Dans le cas d'un comportement non drainé, il est conseillé d'entrer une valeur effective pour le coefficient de Poisson et de sélectionner *Undrained* comme type de comportement. De cette façon, *PLAXIS* ajoutera automatiquement un module de compressibilité pour le fluide interstitiel, basé sur un coefficient de Poisson non drainé implicite de 0,495. Dans ce cas, le coefficient de Poisson effectif devra être inférieur à 0,35. Utiliser des valeurs plus élevées du coefficient de Poisson impliquerait que l'eau ne soit pas suffisamment raide par rapport au squelette du sol pour simuler un comportement non drainé.

Dans le modèle de référence on a pris un coefficient: $\nu = 0,3$ pour la 1^{ère} et couche 2^{ème} et la 3^{ème} couche.

Pour les calculs de l'étude paramétrique on utilise :

- $\nu = 0,1$.
- $\nu = 0,3$.

Pour tous les coefficients simultanément.

Les résultats des calculs sont :

a) Paroi moulée :

La comparaison des résultats est présentée par les courbes sur les figures 4.13 et 4.14 suivantes :

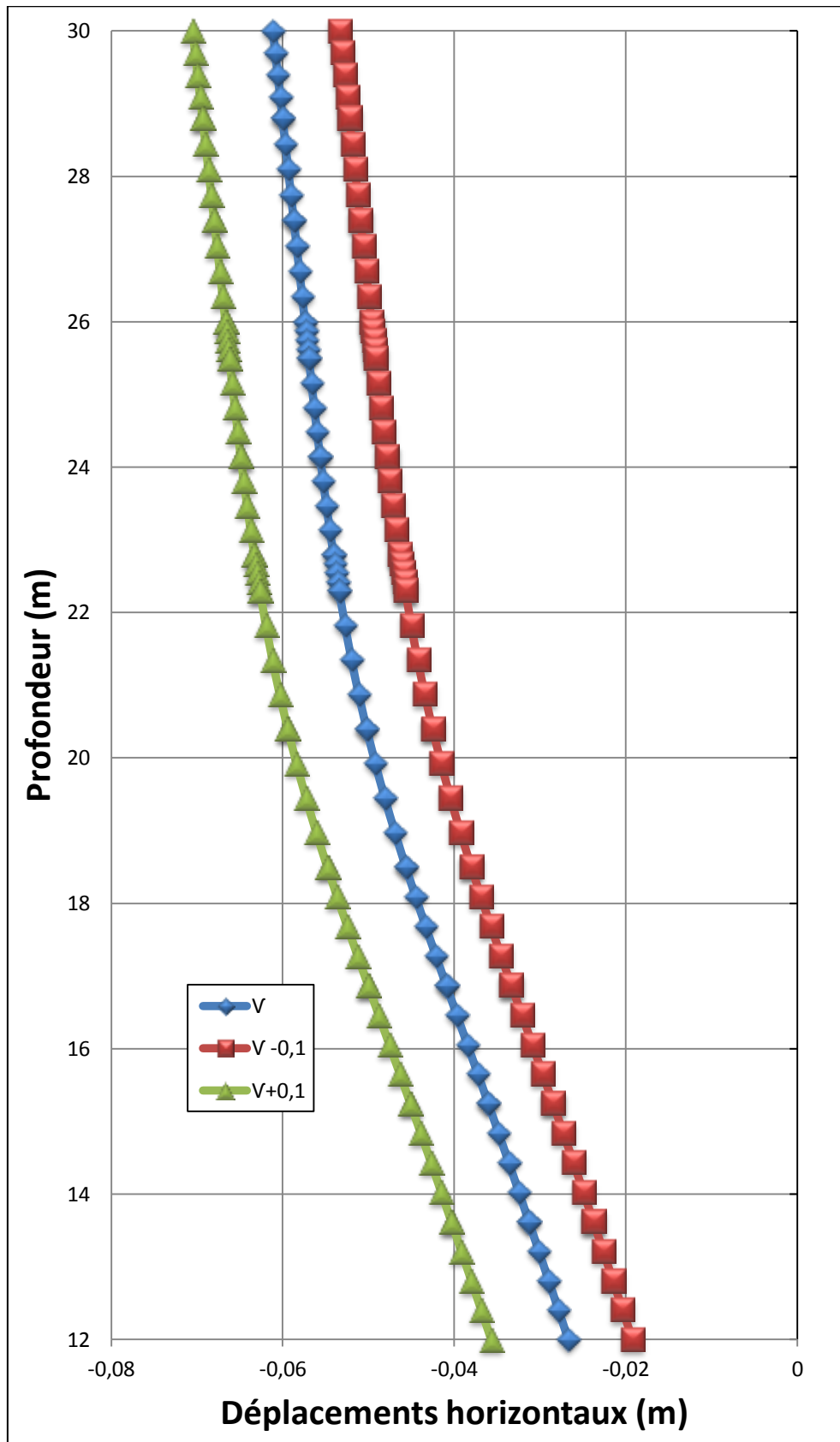


Figure 4.13 Paroi : influence du coefficient de Poisson sur les déplacements verticaux.

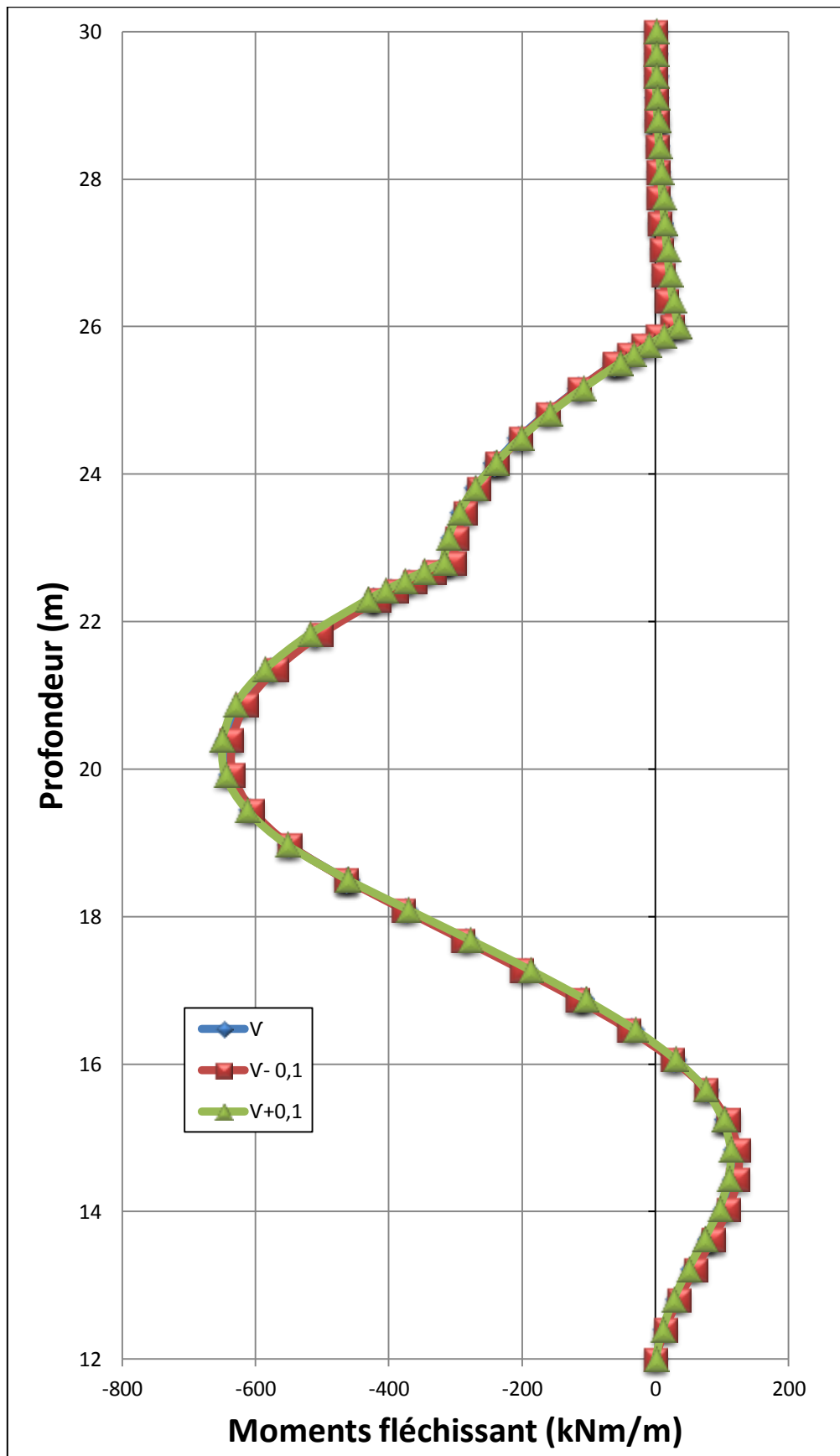


Figure 4.14 Paroi : influence du coefficient de Poisson sur les moments fléchissant.

b) Conclusion :

Une augmentation du coefficient de Poisson conduit à :

- une augmentation des déplacements de la paroi .
- Une légère augmentation des moments de la paroi .

Une augmentation des coefficient de Poisson de +0,1 a une influence beaucoup plus importante qu'une diminution de ceux-ci de -0,1 .

4.3.2 Effet du modèle de comportement :

Dans le modèle de référence on a utilisé le modèle Mohr-Coulomb(MC).

Pour l'étudeparamétrique, on utilise le Modèle Linear elastic (LE).

a) Paroi moulée :

La comparaison des résultats est présentée par les courbes sur les figures 4.15et 4.16suivantes:

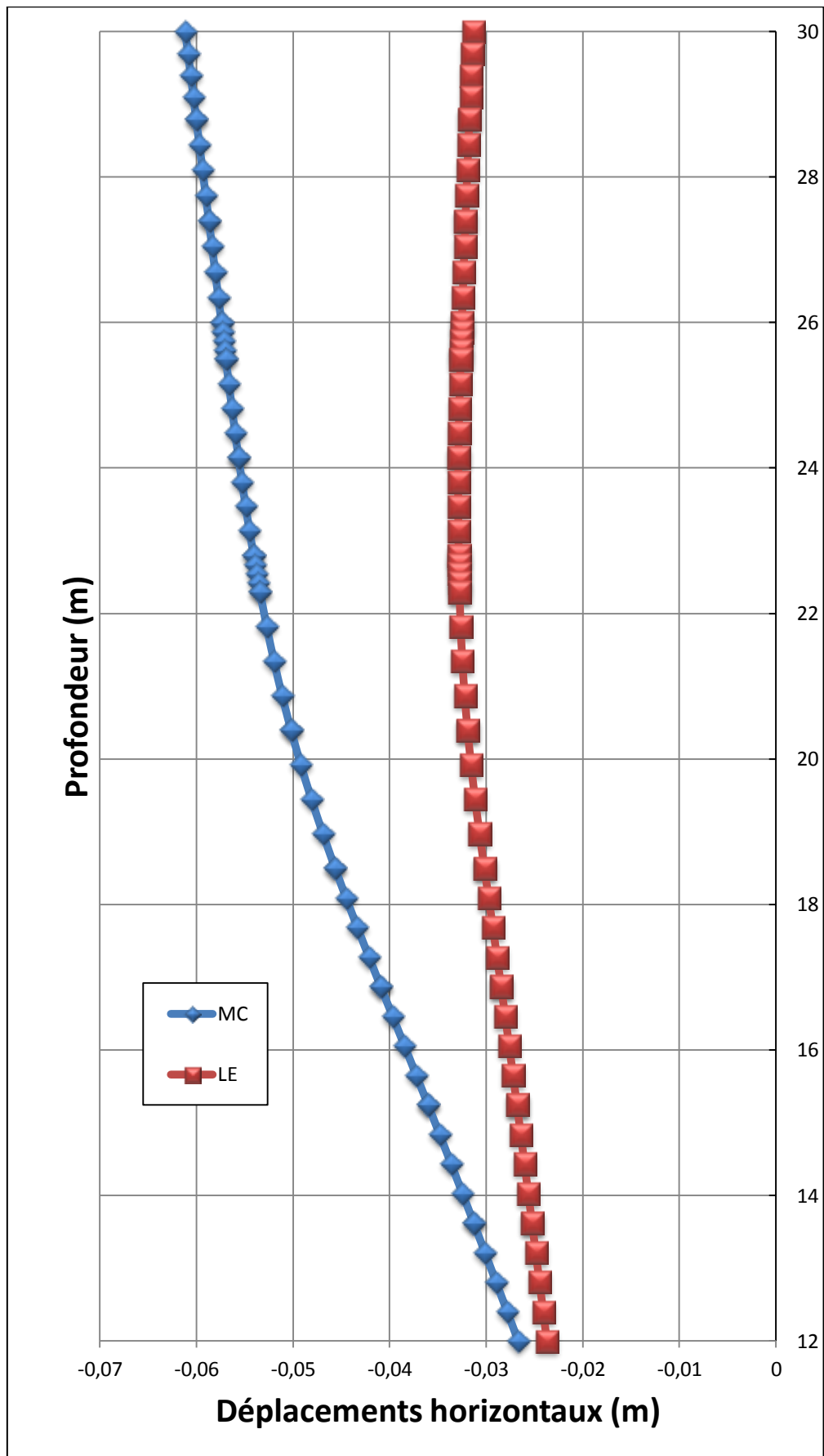


Figure 4.15 Paroi : influence du modèle de comportement sur les déplacements verticaux.

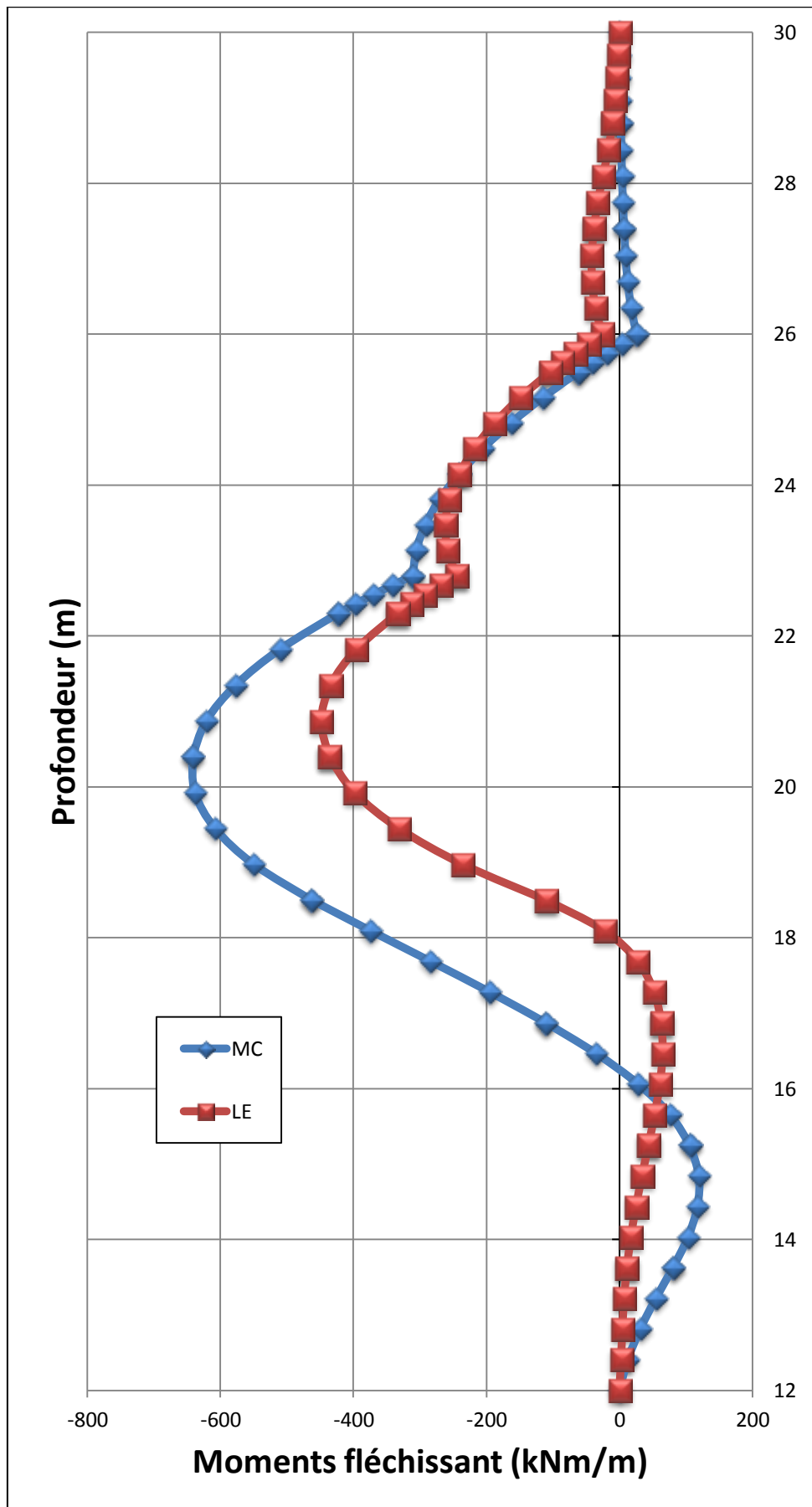


Figure 4.16 Paroi : influence du modèle de comportement sur les moments fléchissant.

b) Conclusion :

Pour le modèle de comportement : on passe de MC au *LE* on remarque :

- une diminution très important des déplacements de la paroi .
- une diminution des moments dans la paroi .

4.3.3 Effet des interfaces

La résistance de l'interface peut être définie grâce aux options suivantes :

***Rigide (*Rigid*) :** cette option est utilisée pour que l'interface n'influence pas la résistance du sol avoisinant. Par exemple, les interfaces s'étendant autour des angles d'un élément de structure ne sont pas significatives des interactions sol-structure et n'ont donc pas subi de réduction de leurs caractéristiques. Ces interfaces doivent être déclarées *Rigid* (ce qui correspond à $R_{inter}=1,0$). Ainsi, les propriétés de l'interface, y compris l'angle de dilatance ψ_i , sont identiques aux propriétés du sol excepté le coefficient de Poisson ν_i .

***Manuel (*Manual*) :** si la résistance d'interface est régie par l'option *Manual*, la valeur de R_{inter} peut être saisie manuellement. En général, pour des interactions réelles entre le sol et un élément de structure, l'interface est plus faible et plus déformable que la couche de sol associée, ce qui signifie que la valeur de R_{inter} est inférieure à 1.

Des valeurs représentatives de R_{inter} dans le cas d'interactions entre différents types de sols et de structures peuvent être trouvées dans la littérature. En l'absence d'informations plus détaillées, il est classique de prendre un R_{inter} d'environ $2/3$ pour un contact sable-acier et d'environ $1/2$ pour des contacts argile-acier ; les interactions avec du béton donnent des valeurs légèrement supérieures. Des valeurs de R_{inter} supérieures à 1 ne devraient normalement pas être utilisées [11].

Dans le modèle de référence on a pris un coefficient de rigidité d'interface égale à : 0,33 pour la 1ère couche, et 0,67 pour la 2ème et 0,5 pour la 3ème couche.

Pour les calculs de l'étude paramétrique on utilise :

- $R_{inter}-0,1$.
- $R_{inter}+0,1$.

Pour toutes les couches simultanément.

Les résultats des calculs sont :

a) Paroi moulée :

La comparaison des résultats est présentée par les courbes sur les (figures 4.17 et 4.18) suivantes :

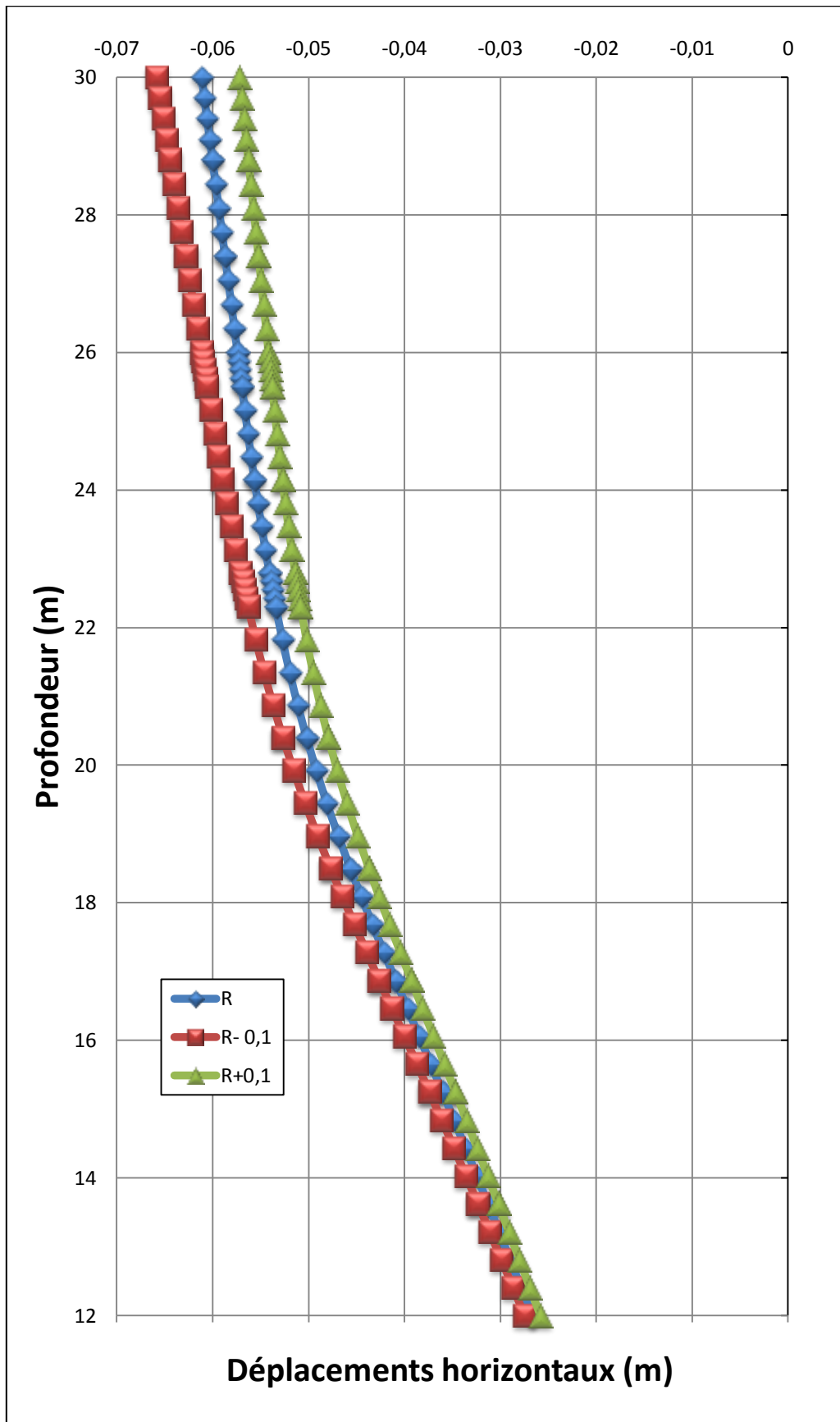


Figure. 4.17 Paroi : influence des interfaces sur les déplacements verticaux.

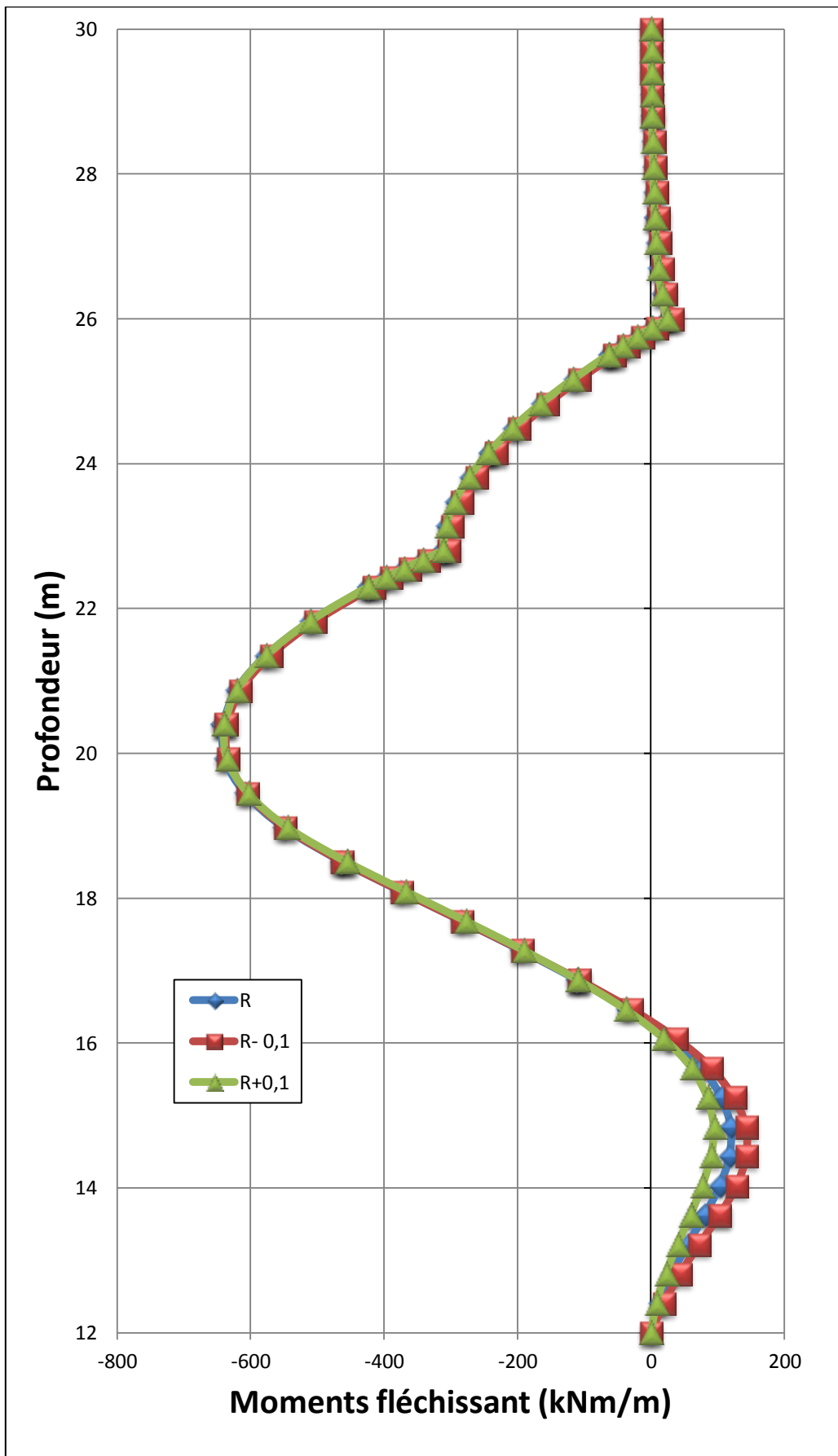


Figure 4.18 Paroi : influence des interfaces sur les moments fléchissant.

b) Conclusion :

Une augmentation du coefficient de rigidité d'interface conduit à :

- une diminution des déplacements de la paroi .
- on remarque une peu de changement des moments dans la paroi .

L'influence de ce paramètre est d'autant plus importante que ses valeurs sont plus faibles.

4.4 Conclusion :

En peut résumé les résultats de l'étude paramétrique sur le tableau suivant :

		Paroi moulée	
		déplacements	moments fléchissant
Paramètres de modélisations	Maillage 6 → 15	2%	3%
	Précision des calculs 1% → 3%	-1%	-0.4%
	3% → 6%	-1%	-1%
Paramètres Du sol	Cohésion c -5 kPa → c	-10%	-12%
	c → c +5 kPa	-8%	-7%
	Angle de frottement φ -5° → φ	-22%	-22%
	φ → φ +5°	-14%	-16%
	Module d'Young E -25% → E	-27%	-11%
	E → E +25%	-20%	-6%
	Coefficient de Poisson ν -0,1 → ν	8%	1%
	ν → ν +0,1	10%	1%
Les interfaces	R_{inter} -0.1 → R_{inter}	-10%	1%
	R_{inter} → R_{inter} +0.1	-8%	0.3%
Modèle de comportement Mohr-Coulomb → Lineair-Elastic		-50%	-30%

Tableau 4.1 Résumé des résultats de l'étude paramétrique

Conclusion

On a établi un calcul de référence pour un projet donné ; ce calcul de référence est une approximation raisonnable de la réalité.

On a fait varier individuellement plusieurs paramètres géotechniques et de calcul, et étudié leur influence.

Des calculs avec d'autres logiciels aux éléments finis doivent donner des résultats similaires, mais pas rigoureusement identiques.

Cette étude ne prétend pas être terminée : L'influence combinée de plusieurs paramètres, qui n'a pas été étudiée ici, peut bien sûr être encore plus importante.

Les conclusions tirées de cette étude paramétrique ne sont pas généralisables, même pour d'autres calculs équivalents.

L'étude présentée s'est limitée à une étude en deux dimensions.

L'étude paramétrique a mis en évidence l'influence de variation des paramètres géotechniques et de modélisation sur le comportement d'une paroi moulée tirantée. Donc, en doit donner une grande importance lors d'estimation et de choix de ces paramètres.

Cette étude explique clairement les résultats très différents qui peuvent être obtenus pour un même projet par plusieurs utilisateurs, même par le même logiciel.

D'où la nécessité de généraliser la pratique des tests de performance pour valider les logiciels, mais aussi pour aboutir à des recommandations concernant la modélisation d'ouvrages géotechniques.

Références Bibliographiques :

[01] **SAADI Riadh-** modélisation numérique d'une paroi de soutènement en zone urbaines.

Thèse de Magister, Université de Batna .

[2] **Magnan J.P. :** « Géotechnique 1ère année », tome 2, Ecole Nationale des Travaux

Publics de l'Etat, 1997.

[3] **Imbert J.F. :** « Analyse des structures par éléments finis », Edition SEPADUES, 1979.

[4] **Mestat P. :** « Maillages d'éléments finis pour les ouvrages de géotechnique »,

Bulletin des LCPC 212, 1997.

[5] **Lahmadi,** "Étude paramétrique de l'interaction entre ouvrages : Tunnel – Bâtiment – Excavation,"

Thèse de Magister, Université de Batna, 2006.

[6] **Boulon M., Flavigny E., Malecot Y. et ... :** « Pratique éclairée des éléments finis

en géotechnique », document 1, Laboratoire 3S et Terrasol, décembre 2004.

[7] **Brinkgereve R.B.J. et Vermeer P.A. :** « PLAXIS Version 8, scientific manual »,

DELFT University of Technology & PLAXIS BV, Pays-Bas, 2003.

[8] **Brinkgereve R.B.J. et Vermeer P.A. :** « PLAXIS Version 8 material model

manual», DELFT University of Technology & PLAXIS BV, Pays-Bas, 2003.

[9] A. Chouikha, "Dimensionnement d'une paroi moulée tirantée pour un bâtiment R+12," Journée technique de formation sur les grandes excavations en zones urbaines, TERRASOL Tunisie, Tunis le 25 avril 2008.

[10] **J-B. Kazmierczak,** "Excavation à l'abri d'une paroi moulée avec rabattement de nappe," Pratique

éclairée des éléments finis en Géotechnique, Laboratoire 3S et Terrasol, pp. 99-112, Paris 17-19

Novembre 2004.

[11] **Brinkgereve R.B.J. et Vermeer P.A. :** « PLAXIS Version 8, manuel de

référence», DELFT University of Technology & PLAXIS BV, Pays-Bas, 2003.

Annexe

PLAXIS Version 8 Professionnelle pour Windows

FINITE ELEMENT CODE FOR SOIL AND ROCK ANALYSES
<http://www.plaxis.nl>

CARACTERISTIQUES

PLAXIS V8 est un logiciel géotechnique aux éléments finis spécialement destiné à l'analyse en 2D des déformations et de la stabilité des ouvrages géotechniques. Les applications géotechniques nécessitent des lois de comportement avancées pour la simulation du comportement des sols et/ou des roches, non linéaire, dépendant du temps et anisotropie. De même, le sol étant un matériau polyphasique, des procédures spéciales sont nécessaires pour prendre en compte les pressions interstitielles, que celles-ci soient ou non hydrostatiques. Bien que la modélisation du sol lui-même soit un problème important, beaucoup de projets géotechniques impliquent également la modélisation des structures et de leur interaction avec le sol. PLAXIS est doté de fonctionnalités tout à fait remarquables pour traiter tous les aspects des structures géotechniques complexes. Un résumé des fonctions essentielles est donné ci-dessous :

SAISIE DES DONNEES :



Définition graphique de la géométrie : La définition des couches de sol, des ouvrages, des phases de construction, des chargements et des conditions aux limites s'appuie sur des procédures graphiques pratiques, ce qui permet une description précise de la coupe. Le maillage 2D est généré automatiquement à partir de ce modèle géométrique.



Génération automatique du maillage : PLAXIS offre une génération entièrement automatique de maillages non structurés d'éléments finis, avec des options pour raffiner le maillage, globalement ou localement. Le maillage peut contenir des milliers d'éléments.

Éléments de degré élevé : Des éléments triangulaires quadratiques à 6 noeuds et du 4^{ème} ordre à 15 noeuds sont disponibles pour modéliser les déformations et les contraintes dans le sol.



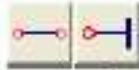
Coques : Des éléments spécifiques de poutre sont utilisés pour modéliser la flexion des murs de soutènement, des revêtements de tunnel et autres éléments élancés de structures. Ces éléments sont définis par leur rigidité de flexion, leur raideur normale et leur moment fléchissant ultime. Une rotule plastique est introduite dès que le moment ultime est atteint. Ces éléments peuvent être utilisés conjointement avec des éléments d'interface pour conduire des analyses réalistes de tous les ouvrages géotechniques.



Articulations et raideurs à la rotation : Une articulation est une liaison entre éléments de poutre qui permet une rotation au point de jonction. Les articulations peuvent être introduites pour créer des joints là où les rotations sont possibles. Il est également possible de définir une raideur à la rotation lorsque la liaison n'est ni une rotule ni un encastrement.



Interfaces : Ces éléments joints sont nécessaires pour les calculs impliquant l'interaction d'un ouvrage et du sol. Ils peuvent servir à modéliser la zone de matériau très fortement cisailé sous la base des fondations, contre les pieux, les géotextiles ou les murs de soutènement. Ils sont caractérisés par les valeurs de l'angle de frottement et de l'adhérence, qui ne sont pas nécessairement les mêmes que l'angle de frottement et la cohésion du sol encaissant.



Ancrages : Des éléments de ressort élastoplastique servent à représenter les ancrages et les boutons. Ils sont définis par leur raideur normale et la valeur maximale de l'effort normal. Une option spéciale permet d'analyser les ancrages ou appuis précontraints.



Géotextiles : Les géotextiles ou les géogrilles sont souvent utilisés dans la pratique pour la construction de remblais ou de soutènements en sol renforcé. Ils peuvent être simulés dans PLAXIS par l'emploi d'éléments spéciaux de traction. Il est souvent commode d'associer ceux-ci avec des éléments d'interface pour modéliser l'interaction avec le sol encaissant.



Tunnels : PLAXIS offre une option qui facilite la création des tunnels circulaires ou non circulaires composés d'arcs successifs. Des éléments de poutre et d'interface peuvent être adjoints pour modéliser le revêtement du tunnel et l'interaction avec le sol encaissant. Des éléments isoparamétriques servent à définir les limites curvilignes au sein du maillage. Plusieurs options sont également disponibles pour analyser les déformations provoquées par la construction du tunnel.



Conditions aux limites : Les "fixités" sont des déplacements nuls imposés. Ces conditions peuvent être appliquées aux lignes comme aux points définissant la géométrie du modèle, dans les directions x ou y. D'autre part, il est possible de définir des déplacements imposés non nuls pour certaines frontières du modèle. Une option permet d'appliquer les conditions d'appui standard valables dans la majorité des cas.



Chargements : Deux systèmes de chargement indépendants sont proposés pour appliquer des forces ponctuelles ou des charges réparties. Les forces ponctuelles peuvent être appliquées à n'importe quel point de la géométrie, les charges réparties sur n'importe quelle ligne de la géométrie, sans se limiter à la seule frontière extérieure. Les valeurs des chargements peuvent être modifiées dans le mode "Construction par étapes" et/ou par l'utilisation des multiplicateurs.

LOIS DE COMPORTEMENT DU SOL :



Base de données des matériaux : Les propriétés des matériaux sont regroupées dans une base de données du projet. Toutes les données figurant dans les bases de données de différents projets peuvent être partagées via une base de données globale.

Modèle de Mohr-Coulomb : Ce modèle non-linéaire simple et robuste n'utilise que des paramètres qui sont connus habituellement. Tous les facteurs de non-linéarité ne sont cependant pas couverts par ce modèle. Le modèle de Mohr-Coulomb permet d'estimer de manière réaliste la charge de rupture de fondations circulaires, de pieux courts, ... etc. Il peut également servir à calculer un coefficient de sécurité par une approche de ϕ -c réduction.

Modèles avancés de sol : PLAXIS offre d'autres modèles de comportement de sol : le *Hardening Soil Model* (modèle hyperbolique en élastoplasticité) pour les sols raides, comme les argiles surconsolidées et les sables ; le *Soft Soil Creep Model* (modèle de type Cam-Clay) pour l'analyse du comportement des sols compressibles normalement consolidés. En complément,

PLAXIS inclut un modèle pour l'analyse des roches en comportement anisotrope : le *Jointed Rock model*.

Modèles définis par l'utilisateur : dans *PLAXIS 8*, l'utilisateur a la possibilité de définir ses propres lois de comportement. Cette option, particulièrement utile en premier lieu pour les chercheurs, dans les universités et les instituts de recherche, peut également se révéler intéressante dans les milieux professionnels. Dans les années à venir, les modèles validés et documentés fournis par les utilisateurs seront mis à disposition sur Internet.



Régime d'écoulement permanent : Des réseaux complexes de pressions interstitielles peuvent être générés par combinaison de lignes phréatiques et de saisie directe de pressions. Les pressions interstitielles peuvent également être générées par un calcul d'écoulement permanent.



Calcul du réseau d'écoulement : Les distributions de pressions interstitielles complexes peuvent être générées à partir d'un calcul d'écoulement à deux dimensions. Des drains et des puits peuvent être modélisés grâce à des éléments spécifiques. Les potentiels aux limites du modèle sont définis comme des niveaux phréatiques.

Suppressions interstitielles : *PLAXIS* distingue les comportements drainés ou non drainés des sols, pour modéliser les sables perméables comme les argiles quasi-imperméables. Les suppressions interstitielles sont calculées lorsque des couches de sol non drainé sont soumises à des chargements. Les conditions de chargement non drainé conditionnent souvent la stabilité des ouvrages géotechniques.

FONCTIONS DE CALCUL :



Le programme de calcul permet de conduire des analyses en déformation menées par un calcul plastique, un calcul de Consolidation ou un calcul en Grandes déformations. Pour chaque projet, plusieurs phases de calcul peuvent être définies avant le lancement du calcul.

Incrémentation automatique du pas de chargement : Ce mode évite à l'utilisateur d'avoir à choisir par lui-même les pas de chargement adaptés au calcul plastique incrémental, tout en garantissant une procédure de calcul fiable et efficace.

Contrôle de la longueur d'arc : Cette fonction permet un calcul correct des charges et mécanismes de rupture. Dans les calculs à charge contrôlée, la procédure itérative échoue dès que la charge imposée dépasse la valeur de pic. Avec le contrôle de la longueur d'arc, la charge appliquée est automatiquement réduite pour pouvoir examiner le phénomène de pic ainsi que toute évolution éventuelle après ce pic.

Construction par étapes : Il est possible de simuler les phases de construction ou d'excavation, par activation/désactivation de groupes d'éléments, application de chargements ou changement des conditions hydrauliques. Cette procédure permet une estimation réaliste des contraintes et déplacements provoqués par exemple par la construction d'un barrage en terre ou une excavation profonde.

Consolidation : La dissipation des suppressions interstitielles avec le temps peut être simulée par un calcul de consolidation. Une analyse de consolidation nécessite la définition des perméabilités de chacune des couches de sol. Des procédures d'incrémentement automatique du pas de temps rendent l'analyse performante et facile à utiliser. L'option "Construction par étapes" peut être combinée avec une analyse en consolidation.

Analyse en variables de Lagrange actualisées : Avec cette option, le maillage est actualisé en permanence durant le calcul. Dans certaines situations, une analyse classique en petites déformations peut révéler des modifications importantes de la géométrie. Dans ces situations, il est recommandé de procéder à un calcul plus précis par actualisation des variables de Lagrange. Cette option est disponible pour tous les types de calcul.

Coefficients de sécurité : Le coefficient de sécurité est généralement défini comme le rapport de la charge de rupture à la charge de service. Cette définition est adaptée aux fondations, mais non aux remblais ou aux ouvrages de soutènement en palplanches. Dans ces derniers cas, il est plus approprié d'utiliser la définition du coefficient de sécurité de la mécanique des sols, c'est à dire le rapport entre la résistance au cisaillement mobilisable et la résistance au cisaillement mobilisée à l'équilibre. Dans *PLAYS*, le coefficient de sécurité est calculé par une procédure de réduction de c et ϕ .

Gestionnaire de calculs : Dans le gestionnaire de calculs, plusieurs projets peuvent être sélectionnés pour un calcul différé. Cette option permet une utilisation optimale de l'ordinateur en arrière-plan, et est utile dans le cas d'études paramétriques.

ANALYSE DES RESULTATS :

Le post-processeur *PLAYS* a des fonctions avancées pour restituer les résultats du calcul, sous forme de graphiques et tableaux. Ceux-ci peuvent être envoyés sur n'importe quel imprimante ou copiés dans le presse-papier de Windows pour être exportés vers un autre logiciel.

Déformations : La visualisation des déformations peut se faire sous la forme de maillage déformé, de déplacements ou déformations totaux ou incrémentaux. Tous les graphiques de déplacement ou de déformation peuvent être présentés avec flèches, lignes isovaleurs ou domaines isovaleurs.

Contraintes : La restitution des contraintes peut se faire en contraintes effectives, contraintes totales, pressions interstitielles et surpressions interstitielles. Ces contraintes peuvent être figurées en lignes isovaleurs comme en domaines isovaleurs.

Efforts et déplacements dans les éléments de structure : Des graphiques et tableaux fournissent directement les déplacements, efforts normaux, tranchants, circonférentiels et les moments fléchissant de tous les éléments de structure. Les efforts et déplacements peuvent être tracés par phase, ou sous forme d'enveloppe de toutes les phases précédentes.



Coupes : Cette option très commode est offerte par *PLAYS* pour créer des graphiques des sollicitations ou des déplacements selon des coupes sélectionnées dans le modèle.



Générateur de rapports : Un générateur de rapport a été développé pour permettre l'édition d'un rapport des données saisies et des résultats obtenus pour un modèle. Ce rapport peut être édité dans Word.

Animations : Il est possible de générer des animations vidéo pour toutes les sorties graphiques, notamment les déplacements et efforts dans les éléments de structure.



Courbes : Un outil spécifique permet de représenter les courbes charge-déplacement, les chemins de contraintes, les courbes effort-déformation, ou encore l'évolution de tassements avec le temps.

Résumé :

Les parois moulées offrent un large champ d'application dans le domaine de réalisation de fouilles en déblai, pour les fouilles de grande profondeur et en site urbain.

Le présent travail s'intéresse à l'étude de l'effet des paramètres géotechniques (modèle de comportement, les interfaces et les écoulements) et de modélisation (géométrie du problème, maillage et tolérance) sur le comportement d'une paroi moulée.

Le modèle de référence c'est une paroi moulée périphérique rectangulaire, et qui a été réalisé pour le soutènement de trois niveaux en sous-sols surmontant par une tour, l'ensemble constitue le nouvel immeuble d'Algérie Poste.

La modélisation numérique est réalisée à l'aide du code d'éléments finis Plaxis.

Les résultats obtenus montrent l'influence importante de variation de certains paramètres sur le calcul.

Mots-Clefs :

Paroi moulée, modélisation, éléments finis, paramètre géotechnique.

Abstract:

The diaphragm walls offer a broad field of application in the field of realization of excavations out of cut, for the excavations of great depth and in urban site.

This work is interested in the study of the effect of the geotechnical parameters (model of behavior, interfaces and flows) and of modeling (geometry of the problem, grid, and tolerance) on the behavior of a diaphragm wall.

The model of reference it is a rectangular peripheral diaphragm wall, and which was carried out for the supporting of three levels in basements surmounting by a tower, the unit constitutes the new building of Algeria Mail.

Numerical modeling is carried out using the code of finite elements Plaxis. The results obtained show the important influence of variation of certain parameters on calculation.

Key-Words:

Diaphragm wall, modeling, finite elements, geotechnical parameter.

ملخص:

الجدران الحاجزة توفر نطاق واسع في مجال إجراء البحوث في قطاع الحفر العميق في المواقع الحضرية. ويركز هذا العمل على دراسة تأثير عوامل الجيوتقنية (سلوك النموذج، واجهات والتدفقات) والنمذجة (شبكة و التسامح) على سلوك جدار الحاجز.

النموذج المرجعي للجدران الحاجز مستطيل الذي انجز لدعم ثلاثة مستويات تحت الارض للمبنى الجديد لبريد الجزائر. وتم تنفيذ النماذج العددية باستخدام plaxis.

وأظهرت النتائج التي تم الحصول عليها عن وجود اختلاف في التأثيرات عند تغيير بعض الإعدادات على الحساب.