

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abou Bekr Belkaid -Tlemcen
Faculté de Technologie
Département de Génie Civil



Mémoire pour l'Obtention du Diplôme de
Master en Génie Civil
Infrastructures de Base et Géotechnique
Option : Travaux Publics

Thème :

LES SOURCES D'ERREURS EN MODELISATION NUMERIQUE :
APPLICATION AUX OUVRAGES GEOTECHNIQUES

Présenté par :

M^{elle} ABDERRAHIM Zahia

Soutenu le 23 juin 2014 devant le jury composé de :

Mr ALLAL M.A.	Professeur	Président
M ^{me} BOUCIF N.	M.A.A.	Examinatrice
M ^{elle} KHELIFI Z.	Chercheur	Examinatrice
Mr ABOU-BEKR N.	Professeur	Encadreur
M ^{me} BENCHOUK A.	M.C.B.	Encadreur

REMERCIEMENTS

Je remercie d'abord mes encadreurs Monsieur ABOU-BEKR N. et Madame BENCHOUK A. pour leurs soutiens et leurs aides durant toute la période pour élaborer ce mémoire. Je leurs exprime mes vives et respectueuses gratitudees.

Je tiens également à remercier Monsieur ALLAL M.A. d'avoir accepté de présider le jury de mon projet de fin d'étude.

Je remercie aussi Madame BOUCIF.N. et Mademoiselle KHELIFI.Z. d'avoir bien voulu examiner ce projet.

J'adresse également ma profonde attitude à tous les enseignants de l'université d'Abou Bekr-Belkaid et en particulier à ceux du département de génie civil.

Enfin je remercie toutes les personnes qui de prés ou de loin ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

DEDICACES

*Je dédie ce mémoire, le fruit de mon travail durant tous les années
de mes études à:*

*A mon père et ma mère que dieu les protège, qui m'ont offert tous les
moyens,*

*Ainsi leurs encouragements avec lesquels j'ai pu atteindre ce
niveau.*

A mes frères Youssouf et Rabie.

A mes sœurs Kheira, Nawal et Nadiya

A mes nièces Fatiha, Ikram et Nardjisse.

*A tous mes amis (es), toute ma famille (ABDERRAHIM et
BELMAHI) et à la promotion M2 IBG-TP (2013 et 2014).*

*A tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de
ce mémoire.*

Enfin, à tous ceux qui m'aiment.

A vous.....

ABDERRAHIM Zahia

ملخص

الهدف من هذا العمل هو توجيه المهندس إلى الاستعمال الحذر لبرامج الحساب في نمذجة الهياكل. الدراسة التي تم اختيارها هي هيكل حقيقي مجهز وهي حالة الحفر المُسند بالألواح المثبة. الهيكل منمذج بواسطة برنامج Plaxis. نركز بشكل خاص على الانتقال الأفقي على مسافة 2م وراء الجدار الاستنادي. بعد العملية الحسابية الأولى بالنموذج وقيم الوسائط المرجعية، نفذت العديد من العمليات الحسابية من حيث تغيير الوسيط (وسيط ميكانيكي، ووسيط هندسي، الخ.). كل تغيير في قيمة الوسيط قد تُعبّر عن خطأ محتمل (خطأ في القياس أو في تفسير التجربة، خطأ في الوحدة). تستخدم النتائج المتحصل عليها لجذب انتباه المهندس لحساسية النموذج وفق المعطيات المعبرة وبالتالي الرؤية بطريقة واضحة بأن نوعية النتائج ترتبط ارتباطاً وثيقاً بنوعية المعطيات.

الكلمات المفتاحية

نمذجة، برنامج حساب، هيكل، الوسائط الجيوتقنية، خطأ.

RESUME

L'objectif de ce travail est d'orienter l'ingénieur vers une utilisation avertie des codes de calcul pour la modélisation des ouvrages.

Le cas d'étude choisi est un ouvrage réel instrumenté. Il s'agit d'une excavation soutenue par des palplanches ancrées. L'ouvrage est modélisé par le code Plaxis. On s'intéresse notamment aux déplacements horizontaux à une distance de 2m derrière le soutènement.

Après un premier calcul avec un modèle et un jeu de données de référence, plusieurs calculs sont menés où un paramètre est varié (paramètre mécanique, géométrique, etc.). Une variation d'un paramètre correspond à une erreur éventuelle (erreur de mesure ou d'interprétation d'un essai, erreur d'unité).

Les résultats obtenus permettent d'attirer l'attention de l'ingénieur sur la sensibilité d'une modélisation aux données introduites et par conséquent de voire de façon très claire que la qualité des résultats est directement liée à la qualité des données.

Mots clés

Modélisation, code de calcul, ouvrage, paramètres géotechniques, erreur.

Abstract

The objective of this work is to direct the engineer towards an informed use of the numerical codes for the modeling of the structures.

The selected case of study is an instrumented structure. It is about an excavation supported by anchored sheet piles. The structure is modeled by Plaxis code. One is interested in particular in horizontal displacements at a distance of 2m behind sheet piles.

After the first calculation with a model and a reference data file, several calculations are carried out where a parameter is varied (mechanical parameter, geometrical parameter, etc). A variation of a parameter corresponds to a possible error (error of interpretation of a test, error of measurement, error of unit).

The results obtained make it possible to draw the attention of the engineer to the sensitivity of a modeling for the introduced data and consequently of even in a very clear way that the quality of the results is directly related to the quality of the data.

Key words

Modeling, numerical code, structure, geotechnical parameters, error.

SOMMAIRE

RESUME	I
LISTE DES FIGURES.....	V
LISTE DES TABLEAUX.....	VII
LISTE DES SYMBOLES	VIII
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : SOURCES D'ERREURS DANS LES CODES.	
1. Introduction	2
2. La méthode des éléments finis	2
3. Définition d'erreur.....	3
4. Types d'erreurs	4
4.1. Erreurs de discrétisation	5
4.1.1. Les erreurs dues au pas de temps	6
4.1.2. Les erreurs dues à la discrétisation spatiale	6
4.1.3. Les erreurs dues au chargement	6
4.2. Erreurs de modèle liée au modèle théorique.....	7
4.3. Erreurs de convergence	8
4.4. Erreurs de calcul	8
4.5. Erreurs de données (les erreurs dues au modélisateur)	9
4.6. Erreurs globales et erreurs locales	10
4.6.1. Les erreurs globales :	10
4.6.2. Les erreurs locales :	10
4.7. Erreurs de pollution.....	10
5. Amélioration de la qualité de modèle et l'analyses des erreurs par éléments finis	11
6. L'estimation des erreurs	11
6.1. L'estimation d'erreur à priori.....	12
6.2. L'estimation d'erreurs à posteriori.....	12
6.2. 1. Estimateurs d'erreur utilisant le concept d'analyse duale	14

6.2.2. Estimateurs d'erreur par la relation de comportement	14
6.2. 3. Estimateur d'erreur sur les résidus d'équilibre.....	15
a. Estimateurs d'erreur par résidus implicites	15
b. Estimateurs d'erreur par résidus explicites.....	15
6.2.4. Extrapolation de Richardson	15
6.2.5. Estimateurs d'erreurs basés sur le lissage des contraintes	15
6.2.6. Estimateurs d'erreurs basés sur les bases hiérarchiques	15
6.3. Qualité et performances d'un estimateur d'erreur	16
7. Exemples sur l'application d'erreurs.....	16
8. Conclusion.....	21

CHAPITRE II : CHOIX D'UN CAS D'ETUDE : EXCAVATION A CHICAGO.

1. Introduction	22
2. Généralités sur les palplanches	22
2.1. Introduction	22
2.2. Définition des palplanches.....	22
2.3. Les type de palplanches.....	23
2.3.1. Palplanches en porte à faux	23
2.3.2. Rideaux plans (rideaux simples)	23
2.4. L'usage de palplanches.....	24
2.5. Mise en place de palplanches	25
3. Présentation du cas d'étude (excavation en milieu urbain à Chicago).....	25
3.1. Description du site.....	25
3.2. Modélisation de l'ouvrage (Moussaoui, 2011)	28
4. Conclusion.....	30

CHAPITRE III : APPLICATION : MODELISATION DU CAS D'ETUDE PAR PLAXIS.

1. Introduction	31
2. Présentation de L'outil de Modélisation Numérique Plaxis	31
3. Paramètres du calcul dans le code d'éléments finis Plaxis	32
▪ Le modèle Mohr-Coulomb	32
-Module de cisaillement.....	32
-L'angle de frottement	33

-La cohésion	33
-L'angle de dilatance	33
4. Présentation du modèle	33
5. Modélisation de l'ouvrage	34
5.1. Géométrie et maillage	35
5.2. Les données géotechniques.....	35
5.3. Les conditions initiales et les conditions aux limites.....	36
6. Erreurs sur les paramètres rhéologiques	39
6.1. L'influence du module de cisaillement G	39
6.2. L'influence de la cohésion.....	42
6.3. L'influence de l'angle de frottement	43
6.4. L'étendue du modèle.....	45
6.5. L'étendue du maillage	46
6.6. L'influence de la nappe phréatique.....	47
6.7. L'influence de l'angle de dilatance	48
7. Conclusion	50
CONCLUSION GENERALE.....	51
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	52
WEBOGRAPHIE	53

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1:les mesures expérimentales d'essai (Favre, 1998).	18
Figure I. 2:les mesures numériques d'essai (Favre, 1998).....	18
Figure I. 3:la différence entre les mesures numériques et expérimentales (Favre, 1998).	19
Figure I. 4:Erreur de discrétisation (Mestat, 2006). Figure I. 5:Erreur de modèle (Mestat, 2006).	19
Figure I. 6:Erreur de convergence (Mestat, 2006).	20
Figure II. 1:Un rideau de palplanche (Schlosser, 1991).	22
Figure II. 2:La déformé d'un rideau de palplanches soumis à une pression $p(z)$ (Schlosser, 1991).	23
Figure II. 3: Rideaux plans (Bousquet, 1980).	24
Figure II. 4:Plan de l'ouvrage et instrumentation du site (Rechea <i>et al.</i> , 2008)	26
Figure II. 5:Profil d'excavation en milieu urbain <i>Lurie Research Center</i> (Rechea <i>et al.</i> , 2008)..	27
Figure II. 6: Modèle éléments finis 2D en déformation plane et maillage associé.....	28
Figure II. 7:Déplacement horizontal deux mètres derrière le rideau de palplanches en fonction de la profondeur (Moussaoui, 2011).	30
Figure III. 1:Modèle éléments finis 2D en déformation plane et maillage associé.....	34
Figure III. 2:Géométrie du modèle de référence.	35
Figure III. 3:Schéma représentatif du maillage.	37
Figure III. 4:Schéma représentatif de la déformée du maillage.	37
Figure III. 5 : Schéma représentatif du déplacement horizontal du modèle.....	38
Figure III. 6:Déplacement horizontal en fonction de la profondeur du modèle de référence.	38
Figure III. 7:Les courbes du déplacement horizontal expérimental et numérique en fonction de la profondeur.....	39
Figure III. 8:Déplacement horizontal en fonction de la profondeur en faisant varier G du sable.....	41
Figure III. 9:Déplacement horizontal en fonction de la profondeur en faisant varier G de l'argile.	41
Figure III. 10:Déplacement horizontal en fonction de la profondeur faisant varier C d'argile.	43
Figure III. 11:Déplacement horizontal en fonction de la profondeur en variant ϕ du sable. ..	44
Figure III. 12:Déplacement horizontal en fonction de la profondeur faisant varier ϕ d'argile.	45
Figure III. 13:Déplacement horizontal en fonction de la profondeur en changeant les dimensions de modèle.....	46
Figure III. 14:Déplacement horizontal en fonction de la profondeur en changeant la densité du maillage.....	47

Figure III. 15: Déplacement horizontal en fonction de la profondeur en supprimant la nappe phréatique.....	48
Figure III. 16 : Déplacement horizontal en fonction de la profondeur en faisant varier Ψ de sable.....	49

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. 1:Liste des estimateurs d'erreurs a posteriori (cité par Vulpe, 2011).	14
Tableau I. 2:Erreurs de calcul relatives estimées d'après les résultats de concours de prévisions en aveugle, tous modèles de calcul confondus (Mestat et al. ,2000).....	17
Tableau I. 3:Les différents types d'erreurs.	20
Tableau II. 1:Les caractéristiques du rideau de palplanches et les butons (Moussaoui, 2013).	29
Tableau II. 2:Les valeurs des paramètres du modèle de comportement (Moussaoui, 2013)..	29
Tableau III. 1:données géotechniques.....	36
Tableau III. 2:Les caractéristiques du rideau de palplanches et les butons.	36
Tableau III. 3:Les valeurs des paramètres du modèle de comportement en faisant varier la valeur de G du sable.	40
Tableau III. 4:Les valeurs des paramètres du modèle de comportement en faisant varier la valeur de G de l'argile.....	40
Tableau III. 5:Les valeurs des paramètres du modèle de comportement faisant varier la cohésion de l'argile.....	42
Tableau III. 6:Les valeurs des paramètres du modèle de comportement en faisant varier l'angle de frottement du sable.....	43
Tableau III. 7:Les valeurs des paramètres du modèle de comportement en faisant varier l'angle frottement d'argile.....	44
Tableau III. 8: Les valeurs des paramètres du modèle de comportement en faisant varier l'angle de dilatance de sable.....	Erreur ! Signet non défini.

Liste des symboles.

C : La cohésion.

d : L'épaisseur équivalente.

EA : La rigidité normale.

EI : La rigidité de flexion.

G_{ref} : Le module de cisaillement.

ϕ : L'angle de frottement.

W : Le poids linéique.

γ_d : Poids volumique du sol sec.

γ_{sat} : Poids volumique du sol saturé.

ψ : L'angle de dilatance.

ν : Le coefficient de poisson.

Introduction générale

L'évolution de la technologie amène l'ingénieur à réaliser des projets géotechniques 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 (Moussaoui, 2013).

Parmi celles-ci, La méthode des éléments finis a été largement utilisée dans la conception des ouvrages géotechniques, notamment l'analyse des travaux d'excavation et les projets des grands ouvrages de soutènement.

Mais dans certains cas on trouve une différence remarquable entre les résultats obtenus par la mesure et ceux de la modélisation numérique appliquée à un ouvrage géotechnique. Ces écarts reviennent aux erreurs non identifiées et la qualité des calculs numériques.

Ces erreurs sont souvent dues à une absence de mesure des paramètres géotechniques ou à des mesures mal conduites ou mal interprétées.

L'objectif de ce travail est d'identifier les types d'erreurs qu'on peut rencontrer dans une modélisation numérique d'un ouvrage géotechnique et ceci à partir d'une application sur un ouvrage réel instrumenté.

Pour cela, nous avons choisi comme modèle une excavation en milieu urbain réalisée à Chicago et les calculs ont été effectués en utilisant le code aux éléments finis Plaxis.

Le présent mémoire est composé de trois chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à la recherche bibliographique : une identification des différentes sources d'erreur dans les codes à prendre en compte.
- Le deuxième chapitre présente des généralités sur les palplanches, ainsi que le modèle géotechnique retenu pour cette étude.
- Le troisième chapitre est consacré à la description générale du logiciel (Plaxis) ainsi qu'aux résultats obtenus pour le cas d'étude et leur sensibilité aux variations des différents paramètres. L'interprétation des résultats fait également appel aux résultats obtenus par la mesure in situ.

Enfin une conclusion générale est présentée pour synthétiser les principaux résultats.

CHAPITRE I

SOURCE D'ERREURS DANS LES CODES

1. Introduction

Les deux techniques disponibles pour étudier un ouvrage géotechnique à savoir l'expérience et la modélisation, sont toutes les deux imparfaites et présentent de nombreuses possibilités d'erreurs.

Comme la majorité des techniques de modélisation, la méthode des éléments finis ne fournit qu'une solution approchée d'un problème donné.

Les erreurs peuvent avoir plusieurs origines, Il est donc indispensable de s'intéresser aux résultats des valeurs calculées en fonction des erreurs induites par les différents moyens qui participent à l'évaluation d'un ouvrage géotechnique pour assurer la qualité laquelle est un compromis entre ce qui est souhaitable et ce qui est possible.

Se pose alors la question de la fiabilité des résultats numériques employés, qu'il faut être en mesure de certifier au moyen d'outils adaptés afin de s'assurer que les résultats obtenus soient proches de la réalité tout en quantifiant l'écart par rapport à cette dernière.

Ce chapitre sera consacré au développement de cette problématique ou on suivra la démarche suivante :

Premièrement on donne une présentation de la méthode des éléments finis et la signification du mot « erreur », ensuite on citera les différentes sources d'erreur dans une modélisation d'un ouvrage géotechnique.

Après ça on mentionne les méthodes d'estimation des erreurs, Et enfin on donne quelques exemples pour expliquer l'effet des erreurs sur les résultats de la modélisation numérique.

2. La méthode des éléments finis

Depuis une trentaine d'années, les méthodes numériques et plus particulièrement la méthode des éléments finis interviennent dans le calcul des ouvrages de géotechnique.

Les outils d'aide à la modélisation devenant de plus en plus perfectionnés, l'utilisation de la méthode des éléments finis s'est largement développée et peut sembler de moins en moins une affaire de spécialistes.

Si l'utilisation de la méthode se démocratise de par la simplicité croissante de mise en œuvre, la fiabilité des algorithmes et la robustesse de la méthode, il reste néanmoins des

questions essentielles auxquelles l'ingénieur devra répondre s'il veut effectuer une analyse par éléments finis dans de bonnes conditions :

- Formaliser les non dits et les réflexions qui justifient les choix explicites ou implicites de son analyse du problème.
- Evaluer la confiance qu'il accorde aux résultats produits.
- Analyser les conséquences de ces résultats par rapport aux objectifs visés.

La méthode des éléments finis se propose de mettre en place, sur la base de formulations faibles, un algorithme discret (discrétisation) permettant de rechercher une solution approchée d'un problème aux dérivées partielles sur un domaine compact avec conditions aux bords et ou dans l'intérieur du compact.

Il s'agit donc de répondre aux questions d'existence et d'unicité de la solution, de stabilité, convergence des méthodes numériques, ainsi que d'apprécier l'erreur entre la solution exacte et la solution approchée (indicateurs et estimateurs d'erreur, a priori et a posteriori).

3. Définition d'erreur

Pour une grande classe des problèmes de génie civil et plus spécifiquement dans le domaine de géotechnique le terme "erreur" y est utilisé et interprété de plusieurs façons selon les personnes et le domaine d'application, il englobe les concepts d'ambiguïté et de variabilité et assure la qualité de calcul.

Il s'est avéré que la méthode d'élément fini est un outil flexible, particulièrement aux problèmes géotechniques. Puisque les méthodes numériques rapportent les solutions approximatives, il est essentiel de présenter quelques mesures d'erreur et d'employer l'amélioration pour garder cette erreur dans les limites prescrite pour s'assurer que la méthode d'élément fini est effectivement employée pour l'analyse pratique. L'erreur est alors commandée par l'arrangement adaptatif pour atteindre une exactitude donnée.

En premier lieu il est nécessaire de définir ce que nous voulons dire par « erreur ». Cela nous conduit à savoir qu'il y a trois types de « solutions » (Vulpe, 2011) :

- La solution réelle : est obtenue à partir des mesures in situ sur l'ouvrage. Elle représente la solution globale prenant en compte les comportements et interactions de l'ensemble du problème physique. Elle ne peut pas être obtenue par calculs.
 - La solution théorique : représente la solution exacte du problème mathématique issu de la physique et de la mécanique en tenant compte des conditions aux limites.
-

- La solution numérique : représente la solution obtenue pour le problème d'éléments finis. C'est une solution approchée car des hypothèses simplificatrices interviennent en grand nombre dans son estimation.

Le contrôle de la qualité du calcul par éléments finis consiste à comparer la solution approchée avec la solution exacte du problème qui est considéré comme « une erreur ». Par raisons de simplification, on peut dire que l'erreur est l'écart entre l'estimation et la « vraie valeur » ou la différence entre la valeur mesurée d'une grandeur et une valeur de référence.

4. Types d'erreurs

La modélisation a été définie comme une démarche permettant d'étudier la réalité en lui associant un monde virtuel supposé équivalent. Le modèle, n'est que l'outil de représentation de cette réalité et ne peut donc pas la décrire telle qu'elle est. Il est donc nécessaire d'associer une incertitude à l'étude de la réalité virtuelle.

Si l'on adapte la définition d'incertitude de mesure, l'incertitude d'une grandeur modélisée peut être définie comme une valeur associée au résultat d'un modèle. Cette valeur caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées à la valeur exacte de la grandeur modélisée.

Ainsi, l'incertitude associée à une grandeur modélisée peut être évaluée en utilisant l'analyse des incertitudes. Cette représentation permet de bien préciser la signification du concept « source d'erreur ».

Depuis 1960 les chercheurs ont démontré l'importance des codes de calculs numériques dans la conception et l'analyse de comportement des ouvrages géotechniques par la méthode des éléments finis qui permette de rassembler les étapes dans l'élaboration d'un modèle de calcul mais de multiples raisons peuvent faire que l'exécution d'un programme ne produit pas le résultat souhaité. Du côté de l'élaboration du code et pour obtenir une meilleure qualité il faut d'abord identifier les erreurs et leurs sources.

Dans n'importe quelle approche de modélisation et pour n'importe quel type d'utilisation, il est donc possible d'induire que les sources d'erreur proviennent :

- Erreurs de discrétisation (ou d'approximation).
- Erreurs de modèle liée au modèle théorique.
- Erreurs de convergence.
- Erreurs de calcul.
- Erreurs de données.

Mestat et al(2000) ont cité quelques exemples de données pouvant entraîner des erreurs :

- Mauvaise valeur pour les paramètres des modèles (lois de comportement d'interfaces, de couplage, etc.).
- Valeur impossible pour un paramètre de comportement (par exemple : module d'Young ou coefficient de Poisson négatifs, angle de frottement supérieur à 60 degrés, etc.).
- Nombre d'incrément trop petit ou accroissements de chargement trop forts.
- Nombre d'itérations trop faible, tolérance trop forte pour les tests de convergence.
- Inadaptation des pas de temps pour un problème d'évolution.
- Choix d'une méthode de résolution incompatible avec la loi de comportement retenue (ce peut être le cas pour des lois d'écoulement plastique non associées).
- Données implicites dans le code incompatibles avec le calcul souhaité par l'utilisateur (par exemple, nombre de sous-pas d'intégration par défaut trop faible), etc.

4.1. Erreurs de discrétisation

Ces types d'erreurs dues à la technique des éléments finis ou dues aux hypothèses utilisées pour décrire le modèle mathématique (méthode de résolution approchée, algorithmes utilisés, l'évolution de maillage, méthode itérative, traitement des équations de comportement, loi de chargement appliquée) . Et à la mise en œuvre par l'utilisateur (hypothèses de calcul, type d'analyse et d'éléments, élaboration du maillage, taille de problème, choix du modèle bidimensionnel ou tridimensionnel, etc.).

Donc la réalisation d'un maillage nécessite de nombreuses étapes et souvent la manipulation de plusieurs sous-maillages qu'il faudra ensuite assembler. C'est généralement une bonne garantie, mais son emploi nécessite tout de même des options de vérification du maillage afin d'avertir l'utilisateur de la présence d'éléments aux géométries trop irrégulières, de vides non voulus, de manques de liaison, de mauvais raccordements, etc.

Exemples des données pouvant entraîner une erreur de discrétisation (Mestat et al., 2000).

- Choix d'éléments finis inadaptés (géométrie trop élancée, angle au sommet trop important, cisaillement mal décrit par l'élément choisi, degré d'interpolation insuffisant, etc.).
 - Assemblage sans précaution des éléments avec des degrés de liberté différents (poutres et massifs bidimensionnels, coques et massifs tridimensionnels).
 - Assemblage des sous-maillages avec des frontières discrétisées de manière différente.
 - Assemblage en laissant des nœuds sans liaison suffisante dans le maillage
 - Maillage avec une densité insuffisante dans les régions les plus sollicitées, autour des structures, des inclusions ou des cavités.
 - Maillage trop grossier au voisinage d'éléments d'interface ou aux frontières séparant des couches de rigidité différente (discontinuité brutale).
-

– Gestion incorrecte des raccordements entre éléments d'interface et éléments de massif : arrêt ou intersection des lignes (en 2D) ou des plans (en 3D) d'interface.

Donc on constate que l'erreur de discrétisation est très importante dans les calculs donc elle ne doit pas être négligée et la construction du maillage et il mérite toute l'attention de l'utilisateur, alors l'expérience numérique montre que plus les lois de comportement des sols sont compliquées, plus il convient de raffiner le maillage. Ces erreurs sont regroupées en 03 catégories :

4.1.1. Les erreurs dues au pas de temps

Ils dépendent de l'algorithme de résolution et on l'applique dans les problèmes de consolidation.

Pour la plupart des non linéarités (comportement, contact, grandes déformations) la discrétisation temporelle influence le résultat. Des résultats de convergence existent dans tous les cas classiques (élasto-visco-plasticité, contact), mais il reste néanmoins à s'assurer que pour un pas de temps choisi la solution est suffisamment proche de la solution continue en temps.

La solution la plus simple est similaire au raffinement uniforme pour l'adaptation de maillage: elle consiste à raffiner uniformément le pas de temps sur tout le transitoire.

4.1.2. Les erreurs dues à la discrétisation spatiale du domaine géométrique

Représente l'ouvrage et son environnement (maillage). Quand le maillage devient de plus en plus fin, la solution donnée par le calcul tend vers une limite très proche de la solution exacte du problème.

Des problèmes numériques peuvent venir changer les résultats quand le nombre des mailles devient très grand ou très faible.

4.1.3. Les erreurs dues au chargement

Dues aussi à l'algorithme de résolution, les erreurs de conception liées, par exemple à une mauvaise compréhension du modèle à simuler ou de la définition exacte des indicateurs à calculer ou à une traduction erronée en algorithme.

Celui-ci est appliqué en accroissements successifs, appelés incréments.

4.2. Erreurs de modèle liée au modèle théorique

Ces erreurs sont dues au fait que les modèles mathématiques sont plus ou moins idéalisés ou à l'approximation du problème réel, ce qui donne lieu à plusieurs erreurs, ils dépendent des équations mathématiques du modèle et des incertitudes de mesure.

Même si l'ouvrage a été correctement décrit, les moyens de mesure utilisés pour sa description sont également entachés d'incertitude. Cette incertitude de mesure dépend des moyens utilisés donc il semble cependant que des erreurs mêmes faibles sur certaines grandeurs sensibles peuvent avoir des conséquences importantes.

L'erreur de modèle est liée aux choix effectués par l'utilisateur sur le type d'analyse (statique, dynamique, calcul drainé, calcul non drainé, etc.) et les lois de comportement des matériaux (élasticité linéaire, isotrope ou anisotrope, élastoplasticité parfaite, élastoplasticité avec écrouissage, élasto-viscoplasticité).

Généralement, l'erreur de modèle croît dans la proportion où des phénomènes physiques importants sont négligés dans la modélisation et où les hypothèses de calcul deviennent incohérentes avec la réalité du projet et de son environnement. Ainsi, même lorsque les erreurs de données et de discrétisation sont faibles, l'erreur de modèle peut rester très grande.

Par exemple les erreurs dans les lois de comportement proviennent généralement de la programmation des lois de comportement dans les logiciels soit au gestion des tractions (logarithmes ou puissance de nombre négatif, grandes valeurs pour les exponentielles), pas de solution pour une équation implicite liée aux relations de comportement écrites au niveau d'un point d'intégration, maillage identique pour une étude avec différentes lois de comportement, cas de lois isotrope et anisotrope (Mestat,2010).

Exemples des données pouvant entraîner une erreur de modèle (Mestat et al., 2000).

- Modèle bidimensionnel alors que les phénomènes sont tridimensionnels.
- Hypothèse d'un sol monophasique,
- Loi de comportement trop simplifiée (par exemple : élasticité pour un sol).
- Phénomène physique important négligé (interaction sol-structure, mouvement de l'eau, effet du temps, etc.)
- Phénomène de décollement empêché.
- Absence d'interface (mauvaises conditions de liaison entre les matériaux ou les structures).
- Loi de chargement inappropriée (par exemple : phasage des travaux trop simplifié).

En pratique, l'erreur de modèle s'apprécie qualitativement au moment de la justification des hypothèses de calcul ou l'utilisateur doit prendre les limites du modèle qu'il est en train d'élaborer.

4.3. Erreurs de convergence

Elles sont dues soit à un découpage inapproprié du chargement (estimation de la rupture), soit à des données inadaptées pour les algorithmes de résolution ou convergence au sens du maillage (elle est assurée par le choix et la formulation mathématique des éléments finis. Lorsque le maillage devient de plus en plus fin, la solution numérique tend vers une limite très proche de la solution exacte du problème, elles concernent seulement les problèmes de comportement non linéaire et la résolution par une technique itérative (non linéarités).

Elle peut être aussi une convergence au sens du schéma d'intégration locale : Elle permet le calcul des contraintes et des quantités non linéaires (déformation plastique, écrouissage) traitant des équations différentielles de comportement (vérifier la loi de comportement).

Et le troisième type de ce genre d'erreurs est la convergence au sens du processus de résolution incrémental et itératif qui permet d'obtenir la solution en déplacements et en contraintes pour un maillage et un schéma d'intégration des lois de comportement non linéaire donnés (Mestat, 2003).

Des taux de convergence sont définis quand le problème d'éléments finis est bien posé et que la suite des déplacements converge, on observe la plupart du temps que la suite des taux de convergence est monotone décroissante. Lorsque de plus elle tend vers une limite strictement inférieure à l'unité, la suite est « absolument convergente » (Mestat et al, 2000).

Dans les problèmes en 2D, les maillages sont généralement acceptables, sauf lorsqu'il y a beaucoup de matériaux et d'interfaces : risque de mauvaise estimation des contraintes dans les revêtements de tunnels ou dans les ouvrages de soutènement par contre en 3D les maillages sont pour la plupart du temps insuffisants à cause de la taille (Mestat, 2005).

Cette erreur est naturellement rattachée à l'étude de la suite des déplacements solution du problème en comportement non linéaire (Mestat et al, 2000).

4.4. Erreurs de calcul

Elles représentent la différence entre la solution analytique et la solution numérique à la fin de calcul ou c'est la combinaison des erreurs précédentes, car elles sont proches de l'erreur de modèle.

L'erreur de calcul peut s'évaluer par référence aux ordres de grandeur connus pour des ouvrages et des sols similaires.

4.5. Erreurs de données (les erreurs dues au modélisateur)

Elles sont provoquées par des caractéristiques de calcul erronées (fautes de frappe, mauvaise estimation des paramètres mécaniques) ou ils sont dues à la présence dans le modèle mathématique de paramètres numériques dont les valeurs ne peuvent être déterminées qu'approximativement suite à des mesures expérimentales.

Par exemple les erreurs peuvent provenir d'une simple faute de saisie. Elles peuvent aussi provenir d'une mauvaise connaissance du modèle utilisé pour représenter le phénomène étudié. Dans ce cas, le code peut donner une description géométrique tout à fait inadéquate de l'ouvrage, mais on ne peut les quantifier ce type d'erreurs directement comme les erreurs précédentes.

Les erreurs dans les conditions aux limites peuvent être un changement d'une condition aux limites, cela entraîne l'application de la réaction avec un signe opposé ou des nouvelles conditions aux limites (blocage de déplacements) cela entraîne un nouveau calcul de la matrice de rigidité (Mestat, 2010).

Voici quelques exemples qui peuvent être des erreurs de données.

- Conditions limites en déplacements (Il faut empêcher les mouvements de corps rigides).
- Calcul aux points d'intégration et exploitation des contraintes aux nœuds.
- Changements de valeurs de paramètres entre deux calculs enchaînés (par exemple des modules d'Young).
- Relâchement d'une condition aux limites en déplacements (par exemple, une condition $u=0$ supprimé).
- Exploitation de calculs non convergés.
- Valeurs de paramètres constants pour une grande profondeur (exemple : excavation et module d'Young constant). Etc.

Une partie importante de notre travail portant sur l'évaluation des erreurs associées à ce type d'erreur que nous allons développer de façon un peu plus détaillée dans le chapitre03.

Dans la méthode des éléments finis on s'intéresse plus aux erreurs de discrétisation car elles définissent le modèle de calcul (dimensions, types d'éléments finis, densité de maillage, condition aux limites, etc.) mais on peut ajouter d'autres types d'erreurs selon la modélisation d'ouvrage choisit :

4.6. Erreurs globales et erreurs locales

4.6.1. Les erreurs globales : déplacements en norme énergétique qui ne présentent pas d'informations pertinentes pour l'ingénieur, les erreurs locales sont représentées par des quantités calculées en un nœud ou un point d'intégration telles que le champ de contraintes, le champ de déplacements ou les champs de vitesses (Oden et Prudhomme, 2001 cité par Vulpe, 2011).

4.6.2. Les erreurs locales : champs de déplacement, champs de contraintes, facteur d'intensité.

Les erreurs locales deviennent plus importantes que les erreurs globales puisque souvent les erreurs qui nous intéressent sont localisées dans une zone restreinte de la discrétisation et l'accent est mis sur l'amélioration de la qualité de la solution numérique dans la zone d'intérêt (cité par Vulpe, 2011).

4.7. Erreurs de pollution

L'étude numérique des erreurs de pollution dans la méthode des éléments finis ou l'effet d'erreur de pollution sur la qualité locale de l'évaluation des erreurs pour différentes classes des mailles et des solutions utilisées dans des calculs pratiques des ouvrages. En particulier, on considère les solutions harmoniques avec des singularités algébriques du type d'erreur et avons étudié l'effet de pollution pour les mailles uniformes, les mailles (équilibrées) globalement adaptatives, les mailles raffinées localement et les mailles équilibrées.

La première approche de ce type (Babuska, Strouboulis, Upadhyay et Gangaraj, 1995 ; Huerta et Diez, 2000) définit le concept de pollution, selon lequel l'erreur sur une zone donnée, provient de deux contributions distinctes.

D'une part l'erreur due à la discrétisation, d'autre part un terme de pollution représentant les effets de l'erreur commise sur le reste du domaine. Le calcul de l'erreur locale s'effectue alors en évaluant les deux termes précités à l'aide de problèmes auxiliaires posés sur le domaine complet (Parret-Fréaud, 2011).

On conclue de l'étude de ce type d'erreurs:

- Quand la maille est globalement adaptative (équilibré dans la norme d'énergie) l'effet de pollution est négligeable, et pour tous les buts pratiques, on garanti la fiabilité de l'évaluation des erreurs pour n'importe quelle maille.
 - Si la maille n'est pas équilibrée dans la norme d'énergie, l'effet de pollution peut être significatif.
 - Pour les mailles uniformes, l'effet de pollution est significatif.
-

- L'exactitude de la solution finie d'élément dans un modèle dépend du rapport entre la maille à l'intérieur du modèle et la maille en dehors du modèle et la douceur de la solution exacte.
- Il est possible de commander l'effet de pollution de modèle en utilisant les grilles équilibrées qui moins sont raffinées en dehors du modèle que les grilles globalement équilibrées.
- La fiabilité de l'évaluation des erreurs locales dans un modèle intérieur peut être garantie seulement quand l'erreur de pollution dans le modèle est négligeable en ce qui concerne l'erreur dans la meilleure approximation locale.

Si l'erreur de pollution est grande en ce qui concerne l'erreur dans la meilleure approximation locale, l'évaluation grave peut se produire et en général rien ne peut être dit au sujet de la fiabilité des résultats locaux a posteriori de l'évaluation des erreurs.

5. Amélioration de la qualité de modèle et l'analyses des erreurs par éléments finis

Pour bien mener une étude de ce genre il est nécessaire d'identifier les diverses sources qui affectent la réponse d'un modèle. Pour cela l'analyse de sensibilité est une méthode bien adaptée pour hiérarchiser ces sources, la technique pour obtenir une meilleure solution est aussi appelée adaptation de maillage elle se déroule suivant trois étapes (Stelzer et Hofstetter, 2005 cité par Parret-Fréaud, 2011).

- Une première analyse éléments finis est effectuée.
- Estimation d'erreurs de la solution numérique. Des estimateurs d'erreurs sont employés pour déterminer les erreurs dans la première solution numérique.
- Une méthode d'adaptation de maillage est appliquée sur le modèle numérique original, la technique d'adaptation consiste à modifier le modèle original entier ou une partie du modèle original afin d'obtenir de meilleures solutions numériques.

6. L'estimation des erreurs

Pour entamer une meilleure qualité des analyses par la méthode des éléments finis les chercheurs ont donné une grande importance aux paramètres de modélisation par la méthode des éléments finis ou qui plus lié à la discrétisation et basée sur les erreurs globales et locales, Il existe donc des méthodes afin d'estimer véritablement l'erreur commise lors d'un calcul éléments finis et ceci pour un grand nombre d'applications.

On peut dire qu'un estimateur d'erreur est une approximation de l'erreur exacte qui est calculé à partir de la solution approchée.

Par la nature, l'exactitude des résultats de la méthode des éléments finis dépend fortement de la discrétisation du problème, Ces estimateurs permettent de mesurer la qualité de la solution calculée et fournissent une information pour contrôler l'algorithme d'adaptation de maillage.

Pour obtenir des résultats satisfaisants, l'expérience suffit pour obtenir une maille dans le cas des problèmes simples. Avec des problèmes plus complexes, cependant, où la solution évolue avec du temps, ou en présence de contact par exemple, c'est plus difficile pour obtenir une maille appropriée. Pour cela il existe beaucoup d'estimateurs d'erreurs (Kuss et al, 2011).

Ces erreurs de modèle doivent être comprise comme l'ensemble des erreurs liées au logiciel, à son utilisation, à la méthode de calcul et à la manière d'obtenir les paramètres de calcul.

L'analyse et l'estimation des erreurs peuvent être menées en suivant deux stratégies différentes :

6.1. L'estimation d'erreur à priori

Elle se fait avant le calcul par la méthode des éléments finis, elle est utilisée pour déterminer les limites sur les paramètres du problème, donc l'estimateur a priori nous permet d'assurer la convergence de l'erreur vers zéro, sous réserve d'une régularité suffisante de la solution exacte, qui dépend de divers paramètres, sans nécessairement connaître la solution exacte ni sa régularité.

6.2. L'estimation d'erreurs à posteriori

Elle donne une estimation de magnitude de l'erreur et pour contrôler l'erreur, ce type d'estimateurs ne dépendent que de la solution numérique et des données du problème, sans nécessiter davantage de régularité sur la solution exacte que celle imposée par la formulation faible, elles permettent aussi de contrôler l'erreur exacte en en donnant une approximation.

En revanche l'estimation à priori offre différentes faiblesses dans les résultats de convergence des méthodes éléments finis. Cette méthode exploite et quantifie les défauts des solutions approchées afin d'aboutir à une estimation plus précise de l'erreur par rapport à la solution réelle.

Les estimations d'erreur a posteriori, introduites en 1978 par Babuska et Rheinboldt permettent, elles aussi, de contrôler l'erreur exacte en donnant une approximation, mais contrairement aux estimations a priori, sans nécessairement connaître la solution exacte ni sa régularité.

Le sujet a posteriori de l'évaluation des erreurs est devenu un aspect très important dans l'application de la méthode des éléments finis. Le but est d'estimer l'erreur de la méthode d'élément fini, on utilise les données déjà calculées (l'évaluation d'erreur a posteriori doit être distinguée de l'évaluation d'erreur a priori qui emploie seulement les informations a priori sur la solution et la régularité de la maille, etc., et qui est essentielle pour la recherche théorique mais n'est pas efficace pour l'évaluation quantitative dans un cas concret) (Babuska et al, 1994).

Les résultats d'expérimentation numérique avec un estimateur d'erreurs à posteriori se concentrent sur le problème du choix des repères qui est dirigé vers une vérification numérique des dispositifs théoriques de base de l'estimateur.

Les estimateurs d'erreur a posteriori sont obtenus dès lors que la solution numérique est connue. Leur objectif n'est pas de fournir une estimation de l'erreur, mais de donner une estimation de la magnitude de l'erreur. Ils sont utiles pour les techniques de contrôle de l'erreur (Vulpe, 2011).

Enfin on constate que l'objectif de ces techniques d'estimation de l'erreur est de calculer une valeur approchée de l'erreur exacte sans avoir à connaître la solution exacte, généralement inconnue, du problème. En outre, la qualité d'un estimateur est principalement jugée sur sa capacité à fournir une estimation garantie, c'est à dire une borne supérieure de l'erreur vraie.

Dans le tableau dans la page suivante, on présente une liste des estimateurs à posteriori dans les dernières années.

Tableau I. 1: Liste des estimateurs d'erreurs a posteriori (cité par Vulpe, 2011).

Type d'estimateur d'erreur a posteriori		Auteurs
Estimateur d'erreur basé sur l'analyse duale		Veubeke, 1965
Estimateur d'erreur en relation de comportement		Ladevèze, 1975
Estimateur d'erreur sur les résidus d'équilibre	Estimation explicite	Babuska et Rheinboldt, 1978
	Estimation implicite	
Extrapolation de Richardson		Babuska et al., 1982
Estimateur d'erreur basé sur le lissage du champ des contraintes	Méthode globale	Zienkiewicz et Zhu, 1987
	Méthode locale	Zhong, 1991
	Méthode de recouvrement	Zienkiewicz et Zhu, 1992
Estimateur d'erreur basé sur les bases hiérarchiques		Bank et Smith, 1993

6.2. 1. Estimateurs d'erreur utilisant le concept d'analyse duale

L'analyse duale constitue d'un point de vue historique la première réponse à la problématique de l'estimation d'erreur a posteriori. Elle consiste à utiliser les propriétés des solutions issues de deux analyses éléments finis, l'une reposant sur un modèle déplacement, l'autre sur un modèle équilibre, afin d'évaluer ou d'encadrer l'erreur commise et à comparer deux solutions d'éléments finis du même problème, obtenus suivant deux approches différentes :

- Une approche cinématiquement admissible (formulation en déplacements).
- Une approche statiquement admissible (formulation en contraintes).

6.2.2. Estimateurs d'erreur par la relation de comportement

Cette famille d'estimateurs définissant le concept d'erreur en relation de comportement comme la mesure énergétique du résidu associé à la loi de comportement entre deux champs approchés admissibles, Cette solution approchée ne vérifie pas la loi de comportement du matériau, mais une approximation de cette loi. La qualité de cette approximation est obtenue en comparant les deux lois de comportement (la loi constitutive utilisée et la loi constitutive approximée).

6.2. 3. Estimateur d'erreur sur les résidus d'équilibre

On distingue deux types d'estimateurs :

a. Estimateurs d'erreur par résidus implicites

Ils sont appelées implicites car une approximation de l'erreur est obtenue non plus directement à partir de la solution éléments finis et des données du problème mais après résolution de problèmes locaux liés à l'erreur.

Le principe de base de ces estimateurs repose sur l'exploitation des conditions aux limites ainsi que la solution éléments finis et les estimateurs emploient l'approximation de l'erreur en résolvant des problèmes locaux élément par élément.

b. Estimateurs d'erreur par résidus explicites

Ils sont dit explicites car ils permettent d'obtenir directement une estimation de la norme énergétique de l'erreur globale ou locale μ a partir de la solution éléments finis et des données du problème, et sont donc simples à mettre en œuvre cet estimateur reste peu utilisé en pratique.

6.2.4. Extrapolation de Richardson

L'extrapolation de Richardson est basée sur la propriété de convergence asymptotique de la solution approchée. La méthode a été proposée et appliquée par Richardson (1910) à la Méthode des Différences Finies. Elle a été ultérieurement développée par Gago (1982) pour la méthode des éléments finis (Vulpe, 2011).

6.2.5. Estimateurs d'erreurs basés sur le lissage des contraintes

Ces estimateurs déterminent une approximation plus précise de la solution approchée qui remplace la solution exacte dans le calcul de l'erreur.

6.2.6. Estimateurs d'erreurs basés sur les bases hiérarchiques

Ces estimateurs sont déterminés à partir de deux solutions approchées du même problème obtenues en utilisant deux schémas de discrétisation ayant chacun une précision différente.

6.3. Qualité et performances d'un estimateur d'erreur

Les estimateurs d'erreurs offrent une mesure quantitative pour déterminer la qualité des simulations numériques. Ils fournissent une base pour les techniques de contrôle de l'erreur des modèles discrets.

Le principe des différentes méthodes d'estimation développées consiste à obtenir une mesure approchée. Celle-ci ne peut cependant aller sans la connaissance de la qualité de l'approximation ainsi réalisée ou en d'autres termes, de la qualité du processus d'estimation d'erreur. Une manière usuelle permettant de quantifier cette qualité repose sur l'efficacité.

De plus, dans un cadre d'ingénierie, il est fortement souhaitable d'obtenir une borne supérieure de l'erreur vraie. Dans ce cas, l'estimateur associé est dit fournir une estimation garantie de l'erreur vraie.

L'évaluation de la qualité des estimateurs d'erreur a fait par le passé l'objet de plusieurs études générales portant notamment sur leur comportement vis à vis de la forme du maillage, de la régularité de la solution exacte.

Notons enfin qu'en plus de sa qualité, un estimateur d'erreur peut être également évalué sur ses performances en matière de coût de calcul. En ce sens, les procédures associées ne doivent introduire qu'un coût numérique additionnel le plus faible possible, nécessairement on attribue à un estimateur certaines propriétés qui attestent de sa qualité. Ainsi, il doit satisfaire trois conditions :

- Fiabilité.
- Efficacité.
- Localité: l'estimateur doit donner des informations sur la distribution locale de l'erreur.

7. Exemples sur l'application d'erreurs

Le tableau dans la page suivante présente les erreurs estimées lors de des concours de prévisions à l'aveugle (Mestat et Riou, 1999 ; Mestat, 2001).

Tableau I. 2: Erreurs de calcul relatives estimées d'après les résultats de concours de prévisions en aveugle, Benchmark (Mestat et al., 2000).

Ouvrage	Erreur relative sur les déplacements (%)	Autres comparaisons
Remblais d'Haarajoki (Finlande)	Tassement instantané : 0,8 – 3 Tassement à 18 mois : 0,4 - 2,7	Pression interstitielle instantanée : selon point de mesure (0,2 - 0,7), (0 - 1,0), (0,05 - 0,1) Pression interstitielle à 18 mois : (0,2 - 0,7), (0,1 - 0,9), (0 - 0,2)
Remblai de Muar Flats (Malaisie)	Tassement à court terme : 0,6 - 1,8 Déplacement horizontal : 0,4 - 4,7	Hauteur de rupture : 0 - 0,4 Pression interstitielle : 0,1 - 0,6
Remblai de Gloucester (Canada)	Tassement à long terme : selon point de mesure 0,5 - 1,5	Pression interstitielle : 0,5 Déplacements horizontaux : 0,9
Remblai du MIT (Boston, États-Unis)	Tassement : 0,1 – 19 Déplacement horizontal : > 0,95 – 4	Pression interstitielle : 0,6 - 1,3 Hauteur de rupture : 0,5 - 0,6
Ouvrage de soutènement et géotextiles (Denver, États-Unis)	Tassement maximal en surface : sable : 0,6 - 0,9 argile : 0,7 - 1,7	Surcharge de rupture : sable : > 0,9 - 1,3 argile : > 0 - 0,9
Rideau de palplanches de Hochstetten (Allemagne)	Pour la dernière phase : – tassement max. derrière l'ouvrage : 0 - 5 – dépl. latér. de l'écran à mi-hauteur : 0,5 – 3	Pour la dernière phase : moment max. dans l'écran : 0 - 2,5
Fondations superficielles FHWA (Austin, États-Unis)	Tassement : 0,4 - 0,7	Charges de rupture : 0,7 - 1,1

Ces expériences ont montré que le résultat de l'expérience est faible et plus l'erreur de modèle ne doit être importante.

Par exemple, dans le cas des remblais sur sols compressibles, les tassements dans l'axe du remblai sont généralement bien prévus ; en revanche, les déplacements latéraux en pied sont surévalués. De même, pour les ouvrages souterrains, les tassements en surface sont bons mais la largeur de la cuvette de tassement est fréquemment surévaluée (Mestat et al., 2000).

Pour voir la sensibilité des erreurs sur le modèle on peut faire une comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques.

Les figures ci dessous montrent la variation de volume d'un sol soumis à des contraintes d'une fondation.

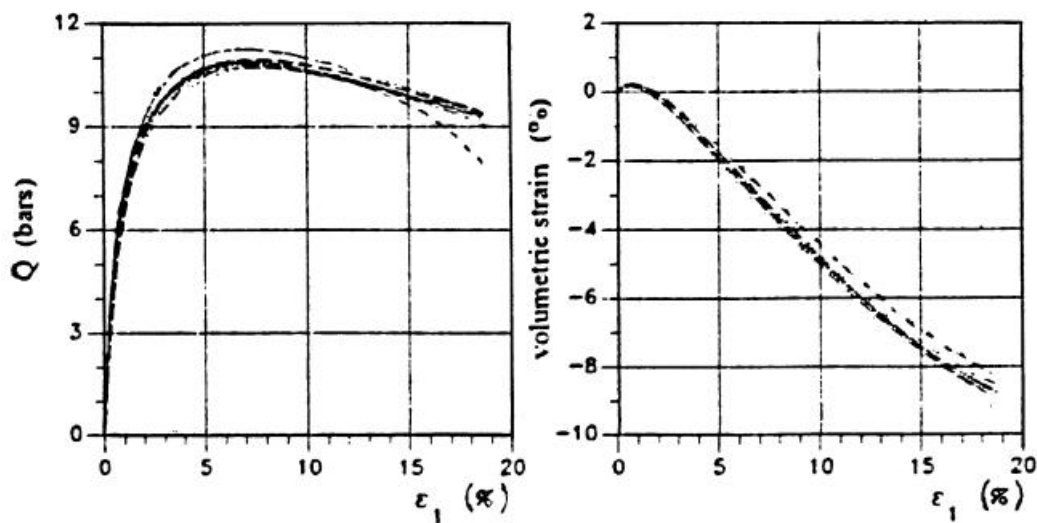


Figure I. 1: les mesures expérimentales d'essai (Favre, 1998).

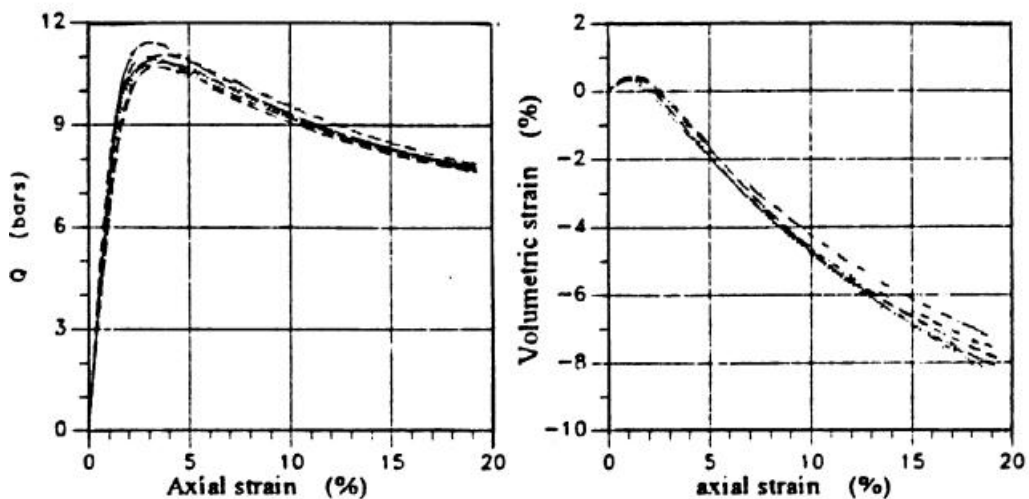


Figure I. 2: les mesures numériques d'essai (Favre, 1998).

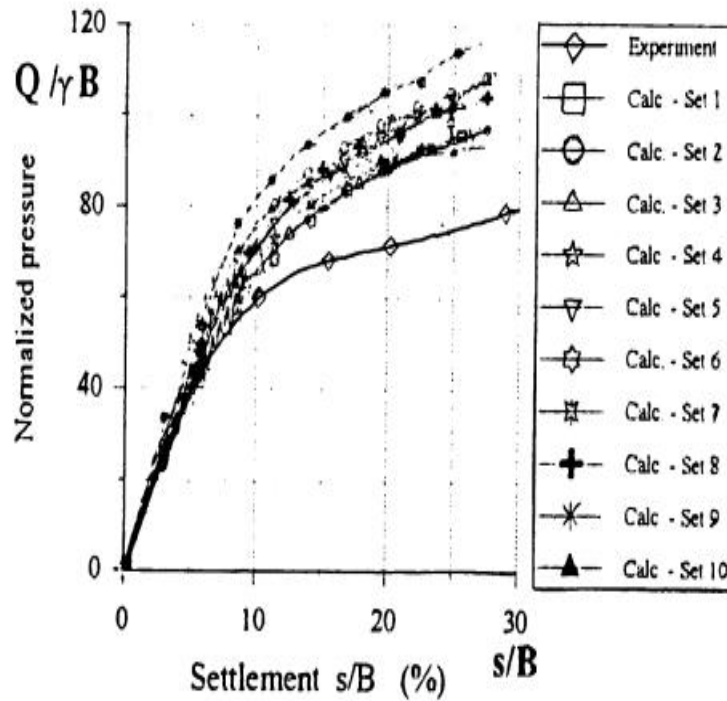


Figure I. 3: la différence entre les mesures numériques et expérimentales (Favre, 1998).

Les figures I.4, I.5 et I.6 illustrent quelques exemples qui démontrent l'influence de variation des paramètres sur le comportement de modèle.

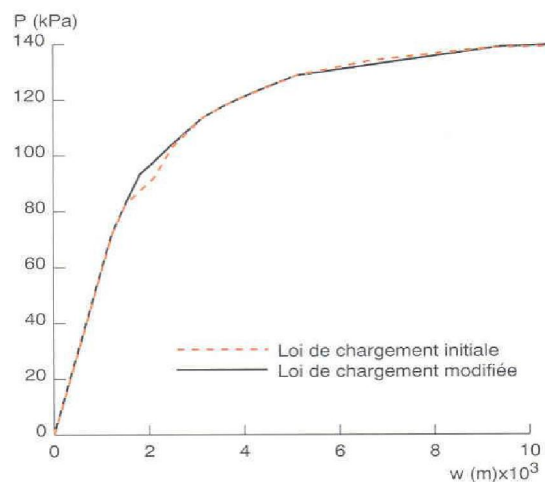
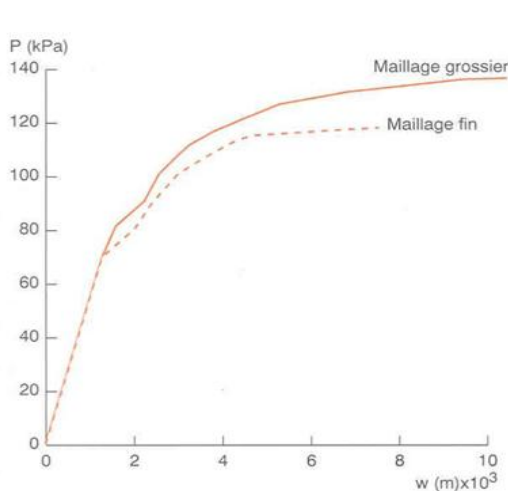


Figure I. 4: Erreur de discrétisation (Mestat, 2006). Figure I. 5: Erreur de modèle (Mestat, 2006).

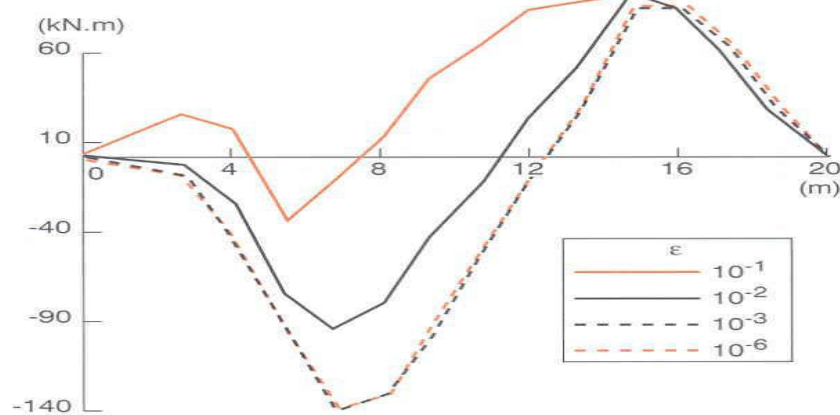


Figure I. 6: Erreur de convergence (Mestat, 2006).

Lorsqu'on traite ce type de problèmes, qui peut être des configurations complexes, la précision de la solution numérique peut interpréter correctement les résultats obtenus. Pour atteindre cet objectif en utilisant la méthode des éléments finis, il est nécessaire de maîtriser l'erreur numérique. Toutefois, la localisation des erreurs reste difficile à prédire. Il est cependant nécessaire de quantifier l'erreur numérique ou du moins de l'estimer. A la limite, l'estimateur idéal indique l'erreur exacte. Au minimum on recherche un estimateur se comportant comme l'erreur exacte. L'estimation d'erreur constitue donc un outil dont l'utilisation est nécessaire.

A la fin, dans un souci de compréhension, on a essayé de synthétiser l'ensemble des sources d'erreurs en les regroupant dans le tableau ci-après.

Tableau I. 3: Les différents types d'erreurs.

Types d'erreurs		Causes d'erreurs
Erreurs de discrétisation	Erreurs dues au pas de temps	La technique des éléments finis.
	Erreurs dus à la discrétisation spatiale	Les hypothèses de modèle mathématique.
	Erreurs dus au chargement	Les erreurs de l'utilisateur.
Erreurs de modèle liée au modèle théorique		Les équations mathématiques. Les incertitudes de mesure.
Erreurs de convergence		Découplage inapproprié du chargement. Les données inadaptées pour les algorithmes de résolution.
Erreurs de calcul		La combinaison des erreurs précédentes.
Erreurs de données		Mauvaise estimation des paramètres.

8. Conclusion

Dans ce chapitre on présenté les types d'erreur qu'on peut rencontrer dans la modélisation des ouvrages géotechniques et les estimateurs d'erreurs utilisées pour déterminer et améliorer la qualité des calculs par éléments finis.

Les techniques de contrôle de l'erreur dans les codes numériques ont été largement développées et étudiées jusqu'à présent.

Ainsi, il nous a semblé nécessaire d'introduire une approche simple pour quantifier les erreurs commises à la fin d'un calcul par éléments finis, celle-ci doit être accessible pour les ingénieurs.

Une telle méthode a été recherchée et proposée pour approximer les résultats de modélisation à ceux de l'expérience et la validité d'un modèle numérique ne peuvent être jugés sur une seule comparaison de calculs et de mesures.

Dans le chapitre suivant, on présente le cas étudié qui concerne une excavation dans un milieu urbain, en essayant de montrer l'influence des erreurs sur plusieurs paramètres, pris un à un, sur le résultat final de la modélisation.

CHAPITRE II

CHOIX D'UN CAS D'ETUDE : EXCAVATION
A CHICAGO

1. Introduction

Dans ce chapitre on va présenter le modèle étudié dans ce mémoire. Il s'agit d'une excavation en milieu urbain réalisée à Chicago dans l'Etat de l'Illinois aux Etats-Unis. On va aussi présenter un aperçu sur les rideaux de palplanches afin de montre leur rôle dans la stabilité des excavations.

2. Généralités sur les palplanches

2.1. Introduction

Un ouvrage de soutènement est une construction qui permet de retenir les massifs de terre pour la réalisation d'excavations verticales.

Il existe une multitude d'ouvrages de soutènement, utilisés selon les contraintes et les besoins du chantier tels que les parois moulées, les murs poids ou cantilever, les parois parisiennes et berlinoises ou les rideaux de palplanches.

L'ouvrage de soutènement étudié dans ce mémoire est un écran de soutènement de type rideaux de palplanches.

2.2. Définition des palplanches

Les rideaux de palplanches sont des pièces longues à section mince qui, juxtaposées, constituent des parois planes ou cylindriques, appelées rideaux (Bousquet, 1980).

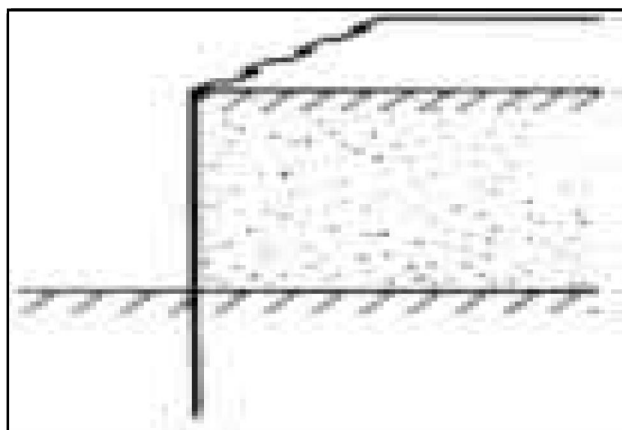


Figure II. 1:Un rideau de palplanche (Schlosser, 1991).

Ils sont constitués généralement de palplanches métalliques, emboîtées les unes dans les autres et mises en place par battage ou par vibration dans le sol de fondation, pour former un écran de soutènement vertical, souple et le plus souvent rectiligne (Schlosser, 1991).

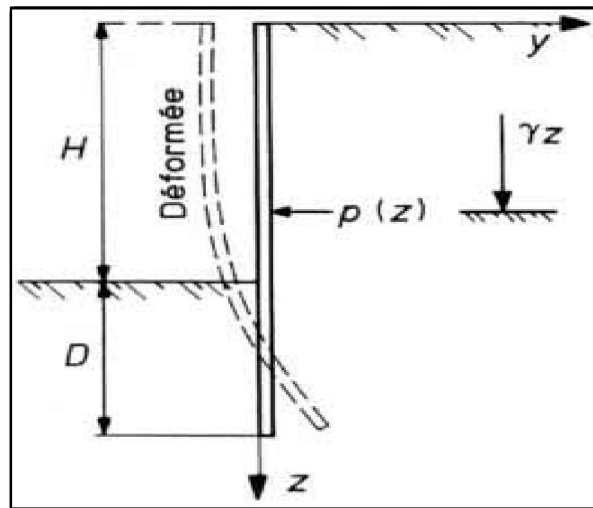


Figure II. 2: La déformée d'un rideau de palplanches soumis à une pression $p(z)$ (Schlosser, 1991).

2.3. Les type de palplanches

Selon la définition il existe beaucoup de types et de profils de palplanches, cela dépend de la résistance souhaitée. On trouve des palplanches excessivement lourdes (grande résistance avant déformation) et d'autre très légère. Cela dépend de l'utilisation que l'on veut en faire.

On peut classer les palplanches selon la géométrie et la forme:

2.3.1. Palplanches en porte à faux

Les palplanches peuvent être construites en plusieurs types de matériaux (acier, aluminium, bois, béton armé, glass en fibre, vinyle, PVC etc.).

2.3.2. Rideaux plans (rideaux simples)

Ils peuvent être encastrés ou non en pied ou en tête, renforcés ou non d'un ou de plusieurs niveaux de tirants (ancrage) ou d'étais.

Les dispositifs de renforcement de ce type de rideaux sont les liernes, butons (éléments allongés en bois, en métal, rarement en béton, reprenant des efforts de poussée) ou tirants qui interviennent dans les calculs de stabilité (Bousquet, 1980).

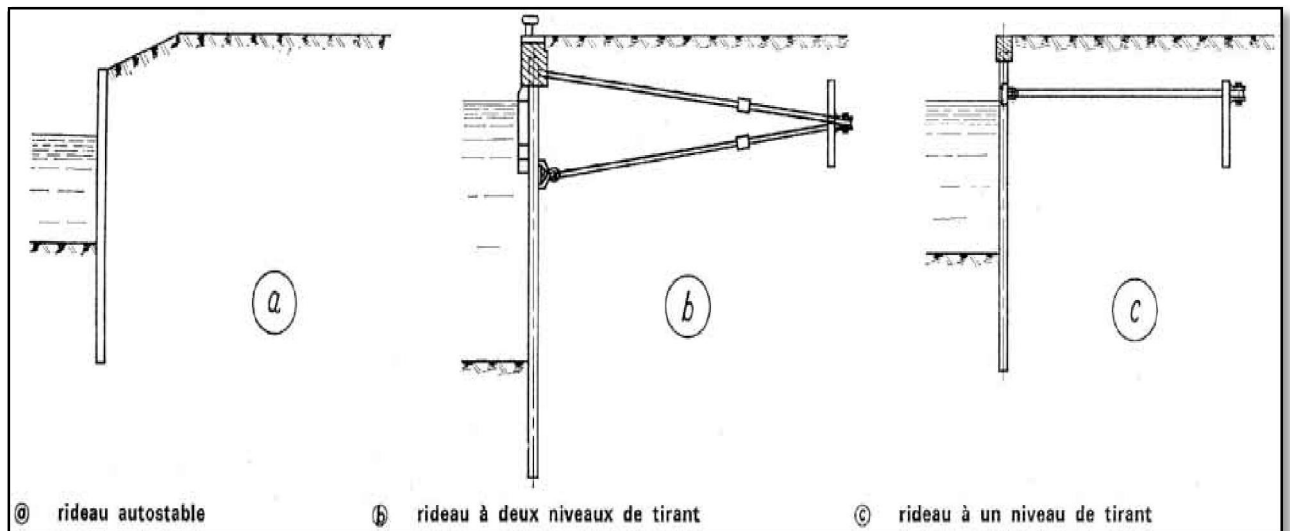


Figure II. 3: Rideaux plans (Bousquet, 1980).

2.4. L'usage de palplanches

Les rideaux de palplanches constituent une importante catégorie d'ouvrages de soutènement. Ils sont principalement utilisés dans les ouvrages portuaires et dans ceux construits dans le cadre de l'aménagement des rivières et des canaux : murs de quai, bajoyers d'écluse, batardeaux, etc.

On distingue :

- L'utilisation de palplanches à titre provisoire : pour permettre l'exécution de travaux de fondation ou des batardeaux en rivière, écran d'étanchéité, blindage de fouille.
- L'utilisation de palplanches à titre définitif : lorsqu'elles sont incorporées dans les ouvrages; dans ce dernier cas elles sont portées en compte, éléments constitutifs de quais, écluses, protections de berges, caissons de fondations, murs de soutènement, para fouilles.

Donc les palplanches permettent de constituer un mur de soutènement, un batardeau, une palée ou un écran imperméable et assurer des blindages de fouilles.

Selon l'emploi de palplanche dans la construction on distingue :

- Les palplanches à module ou à inertie : se comportent comme des poutres verticales, mobilisant la butée au niveau de leur encastrement dans le sol et supportant les poussées dues aux dénivellations de terrain et d'eau (Bousquet, 1980).

- Les palplanches plates : permettent de réaliser des enveloppes cylindriques fermées, contenant des matériaux dont les poussées engendrent des tractions importantes dans les joints (Bousquet, 1980).

2.5. Mise en place de palplanches

Il existe trois grands types de mise en place des palplanches. La méthode par battage, la mise en place par vibrofonçage et la mise en place par presse hydraulique.

Voici les différentes méthodes de fonçage :

- La méthode de battage : c'est la méthode la plus ancienne, son principe un rideau de palplanches est battu bien à la verticale pour remplir mieux.
- La méthode de vibrofonçage : elle devient de plus en plus courant de nos jours, l'objectif de cette technique est de diminuer les frottements internes des sols non cohérents ce qui a pour effet de réduire les efforts latéraux des palplanches mises en place.
- La méthode de vérinage : elle reste rarement utilisée sur chantier, Un vérineur est une machine hydraulique utilisée pour le fonçage des palplanches mais également pour l'extraction de celles-ci.

3. Présentation du cas d'étude (excavation en milieu urbain à Chicago)

3.1. Description du site

Ce modèle étudié est choisi pour représenter une excavation typique dans l'argile de Chicago, L'excavation en milieu urbain *Lurie Research Center* a été réalisée en 2002/2003 pour la construction du centre de recherche médicale de l'université de *Northwestern* à Chicago (Moussaoui, 2013).

L'ouvrage est situé en plein cœur de Chicago dans l'état de l'Illinois aux Etats-Unis (figure II.4).

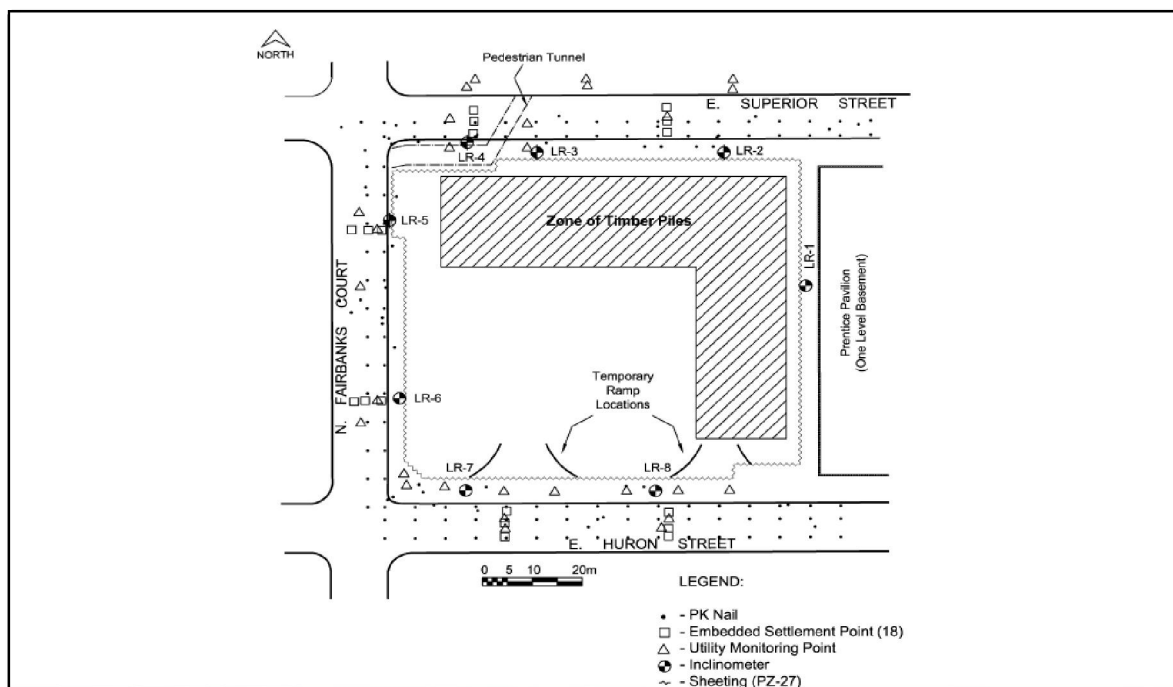


Figure II. 4: Plan de l'ouvrage et instrumentation du site (Rechea et al., 2008)

Le centre de recherche médical de l'université de *Northwestern Lurie Research Center*, est situé en plein cœur de Chicago, dans l'état de l'Illinois, aux États-Unis. Les dimensions de plan de l'excavation sont de 80 m par 68 m.

Une couche superficielle moyennement dense de remblai (*fill*) repose sur une couche de sable lâche à moyennement lâche (*sand*) typique des plages avoisinantes. Ces couches de matériaux granulaires recouvrent un ordre des couches argileuses de différentes glaciations dans la région lesquels ses rigidités augmentent avec la profondeur de l'excavation, ces couches sont : Une couche d'argile moyennement raide (*soft to medium clay*), une couche d'argile raide (*stiff clay*) et une couche d'argile très raide (*hard clay*).

L'excavation atteint 12.8m de profondeur dont le fond est dans la couche d'argile moyennement argileuse. Le niveau de la nappe phréatique se situe au même niveau que celui du *Lac Michigan*, très proche, soit 0m CCD (*Chicago City Datum*). Où La figure (II. 5) récapitule le profil de sol à l'emplacement.

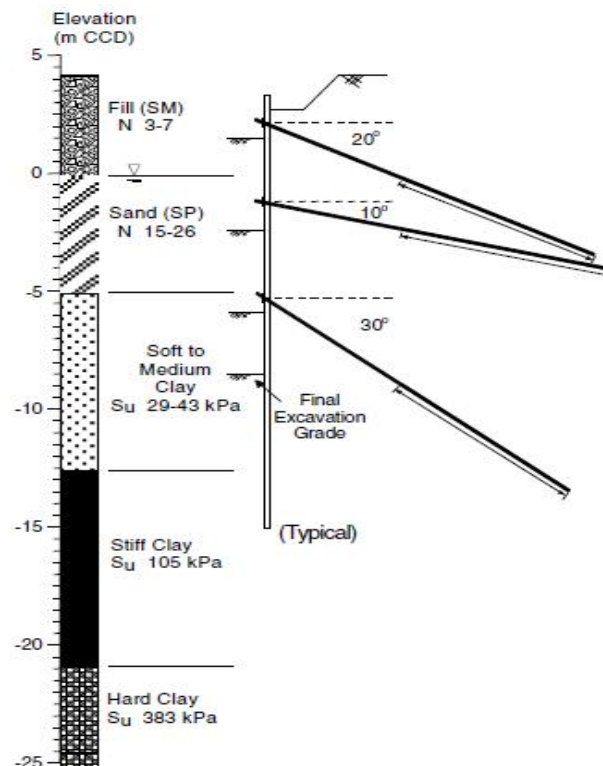


Figure II. 5: Profil d'excavation en milieu urbain *Lurie Research Center* (Rechea et al, 2008)

L'excavation borde à l'Est un bâtiment (*Prentice Pavillon*), de 14 étages plus un niveau de sous sol. Dans tous les cotés de l'excavation il y a un rideau de palplanches de type PZ-27. Ce rideau est maintenu par deux tirants d'ancrages à l'Est sont placés en quinconce dans la couche de sable tous les 2,74m et le troisième sur l'autre coté est placé dans les couches argileuses tous les 1,83m. La résistance du sol étant moins bonne dans l'argile, les tirants y sont beaucoup plus nombreux. Enfin, pour mesurer les déformations horizontales et verticales du sol autour de cette excavation, 8 inclinomètres et 150 points de mesure ponctuelle sont disposés de part et d'autre de l'excavation.

Les résultats de l'inclinomètre LR1 n'ont pas été employés dans les analyses en raison de la proximité d'un bâtiment (*Prentice Pavillon*) et celles des inclinomètres LR3 et LR4 n'ont pas été employés dans les analyses en raison d'existence d'un tunnel piétonnier du nord-ouest de l'emplacement. Inclinomètre LR2 a été endommagé pendant la construction. Les effets du coin ont influencé les résultats de l'inclinomètre LR5, et par conséquent n'étaient pas favorables aux études. Par conséquent des mesures d'inclinomètre obtenues à partir de LR6 et de LR8 ont été utilisées.

La construction de cette excavation se décompose en sept étapes principales (Rechea et al 2008 cité par Levasseur, 2008) :

– ETAPE 1 : installation du mur de soutènement;

- ETAPE 2 : excavation jusqu'à +1,52m CCD de profondeur, installation et mise en tension du premier niveau de tirants d'ancrages à +2,13m CCD.
- ETAPE 3 : construction de caissons en fond de fouille.
- ETAPE 4 : excavation jusqu'à -2,44m CCD de profondeur, installation et mise en tension du deuxième niveau de tirants d'ancrages à -1,22m CCD.
- ETAPE 5 : excavation jusqu'à -5,79m CCD de profondeur, installation et mise en tension du troisième niveau de tirants d'ancrages à -5,18m CCD.
- ETAPE 6 : excavation jusqu'à -8,53m CCD de profondeur;
- ETAPE 7 : construction du radier.

3.2. Modélisation de l'ouvrage (Moussaoui, 2011)

Cet ouvrage est choisi pour représenter une excavation typique dans l'argile de Chicago. Le profil de sol se décompose en une couche de 3,5 m de sable qui repose sur une couche d'argile saturée dont la rigidité augmente avec la profondeur, dont Les caractéristiques géotechniques de chaque paramètre regroupé dans le tableau II.2.

L'excavation est réalisée jusqu'à 08 m de profondeur. Le soutènement est assuré par un rideau de palplanches de 14 m maintenu par deux rangées de butons. La figure II.6 présente le modèle numérique en déformation plane associé à ce problème.

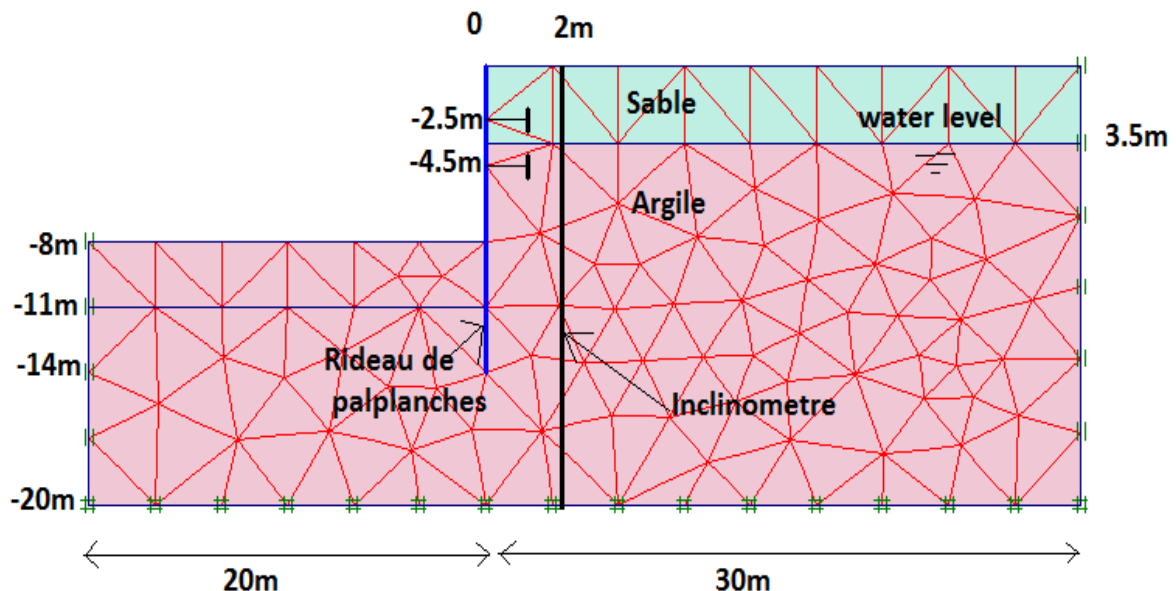


Figure II. 6: Modèle éléments finis 2D en déformation plane et maillage associé.

Les tableaux II.1 et II.2 détaillent les caractéristiques du rideau, des butons et les caractéristiques géotechniques de sable et d'argile.

Tableau II. 1: Les caractéristiques du rideau de palplanches et les butons (Moussaoui, 2013).

Paramètres	Symbole	Valeurs
Mur de soutènement		
Rigidité normale (kN/m)	EA	$2,9 \cdot 10^6$
Rigidité de flexion (kN/m)	EI	$59,0 \cdot 10^3$
Poids linéique (kN/m ² /m)	W	2,22
Epaisseur équivalente (m)	d	0,495
Coefficient de poisson(-)	ν	-
Butons		
Rigidité normale (kN/m)	EA	$9,0 \cdot 10^5$

Tableau II. 2: Les valeurs des paramètres du modèle de comportement (Moussaoui, 2013).

Paramètres	Symbole	Couche de sable	Couche d'argile
Module de cisaillement (kPa)	Gref	9000	2500
Coefficient de poisson	ν	0,2	0,2
Cohésion (kPa)	c	0,2	0,2
Angle de frottement (°)	φ	37	26
Angle de dilatance (°)	ψ	5	0

Le déplacement horizontal U_x d'un inclinomètre fictif placé 2 m derrière le mur de soutènement en fonction de la profondeur Z est présenté dans la figure II.7. Cette courbe de référence $U_x(z)$ est calculée pour les paramètres de sol dont les valeurs sont données dans le tableau II.1.

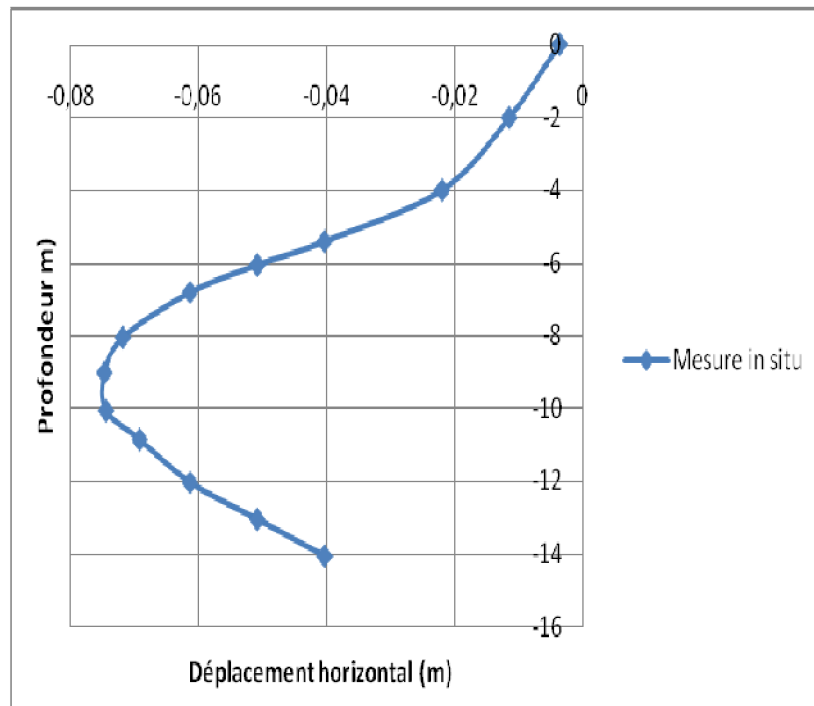


Figure II. 7: Déplacement horizontal deux mètres derrière le rideau de palplanches en fonction de la profondeur (Moussaoui, 2011).

4. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté un aperçu sur les différents types de rideaux de palplanches qui sont des ouvrages de soutènements flexibles. Aussi on a montré brièvement leurs mises en œuvre et mode d'utilisation.

Dans la seconde partie du chapitre, une présentation du cas d'étude est faite. Cette présentation concerne les deux volets : situation géographique du site et description géotechnique du terrain en question où on a présenté les paramètres du modèle qu'on étudiera en détails dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III

APPLICATION : MODELISATION DU CAS
D'ETUDE PAR PLAXIS

1. Introduction

On s'intéresse dans ce chapitre à la modélisation du cas d'étude en utilisant un code de calcul en éléments finis (Plaxis).

On commence ce chapitre par une petite présentation de ce code de calcul. On passe ensuite à la détermination des paramètres de modèle et leurs caractéristiques.

Ensuite, on applique quelques variations des paramètres pour voir leur influence sur le résultat de la modélisation. Ces variations pourraient correspondre à des erreurs de différents types (erreurs de mesure, erreurs d'interprétation des essais, erreurs d'unités, erreurs de modélisation, etc.).

2. Présentation de L'outil de Modélisation Numérique Plaxis 2D

L'analyse des projets géotechniques est possible grâce à des nombreux codes éléments finis. L'ingénieur ayant de l'expérience en ce domaine sait que le poids des hypothèses permettant 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 nœuds, des éléments, sur certains choix réservés au numéricien. Il voudrait disposer du code sur le PC gérant sa bureautique et sa technique quotidienne, 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 (Brinkgereve et Vermeer, 2003).

Conçu par des géotechniciens numérique de l'université de Delft aux Pays-Bas dans les années 1980, le code éléments finis Plaxis est un outil pratique d'analyse d'ouvrages et d'essais géotechniques. Si ce code a initialement été développé pour analyser les digues et les sols mous, son champ d'application s'étend aujourd'hui à une large gamme de problèmes géotechniques. Il permet d'analyser des problèmes élastiques, élastoplastiques, élastoviscoplastiques en 2D ou 3D et en grands déplacements par la méthode lagrangienne actualisée. Très fiable sur le plan numérique, ce code fait appel à des éléments de haute précision, tels que les triangles à 15 nœuds, ainsi qu'à des pilotages des résolutions récents comme la 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 à l'esprit outre mesure. Le recours manuels devenant rare, ceux-ci sont de volume réduit, faciles à consulter. L'ensemble des options simplifiées (initialisation des contraintes, pressions interstitielles) permettent d'aller

au but (prévoir le comportement d'un ouvrage), quitte à réaliser ultérieurement, avec le même code et les mêmes données, un calcul affiné (Brinkgereve et Vermeer, 2003).

3. Paramètres du calcul dans le code d'éléments finis Plaxis

L'utilisation de lois de comportement complexes dans des modèles éléments finis pour l'ingénierie est délicate. Elle demande pour la détermination des paramètres des études sortant du cadre des projets d'ingénierie. L'intégration de telles lois dans des codes d'éléments finis est difficile. Le cout de ces calculs est généralement important et peu de codes sont actuellement opérationnels.

La démarche suivie dans le développement de Plaxis est de fournir à l'utilisateur un code élément finis qui soit à la fois robuste et convivial, permettant de traiter des problèmes géotechniques réels, dans un délai raisonnable en utilisant un modèle de comportement de sols dont les paramètres puissent être déterminés à partir d'une étude géotechnique normale.

Différents modèles de comportement, plus ou moins sophistiqués, ont été implantés dans Plaxis : élastique linéaire, Mohr-Coulomb, modèle de sol avec écoulement ou spécifiques aux sols mous, etc.

- Le modèle Mohr-Coulomb

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

Le modèle de Mohr-Coulomb nécessite cinq paramètres fondamentaux :

- Deux paramètres élastiques : le module d'Young E et le coefficient de Poisson ν .
- Deux paramètres relatifs aux conditions à la rupture : la cohésion C et l'angle de frottement φ .
- Un paramètre relatif à la règle d'écoulement plastique, l'angle de dilatance ψ .
- Module de cisaillement

Le modèle élastique utilisé dans Plaxis est classique. Les tableaux de rentrée des données demandent le module d'Young E et le coefficient de poisson ν et par défaut il calcul G .

L'avantage de G est d'être indépendant des conditions de drainage du matériau ($G_u = G'$), si G est utilisé comme paramètre élastique.

- L'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.

On peut déterminer l'angle de frottement à partir de la courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb.

- La cohésion

Il peut être utile d'attribuer, même à des matériaux purement frottant, une très faible cohésion (0.2 à 1kPa). 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 ou 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 les problèmes (typiquement en kPa).

- L'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 :

$$\begin{aligned}\psi &= \varphi - 30^\circ && \text{pour } \varphi > 30^\circ \\ \psi &= 0^\circ && \text{pour } \varphi < 30^\circ\end{aligned}$$

Les cas où $\psi < 0^\circ$ correspond à des sables très lâches (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 faible ou moyenne sous contraintes assez fortes.

4. Présentation du modèle

Plaxis est un logiciel courant de modélisation par éléments finis des problèmes d'interaction sol/ouvrages géotechniques. Il a été utilisé dans la présente étude pour décrire un modèle plane qui représente une excavation typique dans l'argile de Chicago, L'excavation en milieu urbain Lurie Research Center a été réalisée en 2002/2003 pour la construction du centre de recherche médicale de l'université de Northwestern à Chicago. Lurie Research Center, est situé en plein cœur de Chicago, dans l'état de l'Illinois, aux Etats-Unis (Levasseur 2007 cité par Moussaoui,2013).

Les matériaux sol ont été supposés suivre une loi de comportement élastique parfaitement plastique caractérisée par un module de cisaillement G , un coefficient de poisson ν et obéissant au critère de rupture de Mohr-Coulomb régi par une loi d'écoulement drainé.

5. Modélisation de l'ouvrage

Cet ouvrage est choisi pour représenter une excavation typique dans l'argile de Chicago. Le profil de sol se décompose en une couche de 3.5 m de sable qui repose sur une couche d'argile saturée dont la rigidité augmente avec la profondeur.

L'excavation est réalisée jusqu'à 08 m de profondeur. Le soutènement est assuré par un rideau de palplanches de 14 m maintenu par deux rangées de butons. La figure III.1 présente le modèle numérique en déformation plane associé à ce problème.

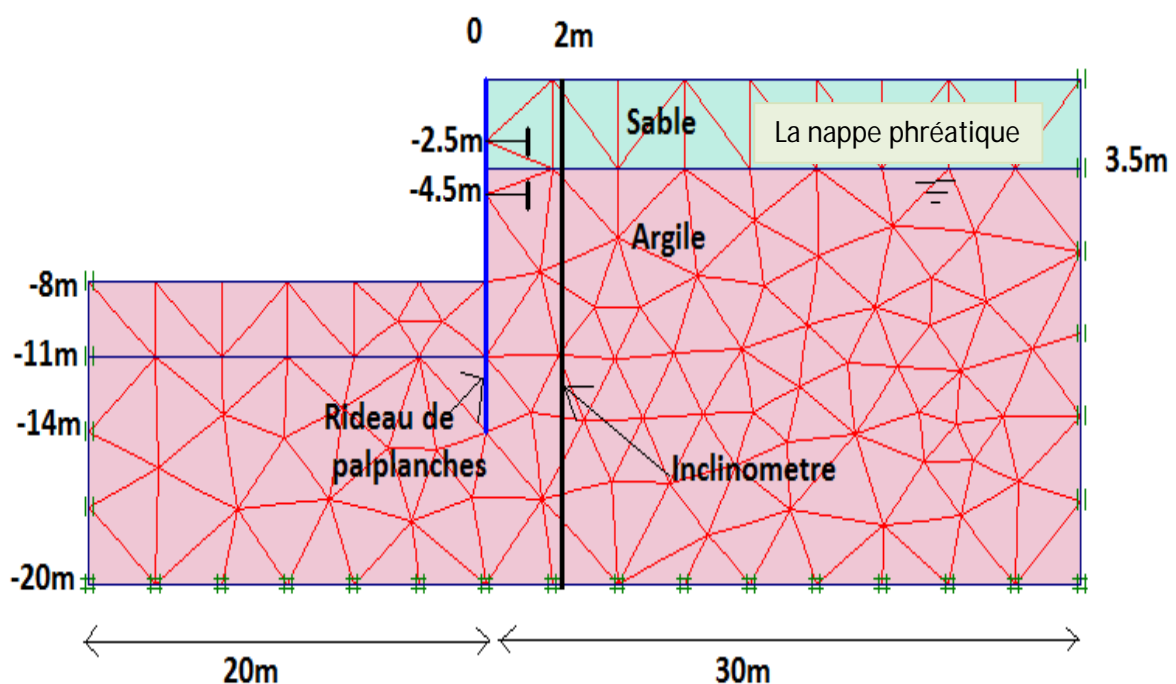


Figure III. 1:Modèle éléments finis 2D en déformation plane et maillage associé.

Pour que le logiciel Plaxis puisse exécuter les calculs facilement il faut lui saisir toute les données du projet suivantes :

5.1. Géométrie et maillage

L'analyse est réalisée dans le cadre des déformations planes et le maillage se compose d'éléments triangulaires à 06 nœuds, chaque nœud peut avoir deux degrés de liberté (deux déplacements suivant x et y respectivement), pour trouver des résultats plus précis, le maillage adopté dans ce modèle est de type coarse (grand).

La figure III.2 représente la configuration générale de ce modèle géométrique.

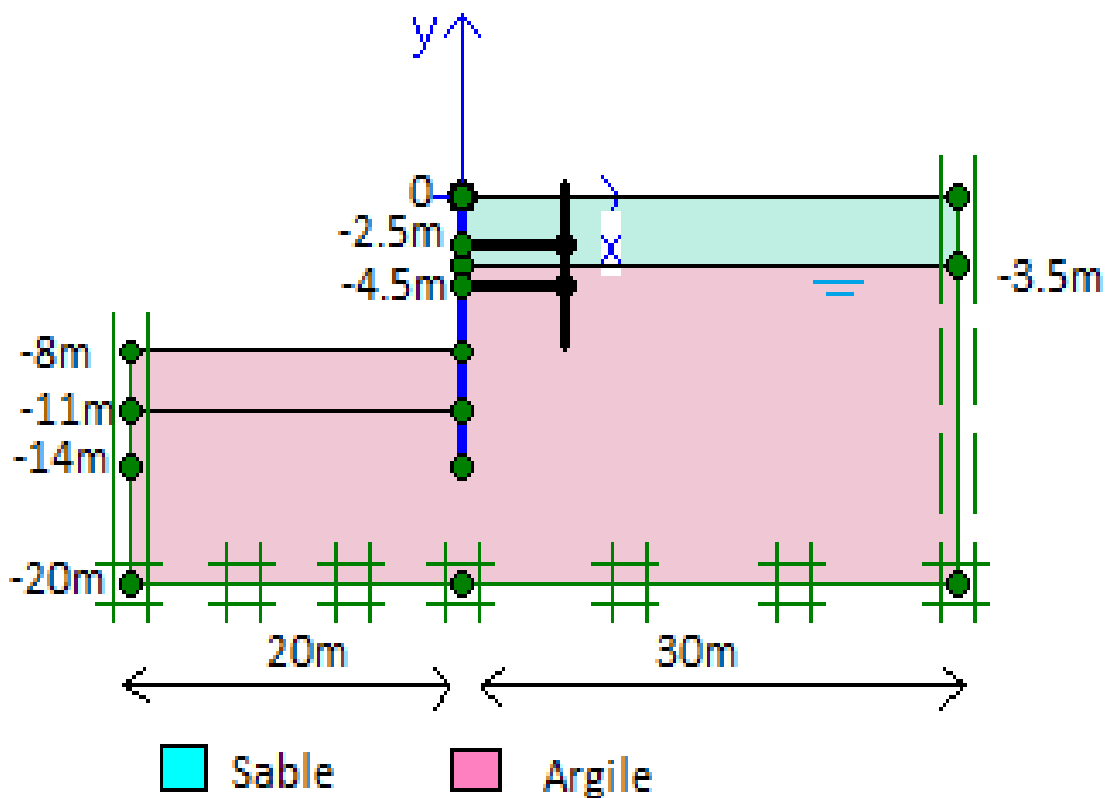


Figure III. 2:Géométrie du modèle de référence.

5.2. Les données géotechniques

La modélisation numérique par le code de calcul PLAXIS, comme tout autre code, exige la définition de quelques paramètres. Les valeurs de ces derniers sont souvent approchées à partir des résultats d'essais au laboratoire.

Les caractéristiques géotechniques spécifiques aux calculs sont regroupées dans le tableau III.1. et le tableau III.2.

Tableau III. 1:données géotechniques.

Couche	Comportement	γ_d kN/m ³	γ_{sat} kN/m ³	C kN/m ²	ϕ	ψ	G kN/m ²	ν	K m/jour
Sable	Drainé	17	20	0,2	37	5	9000	0,2	1
Argile	Drainé	15	18	0,2	26	0	2500	0,2	10 ⁻⁴

Tableau III. 2:Les caractéristiques du rideau de palplanches et les butons.

Elément	Paramètres	Valeurs
Mur de soutènement	EA [kN/m]	2,9 10 ⁶
	EI [kN m ² /m]	59,0 10 ³
	W [kN/m/m]	2,22
	d [m]	0,495
	ν [-]	-
Butons	EA [kN/m]	9,0 10 ⁵

5.3. Les conditions initiales et les conditions aux limites

Les conditions aux limites sont prises en compte en bloquant les déplacements horizontaux (déplacement horizontaux sur les bords latéraux = 0) et verticaux pour la limite inférieure et les limites éloignées dans la direction x (déplacement sur base inférieure du modèle = 0) car les conditions aux limites est une phase obligatoire dans la construction d'une grille PLAXIS.

La modélisation se réalise en deux étapes : dans un premier temps, nous avons réalisé le maillage (figure III.3). La génération du maillage sera faite automatiquement, puis dans un deuxième temps nous l'avons représenté dans un plan x y.

Pour cette application nous avons tracé le déplacement horizontal mesuré par l'inclinomètre en fonction de la profondeur de modèle qui représente l'excavation typique dans l'argile de Chicago à partir des paramètres de deux couches (sable et l'argile).

Les figures III.3 et III.4 illustrent respectivement le schéma représentatif du maillage du modèle ainsi que sa déformation.

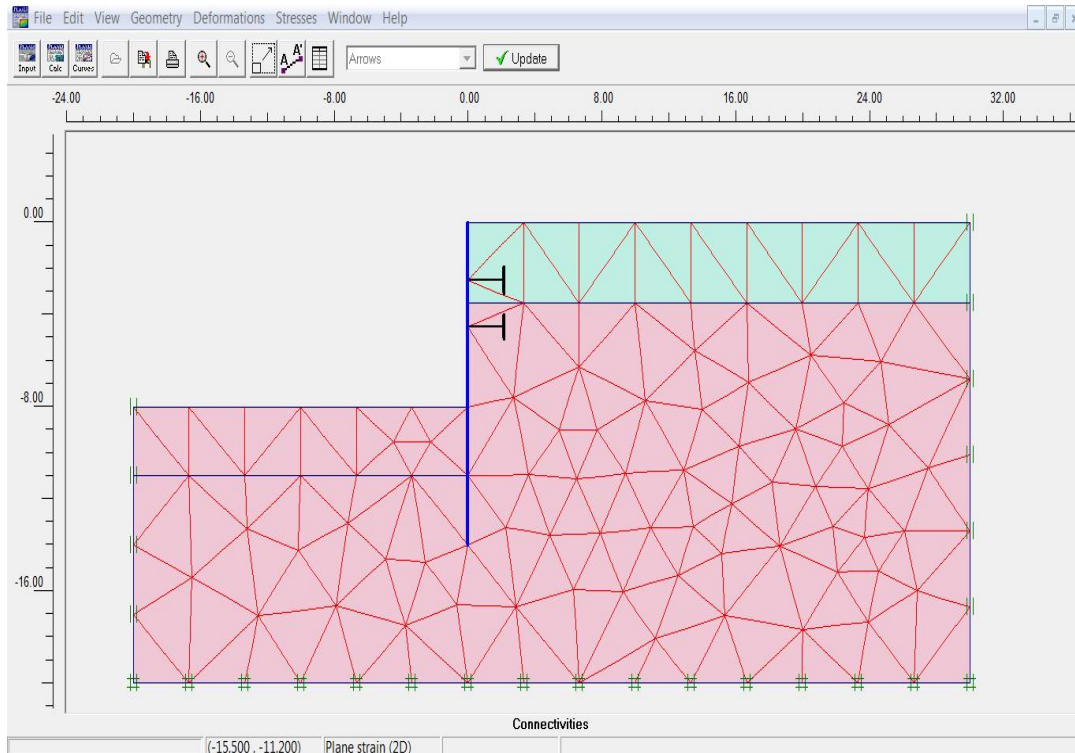


Figure III. 3:Schéma représentatif du maillage.

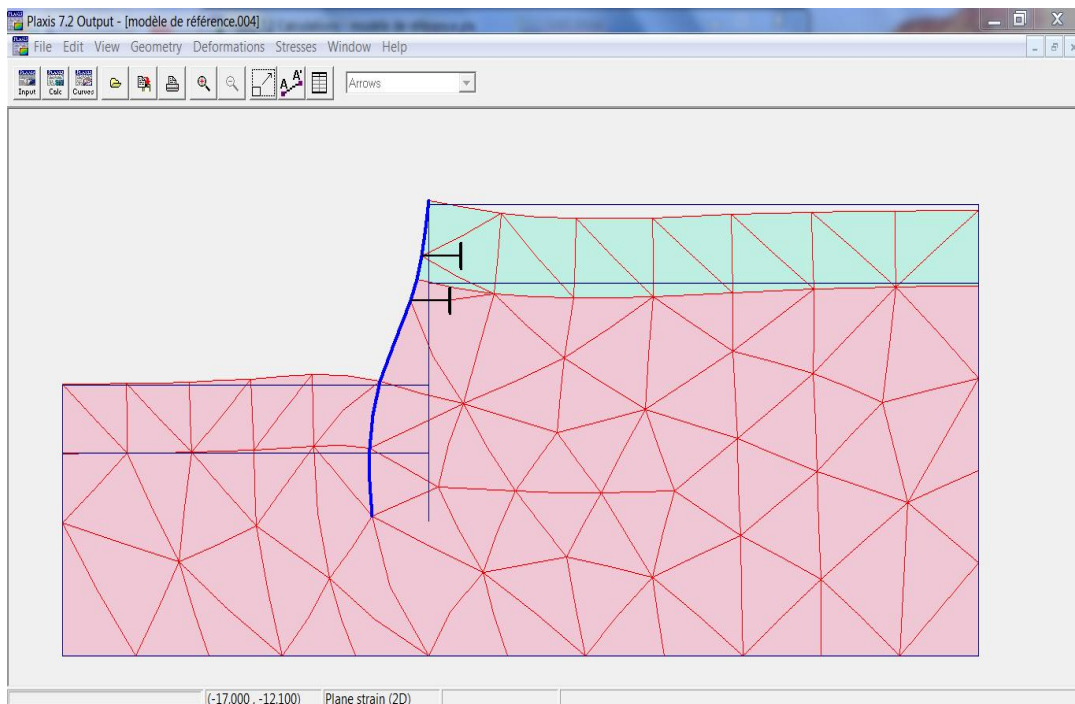


Figure III. 4:Schéma représentatif de la déformée du maillage.

Le résultat graphique de la modélisation relatif à l'état de déplacement horizontal est représenté dans la figure III.5.

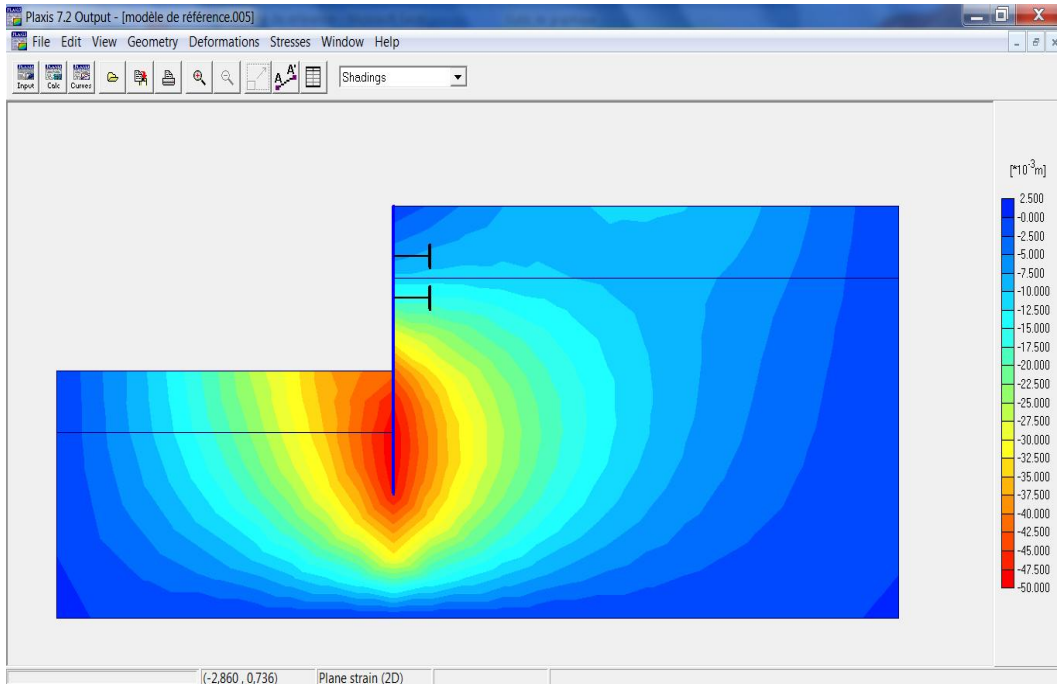


Figure III. 5 : Schéma représentatif du déplacement horizontal du modèle.

La courbe de référence $U_x(z)$, présentée dans la figure III.6 donne la variation des déplacements horizontaux $U_x(z)$ en fonction de profondeur.

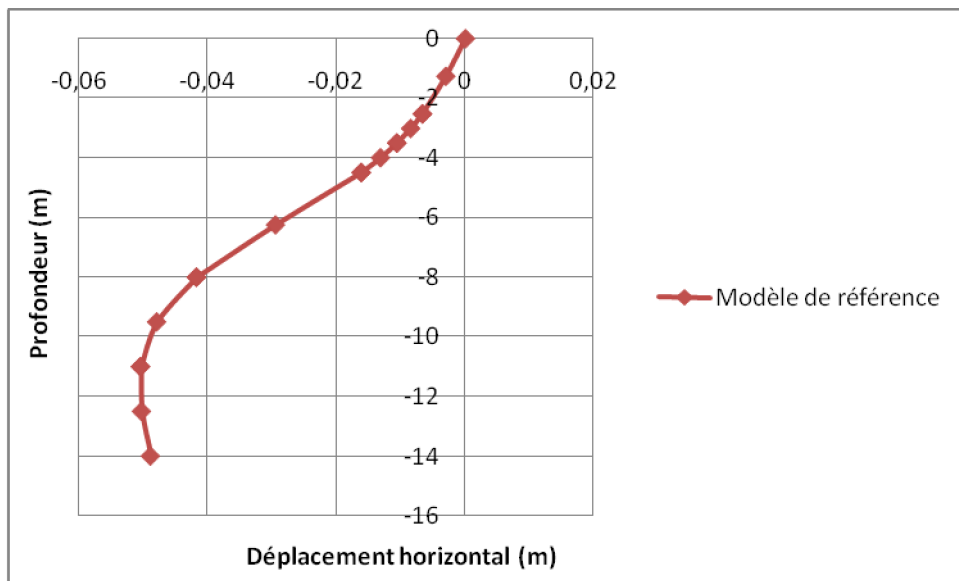


Figure III. 6: Déplacement horizontal en fonction de la profondeur du modèle de référence.

On remarque d'après la figure III.7 (la variation des déplacements horizontaux U_x d'un inclinomètre placé 2 m derrière le mur de soutènement en fonction de profondeur) que le graphe obtenu par la modélisation de modèle par Plaxis n'a pas la même allure que celle de littérature (Moussaoui, 2013).

A une profondeur de 9,50m, l'écart relatif entre le déplacement calculé et le déplacement mesuré est de 36 %.

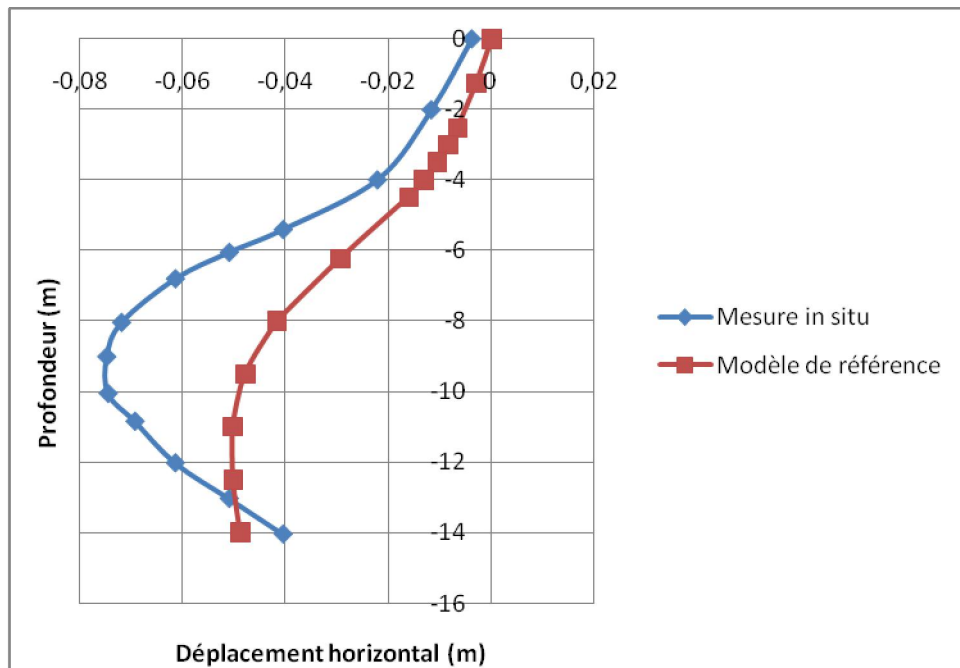


Figure III. 7: Les courbes du déplacement horizontal expérimental et numérique en fonction de la profondeur.

6. Erreurs sur les paramètres rhéologiques

L'étude présentée dans ce chapitre a été réalisée au moyen du code de calcul en éléments finis Plaxis où on va essayer de faire varier les paramètres du modèle et voir leurs influences sur la déformation horizontale.

6.1. L'influence du module de cisaillement G

On prend les valeurs de paramètres de modèle de référence (tableau III.1 et III.2) on change seulement le module de cisaillement de chaque couche (sable et argile) du modèle et on verra leur influence sur le déplacement horizontal.

On prend deux nouvelles valeurs de G pour le sable (tableau III.3) et de même pour l'argile (tableau III.4).

Tableau III. 3: Les valeurs des paramètres du modèle de comportement en faisant varier la valeur de G du sable.

Paramètres	Symbole	Couche de Sable			Couche d'argile
		Valeur initiale	1 ^{er} calcul	2 ^{ème} calcul	
Module de cisaillement (kPa)	Gref	9000	90000	900	2500
Coefficient de poisson	ν	0,2			0,2
Cohésion (kPa)	C	0,2			0,2
Angle de frottement (°)	ϕ	37			26
Angle de dilatance (°)	ψ	5			0

Tableau III. 4: Les valeurs des paramètres du modèle de comportement en faisant varier la valeur de G de l'argile.

Paramètres	Symbole	Couche de Sable	Couche d'argile		
			Valeur initiale	1 ^{er} calcul	2 ^{ème} calcul
Module de cisaillement (kPa)	Gref	9000	2500	25000	250
Coefficient de poisson	ν	0,2	0,2		
Cohésion (kPa)	C	0,2	0,2		
Angle de frottement (°)	ϕ	37	26		
Angle de dilatance (°)	ψ	5	0		

Les figures III.8 et III.9 donnent les déplacements horizontaux en fonction de la profondeur en faisant varier le module de cisaillement du sable puis celui de l'argile.

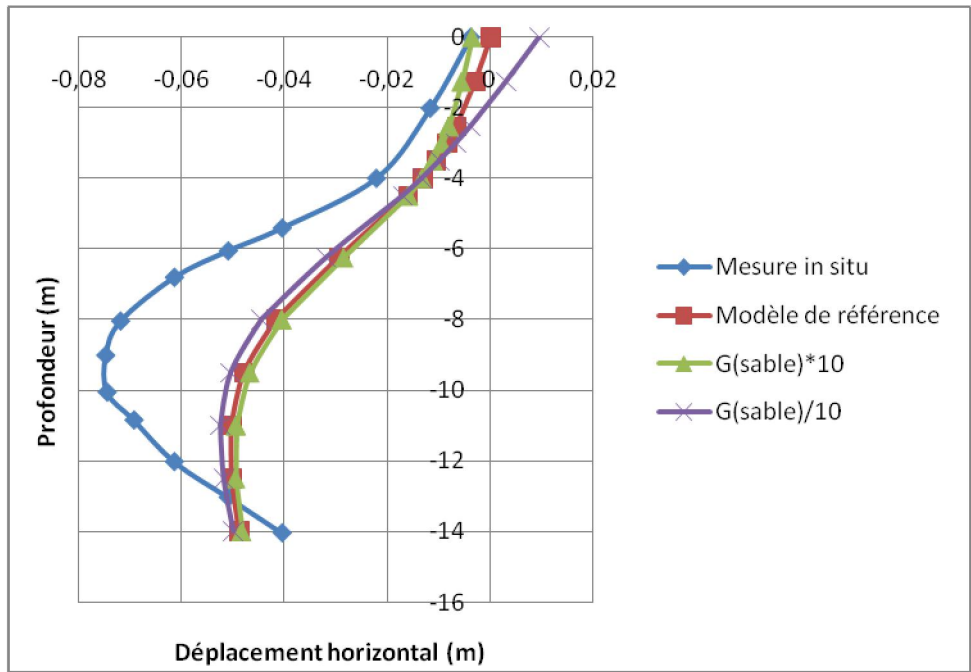


Figure III. 8: Déplacement horizontal en fonction de la profondeur en faisant varier G du sable.

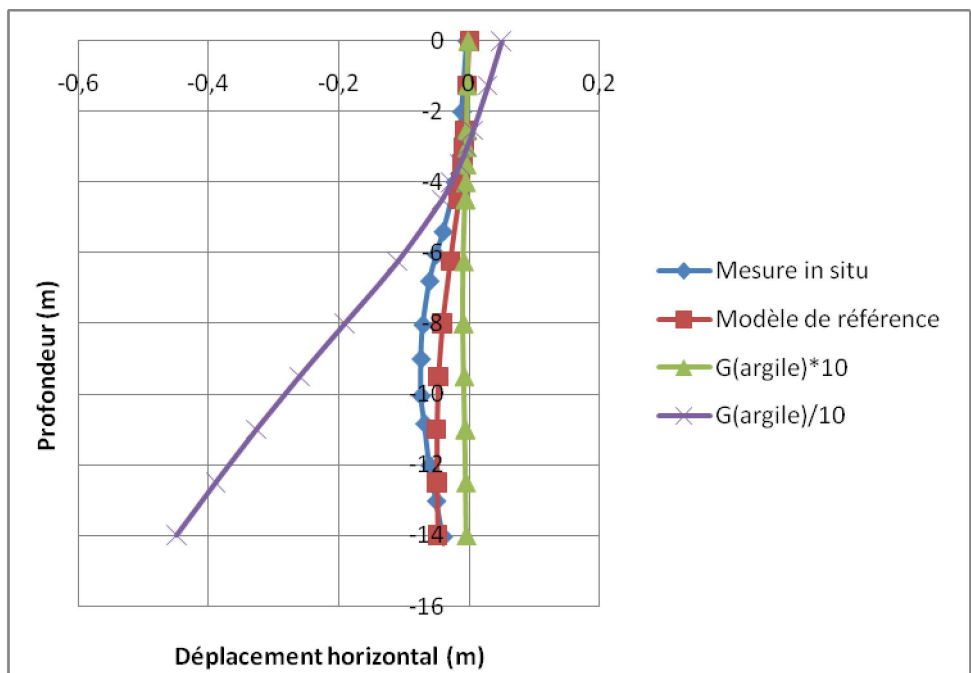


Figure III. 9: Déplacement horizontal en fonction de la profondeur en faisant varier G de l'argile.

La comparaison des résultats obtenus (cf. figure III.8 et figure III.9) par la modélisation numérique du modèle (courbe de référence) et la courbe expérimentale en utilisant les valeurs des paramètres de deux couches du sol présentées sur le tableau III.1 et les courbes

de variation de module de cisaillement de sable ($G=9 \cdot 10^4 \text{kPa}$ et $G=900 \text{kPa}$) montre que les 02 courbes sont presque confondues avec la courbe du modèle, mais on voit clairement un écart plus important entre les graphes qui représentent la variation de module de cisaillement de l'argile ($G=25 \cdot 10^3 \text{kPa}$ et $G=250 \text{kPa}$) et le graphe du modèle de référence.

A une profondeur de 9,50m, le déplacement calculé pour un module de cisaillement de l'argile ($G=250 \text{kPa}$) est largement supérieur au déplacement du modèle de référence avec un écart relatif de 444% par contre dans le cas de ($G=25 \cdot 10^3 \text{kPa}$) le déplacement est plus faible que celui du modèle de référence avec un écart relatif de 82 %.

Ce résultat nous prouve que le changement du module de cisaillement de la couche de sable n'influe pas de façon importante sur le comportement du sol et leur déplacement au contraire du cas de l'argile.

6.2. L'influence de la cohésion

Dans ce cas on varie seulement les valeurs de C de l'argile parmi les paramètres de tableau III.1 et III.2.

On prend ($C=200 \text{kPa}$, $C=100 \text{kPa}$) comme il est montré dans le tableau III.5.

Tableau III. 5: Les valeurs des paramètres du modèle de comportement faisant varier la cohésion de l'argile.

Paramètres	Symbole	Couche de Sable	Couche d'argile		
			Valeur initial	1 ^{er} calcul	2 ^{ème} calcul
Module de cisaillement (kPa)	Gref	9000	2500		
Coefficient de poisson	ν	0,2	0,2		
Cohésion (kPa)	C	0,2	0,2	200	100
Angle de frottement (°)	Φ	37	26		
Angle de dilatance (°)	Ψ	5	0		

La figure III.10 donne le déplacement horizontal en fonction de la profondeur en faisant varier la valeur la cohésion de l'argile.

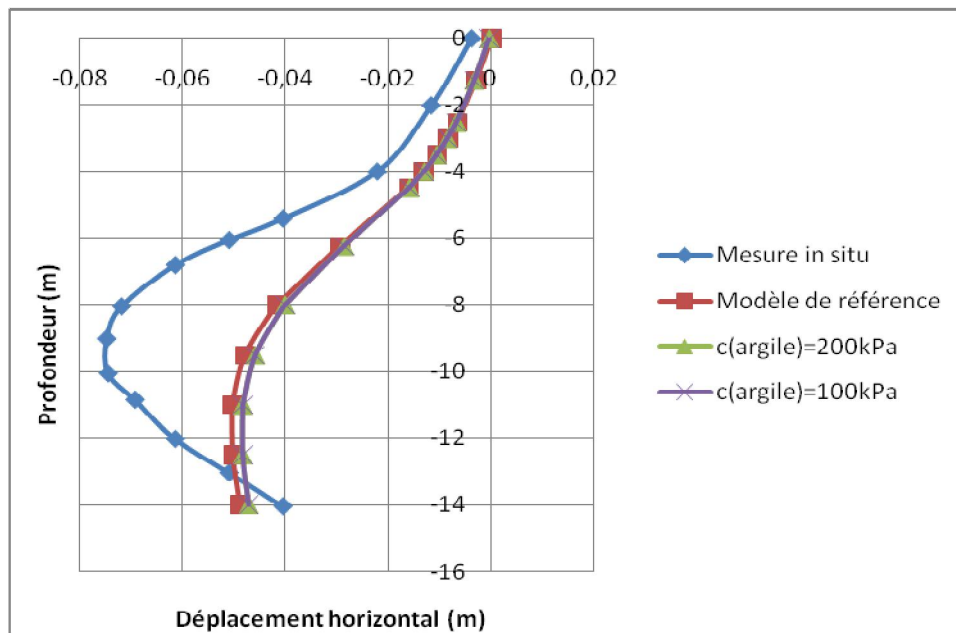


Figure III. 10: Déplacement horizontal en fonction de la profondeur faisant varier C d'argile.

Nous remarquons que les graphes de variation de la cohésion d'argile représentés sur la figure III.10 sont confondus avec le graphe de modèle de référence, donc la cohésion d'argile n'influe pas sur le déplacement horizontal du modèle.

6.3. L'influence de l'angle de frottement

On prend les valeurs de paramètres de modèle de référence (tableau III.1 et III.2) on change seulement l'angle de frottement de chaque couche respectivement (sable et argile) du modèle et on verra leur influence sur le déplacement.

On prend deux nouvelles valeurs du ϕ de sable (tableau III.6) et de l'argile (tableau III.7).

Tableau III. 6: Les valeurs des paramètres du modèle de comportement en faisant varier l'angle de frottement du sable.

Paramètres	Symbole	Couche de Sable			Couche d'argile
		Valeur initiale	1 ^{er} calcul	2 ^{ème} calcul	
Module de cisaillement (kPa)	Gref	9000			25000
Coefficient de poisson	ν	0,2			0,2
Cohésion (kPa)	C	0,2			0,2
Angle de frottement (°)	Φ	37	25	45	26
Angle de dilatance (°)	Ψ	5			0

Tableau III. 7: Les valeurs des paramètres du modèle de comportement en faisant varier l'angle frottement d'argile.

Paramètres	Symbole	Couche de sable	Couche d'argile	
			Valeur initial	1 ^{er} calcul
Module de cisaillement (kPa)	Gref	9000	2500	
Coefficient de poisson	ν	0,2	0,2	
Cohésion (kPa)	C	0,2	0,2	
Angle de frottement (°)	ϕ	37	26	45
Angle de dilatance (°)	ψ	5	0	

Les figures III.11 et III.12 donnent respectivement les déplacements horizontaux en fonction de la profondeur en faisant varier l'angle de frottement de sable puis celui de l'argile.

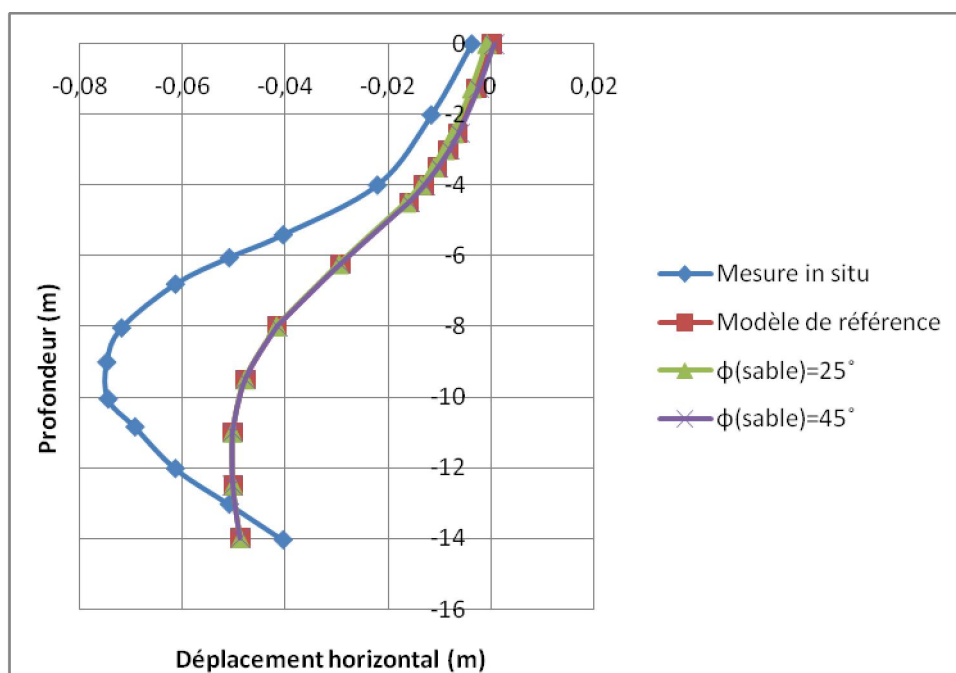


Figure III. 11: Déplacement horizontal en fonction de la profondeur en variant ϕ du sable.

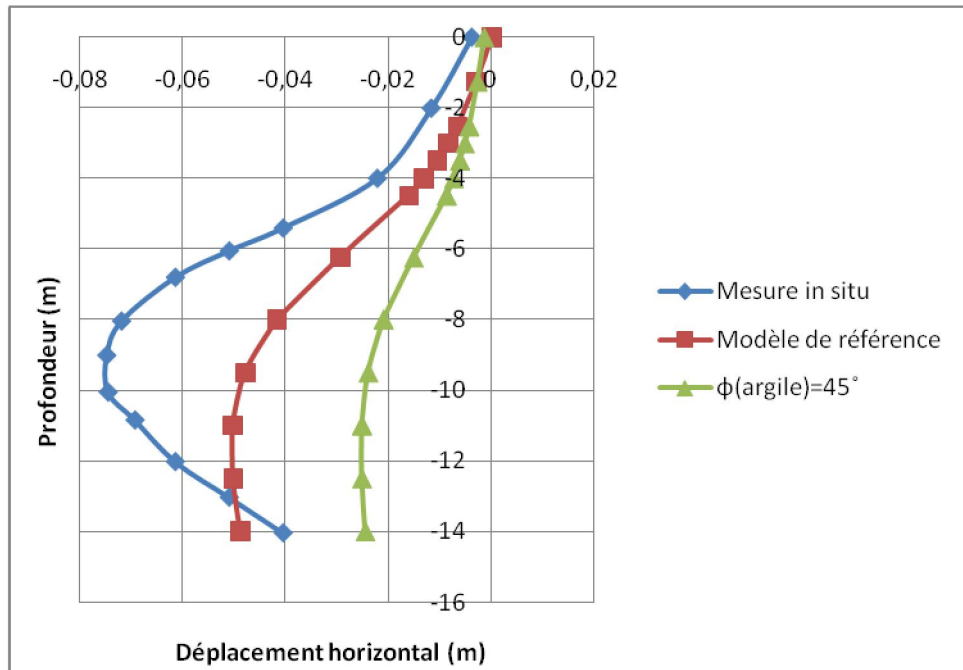


Figure III. 12: Déplacement horizontal en fonction de la profondeur faisant varier ϕ d'argile.

Les résultats obtenus (cf. figure III.11 et III.12) par la comparaison des déplacements horizontaux du modèle (courbe de référence) en utilisant les valeurs des paramètres des deux couches du sol présentées sur le tableau III.1 et les courbes de variation de l'angle de frottement du sable ($\phi=25^\circ$ et $\phi=45^\circ$) montrent que la différence de déplacements n'est pas importante mais dans le cas où on fait varier l'angle de frottement de l'argile ($\phi=45^\circ$).

A une profondeur de 9,50m, le déplacement calculé pour un angle de frottement de l'argile ($\phi=45^\circ$) est plus faible que le déplacement du modèle de référence avec un écart de 50 %.

6.4. L'étendue du modèle

Dans ce cas on prend les mêmes valeurs de paramètres du modèle (tableau III.1 et III.2) mais sa largeur totale devient 10m au lieu de 50m.

La figure III.13 illustre le déplacement horizontal en changeant les conditions aux limites du modèle (dimensions).

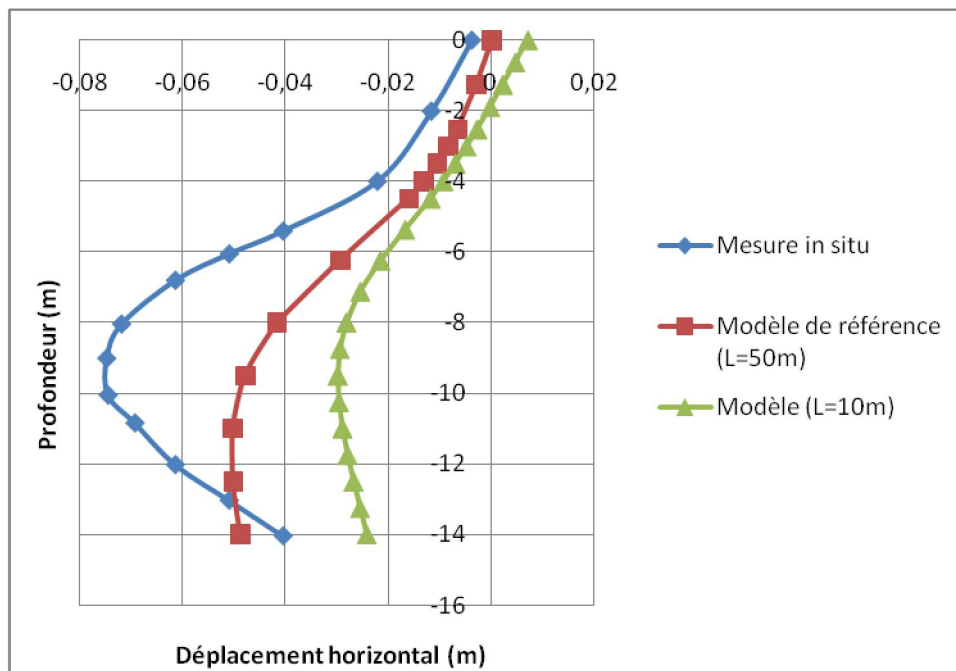


Figure III. 13: Déplacement horizontal en fonction de la profondeur en changeant les dimensions de modèle.

D'après la figure III.13 la variation des dimensions a une influence sur le déplacement horizontal de modèle où on remarque qu'il ya une différence entre les deux courbes (L=50m et L=10m).

A une profondeur de 9,50m, l'écart relatif entre le déplacement calculé en changeant les dimensions (L=10m) et le déplacement du modèle (L=50m) est de 38%.

6.5. L'étendue du maillage

Dans ce cas on prend les mêmes valeurs des paramètres du modèle (tableau III.1 et III.2) mais on change la densité du maillage (maillage grossier et maillage très fin).

La figure III.14 illustre le déplacement horizontal en changeant les conditions aux limites du modèle (la densité de maillage).

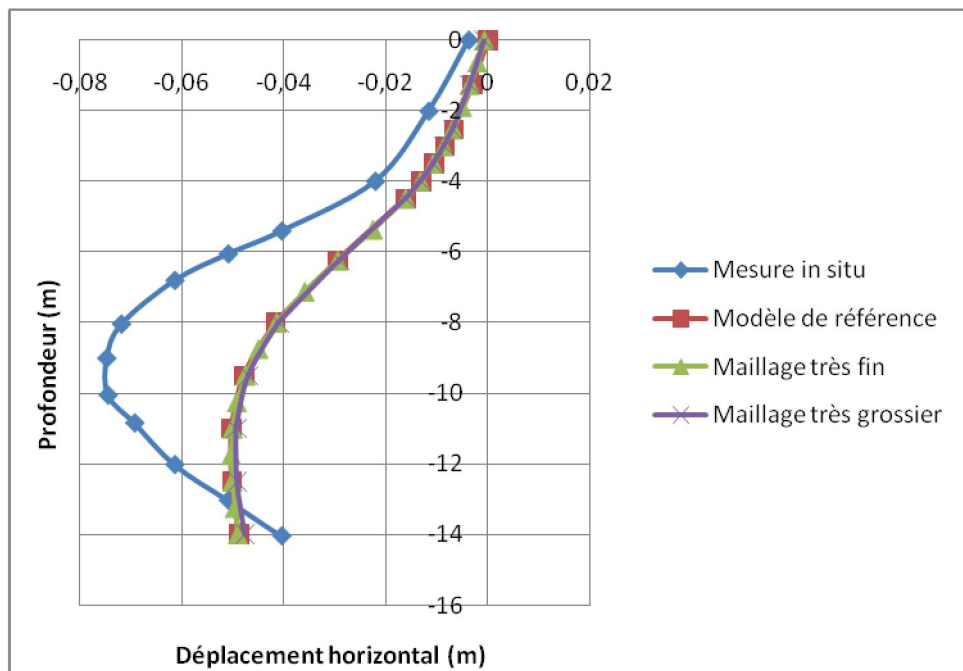


Figure III. 14: Déplacement horizontal en fonction de la profondeur en changeant la densité du maillage.

La comparaison des résultats obtenus (cf. figure III.14) par la modélisation numérique du modèle (courbe de référence) en utilisant les valeurs des paramètres des deux couches du sol présentées sur le tableau III.1 et les courbes de changement de maillage du modèle (maillage très fin et maillage grossier) sont confondues. Le nombre d'élément en maillage très grossier est de 55 éléments, tandis que dans le maillage très fin, il est de 806 éléments.

Donc la densité de maillage n'influe pas d'une façon importante sur les déplacements.

6.6. L'influence de la nappe phréatique

Dans ce cas on ne touche à aucun paramètre, mais on supprime la nappe phréatique.

La figure III.15 illustre le déplacement horizontal en supprimant la nappe phréatique.

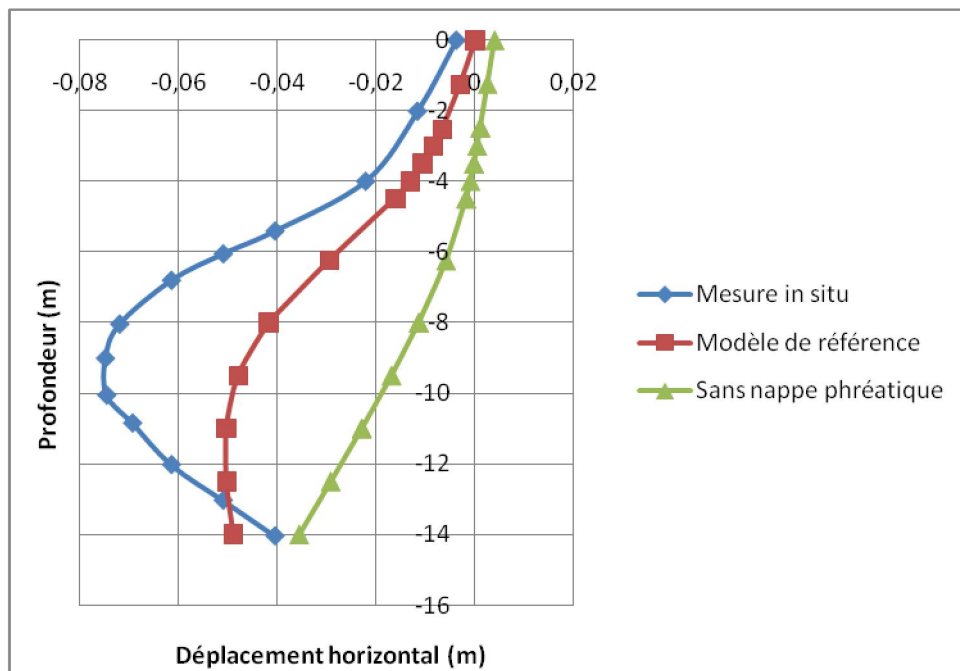


Figure III. 15: Déplacement horizontal en fonction de la profondeur en supprimant la nappe phréatique.

Les résultats obtenus (cf. figure III.15) montrent qu'il y a une différence entre le graphe quand on supprime la nappe phréatique et le graphe de modèle d'où il y a une concordance de 02 graphes sur la profondeur (0-6m) et un petit décalage sur la profondeur (6-14m), donc l'existence de la nappe phréatique influe sur le déplacement du modèle.

A une profondeur de 9,50m, l'écart relatif entre le déplacement calculé sans nappe phréatique et le déplacement de modèle est de 29 %.

6.7. L'influence de l'angle de dilatance

On prend les valeurs de paramètres du modèle de référence (tableau III.1 et III.2) on change seulement l'angle de dilatance de la couche de sable et on verra son influence sur le déplacement de ce modèle.

On prend deux nouvelles valeurs de Ψ de sable (tableau III.8).

Tableau III. 8: Les valeurs des paramètres du modèle de comportement en faisant varier l'angle de dilatance de sable.

Paramètres	Symbole	Couche de Sable			Couche d'argile
		1 ^{er} calcul	2 ^{ème} calcul	3 ^{ème} calcul	
Module de cisaillement (kPa)	Gref	9000			25000
Coefficient de poisson	ν	0,2			0,2
Cohésion (kPa)	C	0,2			0,2
Angle de dilatance (°)	Ψ	0	7	17	0
Angle de frottement (°)	Φ	37			26

La figure III.16 donne les déplacements horizontaux en fonction de la profondeur en faisant varier l'angle de dilatance de sable.

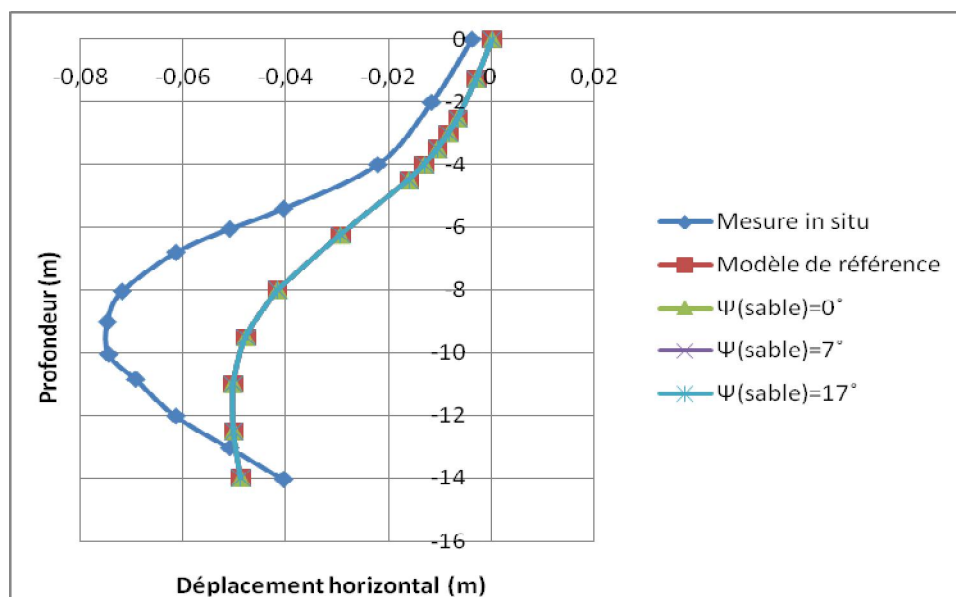


Figure III. 16 : Déplacement horizontal en fonction de la profondeur en faisant varier Ψ de sable.

La comparaison des résultats obtenus (cf. figure III.16) par la modélisation numérique du modèle (courbe de référence) en utilisant les valeurs des paramètres de deux couches du sol présentées sur le tableau III.1 et les courbes de variation d'angle de dilatance de sable (tableau III.8) sont confondues.

Donc l'angle de dilatance n'influe pas d'une façon importante sur les déplacements.

7. Conclusion

On a établi un calcul de référence pour un modèle donné : ce calcul a donné des résultats proches des mesures in situ. On a fait varier individuellement plusieurs paramètres géotechniques et de la géométrie du modèle de référence et étudier leurs influences sur le déplacement horizontal du modèle.

Ainsi que le changement des paramètres du sable et la densité de maillage n'influent pas sur le modèle, mais le changement des paramètres de l'argile, les dimensions du modèle et la présence de la nappe phréatique ont une grande influence sur le modèle.

L'ingénieur doit donc déterminer avec le plus grand soin l'ensemble des paramètres géotechniques nécessaires à la modélisation (les mesures in situ et de laboratoire).

Les erreurs de mesures ou d'interprétations des essais, ou encore les erreurs de modélisation peuvent induire des erreurs importantes sur les résultats des calculs.

Conclusion générale

Dans cette étude, premièrement nous avons présenté quelques notions concernant la méthode des éléments finis, en insistant sur les types ou les sources d'erreurs, les techniques d'estimation et leur influence sur la modélisation numérique.

Ensuite, nous avons présenté le cas d'étude : une excavation à Chicago.

Nous avons fait varier plusieurs paramètres du modèle afin de déterminer leurs influences sur le déplacement horizontal derrière l'ouvrage de soutènement.

Les conclusions principales qu'on peut tirer de cette étude sont :

- Les résultats de la mesure du déplacement in situ sont reproduits par la modélisation avec PLAXIS de façon acceptable.
- le changement des paramètres du sable et la densité du maillage n'ont pas beaucoup d'influence sur les résultats de la modélisation. Au contraire les paramètres relatifs à l'argile, les dimensions du modèle et la présence de la nappe phréatique ont une influence considérable.
- Les sources d'erreurs dans une modélisation numérique peuvent être de différentes origines parmi elles : incertitude des mesures, mauvaise estimation des paramètres, mauvaise interprétation des mesures, changements des valeurs de paramètres, erreur dans les unités, etc.).
- L'ingénieur doit utiliser les codes de calcul de façon avertie. Il doit être conscient que la qualité des résultats est conditionnée par la qualité et la fiabilité des données.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BABUSKA I., STROUBOULIS T., & UPADHYAY C.S., 1994: U model study of the quality of a posteriori for linear elliptic problems- Error estimation in the interior of patch wise triangles error estimators uniform grids of triangles . Computer methods in applied mechanics and engineering 114:307-378.

BABUSKA I., STROUBOULIS T., UPADHYAY C.S., & MATHUR A., 1994: Pollution error in the version of the finite element method and the local quality of a posteriori error estimators, Finite Elements in Analysis and Design 17: 273-321.

BOUSQUET P., 1980 : Pieux et palplanches, application au calcul des ouvrages in Techniques de l'Ingénieur, traité Construction C 140.

BRINKGEREVE R.B.J., & VERMEER P.A., 2003: PLAXIS version 8, validation manual, DELFT University of technology & PLAXIS BV, Pays-Bas, 2003.

FAVRE J.L., 1998: Errors in geotechnics and their impact on safety, Computers and Structures 67: 37-45.

KUSS F., & LEBON F., 2011: Error estimation and mesh adaptation for Signorini-Coulomb problems using E-FEM, a Computers and Geotechnics 89: 1148–1154.

LEVASSEUR S., 2007 : Analyse inverse en géotechnique : développement d'une méthode à base d'algorithmes génétiques. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble, France.

MESTAT P., 2001 : Une base de données sur la modélisation numérique des remblais sur sols compressibles et sur la confrontation calculs-mesures in situ, bulletin des laboratoires des ponts et chaussées: 34-58.

MESTAT P., 2003 : Validation des logiciels, groupe de travail « modélisation numérique, bulletin des laboratoires des ponts et chaussées.

MESTAT P., 2005 : Nécessité de valider la qualité des simulations numériques pour la construction, modélisation numérique et ingénierie de construction, bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, Paris.

MESTAT P., 2006 : lois de comportement simples et algorithmes, session de formation continue (ENPC), bulletin des laboratoires des ponts et chaussées.

MESTAT P., 2010 : Pièges, erreurs et pathologie des calculs numériques, session de formation continue (ENPC), bulletin des laboratoires des ponts et chaussées.

MESTAT P., HUMBERT P., & DUBOUCHET A., 2000 : Recommandations pour la vérification des modèles d'éléments finis en géotechnique, bulletin des laboratoires des ponts et chaussées 229: 33-51.

MOUSSAOUI M., 2013 : l'analyse inverse des problèmes géotechniques applications des méthodes d'optimisations stochastiques. Thèse de doctorat, Université du 20 Août 1955 Skikda, Algérie.

PARRET-FREAU A., 2011 : Estimation d'erreurs de discrétisation dans les calculs par décomposition de domaine, thèse de doctorat, école doctorale sciences pratiques de CACHAN, France.

ROBERT J., & MELOSH S., 1984: Solution errors in finite element analysis, Computers and structures volume.18: 379-393, Great Britain.

SCHLOSSER F., 1991 : Mur de soutènement, application au calcul des ouvrages in Techniques de l'Ingénieur, traité Construction C 244.

STEIN E., RUTER M., & OHNIMUS S., 2007: Error-controlled adaptive goal-oriented modeling and finite element approximations in elasticity, Computer methods in applied mechanics and engineering 196: 3598–3613.

VULPE C., 2011 : Développement d'indicateurs de qualité dans la modélisation des ouvrages géotechniques par la méthode des éléments finis : application aux soutènements, thèse de doctorat, université Paris-Est, France.

ZHANG J., TANG H.W., ZHANG L.M., & HUANG H.W., 2012: Characterising geotechnical model uncertainty by hybrid Markov Chain Monte Carlo simulation, Computers and Geotechnics 43:26–36.

WEBOGRAPHIE

<http://www.plaxis.nl>

ملخص

الهدف من هذا العمل هو توجيه المهندس إلى الاستعمال الحذر لبرامج الحساب في نمذجة الهياكل. الدراسة التي تم اختيارها هي هيكل حقيقي مجهز وهي حالة الحفر المُسند بالألواح المثبة. الهيكل منمذج بواسطة برنامج Plaxis. نركز بشكل خاص على الانتقال الأفقي على مسافة 2م وراء الجدار الاستنادي. بعد العملية الحسابية الأولى بالنموذج وقيم الوسائط المرجعية، نفذت العديد من العمليات الحسابية من حيث تغيير الوسيط (وسيط ميكانيكي، ووسيط هندسي، الخ.). كل تغيير في قيمة الوسيط قد يُعبر عن خطأ محتمل (خطأ في القياس أو في تفسير التجربة، خطأ في الوحدة). تستخدم النتائج المتحصل عليها لجذب انتباه المهندس لحساسية النموذج وفق المعطيات المعبرة وبالتالي الرؤية بطريقة واضحة بأن نوعية النتائج ترتبط ارتباطاً وثيقاً بنوعية المعطيات.

الكلمات المفتاحية

نمذجة، برنامج حساب، هيكل، الوسائط الجيوتقنية، خطأ.

RESUME

L'objectif de ce travail est d'orienter l'ingénieur vers une utilisation avertie des codes de calcul pour la modélisation des ouvrages.

Le cas d'étude choisi est un ouvrage réel instrumenté. Il s'agit d'une excavation soutenue par des palplanches ancrées. L'ouvrage est modélisé par le code Plaxis. On s'intéresse notamment aux déplacements horizontaux à une distance de 2m derrière le soutènement.

Après un premier calcul avec un modèle et un jeu de données de référence, plusieurs calculs sont menés où un paramètre est varié (paramètre mécanique, géométrique, etc.). Une variation d'un paramètre correspond à une erreur éventuelle (erreur de mesure ou d'interprétation d'un essai, erreur d'unité).

Les résultats obtenus permettent d'attirer l'attention de l'ingénieur sur la sensibilité d'une modélisation aux données introduites et par conséquent de voire de façon très claire que la qualité des résultats est directement liée à la qualité des données.

Mots clés

Modélisation, code de calcul, ouvrage, paramètres géotechniques, erreur.

Abstract

The objective of this work is to direct the engineer towards an informed use of the numerical codes for the modeling of the structures.

The selected case of study is an instrumented structure. It is about an excavation supported by anchored sheet piles. The structure is modeled by Plaxis code. One is interested in particular in horizontal displacements at a distance of 2m behind sheet piles.

After the first calculation with a model and a reference data file, several calculations are carried out where a parameter is varied (mechanical parameter, geometrical parameter, etc). A variation of a parameter corresponds to a possible error (error of interpretation of a test, error of measurement, error of unit).

The results obtained make it possible to draw the attention of the engineer to the sensitivity of a modeling for the introduced data and consequently of even in a very clear way that the quality of the results is directly related to the quality of the data.

Key words

Modeling, numerical code, structure, geotechnical parameters, error.