

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA

FACULTÉ DE LA TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

MÉMOIRE DE MASTER EN GÉNIE CIVIL

SPÉCIALITÉ : GEOTECHNIQUE

**COMPORTEMENT D'UN ÉCRAN AUTOSTABLE SOUS
SOLLICITATIONS STATIQUE – MODÉLISATION PAR
ÉLÉMENTS FINIS ET RECOMMANDATION PRATIQUE**

SOUTENU PAR :

DIF AHLEM ET RIAD NADA

DEVANT LE JURY COMPOSÉ DE :

- HAZOUT LEILA PRÉSIDENTE DU JURY
- ABED YOUNES EXAMINATEUR
- ALI BOUAFIA DIRECTEUR DU MÉMOIRE

BLIDA 2020



REMERCIEMENT:

Toute notre parfait gratitude et remerciement a Allah plus puissant qui nous a donné la force, le courage et la volonté pour établir ce travail.

Nous tenons à remercier également nos parents respectifs pour tous les sacrifices qu'ils ont voulu bien consentir à notre égard tout le long de notre cursus universitaire

C'est avec profonde reconnaissance et considération particulière qu'on remercie notre promoteur **Mr Bouafia Ali** pour des conseils et sa bienveillance durant l'élaboration de ce projet

Ainsi nous exprimons notre reconnaissance à tous les membres de jury d'avoir lit ce manuscrit.

Enfin, a tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour la réalisation de ce projet fin d'étude

DEDICACE

C'est avec un grand plaisir que je dédie ce travail

A mes chers parents ma mère et mon père

Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs encouragements

A mes chères sœurs : Sirine et Chahira et ses fils

Pour ses soutiens moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études.

A ma chère grand-mère

Qui je souhaite une bonne santé

A mes chers cousins : Billel et Wissem

Qui je leur souhaite tout le bonheur

A mes chers : Hamadou Nafissa et Djellakh Chemes eddine

Pour leur soutien dans mes joies et mes peines

A ma chère amie avant d'être binôme : Riad Nada

Pour son entente et sa sympathie

*A tous mes amis tout particulièrement : B.Amel ; H.Rania ;Br. Chaima ;
H.Lynda ; B.Chaima ;CH.Asma ; M.khadidja ; M. ichrek ; B.Bouchra*

A toute la promotion géotechnique 2020

DIF AHLEM

DEDICACE

J'ai toujours pensé à faire ou offrir quelque chose à mes parents en signe de reconnaissance pour tous ce qu'ils ont consenti d'efforts rien que pour me voir réussir, et voilà l'occasion est venu

A ceux qui m'ont donnée la vie, symbole de beauté de fierté de sagesse et de patience.

A ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage a qui je dois l'amour et de la reconnaissance.

- A mon père **REDHA** et ma mère **NAIMA**
- Ma sœur **F/Zohra** et mon frère **MOHAMED** ainsi qu'à mon beau-frère **YASSER**
 - A toute la famille **RIAD** et la famille **CHIKAR**
 - A ma très chère amie avant d'être mon binôme **D.AHLEM**

Merci de ton bienêtre

- A mes meilleurs amis:

B.CHAIMA, H.LYNDA, M.YASSMINE, H.NAFISSA, B.LILIA, D.HINDA, D.BESMA et K.LOUBNA

- A toute la promotion2020

- Tous les enseignants qui m'ont dirigé vers la porte de la réussite

RIAD NADA

RÉSUMÉ

Dans le domaine de la géotechnique, qui est caractérisé par la construction d'ouvrages adaptés à un problème spécifique, il est important pour le développement des méthodes de calcul d'étudier le comportement de ces ouvrages et de leur environnement.

Cette étude se situe dans le contexte de recherches menées sur les différents aspects d'un écran de soutènement. Ce travail débute par une étude bibliographique concernant les généralités sur les écrans de soutènement et leurs éléments constitutifs, ainsi que le domaine d'utilisation, la mise en œuvre de ces écrans, et le comportement de l'excavation.

Pour atteindre l'objectif principal de ce projet de fin d'étude qui est destiné à faire une étude pour comprendre le comportement d'un écran auto-stable sous sollicitations statique, on a effectué une modélisation à l'aide de ZSwalls et le code de calcul PLAXIS (2D) qui est basé sur la méthode aux éléments finis.

Les résultats obtenus montrent l'influence importante de variation de certains paramètres sur le calcul (le tassement, le déplacement et la déformé de l'écran).

mots-clés : géotechnique, comportement, écran de soutènement, Modélisation numérique, sollicitation statique, ZSwalls , PLAXIS2D ,élément finis

ABSTRACT

In the field of geotechnical, which is characterized by the construction of structures adapted to a specific problem, it is important for the development of calculation methods to study the behaviour of these structures and their environment.

This study takes place in the context of research envisaged on the various aspects of a retaining wall. This work begins with a bibliographic study concerning the generalities of retaining walls and their constituent elements, as well as the field of use, the implementation of these walls, and the behaviour of the excavation.

To achieve the main objective of this end-of-study project which is oriented to study and understand the behaviour of a self-stable retaining wall under static solicitations, a modelling was carried out using ZSwalls and the code PLAXIS calculation (2D) which is based on the finite element method.

The results obtained have a significant influence of variation of certain parameters on the calculation (settlement, displacement and deformation of the wall).

Key words: geotechnical, behaviour, retaining wall, numerical modelling, static solicitations, ZSwalls, PLAXIS2D, finite elements

ملخص

في المجال الجيوتقني ، الذي يتميز ببناء هياكل تتكيف مع مشكلة معينة ، من المهم تطوير طرق حسابية لدراسة سلوك هذه الهياكل وبيئتها.

تتم هذه الدراسة في سياق البحث الذي تم إجراؤه على جوانب مختلفة من جدار الاستناد. يبدأ هذا العمل بدراسة بيليوغرافية تتعلق بعموميات الجدران الاستنادية والعناصر المكونة لها ، بالإضافة إلى مجال الاستخدام وتنفيذ هذه الجدران وسلوك التثبيت.

لتحقيق الهدف الرئيسي لمشروع نهاية الدراسة هذا والذي يهدف إلى إجراء دراسة لفهم سلوك جدار مستقر ذاتيًا تحت الأحمال الثابتة قمنا بتنفيذ نمذجة باستخدام البرنامج الذي يعتمد على طريقة حساب العناصر المحدودة

ZSwalls و PLAXIS (2D)

تظهر النتائج التي تم الحصول عليها التأثير المعنوي لتغير بعض المعلمات على الحساب (الاستقرار، الإزاحة، وتشوه جدار الاستناد)

الكلمات المفتاحية: الجيوتقني ، السلوك ، جدار الاستناد ، النمذجة العددية ، الإجهاد الساكن ، العناصر المحدودة

ZSwall، PLAXIS (2D)

ABSTRACT

The behaviour of civil engineering structures largely depends on soil-structure interfaces. Indeed, in the geotechnical literature an important part is devoted to the development and improvement of the techniques of analysis of the phenomenon of interaction soil structure. Buried structures and in particular retaining wall are subject to strong interactions with the soil. The solicitations vary very significantly depending on the deformations of the structures.

The development, at the beginning of the 20th century, of retaining wall , flexible structures taking support in the ground, widened the question of the soil-structure interaction. The engineer has a large number of tools for the analysis and design of various structures. Combined with advances in information technology, which make high-performance microcomputers more and more accessible.

The use of finite element calculation software in the calculation of structures and civil engineering works has made it possible to deal with the problem of soil-structure interaction under different aspects. In the finite element method, the behaviour of a soil is represented by a constitutive model. However, we must keep in mind, like any numerical method, that the results should be interpreted with precaution. Geotechnical expertise remains essential to correctly select the soil parameters of a model.

This end-of-study memory consists of launching a study based on numerical modelling and the analysis of the behaviour of an auto-stable retaining wall under static solicitation in sandy and clayey soil, by the numerical finite element method in using ZSwalls and PLAXIS 2D software, in which we studied the effect of the soil / structure interaction on the stability of the wall

Our study has six (6) chapters; including a general introduction, abstract and conclusion.

- A general introduction to the work done is presented.
- The first chapter is devoted to a generality about retaining wall includes its types, its various uses, the implementation of these wall, and the behaviour of the excavation.
- The second chapter is a brief overview of the finite element method and a presentation of the software used ZSwalls.

- The third chapter is a presentation of the finite element calculation software PLAXIS (2D).
- The fourth chapter, we present a study of settlement at the surface of an excavation supported by a retaining wall, in sandy and clayey soil for different compactness and different heights, depending on the ZSwalls software.
- The fifth chapter, we studied the wall / structure interaction upstream, using the ZSwalls software.
- The sixth chapter, we studied the critical height H_c of an unsupported excavation with the PLAXIS software (2D)
- Finally, a general conclusion and research perspectives.

SOMMAIRE :

INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE1. GENERALITE SUR LES ECRANS DE SOUTÈNEMENT	4
1.1 Définition :	4
1.2 Les différents types d'écrans de soutènement :	4
1.2.1 Les rideaux de palplanches métalliques:.....	4
A. Lierne :.....	9
1.2.2 les parois moulées et préfabriquée :.....	10
1.2.3 Les parois clouées :.....	17
A. Caractéristiques géométrique :.....	19
1.2.4 Parois composite :.....	21
1.2.5 les différentes types de parois composites :.....	23
1.3 Comportement de l'excavation :	26
1.3.1 Introduction :.....	26
1.3.2 Mouvement du sol vers la fouille :.....	27
1.3.3 Tassement derrière l'écran :.....	27
1.3.4 La déformation de l'écran :.....	31
1.3.5 Soulèvement du fond de la fouille :.....	33
1.4 Les Méthodes de calculs :	33
1.4.1 Méthode de Coulomb :.....	33
1.4.2 Méthode de Rankine :.....	35
1.4.3 Méthode des équilibres limites :.....	36
1.4.4 Méthodes de calcul des rideaux de palplanches et des parois :.....	37
1.4.5 Méthodes de calcul aux états limites :.....	37
1.4.6 Méthode de calcul aux modules de réaction :.....	39
1.4.7 Calcul par la méthode des éléments finis (méthode numérique) :.....	41
1.5 Conclusion :	42
CHAPITRE2. PRESENTATION DU LOGICIEL ZSWALL	43
2.1 Introduction :.....	43

2.2	Les concepts de base :	44
2.3	Présentation de ZSWALLS	44
2.4	Les fonctionnalités de ZSwalls :	44
2.5	La modélisation par ZSwalls :	45
2.5.1	Preselection (la présélection) :	45
2.5.2	La fenêtre principale:	49
2.6	Conclusion	51
CHAPITRE3. PRESENTATION DU LOGICIEL PLAXIS		52
3.1	Introduction :	52
3.2	Présentation du logiciel :	52
3.2.1	Les points forts de PLAXIS	52
3.3	Modèle de comportement de PLAXIS:	60
3.3.1	Modèle élastique linéaire	60
3.3.2	Modèle deMohr-Coulomb:	61
3.3.3	Modèle de sol avec écrouissage (Hardening Soil Model):	62
3.3.4	Modèle pour les sols mous (Soft Soil Model):	64
3.3.5	Modèle pour les roches fracturées (Jointed Rock Model).....	64
Modèle défini par l'utilisateur:		64
3.4	Conclusion :	65
CHAPITRE4. ETUDE DU TASSEMENT EN SURFACE D'UNE FOUILLE		
SOUTENUE PAR UN ECRAN		66
4.1	Introduction :	66
4.2	Etude du tassement d'un sol sableux en amont du rideau	67
4.2.1	Sable lâche $\varphi = 30^\circ$	67
4.2.2	Sable Moyennement dense $\varphi = 35^\circ$	71
4.2.3	Sable dense $\varphi = 40^\circ$	76
4.3	Etude du tassement d'un sol argileux saturé en amont du rideau	80

4.3.1	Argile molle $C_u = 30\text{Kpa}$:	80
4.3.2	Argile ferme $C_u = 50\text{Kpa}$:	83
4.3.3	Argile raide $C_u = 100\text{Kpa}$:	86
4.4	Conclusion :	91
CHAPITRE5. ETUDE DE L'INTERACTION ECRAN/OUVRAGE AL'AMONT		92
5.1	Introduction :	92
5.2	Présentation du modèle d'éléments finis	92
5.3	Présentation et discussion des résultats :	93
5.3.1	Courbe de chargement à l'amont d'un rideau soutenant une fouille d'argile saturée	93
5.3.2	Courbe de chargement à l'amont d'un rideau soutenant une fouille de sable :	107
5.4	Conclusions	121
CHAPITRE6. ETUDE DE LA HAUTEUR CRITIQUE H_C D'UNE FOUEILLE NON SOUTENUE		122
6.1	Introduction :	122
6.2	Modélisation du problème	123
6.3	Présentation et discussion des résultats.....	123
6.3.1	Argile molle $C_u = 30\text{Kpa}$:	123
6.3.2	Argile ferme $C_u = 50\text{Kpa}$:	127
6.3.3	Argile raide $C_u = 100\text{Kpa}$:	130
6.4	Conclusions	133
CONCLUSION GÉNÉRALE.....		136
ANNEXE.....		138
RÉFÉRENCE.....		163

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 <i>qualité de la boue</i>	13
Tableau 4.1 <i>la variation du tassement de surface $s(x)/D$ en fonction de x/H</i>	68
Tableau 4.2 <i>la variation du tassement de surface $s(x)/D$ en fonction de x/H</i>	68
Tableau 4.3 <i>la variation du tassement de surface $s(x)/D$ en fonction de x/H</i>	69
Tableau 4.4 <i>la variation du tassement de surface $s(x)/D$ en fonction de x/H</i>	70
Tableau 4.5 <i>Tassements maximaux (s_{max}/D) pour les quatre variantes</i>	71
Tableau 4.6 <i>Variation du tassement de surface $s(x)/D$ en fonction de x/H</i>	72
Tableau 4.7 <i>la variation du tassement de surface $s(x)/D$ en fonction de x/H</i>	72
Tableau 4.8 <i>la variation du tassement de surface $s(x)/D$ en fonction de x/H</i>	73
Tableau 4.9 <i>la variation du tassement de surface $s(x)/D$ en fonction de x/H</i>	74
Tableau 4.10 <i>regroupant les tassements maximaux (s_{max}/D) pour les quatre variantes</i>	75
Tableau 4.11 <i>la variation du tassement de surface $s(x)/D$ en fonction de x/H</i>	76
Tableau 4.12 <i>la variation du tassement de surface $s(x)/D$ en fonction de x/H</i>	77
Tableau 4.13 <i>la variation du tassement de surface $s(x)/D$ en fonction de x/H</i>	77
Tableau 4.14 <i>la variation du tassement de surface $s(x)/D$ en fonction de x/H</i>	78
Tableau 4.15 <i>Tassements maximaux (s_{max}/D) pour les quatre variantes</i>	79
Tableau 4.16 <i>Tassement normalisé pour une hauteur de fouille de 4m</i>	80
Tableau 4.17 <i>Tassement normalisé pour une hauteur de fouille de 5m</i>	81
Tableau 4.18 <i>Tassement normalisé pour une hauteur de fouille de 6m</i>	81
Tableau 4.19 <i>Tassements maximums de chaque variante rideau/sol</i>	82
Tableau 4.20 <i>Tassement normalisé pour une hauteur de fouille de 4m</i>	83
Tableau 4.21 <i>Tassement normalisé pour une hauteur de fouille de 6m</i>	83
Tableau 4.22 <i>Tassement normalisé pour une hauteur de fouille de 8m</i>	84
Tableau 4.23 <i>Tassement normalisé pour une hauteur de fouille de 10m</i>	85
Tableau 4.24 <i>Tassements maximums des différentes variantes rideau/sol</i>	85
Tableau 4.25 <i>Tassement normalisé pour une hauteur de fouille de 4m</i>	87
Tableau 4.26 <i>Tassement normalisé pour une hauteur de fouille de 6m</i>	87
Tableau 4.27 <i>Tassement normalisé pour une hauteur de fouille de 8m</i>	88
Tableau 4.28 <i>Tassement normalisé pour une hauteur de fouille de 10m</i>	89
Tableau 4.29 <i>Tassements maximums des différentes variantes rideau/sol</i>	89

Tableau 5.1 <i>tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisée</i>	93
Tableau 5.2 <i>tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisée</i>	94
Tableau 5.3 <i>Tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisée</i>	95
Tableau 5.4 <i>Tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisée</i>	97
Tableau 5.5 <i>Tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisée</i>	98
Tableau 5.6 <i>tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisée</i>	99
Tableau 5.7 <i>Tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisée</i>	100
Tableau 5.8 <i>Tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisée</i>	101
Tableau 5.9 <i>Tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisée</i>	102
Tableau 5.10 <i>tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisée</i>	104
Tableau 5.11 <i>tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisée</i>	105
Tableau 5.12 <i>tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisé</i>	108
Tableau 5.13 <i>tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisé</i>	109
Tableau 5.14 <i>Tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisé</i>	110
Tableau 5.15 <i>Tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisé</i>	111
Tableau 5.16 <i>Tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisé</i>	112

Tableau 5.17 <i>tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisé</i>	113
Tableau 5.18 <i>Tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisé</i>	114
Tableau 5.19 <i>Tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisé</i>	115
Tableau 5.20 <i>Tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisé</i>	117
Tableau 5.21 <i>Tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisé</i>	118
Tableau 5.22 <i>Tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisé</i>	119
Tableau 5.23 <i>Tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisé</i>	120

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1	<i>Les rideaux de palplanches</i>	4
Figure 1-3	<i>exemples d'ouvrage de soutènement en palplanche</i>	5
Figure 1-2	Exemple de soutènement avec un rideau de palplanches	5
Figure 1-4	<i>profils de palplanches</i>	6
Figure 1-6	<i>Mise en œuvre des palplanches</i>	8
Figure 1-7	<i>tirants remblayés</i>	9
Figure 1-8	<i>Schéma d'un tirant attaché à un écran de soutènement</i>	9
Figure 1-9	<i>La disposition des liernes dans un rideau de palplanches</i>	10
Figure 1-10	<i>Schéma de réalisation d'une paroi moulée</i>	10
Figure 1-11	<i>Schéma de principe d'une paroi moulée en place, avec une nappe de tirants</i> ..	11
Figure 1-12	<i>principe général d'exécution</i>	12
Figure 1-13	<i>Principe de soutènement a la boue</i>	13
Figure 1-14	<i>la cage d'armature</i>	14
Figure 1-15	<i>Méthodologie de bétonnage</i>	15
Figure 1-16	<i>opérations successives de mise en place d'un joint waterstop (doc.Solétanche-Bachy)</i>	16
Figure 1-17	<i>Principe de construction d'une paroi préfabriqué</i>	16
Figure 1-18	Constitution et fonctionnement d'un tirant scellé	17
Figure 1-19	<i>Phases de réalisation d'une paroi cloué (D'après les Recommandations Clouterre 91)</i>	18
Figure 1-20	<i>Ouvrage neuf, paroi cloué En soutènement d'excavation</i>	19
Figure 1-21	<i>Détail de têtes de clou, cas des cornières battues</i>	20
Figure 1-22	<i>Détail d'une tête de clou, cas des barres en acier à haute adhérence pour béton armé</i>	21
Figure 1-23	<i>Schéma d'exécution d'une paroi « Berlinoise »</i>	22
Figure 1-25	<i>Paroi Berlinoise</i>	23
Figure 1-26	<i>Vue général d'une paroi Berlinoise a Saint-Ouen</i>	24
Figure 1-27	<i>Paroi micro Berlinoise</i>	24
Figure 1-28	<i>Paroi de Rennaise</i>	25
Figure 1-29	<i>Caractérisation des mouvements autour d'une excavation</i>	26
Figure 1-30	<i>(A) les mouvements verticaux et (B) les mouvements horizontaux</i>	27

Figure 1-31 Tassement derrière l'écran selon.....	28
Figure 1-32 Enveloppe de tassement selon Clough et al (1990).....	29
Figure 1-33 Profil de tassement de type A et de type B	29
Figure 1-34 Définition des surfaces Ac1, Ac2 et As à partir de la déflexion du soutènement (Heish et all (1998)).....	30
Figure 1-35 Relation entre Ac et As pour distinguer les deux types de profils de tassement (Heish et all (1998)).....	30
Figure 1-36 Déflexion maximale de l'écran Uhmax en fonction de la profondeur de l'excavation H pour différents types de sol et de systèmes de système de soutènement (Moorman 2004).....	32
Figure 1-37 Diagrammes d'estimation du déplacement maximal de l'ecran en fonction du coefficient de sécurité vis-à-vis du soutènement (Mana et all (1981)).....	33
Figure 1.38 Bilan des forces exercées sur un mur de soutènement par la méthode de Coulomb.....	34
Figure 1-39 Force de poussée exercée par un massif pulvérulent saturé sur un mur de soutènement.....	35
Figure 1-40 Lignes de glissement dans la zone de rupture en butée derrière un écran rugueux (sol pulvérulent)	36
Figure 1-41 Rideau de palplanche soumis a une distribution de pression normal.....	37
Figure 1-42 Rideau ancré en tête simplement butée en pied	38
Figure 1-43 hypothèse admises pour le calcul d'un rideau non ancré.....	39
Figure 1-44 Schématisation du comportement des parois simplement encastré dans le sol.....	40
Figure 1-45 Hypothèse de base du calcul au module de réaction et son contraire l'effet de voute.....	41
Figure 2-1Modèle de maillage tridimensionnel (3D)	43
0Figure 2-2la Présélection des paramètres du projet	45
Figure 2-3Les différents systèmes du support inclut sur ZSwalls	46
Figure 2-4Les conditions de drainage appliqué lors de la simulation numérique sur Zswalls.....	47
Figure 2-5exemple d'une barrière imperméable.....	48
Figure 2-6Exemple de maillage FE	49
Figure 2-7les fenêtres principales de Zswalls.....	49
Figure 2-8La fenêtre principale de ZSwall	50
Figure 3-1Système de coordonnées et définition des composantes de contrainte Positive. 53	

Figure 3-2	<i>Différents programmes de calcul en PLAXIS 2D.</i>	54
Figure 3-3	<i>Le programme d'entrée de données</i>	55
Figure 3-4	<i>Le programme de calcul (Calculations)</i>	57
Figure 3-5	<i>Le programme de résultats (Output)</i>	59
Figure 3-6	<i>Le programme des courbes (curves)</i>	60
Figure 3-7	<i>Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire</i>	61
Figure 3-8	<i>Fenêtre des Paramètres du modèle de Mohr Coulomb</i>	62
Figure 3-10	<i>Fenêtre des paramètres du HSM</i>	63
Figure 3-9	<i>Relation $\sigma - \epsilon$ pour un essai triaxial du modèle HSM</i>	63
Figure 3-11	<i>Fenêtre des paramètres du SSM</i>	64
Figure 4-1	<i>Fenêtre principale de ZSWalls</i>	66
Figure 4-2	<i>courbe de tassement en fonction de la distance x</i>	67
Figure 4-3	<i>la variation du tassement de surface $s(x)/D$ en fonction de x/H</i>	71
Figure 4-4	<i>la variation du tassement de surface $s(x)/D$ en fonction x/H</i>	75
Figure 4-5	<i>la variation du tassement de surface $s(x)/D$ en fonction de x/H</i>	79
Figure 4-6	<i>Tassement normalisé en fonction de la distance normalisée de chaque hauteur</i>	82
Figure 4-7	<i>Variation du tassement normalisé en fonction de la distance normalisée</i>	86
Figure 4-8	<i>Variation du tassement normalisé en fonction de la distance normalisé</i>	90
Figure 5-1	<i>Exemple d'un modèle du rideau de palplanche et de la fouille dans la fenêtre principale de ZSWalls</i>	92
Figure 5-2	<i>Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée</i>	94
Figure 5-3	<i>Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée</i>	95
Figure 5-4	<i>Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée</i>	96
Figure 5-5	<i>Compilation des courbes du tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée</i>	96
Figure 5-6	<i>Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée</i>	97
Figure 5-7	<i>Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée</i>	98
Figure 5-8	<i>Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée</i>	99
Figure 5-9	<i>Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée</i>	100
Figure 5-10	<i>Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée de toutes les hauteurs</i>	101
Figure 5-11	<i>Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée</i>	102

Figure 5-12	Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée	103
Figure 5-13	Tassement maximal normalisé en fonction de la surcharge normalisée	104
Figure 5-14	Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée	105
Figure 5-15	Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée de toutes les variantes étudiées.....	106
Figure 5-16	Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée	108
Figure 5-17	Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée	109
Figure 5-18	Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée	110
Figure 5-19	Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée	111
Figure 5-20	le tassement maximum normalisé($s_{maxD\%}$) en fonction de la surcharge($q\gamma d * H$)	112
Figure 5-21	Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée	113
Figure 5-22	Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée	114
Figure 5-23	Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée	115
Figure 5-24	Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée	116
Figure 5-25	le tassement maximum normalisé($s_{maxD\%}$) en fonction de la surcharge($q\gamma d * H$)	116
Figure 5-26	Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée	117
Figure 5-27	Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée	118
Figure 5-28	Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée	119
Figure 5-29	Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée	120
Figure 5-30	le tassement maximum normalisé($s_{maxD\%}$) en fonction de la surcharge($q\gamma d * H$)	121
Figure 6-1	schématisation d'un modèle d'éléments finis d'une fouille non soutenue	122
Figure 6-2	Interface du programme de calcul	124
Figure 6-3	La déformée de maillage d'éléments finis.....	124
Figure 6-4	Contours de déplacements horizontaux (U_x)	125
Figure 6-5	Contours de déplacement vertical (U_y).....	126
Figure 6-6	Interface de calcul pour $H = 10m$	127
Figure 6-7	Maillage déformé d'éléments finis	128
Figure 6-8	Déplacement horizontal U_x pour $H= 10 m$	128
Figure 6-9	Déplacement vertical U_y pour $H= 11m$	129
Figure 6-10	Le programme de calcul pour $H = 24m$	130

Figure 6-11 <i>maillage déformé</i>	131
Figure 6-12 <i>Déplacement horizontal U_x pour $H= 24 m$</i>	131
Figure 6-13 <i>Déplacement vertical U_y pour $H= 24m$</i>	132

LISTE DES PRINCIPALES NOTATIONS ET INDICES

γ_d : Le Poids volumique sec du sol.....[kN/m³]

γ_{sat} : le Poids volumique "saturé" du sol.....[kN/m³]

E : Module d'élasticité du sol « module d'Young ».....[kN/m²]

D : La fiche.....[m]

H : La hauteur de la fouille.....[m]

H_c : La hauteur critique de la fouille.....[m]

ν : Le Coefficient de Poisson..... [-----]

C : La cohésion du sol.....[kN/m²]

C_u : La cohésion non drainé du sol.....[kN/m²]

φ : L'angle de frottement.....[°]

ψ : L'angle de dilatance.....[°]

σ : Contrainte normale..... [kN/m²]

τ : Contrainte de cisaillement.....[kN/m²]

F_a : Force de poussée.....[KN]

F_p : Force de butée.....[KN]

K_a : le coefficient de poussée.....[-----]

K_p : Le coefficient de butée..... [-----]

W : Le Poids des terres.....[kN]

δ : Angle de frottement sol – écran.....[°]

α : Inclinaison du mur avec l'horizontale.....[°]

Z₀ : La hauteur de butée.....[m]

q : La surcharge exercée par le radier.....[kPa]

U_x: Déplacement horizontal.....[mm]

U_y: Déplacement vertical.....[mm]

S₀ : Le tassement en contact du mur.....[mm]

S_{max} : Le tassement maximum.....[mm]

- **Abréviations :**

MEF : Méthode des éléments finis

HSM: Hardening Soil Model.

SSM: Soft Soil Model.

INTRODUCTION GENERALE

Le comportement des ouvrages en génie civil dépend en grande partie de celui de l'interaction sol/structure. En effet, dans la littérature en géotechnique une partie importante est consacrée au développement et amélioration des techniques d'analyse du phénomène d'interaction sol/structure. Les ouvrages enterrés et notamment les écrans de soutènement sont soumis à des interactions fortes avec le sol. Les sollicitations varient très sensiblement selon les déformations des ouvrages.

Le développement, au début du 20^{ème} siècle, des écrans de soutènements, ouvrages souples prenant appuis dans le terrain, a élargi considérablement la question de l'interaction sol structure. L'ingénieur dispose d'un grand nombre d'outils pour l'analyse et la conception d'ouvrages divers. Combinés aux progrès informatiques, qui rendent des micro-ordinateurs performants de plus en plus accessibles.

L'utilisation des logiciels de calcul par éléments finis dans le calcul des structures et des ouvrages en génie civil a permis de traiter le problème d'interaction sol structure sous différents aspects. Dans la méthode aux éléments finis, le comportement d'un sol est représenté par un modèle constitutif. Cependant, il faut garder à l'esprit, comme toute méthode numérique, que les résultats doivent être interprétés avec précautions. Une expertise géotechnique reste essentielle pour correctement sélectionner les paramètres de sol d'un modèle.

Ce travail de fin d'études comporte un travail de recherche appliquée dont l'objectif est de dégager des recommandations pratiques destinées aux ingénieurs en phase de conception d'un système de soutènement d'une fouille. En fait, au cours de la phase de conception, plusieurs variantes de soutènement sont possibles et l'ingénieur se pose des questions fondamentales dont il attend de la littérature géotechnique des réponses pratiques, sans qu'il fasse recours à un calcul détaillé, par éléments finis ou par une méthode analytique en vue de trouver des réponses, ces outils seront en fait utilisés en phase suivante qui est celle du dimensionnement du système de soutènement retenu, et le temps et l'effort requis pour les utiliser sont importants ce qui n'encourage pas l'ingénieur à les utiliser en cette préliminaire du projet. Au cours de cette phase de conception en vue du choix du système adéquat de soutènement, on se pose souvent des questions pratiques, par exemple sur l'amplitude du tassement en surface du sol en amont d'une fouille soutenue par un rideau

auto-stable, c'est-à-dire ne comportant pas de tirants d'ancrages ? ou le tassement additif subi par un ouvrage existant suite à la réalisation d'une fouille soutenue ? ou enfin à la hauteur maximale de creusement d'une fouille verticale non soutenue, creusée dans un massif d'argile, sans craindre un effondrement de la fouille au cours du chantier ou à long terme ? Ce mémoire a l'ambition de contribuer à répondre à quelques-unes de ces questions à travers des recommandations destinées aux ingénieurs.

Le travail de ce mémoire consiste à lancer une étude paramétrique basée sur la modélisation numérique et l'analyse du comportement d'un écran de soutènement auto-stable sous sollicitation statique dans un sol sableux ou argileux, par la méthode aux éléments finis en utilisant les logiciels ZSwalls et PLAXIS 2D, dans laquelle on a étudié l'effet de l'interaction sol/soutènement sur la stabilité de l'écran, et éventuellement celle de l'ouvrage à l'amont du soutènement.

Notre étude comporte six (6) chapitres ; y compris une introduction générale, un résumé et une conclusion.

Le premier chapitre est consacré à donner une généralité sur les écrans de soutènements tel que les types, l'utilisation, la mise en œuvre de ces écrans, et le comportement de l'excavation. Il est suivi par le deuxième chapitre qui est une brève présentation du logiciel utilisé ZSwalls basé sur la méthode des éléments finis, ainsi que le troisième chapitre consacré à une présentation du logiciel de calcul par éléments finis Plaxis(2D).

Au quatrième chapitre, nous présentons une étude de tassement en surface d'une fouille soutenue par un écran, dans un sol sableux ou argileux, et ce pour des différentes compacités et des différentes hauteurs de la fouille, le calcul se fait sur la base d'une modélisation par le logiciel ZSwalls.

Au cinquième chapitre, on va entamer une étude de l'interaction écran/ouvrage à l'amont et cela à l'aide du logiciel ZSwalls, en supposant que l'ouvrage transmet à l'amont de l'écran une surcharge uniforme. Enfin, le sixième chapitre comporte une étude de la hauteur critique H_c d'une fouille non soutenue, en utilisant le progiciel PLAXIS (2D),

Enfin, le mémoire finit par une conclusion générale comportant des recommandations pratiques et des perspectives de recherche.

Chapitre1. GENERALITE SUR LES ECRANS DE SOUTÈNEMENT

1.1 Définition :

Les ouvrages de soutènement sont des constructions destinées à prévenir l'éboulement ou le glissement d'un talus raide. Ils sont essentiellement employés :

- Soit en site montagneux pour protéger les chaussées routières contre le risque d'éboulement ou d'avalanches.
- Soit, en site urbain pour réduire l'emprise d'un talus naturel, en vue de la construction d'une route, d'un bâtiment ou d'un ouvrage d'art.

Le rôle des ouvrages de soutènement est de retenir les massifs de terre. Il en existe une grande variété se caractérisant par des fonctionnements différents et conduisant à des études de stabilité interne spécifiques. Les deux grandes familles d'ouvrages de soutènement sont les murs et les écrans.

1.2 Les différents types d'écrans de soutènement :

1.2.1 Les rideaux de palplanches métalliques:

Les palplanches métalliques sont des profilés rectilignes, obtenus par laminage à chaud ou profilage à froid, elles permettent de constituer un mur de soutènement, un batardeau, une palée ou un écran imperméable, et mis en œuvre verticalement dans le sol, en fonction du terrain et de l'environnement par battage, vibrage, ou à l'aide de vérin, (figure1-1).



Figure 1-1 Les rideaux de palplanches

Les vibrations causées par le battage et le fonçage rendent leur utilisation en site urbain très limitée, sauf en cas de retour à des procédures spéciales de fonçage statique.

1.2.1.1 Principe de fonctionnement et domaine d'emploi :

- **Principe de fonctionnement :**

Conçues pour s'enclencher les uns avec les autres, elles permettant de réaliser des rideaux continus relativement étanche, rectiligne, courbes, présentant des angles et pouvant former des enceintes fermées, ils peuvent être simplement encastrés lorsqu'ils sont de faible hauteur, dans le cas des hauteurs moyennes à fortes l'ouvrage peut être ancrés avec des tirants d'ancrage ou boutonnés avec des butons, (figure 1.2)

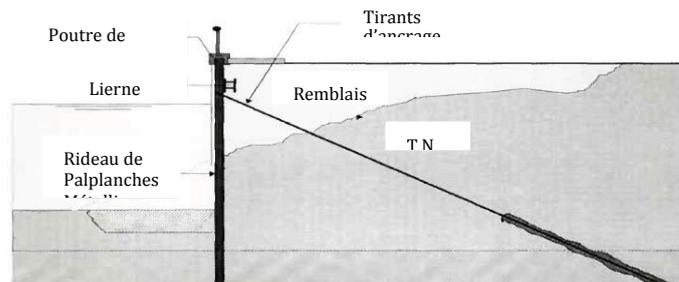
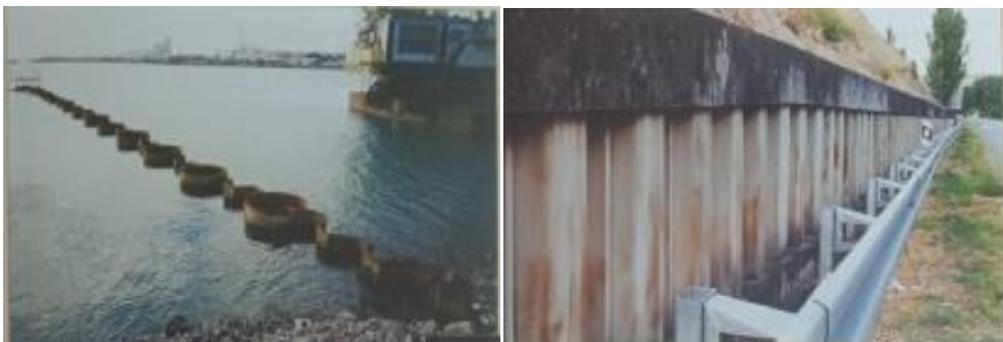


Figure 1-2 Exemple de soutènement avec un rideau de palplanches

- **Domaine d'emploi :**

Ils sont particulièrement bien adaptés pour: (figure1-3)

- la réalisation d'ouvrages de soutènement et d'étanchement en présence d'eau (site aquatique)
- Ouvrages de déblai ou en remblai
- Limitation : pénétration dans le sol
- Hauteur moyenne



a. Rideau combiné de palplanche et de tube en site maritime b. soutènement d'un talus de déblai

Figure 1-3exemples d'ouvrage de soutènement en palplanche

1.2.1.2 Description de l'ouvrage :

1.2.1.2.1 Les profilés :

A. Les différents types :

Les écrans peuvent être constitués de palplanches laminées à chaud ou profilées à froid, (en U, Z, en caisson). on peut utiliser des rideaux combinés (c'est une combinaison entre les profilés types H et la palplanche) .ainsi, on peut réaliser des ouvrages de types gabion circulaires ou rectangulaires en palplanches. (Figure 1.4)



a. Palplanches laminée à chaud. (En U, en caisson)



b. Palplanches laminées à froid. (En z) c. gabion en palplanche

Figure 1-4 *profils de palplanches*

B. Caractéristique géométrique :

Les dimensions de sections de palplanches varient entre 0.40 à 0.60 m pour la largeur (0.75 m pour les plus récentes), la hauteur entre 0.10 et 0.50 m et de 5 à 20 mm pour l'épaisseur.

C. Les serrures :

Les serrures ont initialement été réalisées en rapportant des éléments secondaires aux profilés principaux, la liaison étant obtenue par rivetage.



Figure 1-5Serrure à la jonction de deux palplanches.

D. Mise en œuvre :

La mise en œuvre des palplanches verticalement dans le sol se fait généralement par battage, vibrage ou par presse hydraulique. (Figure 1.6).

Battage (fréquence d'environ 40 à 60 coups/mn) cette technique s'applique bien pour les sols meubles (vases, tourbes...) ou pour lâche (sables grossiers, graviers...) sans inclusion rocheuses. La nuisances sonores ainsi que les vibrations que génèrent cette technique, la rendent souvent peu utilisable en site urbain.

Le fonçage par vibrage, ou le vibrofonçage (fréquences d'environ 1500 à 3000Hz), Les vibrations générées par le vibreur puis transmises au sol par l'intermédiaire du profilé permettent l'enfoncement de celui-ci si l'énergie est suffisante pour vaincre la résistance du sol. Le profilé s'enfonce alors sous son propre poids et celui du vibreur avec des vitesses de pénétration pouvant aller jusqu'à plusieurs mètres par minute.

Cette technique s'applique bien aux sols graveleux issus de l'érosion.

Le trépidage constitue une technique intermédiaire en utilisant une fréquence de vibration de 150 à 300 Hz

Le vérinage ou fonçage direct cette technique consiste à mettre en place les palplanches à l'aide d'un vérin (ou presse à la palplanche) qui se déplace sur la tête des palplanches et applique une force peut atteindre 3MN. Cette technique est bien plus respectueuse de l'environnement que les autres.



Battage

Perforage avant fonçage

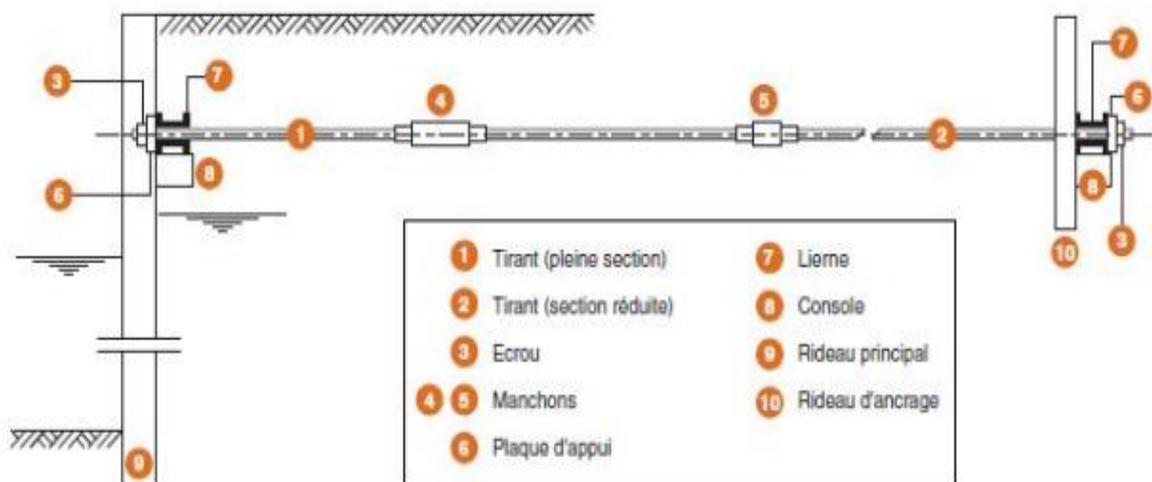
Fonçage par vibration

Figure 1-6 Mise en œuvre des palplanches

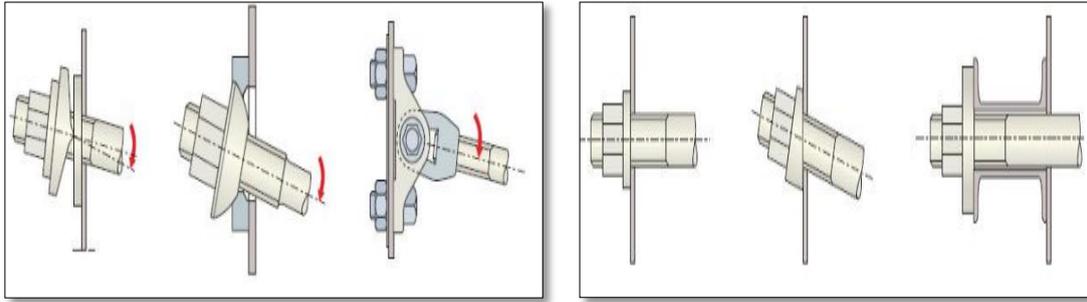
1.2.1.2.2 Les appuis

Les appuis de l'écran sont constitués par le sol en fiche et par des tirants ou butons disposés dans la partie libre de l'écran.

- A. **La fiche** : L'appui de la fiche provient de la capacité du sol à se mobiliser contre les déplacements de l'écran,
- B. **Les tirants** : les tirants sont des éléments métallique noyé dans les terres soutenues par un ouvrage de soutènement (Figure 1.7) ils sont dits actifs ou précontraints lorsque leur armature est constituée d'acier pour précontrainte et qui ils sont bloqué après mise en tension (Figure 1.8), ou passifs lorsque il n'y a pas de mise en tension avant blocage.



a. schéma général d'ancrage d'un rideau de palplanches (d'après technipot)



Attaches articulées

Attaches ordinaires

b .différents types de tête d'ancrage (d'après Unimétal)

Figure 1-7 tirants remblayés

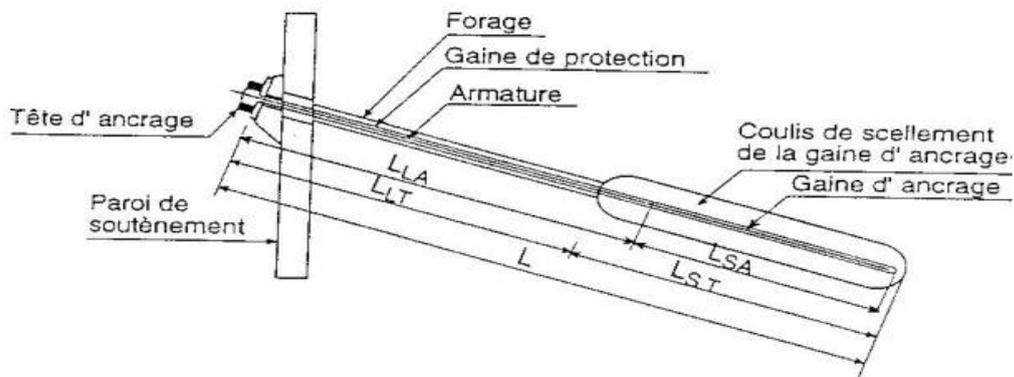


Figure 1-8 Schéma d'un tirant attaché à un écran de soutènement.

C. Les butons : Ils sont constitués en béton armé ou de profilés métalliques prenant appui sur deux structures construites en vis à vis, comme cela peut être le cas pour les soutènements de tranchées ouvertes ou couvertes.

1.2.1.2.3 Les éléments de rigidification :

A. Lierne :

Poutre métallique de liaison entre les palplanches d'un rideau (Figure 1.9) . Elle permet de répartir au mieux des efforts et déformations entre les palplanches.

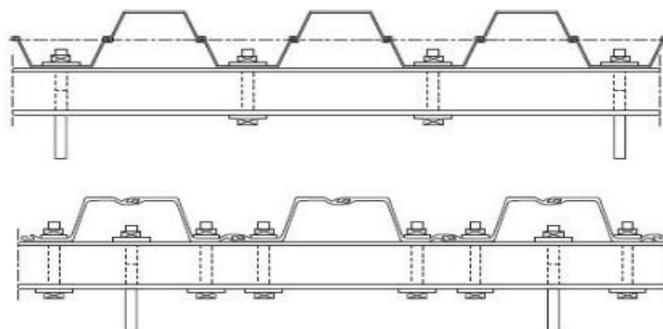


Figure 1-9 La disposition des liernes dans un rideau de palplanches

B. Poutre de couronnement : poutre en béton armé venant coiffer la partie supérieure des palplanches.

1.2.1.2.4 La protection contre la corrosion :

La durée de protection est principalement en fonction de l'épaisseur de la couche de galvanisation. Les trois facteurs les plus déterminants, de cette épaisseur, sont :

- L'épaisseur de paroi de l'acier.
- composition de l'acier
- Rugosité de l'acier

1.2.2 Les parois moulées et préfabriquées :

Une paroi moulée dans le sol est constituée d'une juxtaposition, le plus souvent dans le même plan, de panneaux verticaux en béton armé. Chacun des panneaux est réalisé par exécution préalable d'une tranchée dans le sol, mise en place d'une cage d'armatures dans celle-ci puis bétonnage, à l'aide d'un tube plongeur, (Figure 1.10).

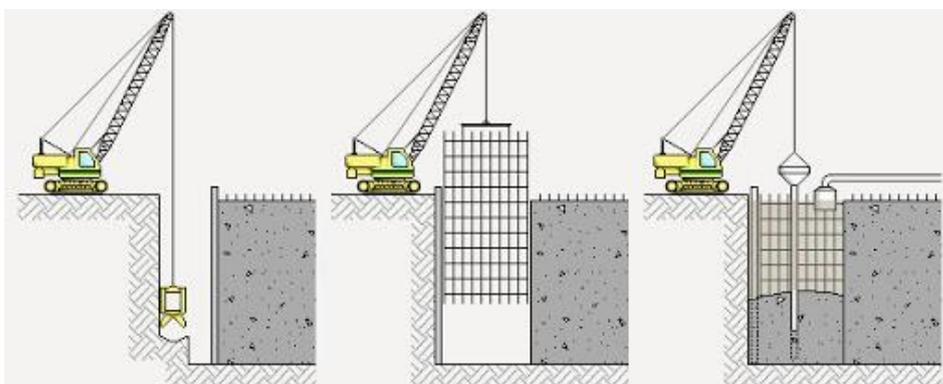


Figure 1-10 Schéma de réalisation d'une paroi moulée.

1.2.2.1 Principe de fonctionnement et domaine d'emploi :

- **Principe de fonctionnement**

Le fonctionnement des parois est celui d'une structure chargée par la poussée des terres et de l'eau soutenue et résistant en flexion pour mobiliser des appuis constitués, d'une part, par le sol en fiche et, d'autre part, par des tirants ou butons disposés dans la partie libre de l'écran (Figure 1.11).

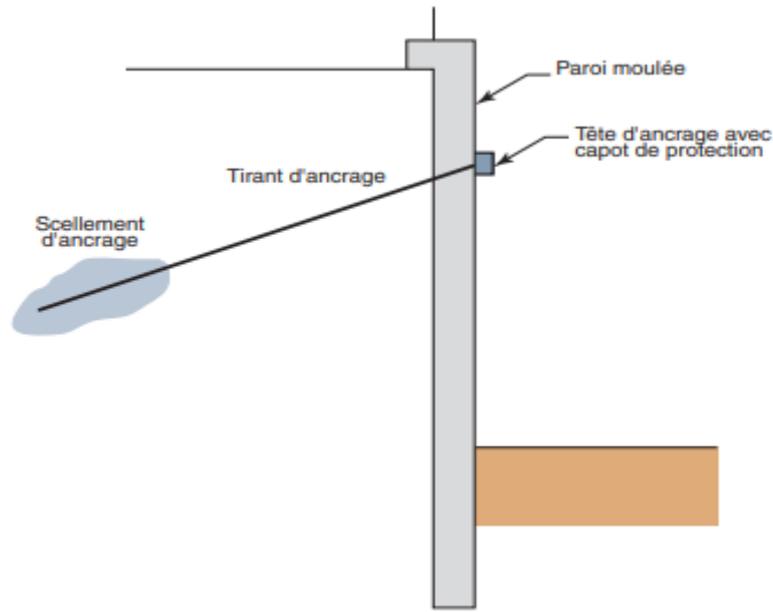


Figure 1-11 Schéma de principe d'une paroi moulée en place, avec une nappe de tirants.

L'écran est inséré d'une façon significative dans le terrain : de façon typique, la fiche pour une paroi ancrée, varie de 30 à 50% de la hauteur de fouille. En permettant la mobilisation d'un appui au sein du terrain, cette fiche joue un rôle déterminant dans l'équilibre de l'ouvrage. La nature de cet appui est variable suivant les propriétés du terrain, la longueur en fiche de l'écran et sa rigidité et la distribution des autres appuis, tirants ou butons, en partie aérienne. Elle peut se réduire à un appui simple, pour des écrans très rigides, ancrés en partie supérieure et dont la fiche est courte, tandis que, pour des écrans ne possédant pas d'appuis en partie supérieure, l'encastrement en fiche devra être total. Dans le cas général, l'écran se trouve partiellement encastré dans le terrain.

Les appuis en partie supérieure de l'écran sont présents dès que la hauteur libre dépasse environ 5m, de façon à limiter les déplacements en tête de l'ouvrage et à assurer sa stabilité. Il s'agit alors de tirants permettant de renvoyer les efforts d'appui suffisamment loin en arrière de l'écran, au sein d'une partie stable du massif de sol. Il peut également s'agir de butons, dans le cas où l'effort d'appui peut être renvoyé à une autre structure faisant face à l'écran (cas des tranchées couvertes, par exemples).

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

- **Domaine d'emploi :**

- Réalisation de fouilles en déblai.
- Enceinte étanche en présence d'une grande nappe phréatique.
- Fondation profonde pour ouvrages.
- Ecrans étanche sans besoin de soutènement.

1.2.2.2 Description de l'ouvrage :

A. Exécution :

L'exécution d'une paroi moulée se décompose en quelques grandes étapes : (Figure 1.12)

- Implantation et réalisation d'une murette guides
- Forage.
- Ferrailage
- Arrachage et tubes joints.
- Réalisation des panneaux adjacents.
- Excavation des terres de l'enceinte.

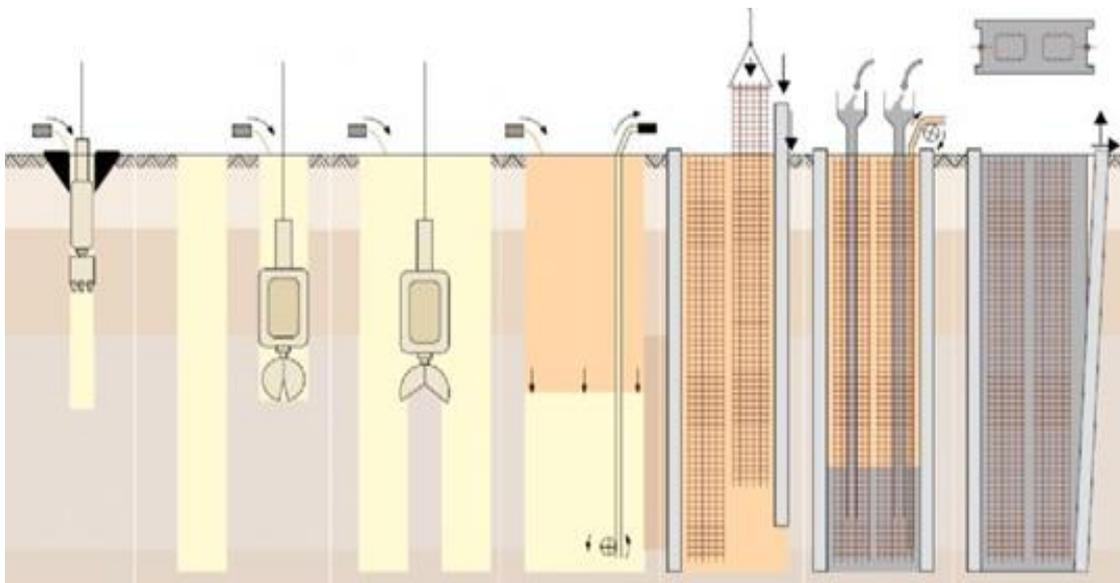


Figure 1-12 principe général d'exécution

B. Soutènement a la boue :

La boue est une argile colloïde tyxotrope qui comprend principalement de la montmorillonite ou des minéraux similaires. Le principe est de soutenir une excavation à l'aide d'une boue bentonitique ayant les propriétés suivantes :

- Elle forme un gel au repos
- Elle forme un liquide lorsqu'elle est mise en mouvement.
- Elle forme un cake (une pellicule d'argile) étanche au contact avec le sol, ce qui augmente aussi légèrement sa cohésion.

Avant l'utilisation de la boue de forage il est nécessaire de contrôler La densité, La viscosité, l'épaisseur du cake et La teneur en sable. Les normes indiquent les valeurs suivantes :

Tableau 1-1 qualité de la boue

Paramètre	Cas d'utilisation		
	Boue neuve	Boue prête à réutiliser	Boue avant bétonnage
Masse volumique (g/ml)	< 1.10	< 1.25	< 1.15
Viscosité Marsh (s)	De 32 à 50	De 30 à 60	De 32 à 50
Filtrat (ml)	< 30	< 50	Sans objet
PH	7 à 11	7 à 12	<4
Teneur en sable (%)	Sans objet	Sans objet	< 4
Cake (mm)	< 3	< 6	Sans objet

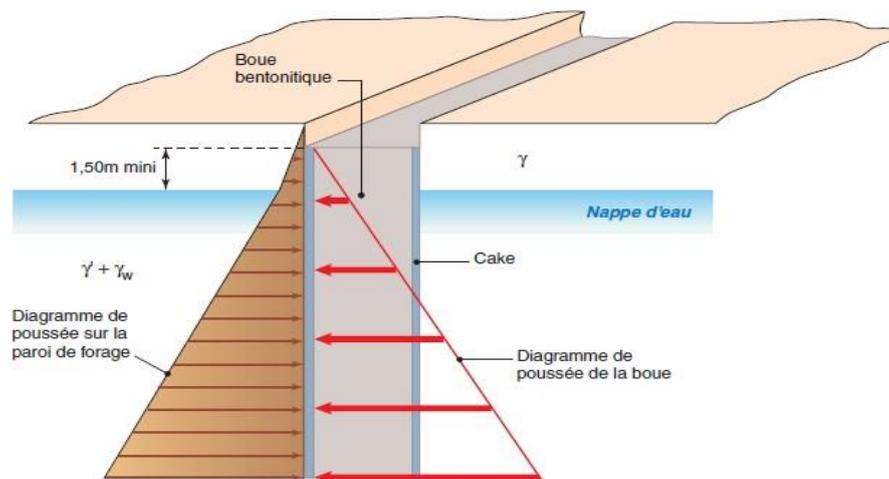


Figure 1-13 Principe de soutènement à la boue

C. Perforation : Outre la fonction de la boue comme soutènement des parois de l'excavation, les problèmes liés à l'exécution de la fouille concernant sa verticalité et la traversé des horizons durs.

Le maintien de la verticalité est obtenu en réalisent des murettes guides en béton armé guidant l'engin de perforation pendant sa descente

1.2.2.3 Les cages d'armatures : La cage d'armature comprend :

- Des Aciers longitudinaux (verticaux).
- Des aciers transversaux (cadres épingles, étriers...)
- Des barres de suspension pour la manutention du maintien du panneau lors de coulage).
- Des armatures d'attente et de renfort lors de tirants ou butons.
- Des tubes pour essais.

Elle doit être suffisamment rigide pour permettre la manutention, et l'espace entre les cages d'armature ne doit pas dépasser 20 c m.(Figure1.14).

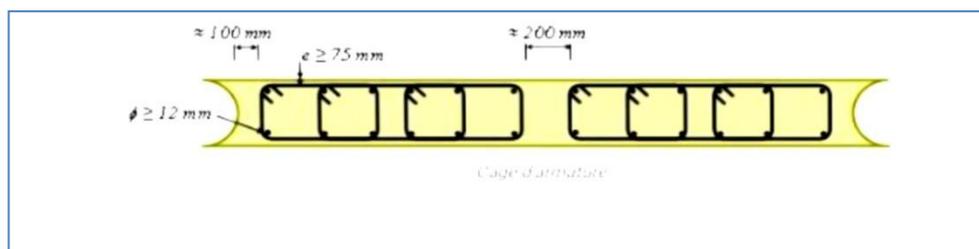


Figure 1-14 la cage d'armature

1.2.2.4 Le béton et le bétonnage :

Le bétonnage se réalise à la colonne, on remplit la tranchée par le fond (sous la bentonite qui se liquéfie et remonte à une vitesse minimale de 3m/h. On laissera une garde de 3 à 5 m pour remonter le béton pollue .pour connaître précisément la hauteur de béton on plombe régulièrement dans le forage .La colonne doit avoir une largeur intérieure supérieure ou égale à 5m .Pendant le bétonnage, on pompe la bentonite que l'on recycle et stock dans les silos de la centrale à boue (Figure1.15)

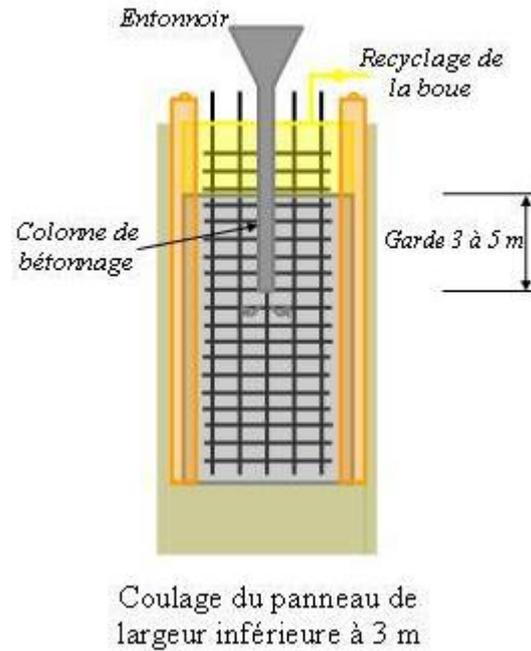


Figure 1-15 Méthodologie de bétonnage

1.2.2.5 Les joints entre panneaux :

Les parois moulées doivent régulièrement remplir une fonction de barrière d'étanchéité à l'eau. Il importe dès lors d'éviter au maximum que l'eau (souterraine) ne pénètre dans la fouille à travers la paroi. C'est la raison pour laquelle des éléments de coffrage métalliques sont installés avant le bétonnage de chaque panneau des deux côtés de la tranchée excavée on les appelle les profilés de jointoiment. (Figure 1.16)



a .Montage des lames water stop dans le coffrage joint b .détail du coffrage avant bétonnage c .empreinte du joint waterstop en place dans le panneau précédent

Figure 1-16 opérations successives de mise en place d'un joint waterstop (doc.Solétanche-Bachy)

1.2.2.6 Les parois préfabriquées :

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

La paroi préfabriquée est un perfectionnement de la paroi moulée : le béton n'est plus coulé au tube plongeur sous une boue de bentonite, mais introduit dans celle-ci sous forme de panneaux de béton armé entiers, fabriqués à l'avance en atelier (figure1.17).

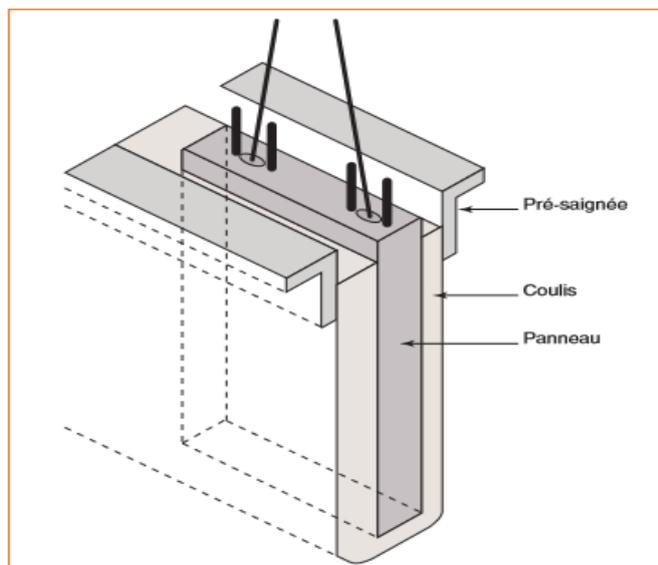


Figure 1-17 Principe de construction d'une paroi préfabriquée

1.2.2.7 Les ancrages :

Les ancrages peuvent constituer un facteur principal dans la stabilité de l'ouvrage, il présente presque toujours trois parties : (Figure1.18)

- l'ancrage proprement dit qui transmet au sol résistant les efforts à reprendre.
- un dispositif de liaison entre cet ancrage proprement dit et l'ouvrage, fréquemment appelé "longueur libre" de l'ancrage.
- La tête d'ancrage, permettant la mise en tension et l'attache du tirant

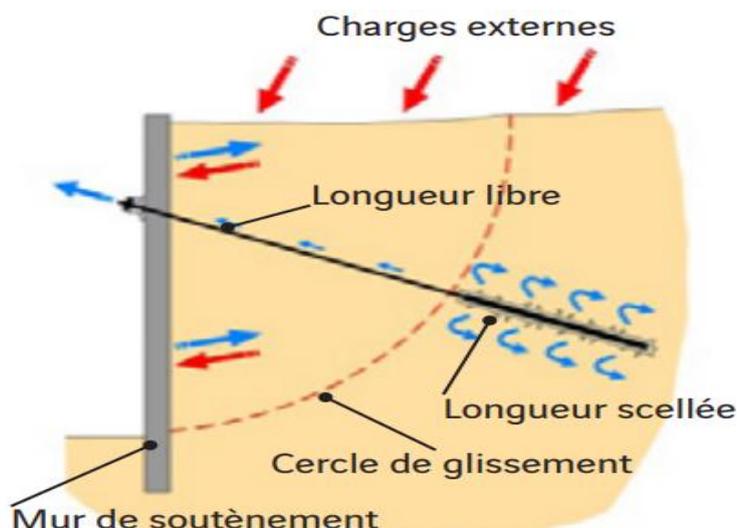


Figure 1-18 Constitution et fonctionnement d'un tirant scellé

Selon l'état de contrainte initial, on distingue les ancrages suivants :

Les ancrages passifs qui sont mis en tension par l'ouvrage lui-même au fur et à mesure que les charges leurs sont appliquées.

Les ancrages actifs ou précontraints qui sont mis en tension de manière contrôlée à l'aide d'un dispositif adapté, et qui prennent réaction sur l'ouvrage lui-même.

1.2.3 Les parois clouées :

La méthode « paroi clouée » a pour fonction la stabilisation des terres

1.2.3.1 Principe de fonctionnement et domaine d'emploi :

- principe de fonctionnement :

Les phases de réalisation sont :

- Un terrassement de hauteur limitée, sur une longueur limitée
- La mise en place des clous
- L'installation du système de drainage
- La réalisation parement

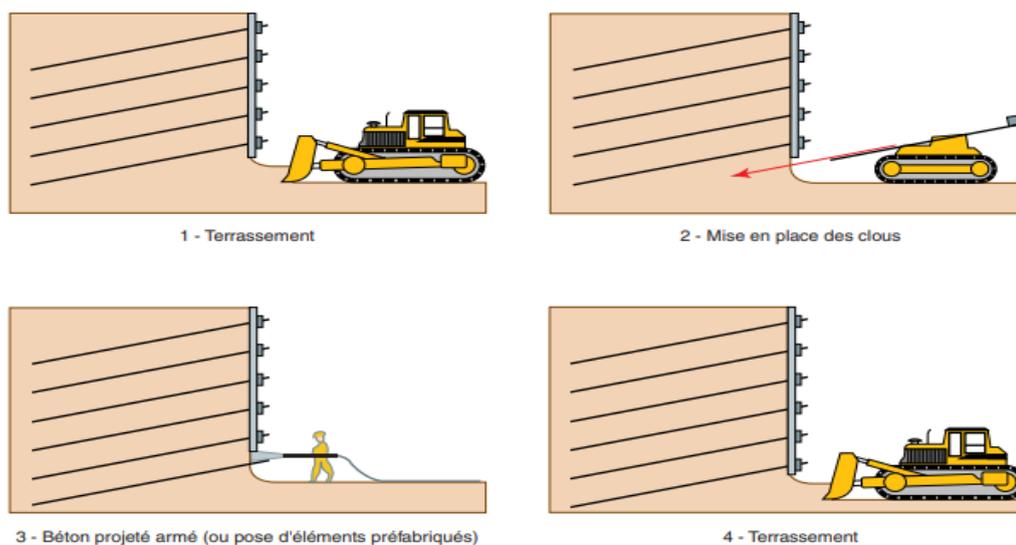


Figure 1-19 Phases de réalisation d'une paroi clouée (D'après les Recommandations Clouterre 91).

La mise en œuvre nécessite la connaissance de l'écoulement de l'eau souterrain et les caractéristiques de sol comme la cohésion afin de limiter l'exposition au danger et aussi pour assurer la stabilité du talus lors de l'excavation

- **Domaine d'emploi :**

Cette technique peut être appliquée dans les domaines suivants :

- Ouvrage exclusivement en déblai et hors d'eau
- Ouvrages neufs pour la réalisation de soutènement d'excavation (Exemple : tranchée routier) (Figure 1.20)
- Travaux d'élargissement des voies (Exemple : raidissement de talus)
- Confortation d'ouvrages : renforcement des maçonneries ou des murs en terre armé, blindage.
- Inutilisables dans les sols sans cohésion à court terme

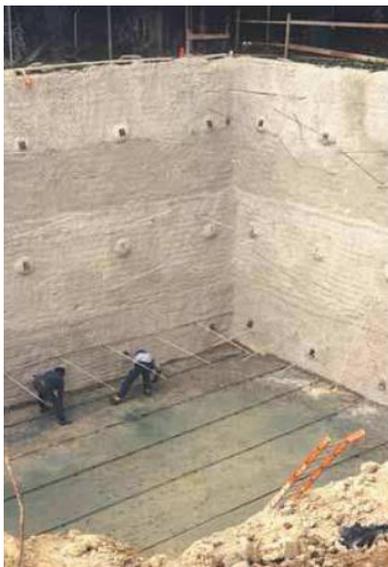


Figure 1-20 *Ouvrage neuf, paroi cloué En soutènement d'excavation*

Pour la réalisation des parois moulé il faut vérifier que :

- la structure existante va pouvoir supporter sans dommage une déformation horizontale du sol ainsi qu'une déformation vertical avec un tassement différentiel
- La présence de la nappe en dessus du mur cloué dans un sol à faible cohésion pour mettre l'ouvrage à l'abri des arrivées d'eau.
- Des précautions doivent être prise dans les sols argileux de caractéristique médiocres afin d'éviter l'infiltration d'eau qui entraîne une forte diminution du frottement latéral sol/clous

1.2.3.2 Description de l'ouvrage :

1.2.3.2.1 Structure :

A. Caractéristiques géométrique :

En général les clous sont disposé en lits incliné par rapport à l'horizontal de 5 et 20 degré et cela pour des raisons d'exécution, tandis que la longueur est d'environ :

- 0.5 à 0.7H pour des clous foncés
- 0.8 à 1.2H pour des clous réalisés par forage

H : hauteur total de l'ouvrage

Caractéristique des clous :

- **Clous battu** : battage, fonçage, vibrofonçage, lançage, procédés utilisé seuls ou associé
- **Clous scellé par un coulis de ciment** : clous scellé dans des forages préalable clous « autoforeur » avec l'injection l'armature et l'outil de forage.

1.2.3.3 Caractéristique du parement :

- Parement réalisé en béton projeté en une seule épaisseur, par passe descendante
- Parement réalisé en béton projeté en plusieurs couches par passe descendante
- Parement réalisé en deux phases

1.2.3.4 Dispositif de liaison entre la tête du clou et le parement :

1.2.3.4.1 Les systèmes les plus fréquenté :

- Cornière ou profilés métalliques battus (Figure 1.21)
- Barres à haute adhérence pour béton armé (Figure 1.22)
- Armature tubulaires



Figure 1-21 *Détail de têtes de clou, cas des cornières battues*



Figure 1-22 *Détail d'une tête de clou, cas des barres en acier à haute adhérence pour béton armé*

1.2.3.4.2 La nappe :

La réalisation des parois clouées dans des terrains qui contiennent des nappes est impossible

1.2.4 Parois composite :

Un mur composite est un mur composé de plusieurs matériaux principaux solidarisés de façon continue par du béton ou par du mortier.

1.2.4.1 Principe de fonctionnement et domaine d'emploi :

- **Principe de fonctionnement**
 - Des éléments verticaux espacés généralement scellés dans des forages sous le niveau général de tassement
 - Au fur et à mesure de l'excavation des panneaux sont réalisés entre ses éléments verticaux

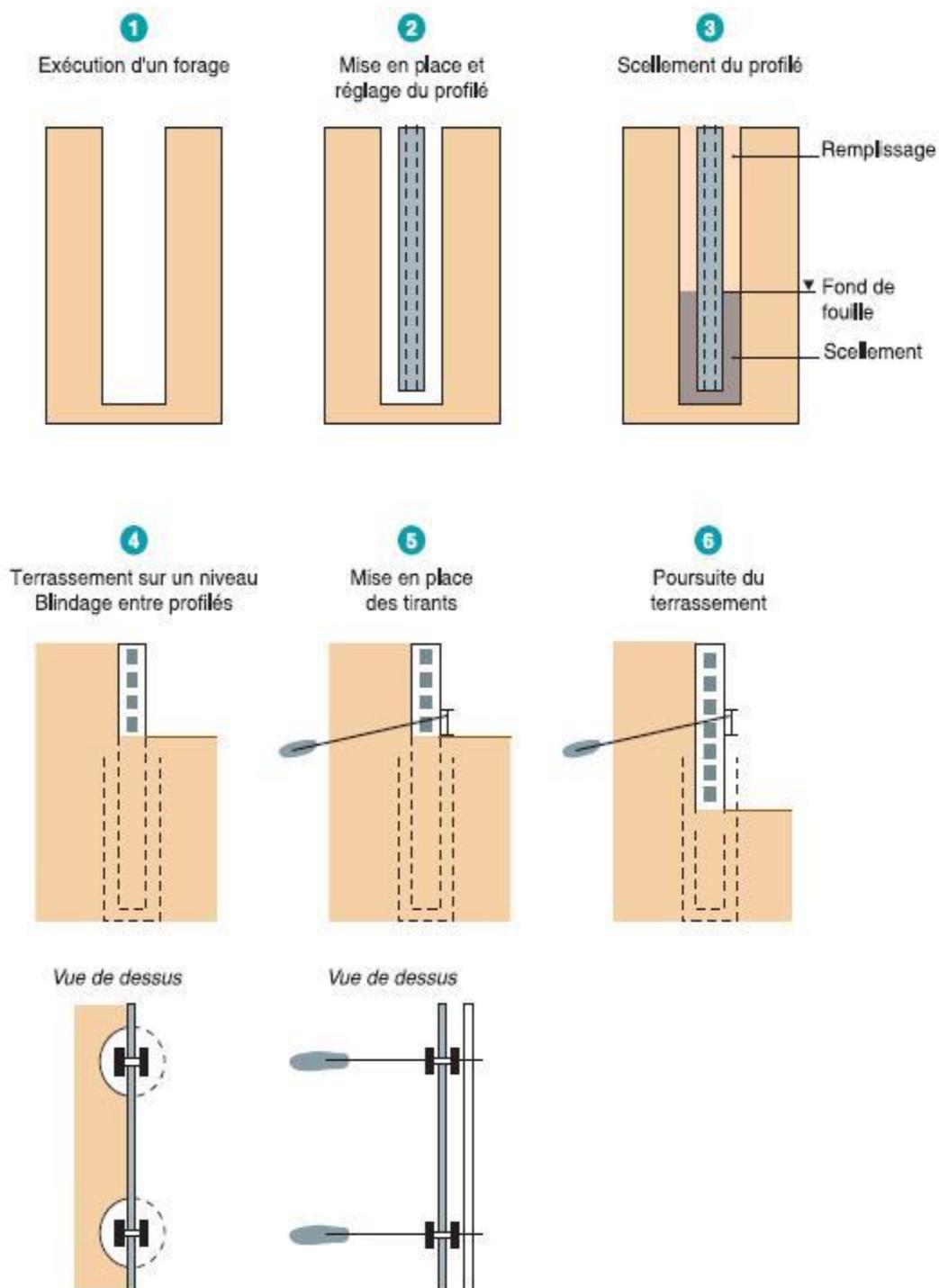


Figure 1-23 Schéma d'exécution d'une paroi « Berlinoise »

1.2.5 Les différents types de parois composites:

1.2.5.1 Structure :

1.2.5.1.1 Paroi Berlinoise :

C'est un type de soutènement qui peut être provisoire ou définitive, les éléments qui le constituent offrent une résistance verticale.

La réalisation de ces éléments se fait :

- Des profilés métalliques (Figure 1.25), implantés de manière régulière tout autour de l'empreinte de la fouille, sont vibrofoncés dans le sol ou scellés dans un fût de béton réalisé au préalable
- Des panneaux de bois ou de béton préfabriqués sont insérés en force entre les profilés au fur et à mesure du terrassement de la fouille.



Figure 1-25 Parois berlinoise

Les parois Berlinoise sont utilisées en soutènement de déblai sous condition :

- Absence de la nappe phréatique (sauf rabattement préalable)
- Cohésion à court terme

Ces conditions sont identiques à celle du clouage, dont leur domaine d'emploi est assez proche.

La figure (1.26) montre ce qui n'est pas toujours le cas, un exemple de paroi Berlinoise dont la structure reste visible après travaux.

Les conditions sont identiques à celle du clouage, dont leur domaine d'emploi est assez proche.



Figure 1-26 *Vue générale d'une paroi Berlinoise à Saint-Ouen*

1.2.5.1.2 Parois micro berlinoise :

Elles sont constituées par des micros pieux, son forage a une hauteur de 1m et sont réalisées avec un atelier léger permettant une foration en un diamètre max de 250mm. (Figure 1.27)



Figure 1-27 *Paroi micro berlinoise*

1.2.5.1.3 Paroi Parisienne :

La paroi parisienne est formée d'éléments offrant une résistance verticale. La réalisation de ses parois se fait :

- Implanter les poteaux dans un forage remplis d'un coulis bentonite-ciment
- Le terrassement se fait par étapes de un à plusieurs mètres selon le type de terrain
- On réalise le blindage, qui peut être constitué de bois, de béton projeté, ou de béton coulé sur place.

Une stabilisation de la paroi peut être demandée au-delà de 3 mètres de profondeur,

1.2.5.1.4 Paroi lutétienne :

Est une évolution de la paroi Parisienne, les éléments verticaux constitués sont des pieux qui sont exécutés en place dans des forages.

1.2.5.1.5 Paroi Rennaise :

La paroi rennaise (Figure 1.28) est une variante de la paroi lutécienne composée uniquement de pieux, pour des terrains de forte cohésion.



Figure 1-28 *Parois de Rennaise*

1.2.5.1.6 La nappe :

Les parois composites se construisent en absence de la nappe, si ce dernier est présente elle sera à considérer suivant des modalités voisines de celles prise pour les ouvrages en palplanches ou en paroi moulé.

1.3 Comportement de l'excavation :

1.3.1 Introduction :

Les excavations profondes sont souvent attribuées à des fouilles de plus de 10 m de profondeur. Il est souvent nécessaire de considérer les effets du processus de la construction sur la stabilité de l'ensemble écran/ fouille / ouvrage.

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

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

Lors d'une excavation les contraintes totales diminuent, et la mise en place du soutènement provoque (Figure 1.29) :

- Mouvement du sol vers la fouille (déplacement latéral)
- Tassement en surface derrière l'écran
- Une déformation du soutènement
- Un soulèvement du fond de la fouille

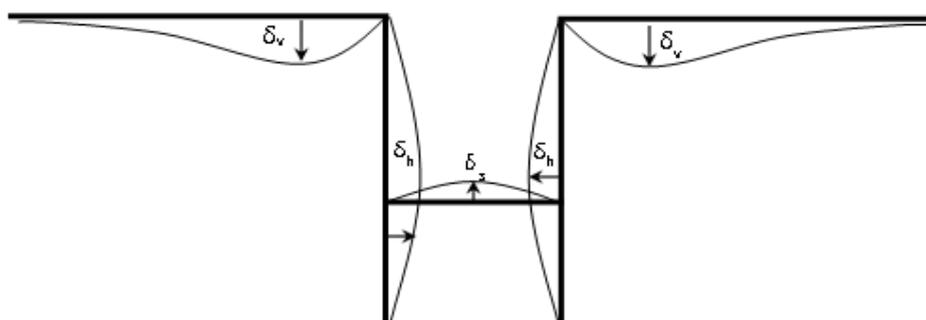


Figure 1-29 *Caractérisation des mouvements autour d'une excavation*

δ_h : déformée de l'écran de soutènement

δ_v : tassement à l'arrière du soutènement

δ_s : et le soulèvement du fond de fouille

1.3.2 Mouvement du sol vers la fouille :

L'excavation est l'inverse d'un chargement du sol, donc le mouvement autour d'une excavation est simplement l'inverse des mouvements suite à un chargement de sol.

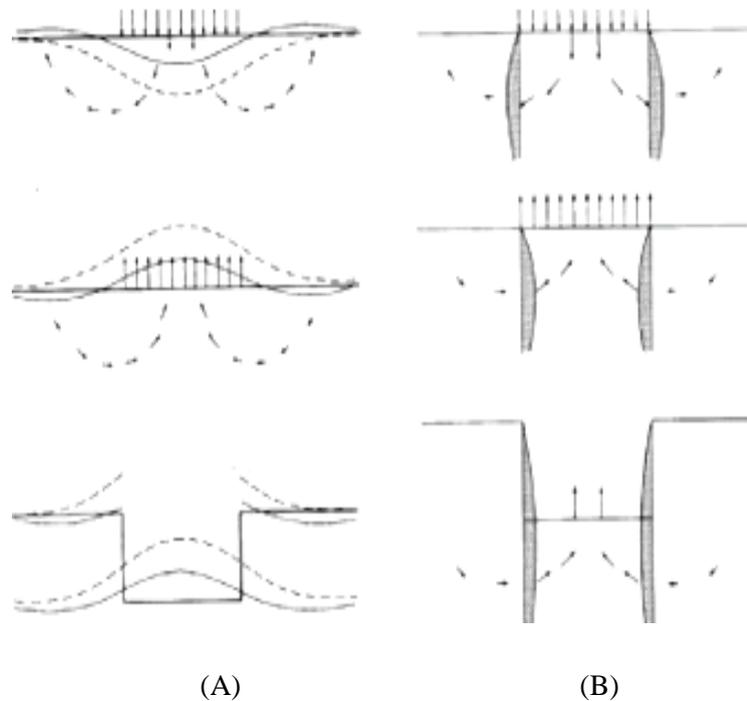


Figure 1-30 (A) les mouvements verticaux et (B) les mouvements horizontaux

Les mouvements verticaux représentent soulèvement dans la zone excavée qui s'accroît avec le temps et un tassement en dehors de cette zone, ainsi que les mouvements horizontaux du sol suite à une excavation.

1.3.3 Tassement derrière l'écran :

Plusieurs études qui ont duré des années ont donné des résultats afin de déterminer le tassement derrière l'écran pour différents types de sols. Les travaux de Clough et al (1990) complètent ceux de Peck (1969), ce dernier a synthétisé un grand nombre d'observations des tassements au droit de l'excavation dans différents types de sol comme le montre la (Figure 1.31)

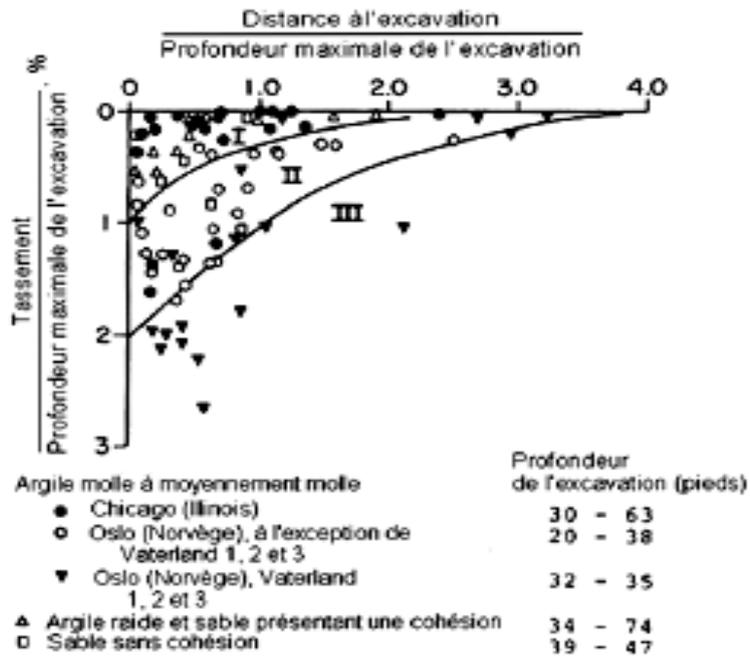


Figure 1-31 Tassement derrière l'écran selon Clough et al (1990)

Zone I: sable, argile ferme à raide,

Zone II: argile molle à très molle à une profondeur limitée en dessous du fond de fouille

Zone III: argile molle à très molle à une profondeur illimitée en dessous du fond de fouille (Clough et al. (1990))

Clough et al (1990) ont constaté que :

Sols sableux ou des argiles raides : un profil de tassement triangulaire qui s'étend jusqu'à 2 fois la profondeur de l'excavation pour les sols sableux, et 3 fois pour les argiles raides

Argile moyennement molle à molle : profils de tassements trapézoïdaux avec une valeur maximale pouvant s'étendre sur une distance de la paroi de 0,75 fois la profondeur de l'excavation

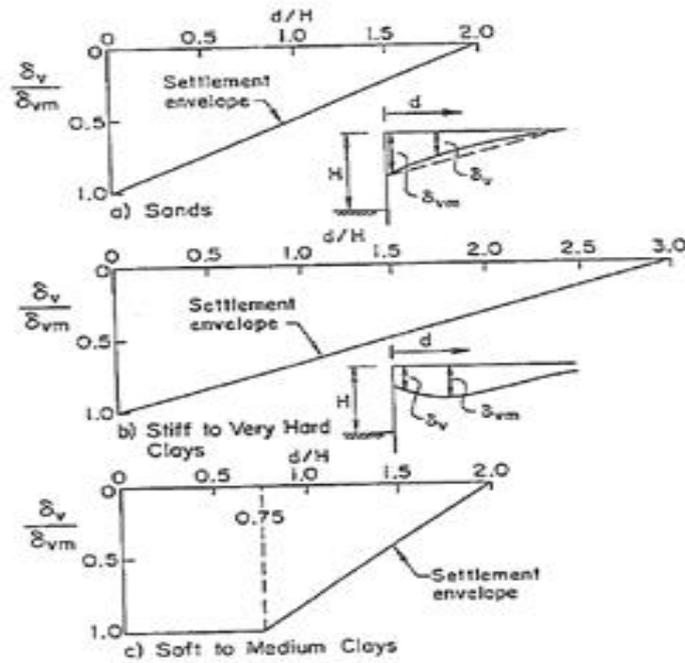


Figure 1-32 Enveloppe de tassement selon Clough et al (1990)

En continuité des travaux de Clough et al. (1990), Hsieh et al. (1998) ont développé une méthode de prévision des tassements du sol adjacent à une excavation en distinguant deux types de profils différents, à savoir profil A et profil B (Figure 1.33)

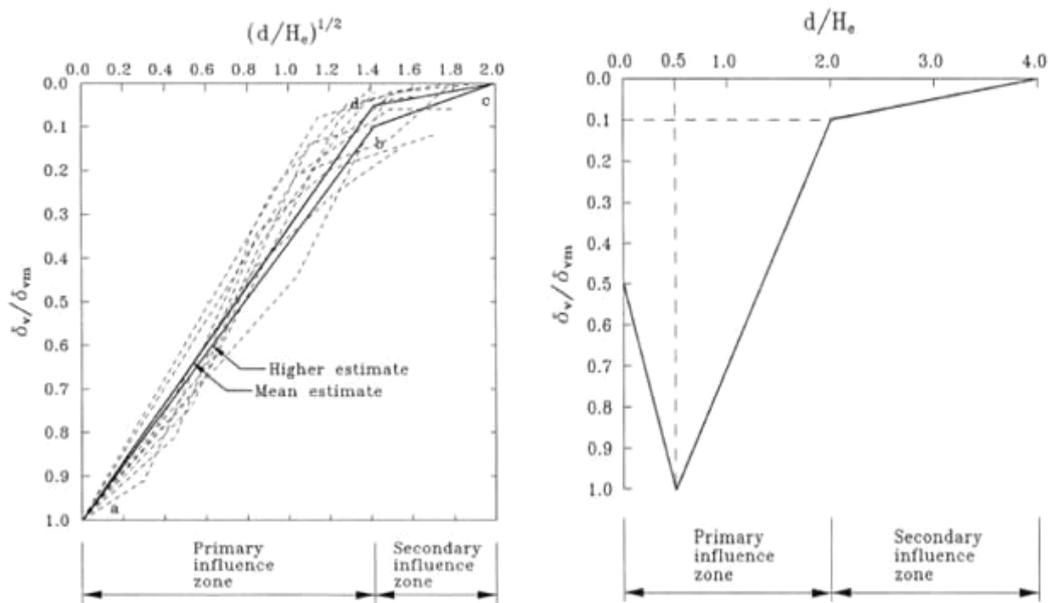


Figure 1-33 Profil de tassement de type A (à gauche) et de type B (à droite) (Hsieh et al. (1998))

Hsieh et al. (1998) qui ont complété les travaux de Clough et al. (1990), ils s'appuient sur la déformée de l'écran de soutènement pour justifier le choix de l'un ou l'autre de ces deux profils de tassements. A cet effet, les auteurs définissent 3 surfaces (Figure 1.34) :

- A_s : l'aire comprise entre la position verticale initiale du soutènement et sa déformée après la dernière passe d'excavation .
- A_{c1} : l'aire comprise entre la position verticale initiale du soutènement et sa déformée suite à la première passe d'excavation
- A_{c2} : l'aire comprise entre la position verticale initiale du soutènement et la ligne en pointillés

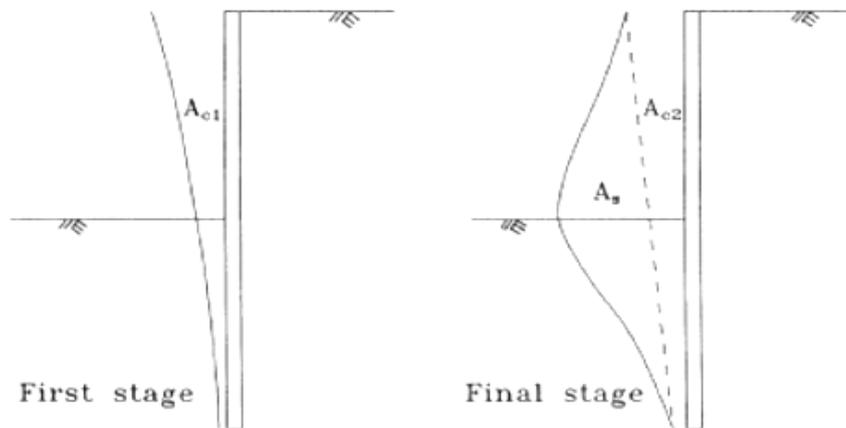


Figure 1-34 Définition des surfaces A_{c1} , A_{c2} et A_s à partir de la déflexion du soutènement (Hsieh et al. (1998))

Dans un sol cohérent, Hsieh et al. (1998) ont étudié la grandeur $A_c = \text{Max}(A_{c1}, A_{c2})$ et ils ont remarqué que les tassements de profils B sont induits par des excavations ayant une surface A_s supérieure à $1,6A_c$ tandis que l'ensemble des autres excavations ont donné lieu à des profils de type A

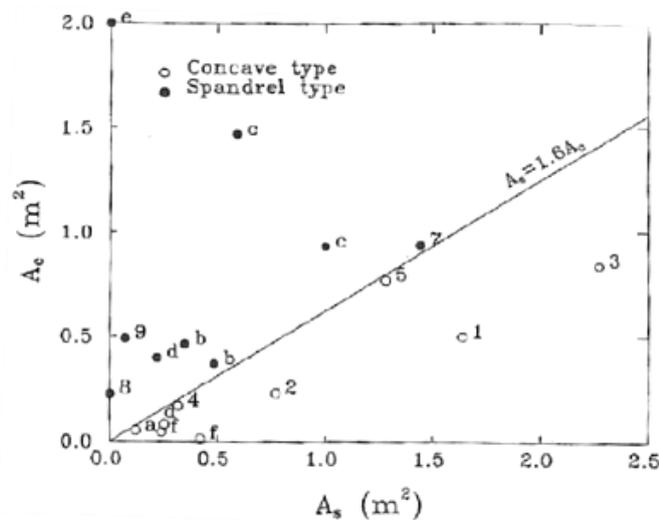


Figure 1-35 Relation entre les surfaces A_c et A_s pour distinguer les deux types de profils de tassement (Hsieh et al. 1998))

1.3.4 La déformation de l'écran :

La déformée de l'écran se mesure grâce à une instrumentation qu'on peut la mettre en place comme l'inclinomètre.

Moorman (2004) a rassemblé une importante base de données d'une excavation principalement dans les argiles molles. (La Figure 1.36) après récapitule la déflexion maximale observée U_{max} en fonction de la profondeur de l'excavation H pour différents types de sol et systèmes de soutènement.

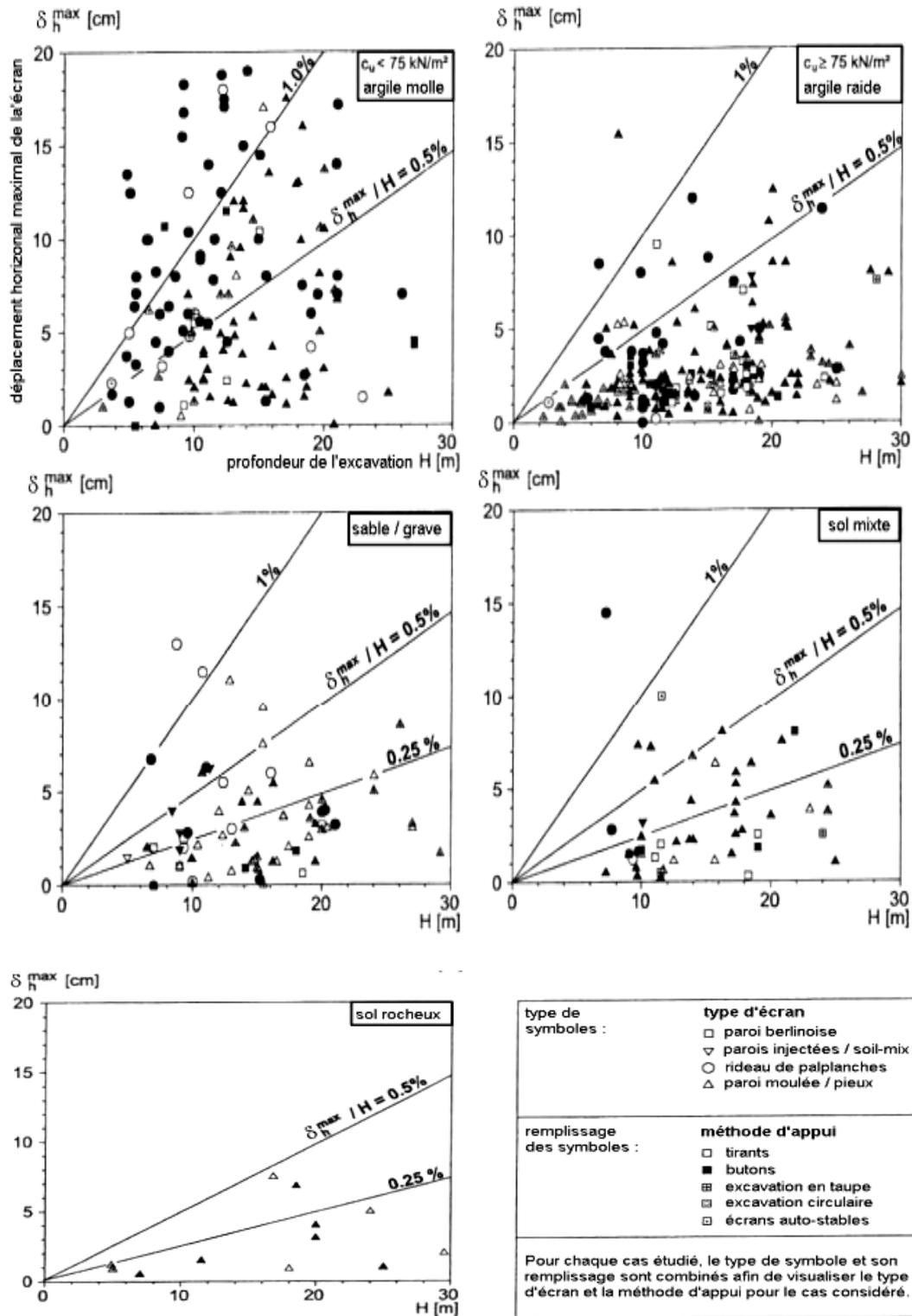


Figure 1-36 Déflexion maximale de l'écran U_{max} en fonction de la profondeur de l'excavation H pour différents types de sol et de systèmes de soutènement (Moorman 2004)

1.3.5 Soulèvement du fond de la fouille :

La mesure du soulèvement du fond de fouille est souvent négligée car elle est considérée comme faible et sans impact, sauf pour le cas particulier de gonflement des argiles sous le radier pour lequel on prévoit un vide sanitaire.

Mana et al. (1981) ont fourni un diagramme montrant une corrélation entre le coefficient de sécurité vis-à-vis du soulèvement du fond de fouille et le déplacement horizontal maximal de l'écran. (figure 1.37)

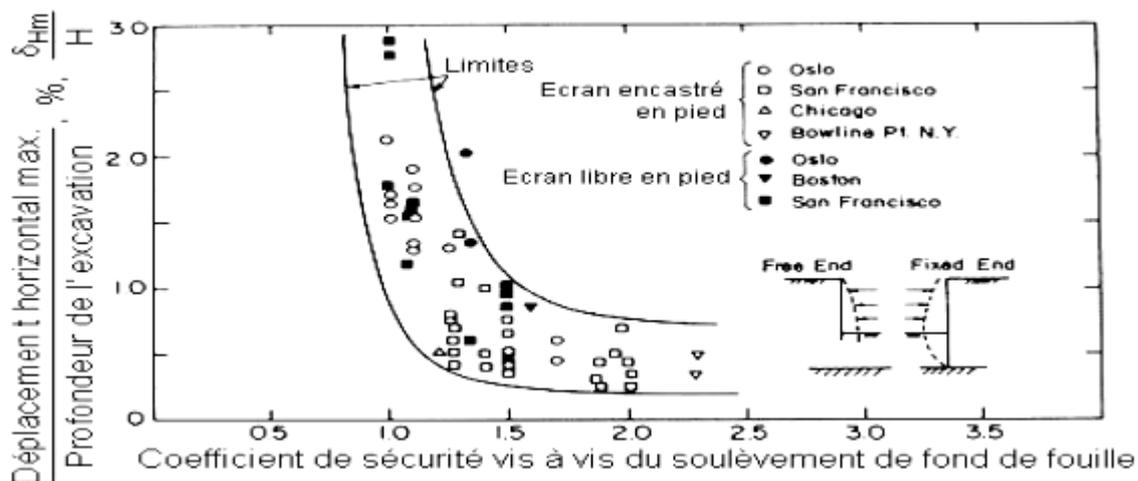


Figure 1-37 Diagramme d'estimation du déplacement maximal de l'écran en fonction du coefficient de sécurité vis-à-vis du soulèvement de fond de fouille (Mana et al. (1981))

Le coefficient de sécurité est calculé selon la méthode de Terzaghi (1943). Le diagramme de Mana et al. (1981) montre que tant que le coefficient de sécurité reste supérieur à 1,5 les déplacements de l'écran ne dépassent pas 1 % de la profondeur de l'excavation.

1.4 Les Méthodes de calculs :

1.4.1 Méthode de Coulomb :

Cette méthode permet de déterminer les forces de poussées et de butée limites s'exerçant derrière un écran ou un mur quelconque sans considération de l'état des contraintes s'exerçant dans le sol derrière le mur. Elle a vu le jour en 1773 par Coulomb. (Figure 1.38)

La théorie de Coulomb repose sur deux hypothèses :

- Le sol se rompt suivant une surface de rupture plane passant par le pied de l'écran.
- La force agissant sur l'écran à une direction connue, ce qui signifie que l'angle de frottement " ϕ " entre l'écran ou le mur et le sol est connu.

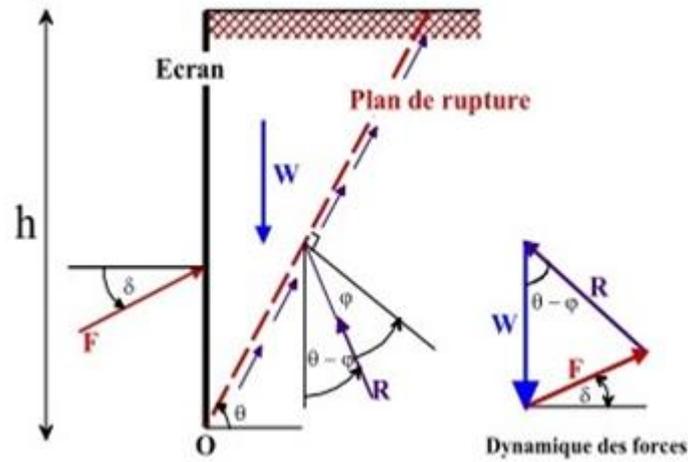


Figure 1-38 Bilan des forces exercées sur un mur de soutènement par la méthode de coulomb.

On suppose que la surface de rupture potentielle est un plan (coin de Coulomb) passant par le pied de l'écran et faisant un angle θ avec l'horizontale.

On fait l'hypothèse que la contrainte de cisaillement $\tau = \sigma' \text{tg } \varphi'$ est complètement mobilisée le long de ce plan. Le coin de Coulomb se comporte de façon rigide-plastique, ce qui n'est pas le cas généralement surtout si l'écran est de grande hauteur.

Après une simple considération de l'équilibre statique la force agissant sur le mur est calculée, le coefficient de poussé est donné par :

$$K_a = \frac{\frac{\sin(\alpha - \varphi)}{\sin \alpha}}{\sqrt{\sin(\alpha + \delta) - \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta)}{\sin(\alpha - \beta)}}}}$$

Le coefficient de butée est donné par :

$$K_p = \frac{\frac{\sin(\alpha + \varphi)}{\sin \alpha}}{\sqrt{\sin(\alpha - \delta) - \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta)}{\sin(\alpha - \beta)}}}}$$

Avec :

φ : Angle de frottement interne du sol.

δ : Angle de frottement sol – écran.

α : Inclinaison du mur avec l'horizontale.

β : inclinaison de la surface du sol avec l'horizontale.

1.4.2 Méthode de Rankine :

La méthode de Rankine a vu le jour en 1860, elle permet de calculer les forces de poussée et de butée à partir d'une approximation de l'état de contraintes dans le sol au contact de l'écran.

Elle repose sur l'hypothèse suivante :

- la présence d'un écran ne modifie pas la répartition des contraintes dans le massif.

$$F = \int_0^H f dz$$

f est la contrainte exercée par le sol sur l'écran ; la force de poussée ou de butée par unité de longueur

L'inconvénient d'une pareille hypothèse est d'imposer, en tout point du mur, la direction de la contrainte qui s'exerce sur le mur, et donc de ne pas tenir compte de la valeur du frottement entre le mur et le sol. Ainsi, dans le cas d'un sol à surface horizontale et d'un mur à paroi verticale.

Cette théorie de Rankine suppose que le frottement entre le mur et le sol est nul, puisque la contrainte est horizontale. Cette méthode conduit à une répartition triangulaire des contraintes de poussée ou de butée sur l'écran et permet d'obtenir le point d'application de la force correspondante.

Pour un mur à parement vertical supportant un massif à surface horizontale, constitué d'un sol pulvérulent saturé :

$$\sigma_h = U + K_a \sigma'_v \text{ Avec : } K_a = \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)$$

$$F_a = \int_0^H \sigma_h dz \quad \text{d'où} \quad F_a = \frac{1}{2} (\gamma w + K_a \gamma') H^2$$

Avec : $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$

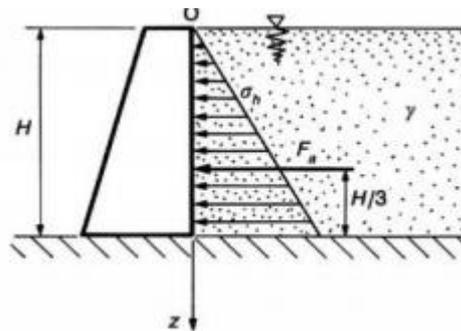


Figure 1-39 Force de poussée exercée par un massif pulvérulent saturé sur un mur de soutènement

1.4.3 Méthodes des équilibres limites :

On considère un massif de sol pulvérulent à surface horizontale, limité latéralement par un écran vertical rugueux. La mobilisation du frottement entre le sol et l'écran dépend du déplacement vertical relatif de l'écran. φ est la valeur de l'angle de frottement correspondant, l'inclinaison δ de la contrainte sur l'écran a pour valeurs extrêmes \pm .

Supposons que, par déplacement latéral de l'écran, on mette le sol en état de rupture (Figure 1.40)

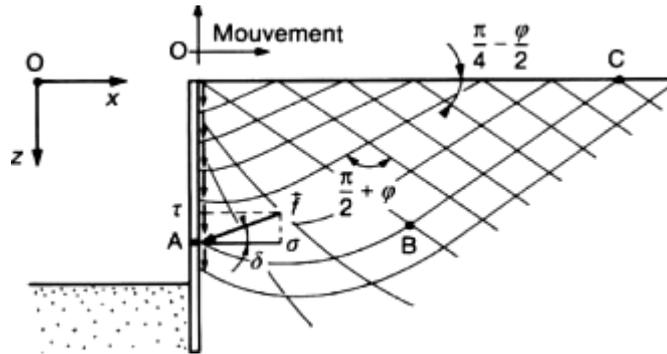


Figure 1-40 Lignes de glissement dans la zone de rupture en butée derrière un écran rugueux (sol pulvérulent)

L'état de contraintes dans le sol en rupture doit satisfaire :

- conditions de l'équilibre, d'autre

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} = \gamma$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = 0$$

- critère de rupture de Mohr-Coulomb, soit en coordonnées rectangulaires Ox, Oz

$$(\sigma_x + \sigma_z)^2 \sin^2 \varphi = (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{xz}^2$$

La résolution de ce système différentiel peut se faire numériquement à partir des conditions aux limites.

La composante verticale σ_z n'est plus obligatoirement égale à γz , on définit quand même le coefficient de poussée ou de butée, comme le rapport du module de la contrainte exercée sur l'écran à γz :

$$K_a = \frac{\sqrt{\sigma_x^2 + \tau_{xz}^2}}{\gamma z}$$

1.4.4 Méthodes de calcul des rideaux de palplanches et des parois :

Ce type de soutènement est flexible ce qui rend le schéma de calcul beaucoup plus complexe que pour les ouvrages rigides. Les méthodes de calcul les plus courantes consistent à considérer une interaction simplifiée dans laquelle le rideau (ou la paroi) est assimilé à une poutre soumise à une distribution de pression normale $P(z)$ sur toute sa hauteur (figure 1.41)

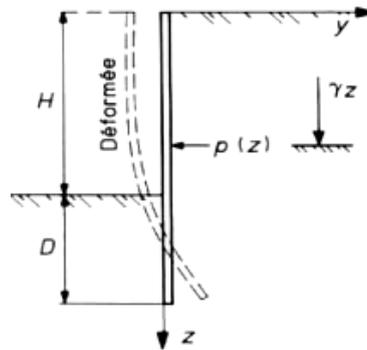


Figure 1-41 Rideau de palplanches soumis à une distribution de pression normale $P(z)$

La pression normale $P(z)$ apportée par le sol est supposée être relative à la contrainte normale verticale supposée, cette dernière est égale au poids des terres, avec un coefficient K ne dépendant que du déplacement $y(z)$ du rideau au niveau considéré, on a :

$$\begin{aligned} Z \leq H & \quad P(z) = K(y) \gamma z \\ Z \geq H & \quad P(z) = K(y) \gamma z - K(-y) \gamma (z-H) \end{aligned}$$

La valeur du coefficient $K(y)$ est comprise entre le coefficient de poussée K_a et le coefficient de butée K_p

La plupart des méthodes sont fondées sur des hypothèses simplificatrices. On peut distinguer les deux types de méthodes suivantes :

- méthodes aux états limites : $K(y) = K_a$ ou K_p ;
- méthodes aux déformations : utilisation d'un module de réaction du sol, $K(y) = m |y|$

1.4.5 Méthodes de calcul aux états limites :

Deux méthodes classiques sont couramment utilisées :

- la première, où le rideau est ancré en tête et simplement buté en pied ;
- la seconde, dans laquelle le rideau n'est pas ancré en tête, mais résiste uniquement par un bon encastrement dans le sol de fondation

1.4.5.1 Rideau ancré, simplement buté en pied :

Un rideau ancré en tête est dit simplement buté en pied lorsque sa fiche est suffisamment faible pour permettre une rotation du rideau autour de son point d'ancrage et un déplacement du pied mobilisant la butée maximale.

Le diagramme des efforts exercés sur le rideau, dans le cas d'un sable (figure 1.42):

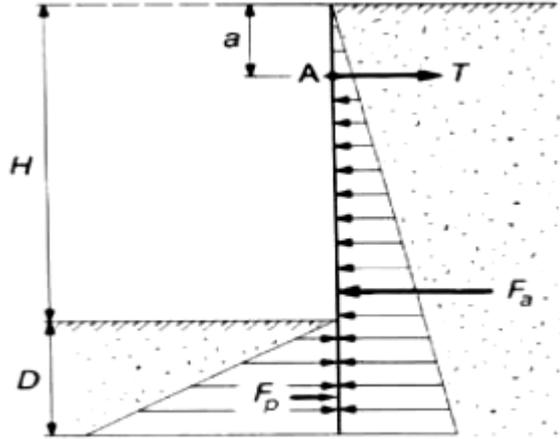


Figure 1-42 Rideau ancré en tête, simplement buté en pied
(A : point d'ancrage, T : effort d'ancrage)

Il faut déterminer les 2 inconnus la fiche D et l'effort d'ancrage T, donc il nous faut 2 équations :

- Résultante horizontale nul:

$$T = F_a - F_p$$

Tel que F_a est la force de poussée exercée sur la face amont du rideau et F_p est force de butée sur la face aval

- Moment résultant nul au point d'ancrage A :

$$F_a \left[\frac{2}{3} (H + D) - a \right] = F_p \left[\frac{2}{3} D + H - a \right]$$

En remplaçant F_a et F_p et en développant l'équation, ça vas nous ramène à une équation de 3eme degré nous permettant de déterminer la fiche D.

1.4.5.2 Rideau non ancré en tête et encastré en pied :

Le calcul pour ce type de rideau subissant une rotation autour d'un point O situé dans sa partie en fiche (Figure 1.45) est fait par la méthode de Rankine.

Elle repose sur les deux hypothèses suivantes :

- le sol des deux côtés du rideau, au-dessus du point de rotation O, est en état d'équilibre limite.
- les efforts de contre-butée sont équivalents à une force horizontale F_c appliquée au niveau du centre de rotation O

On aura deux inconnus à chercher :

- la hauteur de butée Z_0
- la force de contre-butée F_c

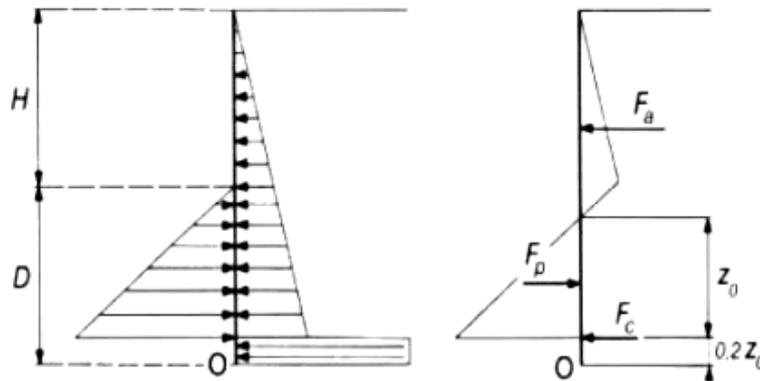


Figure 1-43 Hypothèses admises pour le calcul d'un rideau non ancré

Z_0 est déterminée en écrivant l'équilibre des moments autour du point O, ce qui donne une équation du troisième degré en Z_0

La fiche du rideau est déterminée par l'expression suivante :

$$D = \frac{H}{Kp^2 - 1} + Z_0 + 0.2Z_0$$

En écrivant qu'en projection horizontale la résultante générale des forces s'exerçant sur le rideau est nulle :

$$F_c = F_p - F_a$$

1.4.6 Méthode de calcul aux modules de réaction :

Méthode de calcul aux coefficients de réaction ou méthode « élasto-plastique » est utilisée dans la plus part des cas pour le dimensionnement des parois moulées.

En France, la méthode du coefficient de réaction a été utilisée à partir des années 1970 et elle a été relativement vite intégrée dans des logiciels spécialisés (Delattre, 2001).

La raideur K , qui n'est pas un paramètre intrinsèque du sol, dépend notamment des caractéristiques de celui-ci et de la géométrie de l'ouvrage.

Les valeurs limitent à l'intérieur desquelles peut évoluer la pression qu'exercent ces ressorts sur la paroi ou inversement correspondent aux pressions limites de poussée et de butée de part et d'autre de celle-ci

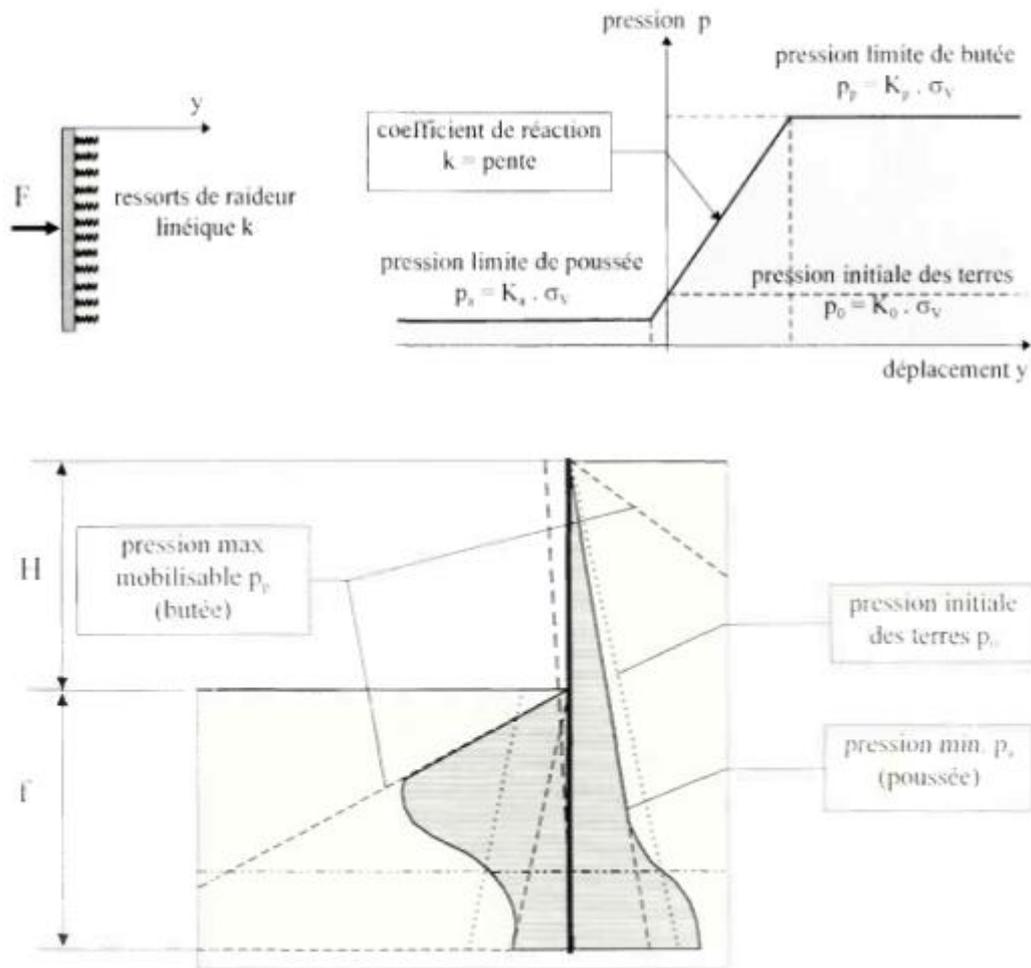


Figure 1-44 Schématisation du comportement de parois simplement encastrées dans le sol

Le principal intérêt de cette méthode est de pouvoir tenir compte des phases de construction qui jouent un rôle essentiel sur la détermination des efforts et des déformations en phase finale d'un ouvrage flexible ou semi-flexible. Elle repose sur l'hypothèse suivante :

- Le sol n'agit sur l'écran que par des couches horizontales indépendantes les unes des autres, c'est-à-dire parfaitement lisses et ne transmettant donc aucune contrainte de cisaillement (Figure 1.46)

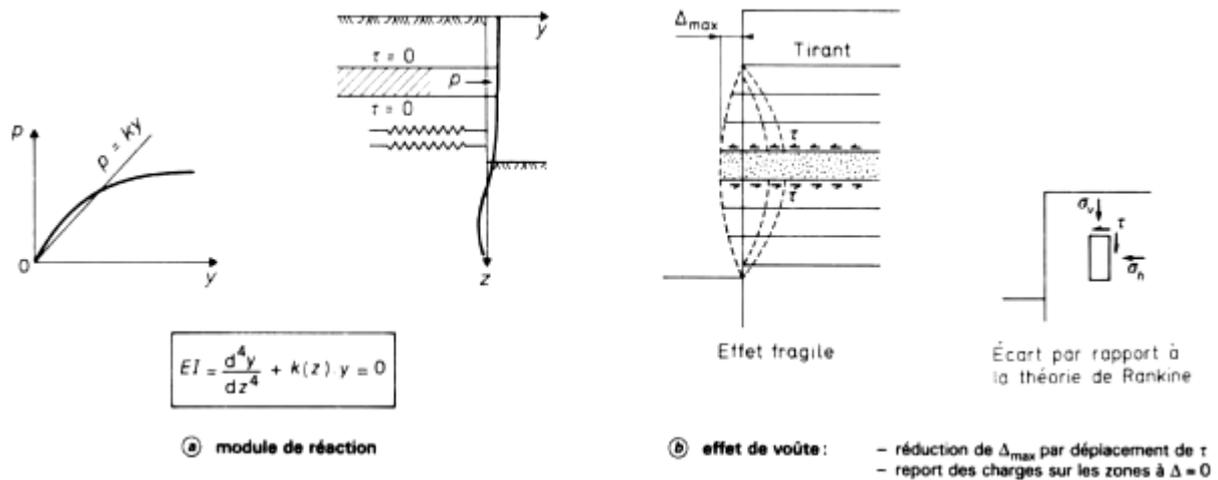


Figure 1-45 Hypothèse de base du calcul au module de réaction et son contraire l'effet de voûte

Cette hypothèse revient à considérer que les plans horizontaux sont des plans principaux, et que les directions principales des contraintes sont verticale et horizontale.

Jointe à l'hypothèse du module de réaction, cette simplification de l'interaction solécran permet de ramener le calcul des efforts et des déplacements de l'écran au cours des diverses phases de travaux à celui d'une poutre sur appui élastique continu (modèle de Winkler), soit à la résolution de l'équation différentielle :

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial z^4} = K(z) \cdot y = 0$$

1.4.7 Calcul par la méthode des éléments finis (méthode numérique) :

L'utilisation des méthodes numériques devient de plus en plus fréquente surtout avec l'évolution de l'outil informatique tant sur le plan soft que hard, ce qui a rendu l'utilisation du calcul par la méthode des éléments finis assez courant et a permis aux ingénieurs de différentes spécialités de développer des logiciels d'analyse numérique et de modélisation. Dans le domaine de la géotechnique on peut citer à titre d'exemple le code de calcul PLAXIS qui sera utilisé dans la présente investigation.

1.5 Conclusion :

Les écrans de soutènement sont très couramment utilisés aujourd'hui pour la réalisation d'ouvrages provisoires et définitifs. Dans ce chapitre, consacré aux généralités sur les écrans de soutènement, on a présenté les éléments constituant les rideaux de palplanches métalliques et les différents types de parois (la paroi moulée préfabriquée ; la paroi clouée et la paroi composite) . Ensuite on a donné le type, l'utilisation et la mise en œuvre de ces écrans. Aussi ; on a mis en évidence quelques techniques et méthodes de calcul proposées par des chercheurs avec leurs conditions d'application. Cet exposé nous permet de conclure que l'application des écrans de soutènement est plus avantageuse, Mais le comportement d'écran est conditionné par le comportement du sol en contact avec la structure.

Chapitre2. PRESENTATION DU LOGICIEL ZSWALL

2.1 Introduction :

En 1963, les ingénieurs en génie civil calculèrent les problèmes de capacité portante de fondation ou de stabilité de pente à l'aide des méthodes de Terzaghi et dimensionnèrent leurs structures avec celles de Timoshenko.

Les années qui ont suivi ont vu l'application de la méthode des éléments finis dans la modélisation des ouvrages géotechnique tels que les soutènement, les fondation et les talus et excavation, ce qui a permis le calcul des champs de contrainte et des déformations d'un problème d'interaction sol-structure par la méthode des éléments finis(EF) formulé sans approximation significative, bi- ou tridimensionnel, statique ou dynamique, mono- ou biphasé, non-linéaire (matériel et/ou géométrique), à plusieurs centaines de milliers de degrés de liberté, et donc une solutions à de nombreux problèmes, autrefois long, voir irrésolubles, avec les moyens de calcul classiques. (La figure 2.1) montre un exemple de maillage présentant un modèle d'élément finis d'un mur composite cloué

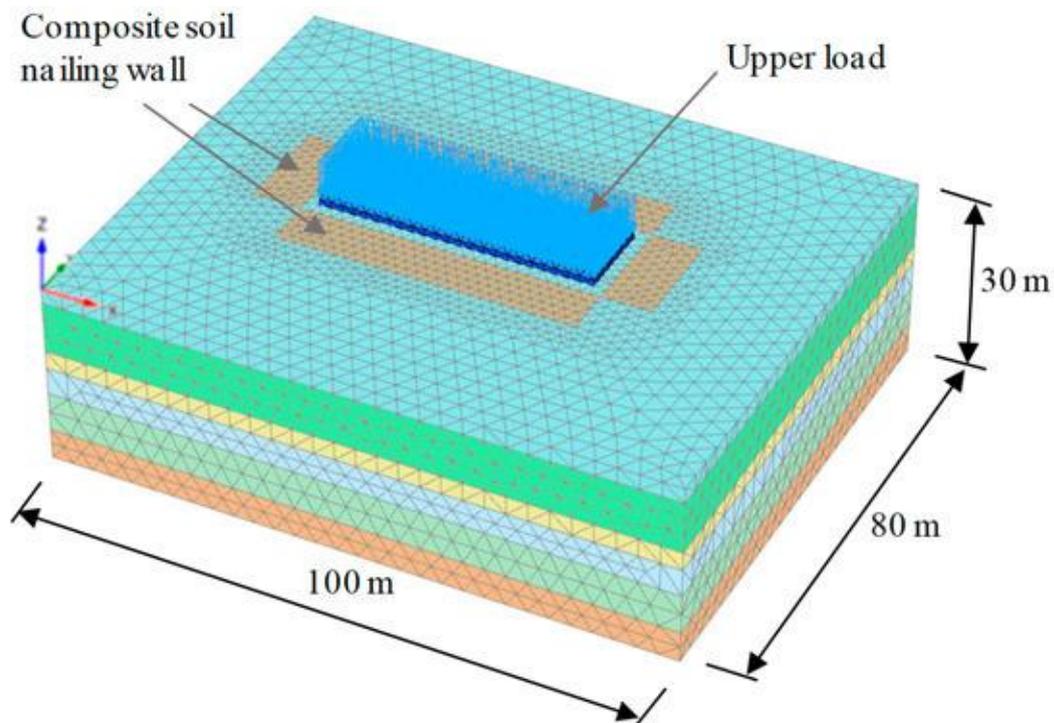


Figure 2-1 Modèle de maillage tridimensionnel (3D)

2.2 Les concepts de base :

La MEF remplace la structure physique à étudier par un nombre finis d'éléments représentant un maillage. Ces éléments sont liés entre eux par des nœuds. D'abord on considère le comportement de chaque partie indépendante puis on assemble ces parties de telle façon qu'on assure l'équilibre des forces et la compatibilité des déplacements réels de la structure en tant qu'milieu continu. La MEF est très puissante car elle permet d'étudier correctement des structures continues ayant des propriétés géométriques et des conditions de charges compliquées.

Elle nécessite :

- Le choix d'une loi de comportement du sol, exemple :Mohr-Coulomb, Cam-Clay...etc,
- La connaissance des caractéristique de l'ouvrage et aussi celle du sol,
- La connaissance des caractéristiquesdes tirants d'ancrage ou des butons,
- L'état initial des contraintes et des pressions interstitielles.

Elle permet de :

- Simuler les phases de travaux
- Déterminer les déplacements d'ouvrage
- Déterminer les déplacements et déformation du sol
- Déterminer les contraintes totales, effective ainsi que les pressions interstitielle

2.3 Présentation de ZSWALLS

ZSwalls est un logiciel 2D basés sur la méthode des éléments finis qui analyse les séquences d'excavation et les écrans de soutènement et cela en introduisant les différentes caractéristiques du sol, de l'écran, du système du support ainsi que la hauteur de la fouille et de l'ancrage. On lance une analyse et aura un rapport automatisé prêt à être imprimé.

2.4 Les fonctionnalités de ZSwalls :

- Prétraitement rapide des excavations de forme rectangulaire basé sur la génération automatisée de maillage par éléments finis, y compris des éléments finis sans verrouillage et une technique de nouage de treillis avancée.
- Modélisation des palplanches et des parois moulées et des éléments de renforcement tels que les ancrages, les entretoises et les clous.
- Prise en compte des charges de surface.
- Modèle de comportement élasto-plastique avancés pour les sols.
- Analyse en fonction du temps (consolidation) ou en régime permanent, y compris les effets du sol partiellement saturé.

2.5 La modélisation par ZSwalls :

2.5.1 Preselection (la présélection) :

L'application démarre avec la boîte de dialogue « Preselection » permet d'imiter la configuration initiale du projet avant de travailler avec des cas et une définition détaillée des données.

(Figure2.2)

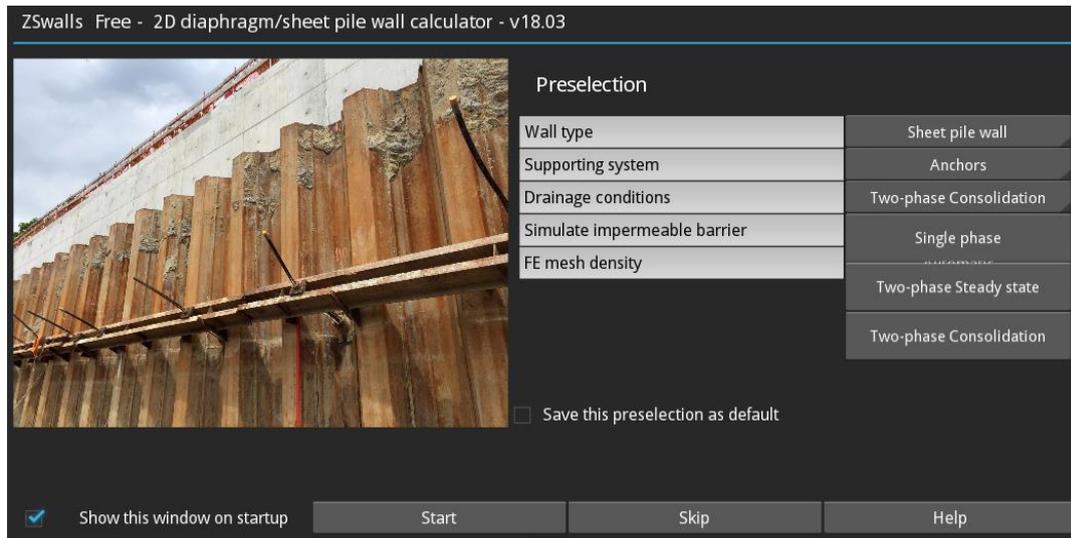


Figure 2-2la *Présélection des paramètres du projet*

a) Les composants de configuration de la présélection sont:

A/Wall type (type de mur) : définit le type de mur de soutènement à considérer dans le projet

- **Sheet pile wall** (Mur de palplanches),
- **Diaphragmwall** (Mur moulé),
- **Alterable** (Modifiable) : le type de paroi peut être changé à tout moment pendant la définition du projet.

B/Supporting system(Le système de support) : permet d'utiliser des composants de support préférables dans le projet

- **Anchors** (Ancrages)
- **Struts** (entretoises)
- **Rigid support** (Support rigide)
- **Fictitious Springs** (Ressort fictif): défini par la force du ressort (k) et la force de précontrainte (F0).
- **Bracingstruts** (blindage) : une séquence de tuyaux en acier non précontraint est recommandée pour modéliser des excavations de taille relativement petite où une tension

de ressort équivalente peut dépendre de la position de la section transversale analysée par rapport au coin d'excavation.

- **Pipes** (Tuyaux) : une séquence de tuyaux en acier précontraint avec un espacement donné (recommandé pour les excavations de grande taille ou longues).
- **Slabs**(Dalles) : ces éléments de support peuvent être utilisés pour simuler la technique à ciel ouvert et représenter les planchers de sous-sol qui sont construits au fur et à mesure que l'excavation progresse; la méthode descendante peut être appliquée pour les projets d'excavation profonde.
- **Mixed system** (Système mixte) : permet l'utilisation de différents éléments de renforcement, à savoir (**Anchors**), (**nails**), (**struts**) et/ ou (**slabs**).

Preselection	
Wall type	Sheet pile wall
Supporting system	Anchors
Drainage conditions	Anchors
Simulate impermeable barrier	Struts
FE mesh density	Slabs
	Mixed system

Figure 2-3 Les différents systèmes du support inclus sur ZSwalls

C/Drainage conditions (Les conditions de drainage) : définissent le type d'analyse à appliquer lors de la simulation numérique de l'excavation

- **Single-phase** (Monophasé) : ignore la présence d'eau souterraine dans le sol; aucun effet de saturation partielle ne sera pris en compte dans la simulation.
- **Two-phase steady state** (État d'équilibre biphasé) : la déformation d'un sol est uniquement déterminée par la contrainte obtenue pour un champ de pression interstitielle entièrement dissipé, ce qui signifie que l'analyse est indépendante du temps (recommandé pour modéliser l'excavation dans des sols hautement perméables, par exemple des sables et des graviers). Un effet de sol partiellement saturé (suction) ne peut être obtenu qu'au-dessus de la nappe phréatique derrière le mur tandis qu'à l'intérieur de la tranchée des pressions nulles sont imposées à la surface du sol de chaque étape d'excavation.

- **Two-phase Consolidation** (La Consolidation en deux phases) : considère le comportement du sol fortement dépendant du temps, en particulier pour les sols argileux à faible perméabilité. Cela tient compte des conditions non drainées ou partiellement drainées qui peuvent se développer derrière le mur de soutènement, ainsi que de la zone partiellement saturée au fond de l'excavation.

Preselection	
Wall type	Sheet pile wall
Supporting system	Anchors
Drainage conditions	Two-phase Consolidation
Simulate impermeable barrier	Single phase
FE mesh density	Two-phase Steady state
	Two-phase Consolidation

Figure 2-4 Les conditions de drainage appliqué lors de la simulation numérique sur Zswalls

D/ Impermeablebarrier (Simuler une barrière imperméable) : Ceci est utilisé pour éviter:

- pompage continu de l'eau lors de l'excavation dans des dépôts hautement perméables (ex: sables).
- Ébullition du fond de la tranchée due à l'abaissement de la nappe phréatique à l'intérieur des supports de tranchée dans des sables saturés ou des graviers.
- Contamination de l'eau.

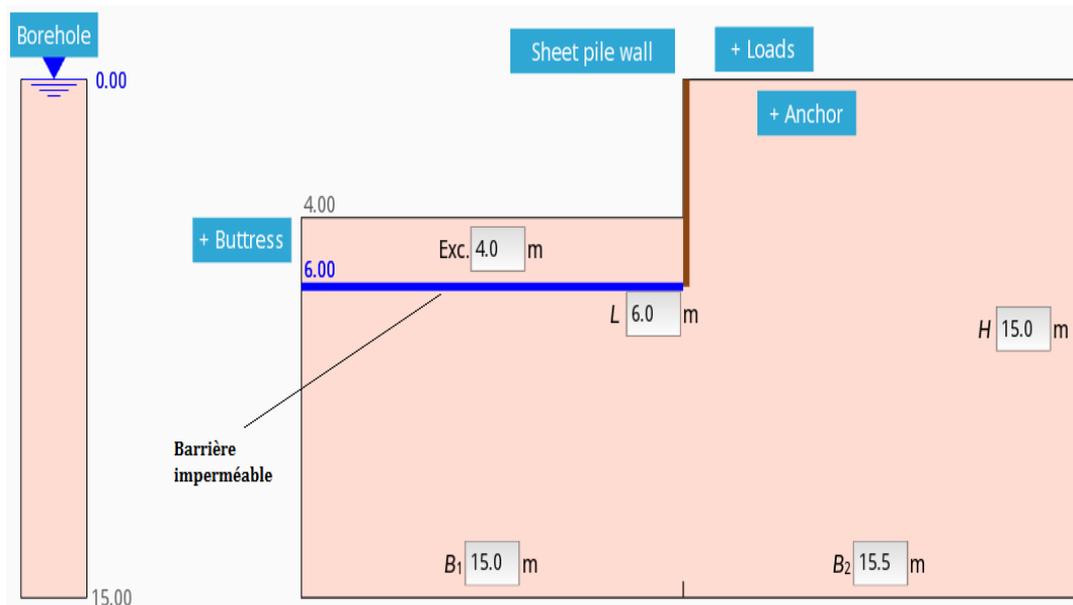


Figure 2-5 *exemple d'une barrière imperméable*

E/FE meshdensity (La densité de maillage FE) : nous permet d'adapter la densité du maillage des éléments finis par rapport à la taille du problème de valeur aux limites analysé

- **Automatic**(Automatique) : trouve automatiquement une taille d'élément optimale par rapport à la profondeur d'excavation.
- **Coarse** (Grossier) : avec une taille d'élément de 1,0 m dans la zone d'intérêt et de 2,0 m dans le domaine extérieur.
- **Medium**(Moyen): 0,75 / 1,5 m
- **Fine** (Fin) : 0,5 / 1,0 m
- **Very fine** (Très fin) : 0,25 / 0,5 m

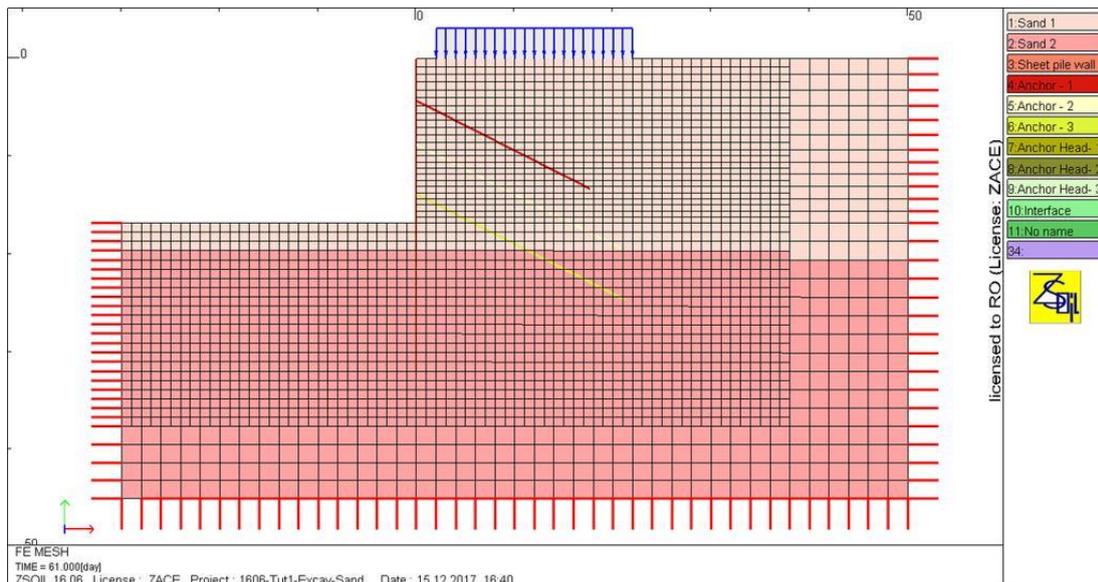


Figure 2-6 Exemple de maillage FE

2.5.2 La fenêtre principale:

A/ Elle contient une barre de différents menus :(Figure2.7)

- **File** (fichier) : opération de fichier comme on peut le trouver dans les logiciels comme Save, Save as, Open, Quitetc
- **Preselection** : la configuration des composants de base qu'on la déjà détaillé
- **Settings** (paramètres): la configuration de l'analyse on trouve le type d'analyse, la durée des étapes d'excavation après l'installation du mur et de la consolidation à la fin de l'excavation, Nombre d'étapes de calcul pour chaque étape d'excavation, profondeur de la barre imperméable et la densité du maillage.
- **Runanalysis** (exécuter l'analyse) : exécution de l'analyse.
- **Report** (rapport) : on peut ouvrir le rapport et spécifier son contenu.
- **Help** (l'aide) : on consulte l'User Guide en cas de difficulté.



Figure 2-7 les fenêtres principales de Zswalls

B/ La fenêtre principale :(Figure2.8)

- **Borehole** (forage) : à travers cette fonction on peut définir le nombre des couches, loi de comportement du sol, les caractéristiques du sol et le niveau de la nappe.
- **Sheete pile wall** : choisir l'écran de soutènement, ses caractéristiques et sa géométrie.

- **Load**(charge) : spécifier la présence de la charge ou son absence.
- **Anchor** : c'est un élément support et on définit ses caractéristiques.
- **Buttress** (contrefort) : c'est une dalle qu'on peut la mettre à la base de l'excavation et on peut déterminer ses caractéristiques.

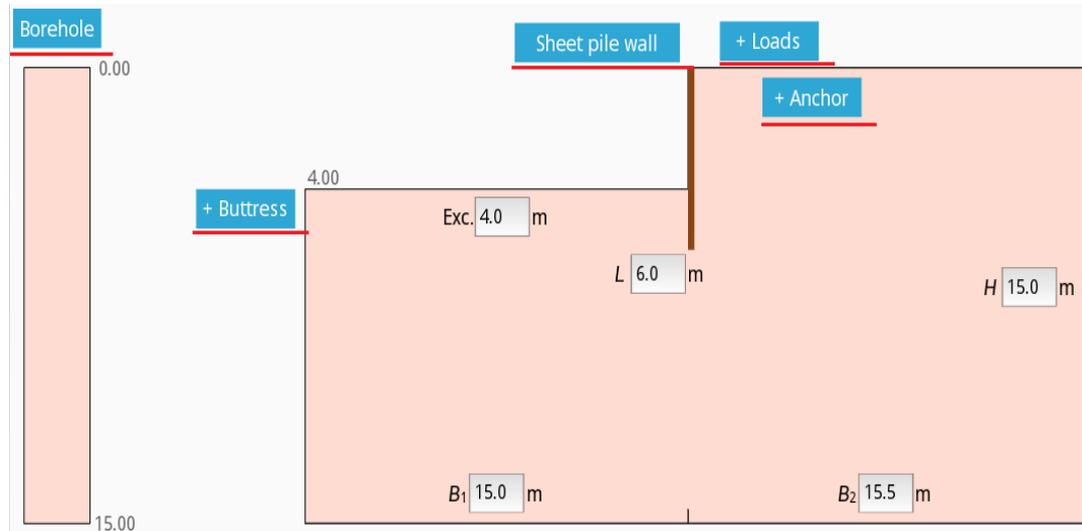


Figure 2-8 La fenêtre principale de ZSwall

2.6 Conclusion

Aujourd'hui, on est amené à passer par la modélisation numérique des ouvrages géotechnique pour les dimensionner. Il faut une connaissance approfondie de différents logiciels afin qu'on exploite au maximum de leurs possibilités.

ZSwalls est un calculateur 2D conçu pour effectuer des analyses détaillées des excavation protégées par des écrans de soutènement. Le programme de ZSwalls est basé sur la méthode des éléments finis comprenant une formulation couplée pour des milieux biphasés totalement et partiellement saturés et des lois de comportement avancées.

Chapitre3. PRESENTATION DU LOGICIEL PLAXIS

3.1 Introduction :

L'évolution de la technologie de la construction des ouvrages géotechnique amène l'ingénieur étudié des problèmes géotechniques de plus en plus complexes, en présence des contraintes de sécurité de plus en plus sévères. Pour l'exécution de ces projets et vu la complexité des méthodes analytiques, l'ingénieur a recours aux méthodes numériques telle que la MEF qui lui permettent de simuler le comportement des systèmes physiques complexes. La méthode des éléments finis est considérée la plus performante des méthodes numériques vu son grand champ d'application.

Dans ce chapitre, nous donnons une description générale du code de calcul par élément finis PLAXIS 2D, qui sera utilisé dans notre étude, et plus particulièrement La description de quelques modèles de comportement disponibles dans ce code.

3.2 Présentation du logiciel :

PLAXIS est un programme d'éléments finis spécialement conçu pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour différents types d'applications géotechniques.

Les situations réelles peuvent être représentées par un modèle plan ou axisymétrique. Le programme utilise une interface graphique pratique permettant aux utilisateurs de générer Rapidement un modèle géométrique, et un maillage d'éléments finis basés sur la coupe transversale de l'ouvrage à étudier. L'algorithme général du code PLAXIS consisté à résoudre un système d'équations algébriques non linéaire selon un processus pour déterminer les valeurs des déplacements aux différents nœuds du maillage, le champ de contraintes, ainsi que les états de rupture du sol.

3.2.1 Les points forts de PLAXIS

- La convivialité de l'interface pour la saisie des données et pour l'interprétation des résultats.
- Générateur automatique de maillage.
- Jeu complet de lois de comportement de sol et la possibilité de définir ses propres lois de comportement
- Couplage avec les calculs d'écoulement et de consolidation ;
- Prise en compte des éléments de structure et de l'interaction sol-structure
- Calculs de coefficient de sécurité.

3.2.2 Conventions de signe :

La génération d'un modèle d'éléments finis à deux dimensions avec PLAXIS est basée sur un modèle géométrique. Ce modèle géométrique est créé dans le plan (x, y) du système de coordonnées global, alors que la direction z est perpendiculaire à ce plan. Dans le système de coordonnées global, la direction z positive pointe vers l'utilisateur. Bien que PLAXIS soit un programme 2D, les contraintes sont basées sur un système de coordonnées cartésiennes 3D, indiqué sur la (Figure 3.1). Dans une analyse en déformations planes, σ_{zz} correspond à la contrainte perpendiculaire au plan de la coupe.

Dans une analyse axisymétrique, x représente la direction radiale, y la direction axiale et z représente la direction tangentielle. Dans ce cas, σ_{xx} représente la contrainte radiale et σ_{zz} la contrainte circonférentielle.

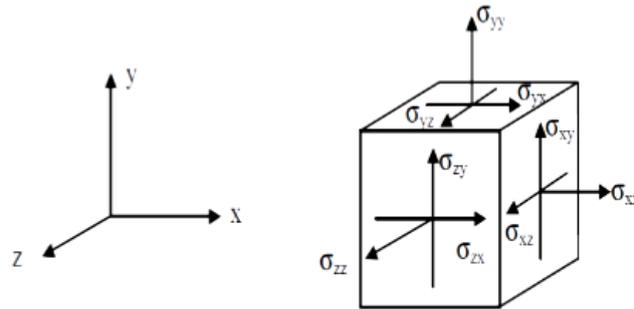


Figure 3-1 *Système de coordonnées et définition des composantes de contrainte Positive.*

3.2.3 Les sous-programmes de PLAXIS :

L'interface d'utilisation de PLAXIS se compose de quatre sous-programmes (**Input, Calculation, Output et Curves**) (Figure 3.2) :

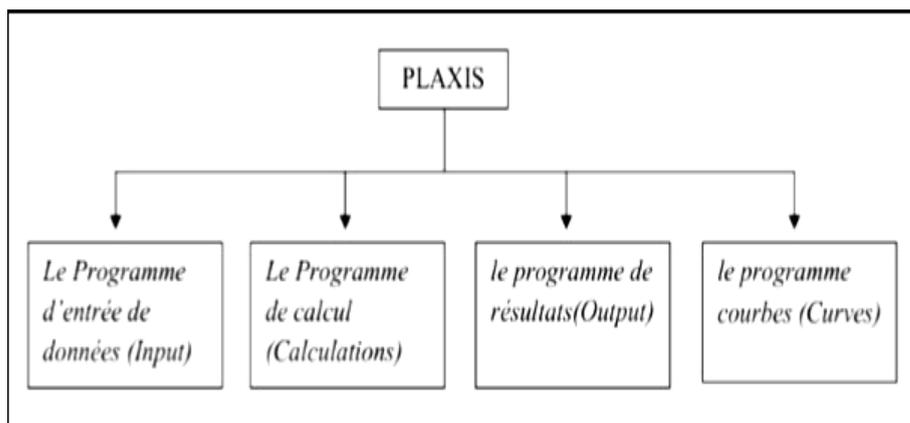


Figure 3-2 Différents programmes de calcul en PLAXIS 2D.

3.2.3.1 Le programme d'entrée de données (Input) :

Le programme contient tout ce qui est nécessaire pour créer et modifier un modèle géométrique, pour générer le maillage d'éléments finis correspondant et pour générer les conditions initiales. (Figure 3.3)

Le menu d'entrée des données (**Main menu**): Le menu Input contient tous les éléments sur les données et les opérations du programme Input.

La barre d'outils générale (**Tool bar general**): La barre d'outils contient les icônes relatives aux actions générales comme les opérations sur le disque, l'impression, les zooms ou le choix d'objets.

La barre d'outils de géométrie (**Tool bar geometry**): Cette barre d'outils contient les icônes pour les actions relatives à la création du modèle géométrique. Ces icônes sont placées dans un ordre tel qu'il permet en général de définir entièrement le modèle en suivant les boutons de la barre d'outils de la gauche vers la droite.

Les règles (**Rulers**): Sur la gauche et la partie supérieure de la planche à dessin, des règles indiquent les coordonnées physiques x et y du modèle géométrique. Ceci permet d'avoir un aperçu immédiat des dimensions.

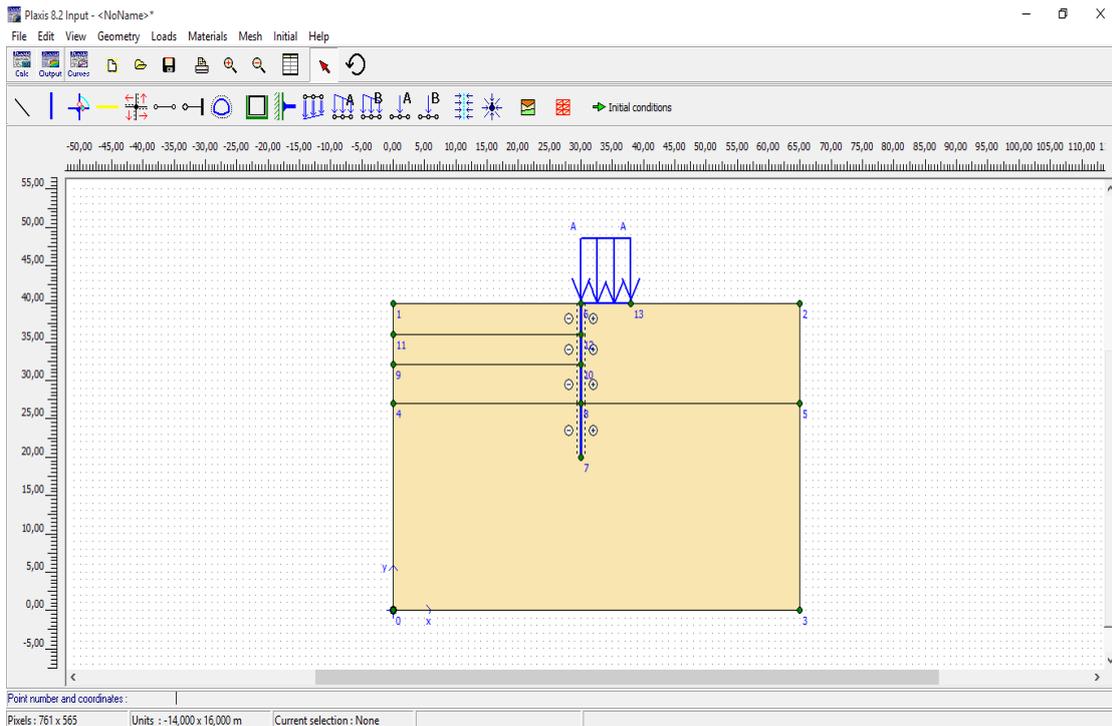


Figure 3-3 Le programme d'entrée de données

A. Le menu d'entrée des données (input) :

Le menu principal du programme d'entrée des données contient des menus déroulant relatifs à la plupart des options pour manipuler des fichiers, transférer des données, afficher des graphiques, créer un modèle géométrique, générer des maillages d'éléments finis et entrer des données en général.

Une distinction peut être faite entre le menu du mode de création de la géométrie et le menu des conditions initiales. Le premier est composé des menus **File, Edit, View, Geometry, Loads, Materials, Mesh, Initial et Help.**

Le second est quant à lui composé des menus **File, Edit, View, Geometry, Generate et Help.**

Le menu File: Permet de créer un nouveau projet, d'ouvrir un projet existant, de sauver le projet en cours sous le nom existant, d'imprimer le modèle géométrique sur une imprimante choisie et permet de quitter le programme Input

Le menu Edit : Permet de restaurer l'état précédent du modèle géométrique et Permet de copier le modèle géométrique dans le presse-papiers de Windows.

Le menu View: Permet de zoomer sur une zone rectangulaire (Le programme agrandira la surface sélectionnée), de restaurer la vue précédant l'agrandissement le plus récent, de voir le tableau des coordonnées x et y de tous les points de la géométrie et Permet de montrer ou cacher les flèches indiquant les axes x et y.

Le menu Geometry: Le menu **Geometry** contient les options de base permettant de fabriquer un

modèle géométrique.

Le menu Loads: Le menu **Loads** contient les options qui permettent d'ajouter des charges et des conditions aux limites au modèle géométrique.

Le menu Materials: Le menu **Materials** est utilisé pour activer la base de données de création et de modification des propriétés des matériaux pour les sols et les interfaces, les plaques, les géo grilles et les ancrages.

Le menu Mesh: Le menu **Mesh** contient les options permettant de définir le type d'éléments (6 ou 15 nœuds), générer un maillage d'éléments finis ou appliquer un raffinement local ou global du maillage.

Le menu Initial: Le menu **Initial** permet d'accéder au menu des conditions initiales du programme **Input**.

3.2.3.2 Le programme de calcul (Calculations) :

Après la sélection (automatique) d'un projet, la fenêtre principale du programme de calcul apparaît (Figure 3.4) ; elle comporte les points suivants :

Le menu de calcul: Le menu de calcul permet l'accès à toutes les options du programme de calcul. La plupart des options sont également accessibles par des icônes situées dans la barre d'outils.

La barre d'outils: La barre d'outils contient les icônes qui peuvent être utilisées comme raccourci pour les options du menu.

Les onglets (partie supérieure de la fenêtre): Les onglets permettent de définir et pré visualiser une phase de calcul.

Liste des phases de calcul (partie inférieure de la fenêtre): Cette liste donne une vue d'ensemble de toutes les phases de calcul d'un projet. Chaque ligne correspond à une phase particulière.

a) le menu de calcul: La fenêtre du programme de calcul contient des menus déroulants relatifs à l'ensemble des options de manipulation de fichiers, de définition des phases de calcul et d'exécution des calculs. Le menu de calcul est composé des sous-menus **File**, **Edit**, **View**, **Calculate and Help**.

Le sous-menu File: Permet d'ouvrir un projet pour lequel des phases de calcul ont été définies, Permet de sauver l'état actuel de la liste de calcul, définir les fichiers du projet PLAXIS seront stockés et Permet de quitter le programme.

Le sous-menu Edit: Permet de passer à la phase de calcul suivante, Permet de supprimer la ou les phase(s) de calcul choisie(s) et copier les listes des phases de calcul dans le presse papiers.

Le sous-menu View: Permet de voir la fenêtre du gestionnaire de calcul à partir de laquelle tous les calculs courants sont contrôlés et Permet de choisir les nœuds et les points de contraintes pour générer des courbes charge-déplacement et des chemins de Contraintes.

Le sous-menu Calculate : Permet d'amorcer le processus de calcul du projet en cours et Permet de choisir un projet pour lequel on veut lancer les calculs.

b) types de calculs: Il y a trois types de types de calcul fondamentaux distincts : un calcul plastique (Plastic), une analyse de consolidation (Consolidation) et un calcul de coefficient de sécurité (Phi-c reduction).

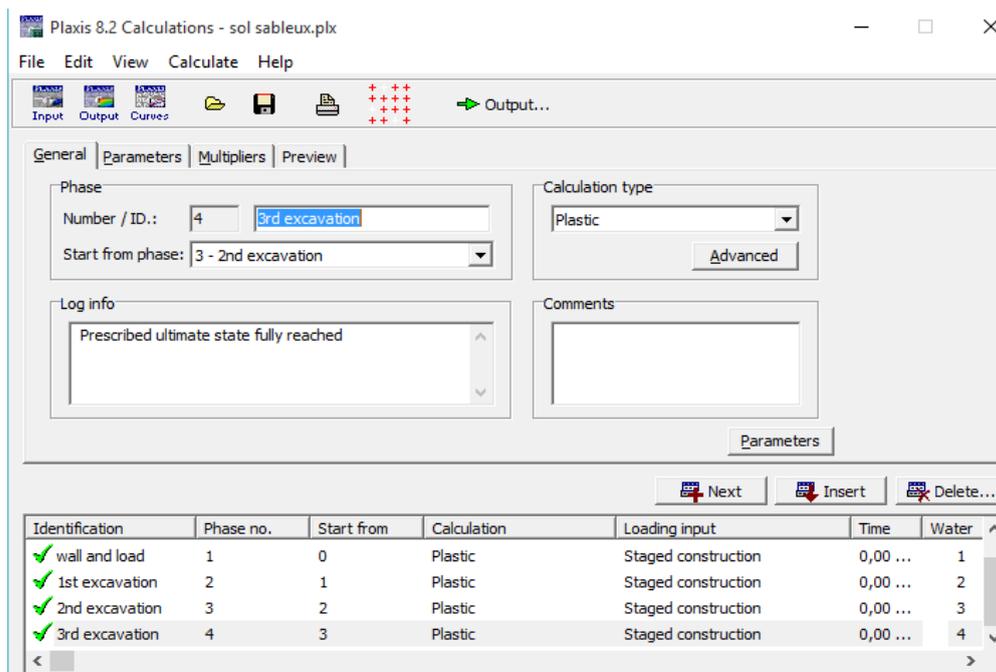


Figure 3-4 Le programme de calcul (Calculations)

3.2.3.3 Le programme de résultats(Output) :

Ce programme contient tous les éléments qui permettent de voir les résultats des données générées et des calculs d'éléments finis. Au début du programme de résultats, l'utilisateur doit choisir le modèle et la phase de calcula appropriée ou le numéro du pas pour lequel les résultats seront affichés. (figure3.5)

Menu des résultats: Le menu des résultats contient toutes les opérations et toutes les fonctionnalités du programme de résultats.

Fenêtres de résultats: Ce sont des fenêtres dans lesquelles des résultats particuliers sont affichés. Les fenêtres de résultats peuvent contenir des représentations du modèle, des représentations spéciales d'éléments du modèle ou des tableaux de résultats.

Barre d'outils: La barre d'outils contient des boutons qui peuvent servir de raccourcis aux éléments du menu. De plus, une case permet de sélectionner directement le type de représentation pour le résultat à afficher.

Barre d'état : La barre d'état contient des informations sur le type d'analyse (déformation plane ou axisymétrique) et la position du curseur de la souris dans le modèle

a) le menu des résultats: Le menu principal du programme Output contient des menus déroulants qui couvrent la plupart des options pour manipuler des fichiers, transférer des données, et voir des graphiques et des tableaux. Les principaux types de résultats d'un calcul aux éléments finis sont les contraintes et les déformations. Par conséquent, ces deux aspects constituent la majeure partie du menu des résultats.

Lorsqu'un modèle géométrique complet est affiché, le menu principal est constitué de différents menus: **File, Edit, View, Geometry, Deformations, Stresses, Window et Help.**

Le menu File : Permet d'ouvrir le projet dont les résultats vont être affichés, Permet de fermer la fenêtre de résultats active, définir le répertoire où les fichiers de projet de PLAXIS seront stockés par défaut et Permet de quitter le programme....

Le menu Edit : Permet de copier les résultats en cours dans le presse-papiers de Windows, Permet de modifier l'échelle de la valeur présentée et Permet de modifier les intervalles choisis pour représenter le résultat avec des contours ou des dégradés iso valeurs.

Le menu View : Permet de zoomer sur une partie rectangulaire pour avoir une vue plus détaillée, Permet de restaurer la représentation d'origine, Permet de voir un tableau de valeurs numériques pour le résultat affiché et Permet de voir les informations de calcul relatives au pas de calcul présenté.

Le menu Géométrie : Permet d'afficher tous les éléments de structure dans le Modèle, afficher les couleurs des matériaux dans le modèle et Permet d'afficher les éléments de sol dans le modèle

Le menu Déformations : contient diverses options qui permettent de visualiser les déplacements et les déformations du modèle aux éléments finis

Le menu Stresses : Le menu Stresses contient diverses options qui permettent de visualiser l'état de contrainte du modèle aux éléments finis

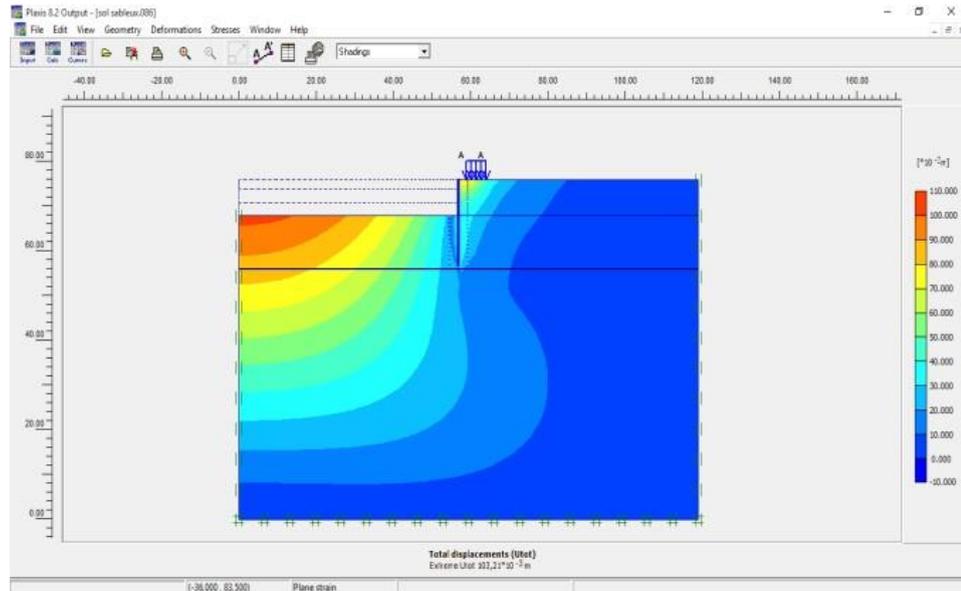


Figure 3-5Le programme de résultats (Output)

B. le programme courbe (curves) :

Ce programme contient toutes les options nécessaires pour générer des courbes charge déplacement, des chemins de contrainte et des courbes contraintes-déformations.

Après la sélection d'un projet existant, le graphique correspondant apparaît dans la la fenêtre principale.(Figure3.6) La fenêtre principale du programme **curves** contient les éléments suivants :

Le menu des courbes : Le menu des courbes contient toutes les options et les outils du programme **curves**. Certaines options sont aussi accessibles par des boutons placés dans la barre d'outils.

Les fenêtres des graphiques : Ce sont les fenêtres dans lesquelles les graphiques sont affichés. Plusieurs fenêtres de graphiques peuvent être ouvertes simultanément et chaque graphique peut contenir jusqu'à un maximum de dix courbes.

La barre d'outils : Cette barre contient des boutons qui peuvent être utilisés comme raccourci des options du menu.

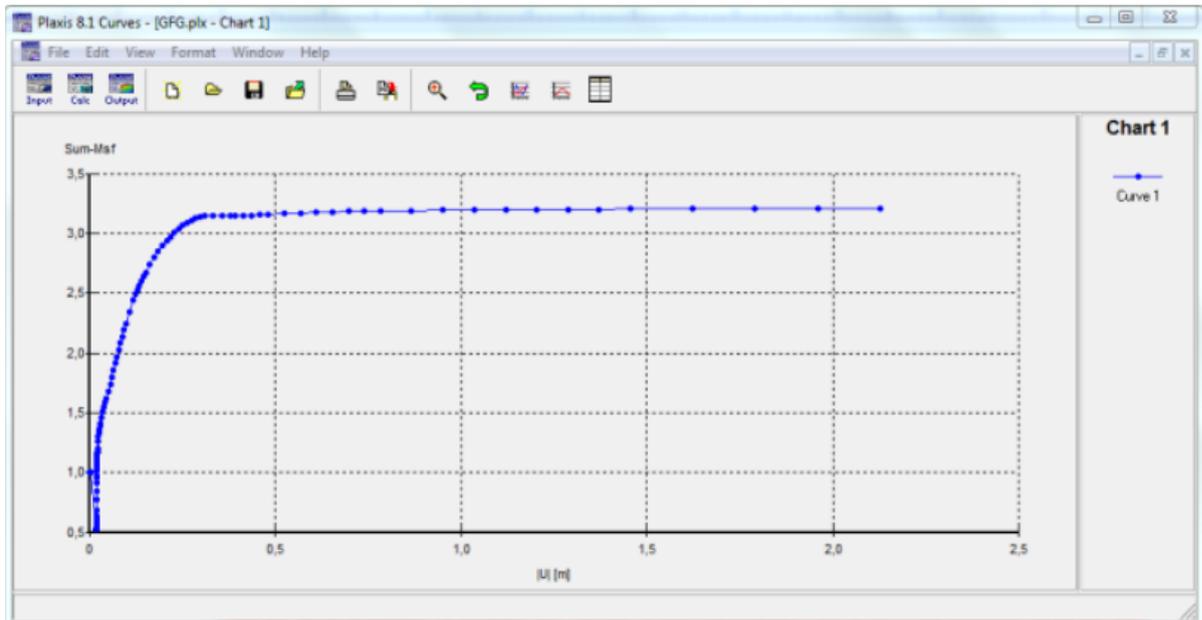


Figure 3-6 Le programme des courbes (curves)

3.3 Modèle de comportement de PLAXIS:

On a plusieurs modèles proposés par PLAXIS, qui permettent de représenter le comportement d'un sol

3.3.1 Modèle élastique linéaire

Un comportement élastique linéaire signifie que le tenseur de déformation reste proportionnel au tenseur des contraintes au cours du chargement. Un matériau est dit isotrope si toutes les directions sont équivalentes. Ce modèle comporte deux paramètres de rigidité élastique, le module d'Young E , et le coefficient de Poisson ν . Le modèle linéaire élastique est très limité pour simuler le comportement d'un sol. Il est utilisé principalement pour des structures rigides massives placées dans le sol. (Figure 3.7)

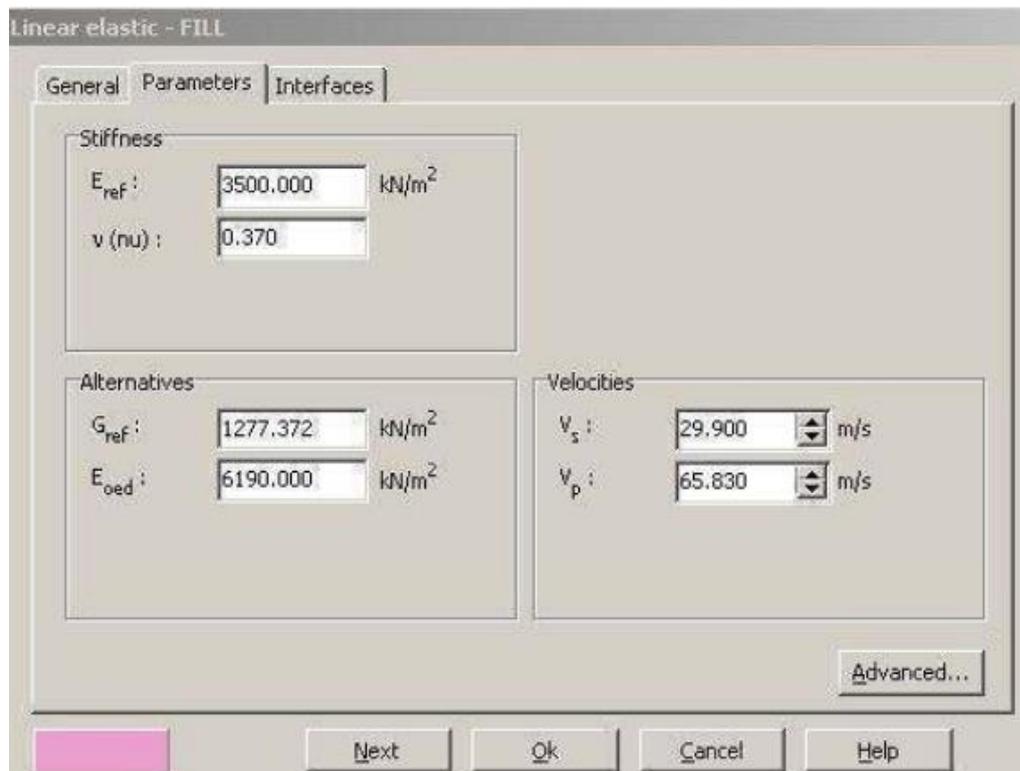


Figure 3-7 Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire

3.3.2 Modèle de Mohr-Coulomb:

Ce modèle implique 5 paramètres, à savoir le module de Young (E) et le coefficient de Poisson (ν) pour l'élasticité du sol, cohésion (C), angle de frottement (φ) et l'angle de dilatance (Ψ) pour la plasticité du sol. Le modèle de Mohr-Coulomb représente une approximation «de premier ordre» du comportement du sol ou des roches. Il est recommandé d'utiliser ce modèle pour une première analyse du problème considéré. (Figure 3.8)

The screenshot shows the 'Mohr-Coulomb - Lesson 1 - Sand' dialog box with three tabs: 'General', 'Parameters', and 'Interfaces'. The 'Parameters' tab is active, displaying the following fields:

Category	Parameter	Value	Unit
Stiffness	E_{ref}	1.300E+04	kN/m ²
	ν (nu)	0.300	
Strength	c_{ref}	1.000	kN/m ²
	φ (phi)	31.000	°
	ψ (psi)	0.000	°
Alternatives	G_{ref}	5000.000	kN/m ²
	E_{oed}	1.750E+04	kN/m ²

At the bottom right, there is an 'Advanced...' button. At the bottom center, there are 'Next', 'Ok', and 'Cancel' buttons.

Figure 3-8 Fenêtre des Paramètres du modèle de Mohr Coulomb

3.3.3 Modèle de sol avec écouissage (HardeningSoil Model):

C'est un modèle hyperbolique de type élasto-plastique intégré dans le logiciel PLAXIS. Ce modèle prend en compte l'écouissage en compression, pour simuler le compactage irréversible d'un sol sous le premier chargement en compression, il permet aussi de simuler le comportement des sables et des graviers, Une représentation du modèle HSM est représentée dans la (Figure 3.9)

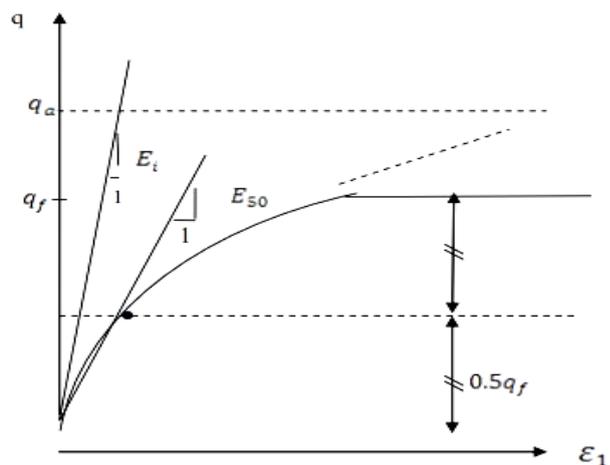


Figure 3-9 Relation σ - ϵ pour un essai triaxial du modèle HSM

Les paramètres du HSM sont représentés par la figure suivante : (Figure3.10)

Stiffness		Strength	
E_{50}^{ref} :	0.000	c_{ref} :	5.000
E_{oed}^{ref} :	0.000	φ (ph) :	22.000 °
E_{ur}^{ref} :	7111.000	ψ (psi) :	0.000 °
power (m) :	0.500		

Alternatives	
<input type="checkbox"/> Use alternatives	
C_c :	1.000E+10
C_s :	1.000E+10
e_{init} :	0.5000

Figure 3-10 Fenêtre des paramètres du HSM

3.3.4 Modèle pour les sols mous (Soft Soil Model):

Ce modèle (en abrégé SSM) est un modèle dérivé du Cam-Clay, il s'agit d'un modèle élasto-plastique avec une surface de charge. Sous la surface de charge, le matériau reste élastique, tandis que si le point représentatif de l'état de contrainte effectif atteint la surface de charge, alors des déformations plastiques apparaissent avec un comportement non réversible. Une surface associée, limite l'espace entre les états admissibles et non admissibles. Les paramètres du SSM sont représentés par la figure suivante : (Figure 3.11)

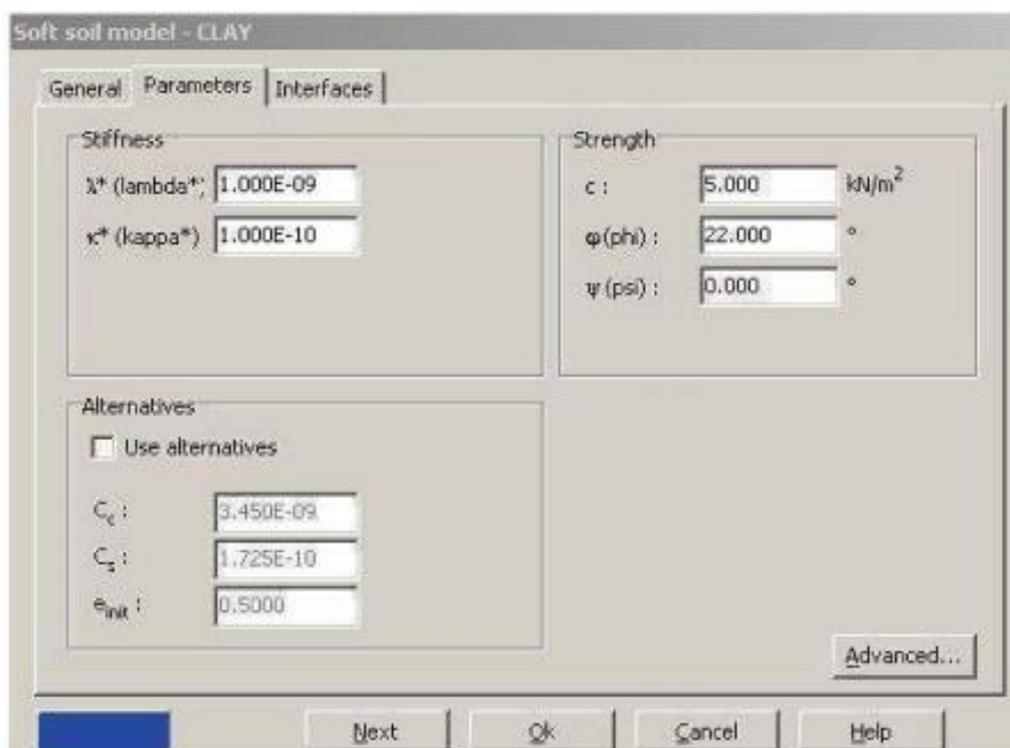


Figure 3-11 Fenêtre des paramètres du SSM

3.3.5 Modèle pour les roches fracturées (Jointed Rock Model) :

C'est un modèle élasto-plastique anisotrope, pour lequel le cisaillement plastique peut se produire seulement dans un nombre limité de directions de cisaillement. Ce modèle peut être utilisé pour simuler le comportement des roches stratifiées ou fracturées

3.3.6 Modèle défini par l'utilisateur:

Cette option permet de définir et d'utiliser des lois de comportement autres que les modèles standards de PLAXIS.

3.4 Conclusion :

L'objectif annoncé dans ce chapitre est de présenter brièvement le logiciel PLAXIS 2D, qui permet la simulation d'un projet réel complexe par un modèle numérique selon la nature du sol et le type d'ouvrage.

Cet exposé sur les différents modèles utilisés et sur la démarche de la modélisation avec le code PLAXIS, nous montre qu'il s'agit d'un logiciel qui se base sur la méthode aux éléments finis. Cette méthode reste théoriquement la plus satisfaisante puisqu'elle permet la modélisation des problèmes géotechniques complexes. Elle constitue un bon outil pour appréhender, d'une part les déplacements de l'écran de soutènements, et d'autre part le comportement du sol derrière le soutènement.

La simulation avec ce code PLAXIS nécessite l'introduction des différents paramètres, les caractéristiques des sols, de l'écran de soutènement et des ancrages, données liées à l'eau aux phases de la réalisation et aux coefficients de réaction des sols qu'il faut déterminer par une étude géotechnique. Certains de ces paramètres sont différents dans leur expressions, mais toujours reliés à des paramètres géotechniques classiques.

L'opérateur doit être capable de choisir un modèle de comportement qui dépend du problème posé (soutènement, tassement de remblai, glissement du terrain, fondation souple ou rigide, renforcement des terres...)

Chapitre4. ETUDE DU TASSEMENT EN SURFACE D'UNE FOUILLE SOUTENUE PAR UN ECRAN

4.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous étudions la variation du tassement en surface du sol à l'amont de l'écran, en cas d'absence de l'ouvrage (surcharge $q=0$). Sur la base des résultats obtenus à partir de la modélisation numérique par éléments finis en utilisant le logiciel « ZSwalls » (voir ANNEXE4). La (Figure 4.1) illustre un schéma du modèle rideau/sol avec les dimensions adoptées au maillage par éléments finis.

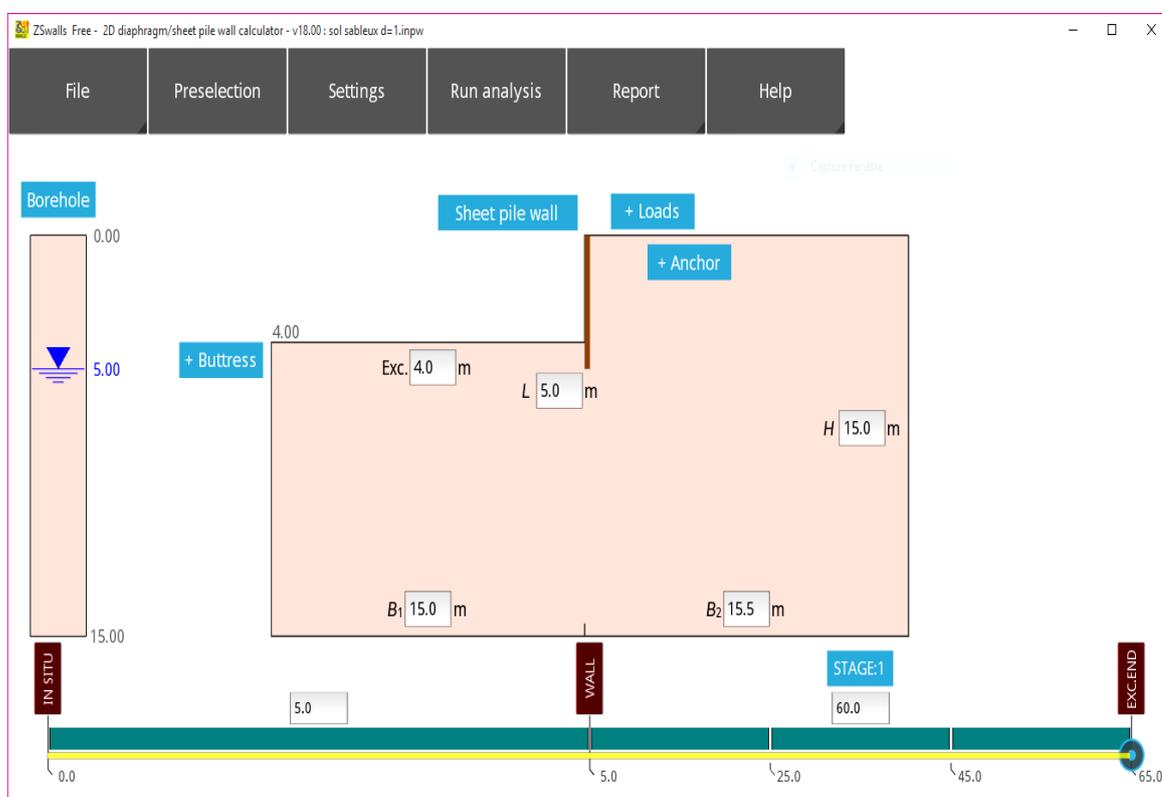


Figure 4-1 Fenêtre principale de ZSWalls

La fenêtre principale du logiciel contient une barre de différents menus utilisés pour analyser les séquences d'excavation et les murs de soutènement, et cela en introduisant les différentes caractéristiques du sol, de l'écran, du système du support ainsi que la hauteur de la fouille et de l'ancrage, comme le montre (la figure 4.1)

Nous traitons le cas de sable (lâche ; moyennement dense et dense), ainsi que le cas de l'argile (molle, ferme et raide), en envisageant quatre(4) variantes de rideaux $H=4, 6, 8, 10\text{m}$, ce qui

4 | ETUDE DU TASSEMENT EN SURFACE D'UNE FOUILLE SOUTENUE PAR UN ECRAN

correspond à des rideaux auto-stables caractérisés respectivement par un élancement $H/D=2$, 1.5, 1.6 et 1.25.

En se basant sur (la figure 4-2), l'objectif de cette étude est de Déterminer :

- Le Tassement s_0 en contact du mur.
- Le Tassement maximum s_{max} et sa position par rapport à la tête du rideau,
- La Distance de stabilisation du tassement X.

Cette étude nous permet en principe de déterminer la zone utile de tassement, ainsi que l'effet de réalisation d'une excavation sur la surface du sol.

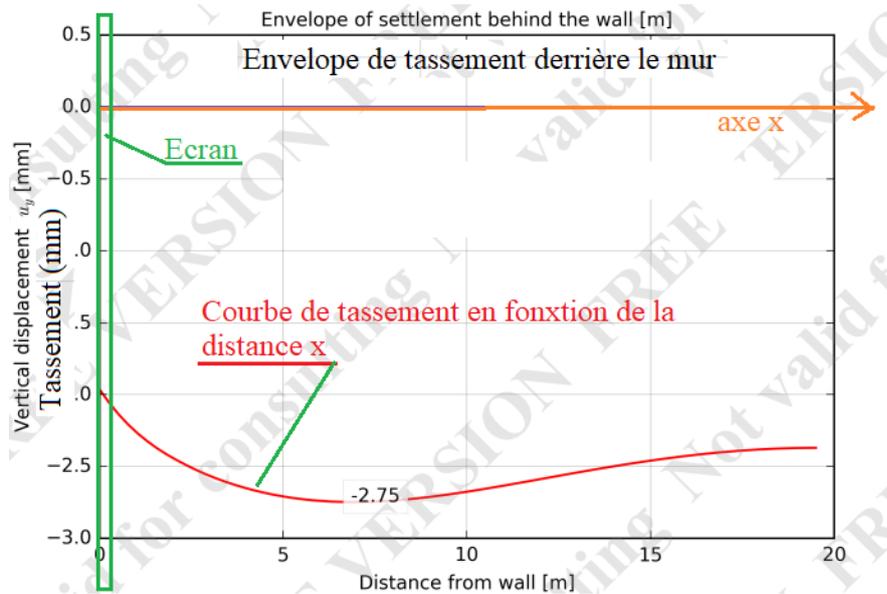


Figure 4-2 courbe de tassement en fonction de la distance x

4.2 Etude du tassement d'un sol sableux en amont du rideau

4.2.1 Sable lâche $\varphi = 30^\circ$

- La 1^{er} variante : $H=4$ m et $D=2$ m ($H/D=2$)

D'après le (tableau 4.1), le tassement normalisée en contact du mur $\frac{s_0}{D}=0.0003$ % à la distance normalisée $\frac{x}{H}=0$. Le tassement normalisée maximum $\frac{s_{max}}{D}=0.0475$ % à la distance normalisée $\frac{x}{H}=4.375$.

La distance normalisée de stabilisation du tassement $\frac{x}{H}=3.75$.

4 | ETUDE DU TASSEMENT EN SURFACE D'UNE FOUILLE SOUTENUE PAR UN ECRAN

Tableau 4.1 la variation du tassement de surface $s(x)/D$ en fonction de x/H

La Distance x(m)	Tassement s(x)en (mm)	Tassement normalisée s/D(%)	Distance normalisée x/H
0	0,005	0,0003	0
2,5	0,005	0,0003	0,625
5	0,2021	0,0101	1,25
7.5	0,2181	0,0109	1,875
10	0,5798	0,0289	2,5
12.5	0,7978	0,0398	3,125
15	0,9096	0,0454	3,75
17,5	0,95	0,0475	4,375

- La 2eme variante : H=6m et D=4m (H/D=1.5)

D'après le (tableau 4.2), le tassement normalisée en contact du mur $\frac{s_0}{D}=0.4022\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H}=0$. Le tassement normalisée maximum $\frac{s_{max}}{D}=0.4022\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H}=0$, donc $\frac{s_0}{D}=\frac{s_{max}}{D}=0.4022\%$. Enfin, la distance de stabilisation du tassement est $\frac{x}{H}=4.16$.

Tableau 4.2 la variation du tassement de surface $s(x)/D$ en fonction de x/H

La Distance x(m)	Tassement s(x)en (mm)	Tassement normalisée s/D(%)	Distance normalisée x/H
0	16,09	0,4022	0
2,5	10,521	0,2630	0,4167
5	5,3819	0,1345	0,8333
7.5	0,7639	0,0190	1,25
10	0,2083	0,0052	1,6667
12.5	0,0347	0,0008	2,083
15	0,7292	0,0182	2,5
17,5	1,2847	0,0321	2,9167
20	1,6667	0,0416	3,3333
22,5	1,9444	0,0486	3,75
25	2,1181	0,0529	4,16
27,5	2,2222	0,0555	4,58
30	2,2917	0,0572	5,00

4 | ETUDE DU TASSEMENT EN SURFACE D'UNE FOUILLE SOUTENUE PAR UN ECRAN

- La 3eme variante : H=8m et D=5m (H/D=1.6)

D'après le (tableau 4.3), le tassement normalisée en contact du mur $\frac{s_0}{D}=1.717\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H}=0$, le tassement normalisée maximum $\frac{s_{max}}{D}=1.717\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H}=0$, et par conséquent $\frac{s_0}{D} = \frac{s_{max}}{D} = 1.717\%$. La distance normalisée de stabilisation du tassement $\frac{x}{H}=4.06$.

Tableau 4.3 la variation du tassement de surface $s(x)/D$ en fonction de x/H

La Distance x(m)	Tassement s(x)en (mm)	Tassement normalisée s/D(%)	Distance normalisée x/H
0	85,85	1,717	0
2,5	67,042	1,3408	0,3125
5	45,35	0,907	0,625
7.5	24,789	0,4957	0,9375
10	10,282	0,2056	1,25
12.5	0,1408	0,00281	1,563
15	0,1408	0,00281	1,875
17,5	0,8451	0,01690	2,1875
20	1,6901	0,03380	2,5
22,5	2,3944	0,04788	2,8125
25	2,8169	0,05633	3,125
27,5	3,2394	0,06478	3,4375
30	3,5211	0,07042	3,75
32,5	3,8028	0,07605	4,06
35	3,8028	0,07605	4,375
37,5	4,0845	0,08169	4,68

- La 4eme variante : H=10m et D=8m (H/D=1.25)

D'après le (tableau 4.4), le tassement normalisée en contact du mur $\frac{s_0}{D}=2.51\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H}=0$, et le tassement normalisé maximum $\frac{s_{max}}{D}=2.5105\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H}=0$, donc $\frac{s_0}{D} = \frac{s_{max}}{D}=2.51\%$. On constate que la distance de stabilisation du tassement $\frac{x}{H}=4.50$.

Tableau 4.4 *la variation du tassement de surface $s(x)/D$ en fonction de x/H*

La Distance x(m)	Tassement s(x)en (mm)	Tassement normalisée s/D(%)	Distance normalisée x/H
0	200,84	2,5105	0
2,5	165,22	2,0652	0,25
5	125,36	1,567	0,5
7,5	82,609	1,0321	0,75
10	42,754	0,5344	1
12,5	17,029	0,2128	1,25
15	5,0725	0,0634	1,5
17,5	4,3478	0,0543	1,75
20	4,3478	0,0543	2
22,5	4,7101	0,0588	2,25
25	6,1594	0,0769	2,5
27,5	7,2464	0,0905	2,75
30	7,971	0,0996	3
32,5	8,6957	0,1086	3,25
35	9,4203	0,1177	3,5
37,5	10,145	0,1268	3,75
40	10,507	0,1313	4
42,5	10,87	0,1358	4,25
45	11,232	0,1404	4,5
47,5	11,594	0,1449	4,75
50	11,594	0,1449	5
52,5	11,594	0,1449	5,25

On voit d'après le (tableau 4.4) que le tassement du sol sableux lâche en contact du rideau dépend de l'élancement du rideau H/D. Il augmente pratiquement de 0 à 2.5% lorsque l'élancement H/D diminue de 2 à 1.25.

Tableau 4.5 Tassements maximaux (s_{max}/D) pour les quatre variantes

La hauteur de la fouille(m)	la fiche D du rideau (m)	Elancement H/D	Le tassement normalisé maximum (%)	La distance normalisée
4	2	2	0.0475	4.375
6	4	1.5	0.4022	0
8	5	1.6	1.717	0
10	8	1.25	2.5105	0

Concernant le tassement maximum, on remarque d'après le (tableau4.5) et la (Figure 4.3) qu'à l'exception de la première variante correspondant à un élancement H/D égal à 2, le tassement en contact du rideau est lui-même le tassement maximum, et qu'il augmente avec la hauteur de la fouille. Mais il diminue lorsque l'élancement du rideau H/D augmente.

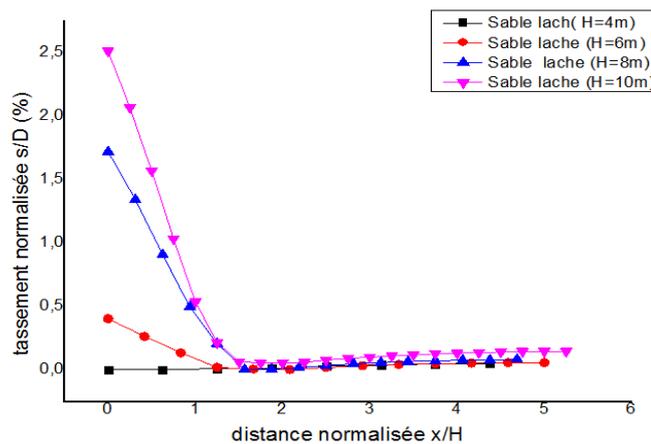


Figure 4-3 la variation du tassement de surface $s(x)/D$ en fonction de x/H

Comparaison :

Pour le sable lâche, on note que le tassement maximum est le même que le tassement en contact de l'écran (à la position $X/H=0$), il devient faible quand on s'éloigne de l'écran, sauf dans la 1^{er} variante (H=4m) où il augmente lorsque on s'éloigne de l'écran.

4.2.2 Sable Moyennement dense $\phi = 35^\circ$

- La 1^{er} variante : H=4m et D=1m (H/D=4)

D'après le (tableau 4.6), le tassement normalisée en contact du mur $\frac{s_0}{D}=0.001 \%$

4 | ETUDE DU TASSEMENT EN SURFACE D'UNE FOUILLE SOUTENUE PAR UN ECRAN

à la distance normalisée $\frac{x}{H} = 0$, le tassement normalisée maximum $\frac{s_{max}}{D} = 0.084\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H} = 3.75$, et enfin la distance de stabilisation du tassement $\frac{x}{H} = 3.12$.

Tableau 4.6 Variation du tassement de surface $s(x)/D$ en fonction de x/H

La Distance x(m)	Tassement s(x)en (mm)	Tassement normalisée s/D(%)	Distance normalisée x/H
0	0,0102	0,0010	0
2.5	0,0102	0,0010	0,625
5	0,0102	0,0010	1,25
7.5	0,3214	0,0321	1,875
10	0,6428	0,0643	2,5
12.5	0,7908	0,0791	3,125
15	0,84	0,084	3,75

- La 2eme variante : H=6m et D=2m (H/D=3)

D'après le (tableau4.7), le tassement normalisé en contact du mur $\frac{s_0}{D} = 0\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H} = 0$. Le tassement normalisée maximum $\frac{s_{max}}{D} = 0.101\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H} = 4.1667$. On constate que la distance de stabilisation du tassement $\frac{x}{H} = 3.75$.

Tableau 4.7 la variation du tassement de surface $s(x)/D$ en fonction de x/H

La Distance x(m)	Tassement s(x)en (mm)	Tassement normalisée s/D(%)	Distance normalisée x/H
0	0	0	0
2.5	0	0	0.41
5	0	0	0,83
7.5	0	0	1,25
10	0,0694	0,0035	1,66
12.5	0,8333	0,0417	2,08
15	1,3611	0,0681	2,5
17,5	1,6944	0,0847	2,9167
20	1,8889	0,0945	3,3333
22,5	2	0,1	3,75
25	2,02	0,101	4,1667

4 | ETUDE DU TASSEMENT EN SURFACE D'UNE FOUILLE SOUTENUE PAR UN ECRAN

- La 3eme variante : H=8m D=4m (H/D=2)

D'après le (tableau 4.8), le tassement normalisé en contact du mur $\frac{s_0}{D}=0.2375\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H}=0$, le tassement normalisée maximum $\frac{s_{max}}{D}=0.2375\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H}=0$, donc $\frac{s_0}{D}=\frac{s_{max}}{D}=0.2375\%$. On remarque que la distance de stabilisation du tassement $\frac{x}{H}=3.75$.

Tableau 4.8 la variation du tassement de surface $s(x)/D$ en fonction de x/H

La Distance x(m)	Tassement s(x)en (mm)	Tassement normalisée s/D(%)	Distance normalisée x/H
0	9,5	0,2375	0
2,5	6,6304	0,1658	0,3125
5	3,4511	0,0863	0,625
7.5	0,0543	0,0014	0,9375
10	0,0543	0,0014	1,25
12.5	0,0543	0,0014	1,5625
15	0,0543	0,0014	1,875
17,5	1,2228	0,0305	2,1875
20	2,0924	0,0523	2,5
22,5	2,7446	0,0686	2,8125
25	3,2337	0,0808	3,125
27,5	3,6141	0,0904	3,4375
30	3,8587	0,0965	3,75
32,5	4,089	0,1023	4,0625
35	4,1033	0,0513	4,375

- La 4eme variante : H=10met D=6m (H/D=1.67)

D'après le (tableau 4-9), le tassement normalisé en contact du mur $\frac{s_0}{D}=1.1255\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H}=0$. On note aussi que le tassement normalisée maximum $\frac{s_{max}}{D}=1.1255\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H}=0$, donc $\frac{s_0}{D}=\frac{s_{max}}{D}=1.1255\%$. Enfin, la distance de stabilisation du tassement $\frac{x}{H}=3.75$.

Tableau 4.9 *la variation du tassement de surface $s(x)/D$ en fonction de x/H*

La Distance x(m)	Tassement s(x)en (mm)	Tassement normalisée s/D(%)	Distance normalisée x/H
0	67,53	1,1255	0
2,5	51,84	0,864	0,25
5	37,551	0,6258	0,5
7.5	23,673	0,3945	0,75
10	1,4286	0,0238	1
12.5	0,102	0,0017	1,25
15	0,102	0,0017	1,5
17,5	0,102	0,0017	1,75
20	0,102	0,0017	2
22,5	0,9184	0,0153	2,25
25	2,2449	0,0374	2,5
27,5	3,3673	0,0561	2,75
30	4,1837	0,0697	3
32,5	4,898	0,0816	3,25
35	5,4082	0,0901	3,5
37,5	5,9184	0,0986	3,75
40	6,3265	0,1054	4
42,5	6,5365	0,1089	4,25
45	6,6327	0,1105	4,5

On voit d'après le (tableau 4.10) que le tassement du sol sableux moyennement dense en contact du rideau dépend de l'élancement du rideau H/D . Il augmente pratiquement de 0 à 1.1 % lorsqu' H/D diminue de 4 à 1.67.

4 | ETUDE DU TASSEMENT EN SURFACE D'UNE FOUILLE SOUTENUE PAR UN ECRAN

Tableau 4.10 regroupant les tassements maximaux (s_{max}/D) pour les quatre variantes

La hauteur de la fouille(m)	la fiche D(m)	Elancement H/D	Le tassement normalisé maximum (%)	La distance normalisée
4	1	4	0.084	3.75
6	2	3	0.101	4.167
8	4	2	0.2375	0
10	6	1.67	1.1255	0

Concernant le tassement maximum, on remarque d'après le (tableau 4.10) et la (figure 4.4) qu'à l'exception de la première et la deuxième variantes correspondant à un élancement H/D égal à 4 et 3, le tassement en contact du rideau est lui-même le tassement maximum, et qu'il augmente avec la hauteur de la fouille. Mais il diminue lorsque l'élancement du rideau H/D augmente.

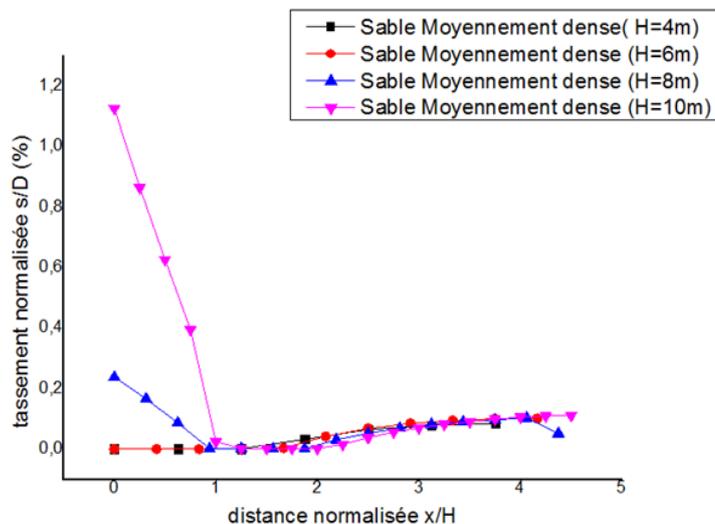


Figure 4-4 la variation du tassement de surface $s(x)/D$ en fonction x/H

Comparaison :

Concernant le sable moyennement dense, l'augmentation du tassement est liée à l'augmentation de la profondeur de l'excavation. Pour la 1^{er} et la 2^{ème} variante plus on s'éloigne de l'écran plus le tassement sera grand. Contrairement à la 3^{ème} et la 4^{ème} variante le tassement maximum est à la position ($x/H=0$) juste derrière l'écran de soutènement (en contact avec l'écran).

4.2.3 Sable dense $\varphi = 40^\circ$

- la 1^{ER} variante : H=4m et D=1m (H/D=4)

D'après le (tableau 4.11), le tassement normalisée en contact du mur $\frac{s_0}{D}=0.0005\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H}=0$. Le tassement normalisée maximum $\frac{s_{max}}{D}=0.086\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H}=3.75$. Enfin, on note que la distance de stabilisation du tassement $\frac{x}{H}=3.75$

Tableau 4.11 la variation du tassement de surface $s(x)/D$ en fonction de x/H

La Distance x(m)	Tassement s(x)en (mm)	Tassement normalisée s/D(%)	Distance normalisée x/H
0	0,005	0,0005	0
2.5	0,0182	0,0018	0,625
5	0,0313	0,0031	1,25
7.5	0,009	0,0009	1,875
10	0,6875	0,0688	2,5
12.5	0,8572	0,0867	3,125
15	0,86	0,086	3,75

- La 2eme variante : H=6m et D=1m (H/D=6)

D'après le (tableau 4.12), on note que le tassement normalisée en contact du mur $\frac{s_0}{D}=0.002\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H}=0$, le tassement normalisée maximum $\frac{s_{max}}{D}=0.177\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H}=3.3330$ Enfin, la distance de stabilisation du tassement $\frac{x}{H}=3.33$.

Tableau 4.12 la variation du tassement de surface $s(x)/D$ en fonction de x/H

La Distance x(m)	Tassement s(x)en (mm)	Tassement normalisée s/D(%)	Distance normalisée x/H
0	0,0204	0,0020	0
2.5	0,0306	0,0031	0,417
5	0,0408	0,0041	0,83333
7.5	0,0102	0,0010	1,25
10	0,4694	0,0469	1,6667
12.5	1,0306	0,1031	2,083
15	1,3980	0,3980	2,5
17,5	1,5918	0,1592	2,9167
20	1,77	0,177	3,33

- La 3eme variante : H=8m et D=2m (H/D=4)

D'après le (tableau4.13), le tassement normalisée en contact du mur $\frac{s_0}{D}=0.0017\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H}=0$, le tassement normalisée maximum $\frac{s_{max}}{D}=0.168\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H}=3.75$. La distance normalisée de stabilisation du tassement $\frac{x}{H}=3.75$.

Tableau 4.13 la variation du tassement de surface $s(x)/D$ en fonction de x/H

La Distance x(m)	Tassement s(x)en (mm)	Tassement normalisée s/D(%)	Distance normalisée x/H
0	0.033	0.0017	0
2.5	0.033	0.0017	0,3125
5	0.033	0.0017	0,625
7.5	0.033	0.0017	0,9375
10	0.033	0.0017	1,25
12.5	0.10	0.005	1,5625
15	1.1	0.055	1,875
17,5	1.9	0.095	2,1875
20	2.483	0.1242	2,5
22,5	2.900	0.145	2,8125
25	3.15	0.1575	3,125
27,5	3.3	0.165	3,4375
30	3.72	0.186	3,75

4 | ETUDE DU TASSEMENT EN SURFACE D'UNE FOUILLE SOUTENUE PAR UN ECRAN

- La 4eme variante : H=10m et D=4m (H/D=2.5)

D'après le (tableau4.14), le tassement normalisé en contact du mur $\frac{s_0}{D}=0.0019$ % à la distance normalisée $\frac{x}{H}= 0$, et le tassement normalisé maximum $\frac{s_{max}}{D}=0.1488$ % à la distance normalisée $\frac{x}{H}= 4.25$. Enfin, notons que la distance de stabilisation du tassement $\frac{x}{H}= 3.75$.

Tableau 4.14 la variation du tassement de surface $s(x)/D$ en fonction de x/H

La Distance x(m)	Tassement s(x)en (mm)	Tassement normalisée s/D(%)	Distance normalisée x/H
0	0,078	0,0019	0
2,5	1,3672	0,0342	0,25
5	0,1563	0,0039	0,5
7.5	0,1719	0,0043	0,75
10	0,1719	0,0043	1
12.5	0,1719	0,0043	1,25
15	0,1719	0,0043	1,5
17,5	0,1719	0,0043	1,75
20	1,2109	0,0302	2
22,5	2,4219	0,0605	2,25
25	3,3984	0,0850	2,5
27,5	4,1797	0,1045	2,75
30	4,7656	0,1191	3
32,5	5,1953	0,1298	3,25
35	5,5078	0,1377	3,5
37,5	5,7422	0,1435	3,75
40	5,94	0,1487	4
42,5	5,95	0,1488	4,25

On voit d'après le (tableau 4.15) que le tassement du sol sableux dense dépend de l'élanement du rideau H/D. Il augmente pratiquement de 0 à 0.2% lorsqu'H/D diminue de 4 à 2.5.

Tableau 4.15 Tassements maximaux (s_{max}/D) pour les quatre variantes

hauteur de la fouille(m)	fiche D(m)	Elancement H/D	tassement normalisé maximum (%)	distance normalisée
4	1	4	0.086	3.75
6	1	6	0.177	3.33
8	2	4	0.186	3.75
10	4	2.5	0.148	4.25

Concernant le tassement maximum, on remarque d'après le (tableau 4.15) et la (Figure 4.5) que le tassement en contact du rideau n'est pas le tassement maximum, et qu'il augmente avec la hauteur de la fouille. Mais il diminue lorsque l'élanement du rideau H/D augmente.

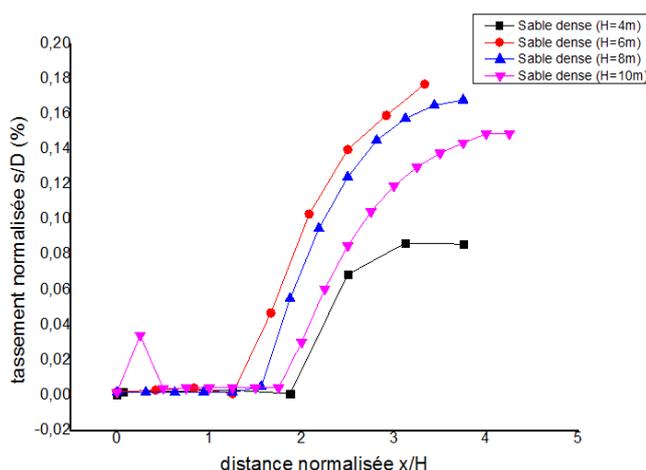


Figure 4-5 la variation du tassement de surface $s(x)/D$ en fonction de x/H

Comparaison :

Pour le sable dense, dans les quatre variantes le tassement en contact avec l'écran est faible, puis il augmente progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne la valeur maximale.

On remarque que les valeurs du tassement maximum pour les quatre hauteurs sont assez proches ainsi que leur position, ($s_{max}/D=0.086\%$ à la position 3.75 ; $s_{max}/D=0.177$ à la position 3.33 ; $s_{max}/D=0.186$ à la position 3.75 ; $s_{max}/D=0.148$ à la position 4.25). On remarque que le tassement augmente avec la hauteur de la fouille, et diminue quand l'élanement H/D augmente.

En conclusion, en comparant les différents types de sable (lâche, moyennement dense et dense), nous concluons que la position de tassement maximum peut être soit en contact avec

4 | ETUDE DU TASSEMENT EN SURFACE D'UNE FOUILLE SOUTENUE PAR UN ECRAN

l'écran($x/H=0$) comme nous l'avons remarqué dans le cas de sable lâche, soit plus éloignée (cas du sable dense). Donc, la hauteur de la fouille et le type de sol sont des facteurs affectant le tassement maximum du sol et sa position.

A titre d'application pratique des résultats obtenus, considérons l'exemple suivant : Lors de la conception du soutènement d'une fouille sableuse dense haute de 5 m par un rideau de palplanches auto-stable fiché à 1 m, on se demande quel est le tassement maximum de la surface à l'amont du rideau, et quelle est sa position ?

D'après le (tableau 4.15), on voit que le tassement maximum normalisé pour une hauteur de 5 m et une fiche de 1 m est de $(0.086+0.177)/2=0.131\%$, ce qui donne un tassement maximum de 1.3 mm, à une distance normalisée de $(3.75+3.33)/2=3.54$, soit à $3.54 \times 5=17.7$ m.

4.3 Etude du tassement d'un sol argileux saturé en amont du rideau

4.3.1 Argile molle $C_u=30\text{Kpa}$:

- 1 e variante $H=4\text{m}$ et $D=3\text{m}$ ($H/D = 1.33$)

D'après le (tableau 4.16), le tassement normalisée en contact du mur $\frac{S_0}{D}=0.103\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H} = 0$, le tassement normalisée maximum $\frac{s_{\max}}{D} = 0.145\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H} = 4.375$. Enfin, on note que la distance de stabilisation du tassement $x = 2.5$.

Tableau 4.16 Tassement normalisé pour une hauteur de fouille de 4m

La distance x	Distance normalisée x/H	Tassement s(x) (mm)	tassement normalisé s(x)/D
0	0	3.095	$S_0/D = 0.103$
2.5	0.625	3.698	0.123
5	1.25	3.986	0.133
7.5	1.875	4.192	0.14
10	2.5	4.308	0.144
12.5	3.125	4.35	$S_{\max}/D = 0.145$
15	3.75	4.3425	0.144
17.5	4.375	4.3288	0.144
20	5	4.3082	0.143

- 2eme variante $H=5\text{m}$ et $D=2\text{m}$ ($H/D = 2.5$)

Tableau 4.17 Tassement normalisé pour une hauteur de fouille de 5m

La distance x (m)	Distance normalisée x/H	Tassement s(x) (mm)	tassement normalisé s(x)/D
0	0	4	S0/D = 0.2
2.5	0.5	4.845	0.242
5	1	5.168	0.258
7.5	1.5	5.369	0.268
10	2	5.477	0.273
12.5	2.5	5.48	Smax /D= 0.274
15	3	5.477	0.273
17.5	3.5	5.472	0.273
20	4	5.44	0.272

D'après le (tableau 4.17), le tassement normalisé en contact du mur $\frac{s_0}{D} = 0.2\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H} = 0$, le tassement normalisé maximum $\frac{s_{max}}{D} = 0.274\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H} = 2.5$. La distance de stabilisation du tassement $\frac{x}{H} = 2.0$

- 3eme variante H= 6m et D= 1m (H/D = 6)

D'après le (tableau 4.18), le tassement normalisé en contact du mur $\frac{s_0}{D} = 0.552\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H} = 0$. Notons aussi que le tassement normalisé maximum $\frac{s_{max}}{D} = 0.684\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H} = 2.083$. Enfin, la distance normalisée de stabilisation du tassement $\frac{x}{H} = 2.91$.

Tableau 4.18 Tassement normalisé pour une hauteur de fouille de 6m

La distance x (m)	Distance normalisée x/H	Le tassement s(x) (mm)	tassement normalisé s(x)/D
0	0	5.524	S0/D = 0.552
0.5	0.417	6.591	0.659
1	0.833	6.792	0.679
1.5	1.25	6.811	0.681
2	1.667	6.805	0.68
2.5	2.083	6.84	Smax/D = 0.684
3	2.5	6.72	0.672
3.5	2.917	6.664	0.666
4	3.333	6.622	0.662

4 | ETUDE DU TASSEMENT EN SURFACE D'UNE FOUILLE SOUTENUE PAR UN ECRAN

On voit d'après le (tableau 4.19) et la (Figure 4.6) que le tassement maximum du sol argileux mou dépend de l'élançement du rideau H/D . Il augmente pratiquement de 0.145 à 0.684 lorsqu' H/D diminue de 3.12 à 2.08.

Tableau 4.19 *Tassements maximums de chaque variante rideau/sol*

H(m)	D(m)	Smax/D	H/D	Position
4	3	0.145	1.33	3.125
5	2	0.274	2.5	2.5
6	1	0.684	6	2.083

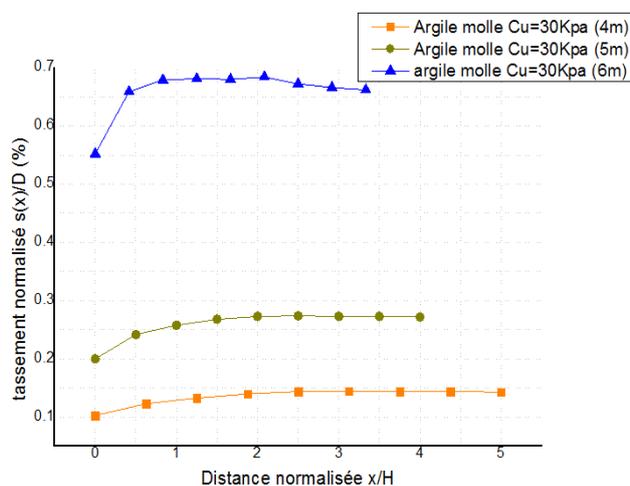


Figure 4-6 *Tassement normalisé en fonction de la distance normalisée de chaque hauteur*

Comparaison :

On remarque qu'en augmentant la hauteur de la fouille le tassement augmente, pour la position du tassement maximal ça se différencie d'une hauteur à l'autre.

Le tassement de la fouille de la hauteur 4m est petit par rapport aux deux autres hauteurs malgré que son ancrage soit plus grand donc on constate que la hauteur de la fouille est le facteur principal vis-à-vis du tassement. On remarque aussi que le tassement maximum normalisé augmente avec l'élançement H/D du rideau.

4.3.2 Argile ferme Cu = 50Kpa :

- 1^{er} variante H = 4m et D = 3m (H/D = 1.33)

D'après le (tableau 4.20), le tassement normalisée en contact du mur $\frac{s_0}{D} = 0.09\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H} = 0$, le tassement normalisée maximum $\frac{s_{max}}{D} = 0.105\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H} = 1.25$. Enfin, la distance de stabilisation du tassement $\frac{x}{H} = 2.50$

Tableau 4.20 Tassement normalisé pour une hauteur de fouille de 4m

La distance x (m)	Distance normalisé x/H	Le tassement s(x) (mm)	Tassement normalisée s(x)/D
0	0	2.7	S0/D = 0.09
2.5	0.625	3.06	0.102
5	1.25	3.15	Smax/D = 0.105
7.5	1.875	3.12	0.104
10	2.5	3.06	0.102
12.5	3.125	3	0.1
15	3.75	2.94	0.098

- 2eme variante H = 6m et D = 1m (H/D = 6)

D'après le (tableau 4.21), le tassement normalisée en contact du mur $\frac{s_0}{D} = 0.39\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H} = 0$. On note aussi que le tassement normalisé maximum $\frac{s_{max}}{D} = 0.648\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H} = 2.5$, et que la distance de stabilisation du tassement $\frac{x}{H} = 2.50$.

Tableau 4.21 Tassement normalisé pour une hauteur de fouille de 6m

La distance x (m)	Distance normalisé x/H	Le tassement s(x) (mm)	Tassement normalisé s(x)/D
0	0	3.9	S0/D = 0.39
2.5	0.416	5.13	0.513
5	0.833	5.76	0.576
7.5	1.25	6.15	0.615
10	1.667	6.36	0.636
12.5	2.083	6.46	0.646
15	2.5	6.48	Smax/D = 0.648
17.5	2.92	6.45	0.645
20	3.33	6.55	0.644

4 | ETUDE DU TASSEMENT EN SURFACE D'UNE FOUILLE SOUTENUE PAR UN ECRAN

- 3eme variante $H = 8\text{m}$ et $D = 1\text{m}$ ($H/D = 8$)

D'après le (tableau 4.22), le tassement normalisée en contact du mur $\frac{s_0}{D} = 0.709\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H} = 0$. Notons aussi que le tassement normalisée maximum $\frac{s_{\max}}{D} = 0.684\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H} = 1.12$. Enfin, la distance de stabilisation du tassement $\frac{x}{H} = 2.81$.

Tableau 4.22 Tassement normalisé pour une hauteur de fouille de 8m

La distance x (m)	Distance normalisé x/D	Le tassement s(x) (mm)	Tassement normalisé s(x)/D
0	0	7.09	$S_0/D = 0.709$
2.5	0.31	8.9	0.89
5	0.625	9.83	0.983
7.5	0.935	10.38	1.038
10	1.25	10.76	1.076
12.5	1.56	11.024	1.1024
15	1.875	11.143	1.1143
17.5	2.18	11.19	1.119
20	2.5	11.20	$S_{\max}/D = 1.12$
22.5	2.81	11.16	1.116
25	3.12	11.15	1.115
27.5	3.43	11.14	1.114

- 4eme variante $H = 10\text{m}$ et $D = 1\text{m}$ ($H/D = 10$)

D'après le (tableau 4.23), le tassement normalisée en contact du mur $\frac{s_0}{D} = 1.365\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H} = 0$, le tassement normalisée maximum $\frac{s_{\max}}{D} = 1.785\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H} = 2.25$. Enfin, la distance de stabilisation du tassement $\frac{x}{H} = 2.75$.

Tableau 4.23 *Tassement normalisé pour une hauteur de fouille de 10m*

La distance x (m)	Distance normalisée x/H	Le tassement s(x) (mm)	Tassement normalisé s(x)/D
0	0	13.65	S0/D = 1.365
2.5	0.25	16.05	1.605
5	0.5	17.2	1.72
7.5	0.75	17.69	1.769
10	1	17.6	1.767
12.5	1.25	17.7	1.77
15	1.5	17.79	1.779
17.5	1.75	17.84	1.784
20	2	17.849	1.7849
22.5	2.25	17.85	Smax/D = 1.785
25	2.5	17.8	1.78
27.5	2.75	17.7	1.77
30	3	17.68	1.768
32.5	3.25	17.68	1.768

On voit d'après le (tableau 4.24) et la (figure 4.7) que le tassement du sol argileux ferme maximum dépend de l'élanement du rideau H/D. Il augmente pratiquement de 0.104 à 1.785% lorsqu'H/D diminue de 1.875 à 2.25

Tableau 4.24 *Tassements maximums des différentes variantes rideau/sol*

H (m)	D (m)	Smax/D	H/D	Position x/H
4	3	0.104	1.33	1.875
6	1	0.648	6	2.5
8	1	1.12	8	2.5
10	1	1.785	10	2.25

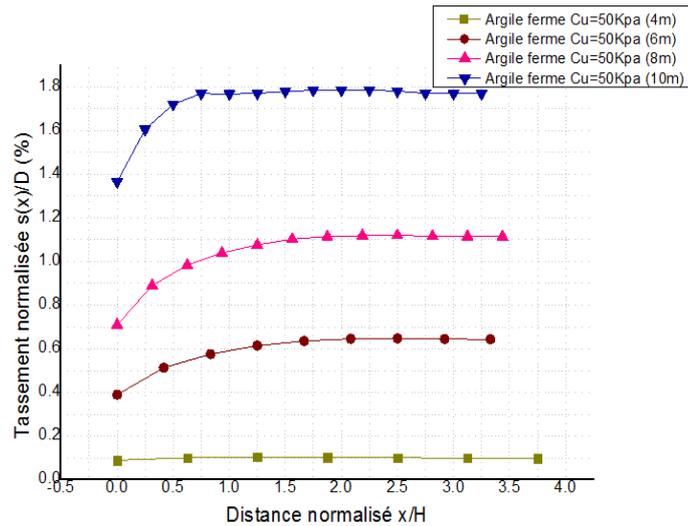


Figure 4-7 Variation du tassement normalisé en fonction de la distance normalisée

Comparaison :

Le tassement est très grand dans la fouille de la hauteur 10m par rapport aux autres car on remarque qu'on en augmentant la hauteur d'une fouille le tassement augmente et donc la stabilité de l'écran est faible. On remarque aussi que le tassement maximum normalisé augmente avec l'élancement H/D du rideau.

4.3.3 Argile raide Cu = 100Kpa :

- 1^{er} variante H = 4m et D= 3m (H/D = 1.33)

D'après le (tableau 4-25), le tassement normalisée en contact du mur $\frac{s_0}{D} = 0.095\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H} = 0$, le tassement normalisée maximum $\frac{s_{max}}{D} = 0.1447\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H} = 3.75$. Enfin, notons que la distance de stabilisation du tassement $\frac{x}{H} = 4.37$.

4 | ETUDE DU TASSEMENT EN SURFACE D'UNE FOUILLE SOUTENUE PAR UN ECRAN

Tableau 4.25 Tassement normalisé pour une hauteur de fouille de 4m

La distance x (m)	Distance normalisée x/H	Le tassement s(x) (mm)	Tassement normalisé s(x)/D
0	0	2.94	S0/D = 0.095
2.5	0.625	3.495	0.1165
5	1.25	3.852	0.1284
7.5	1.875	4.101	0.1367
10	2.5	4.254	0.1418
12.5	3.125	4.308	0.1436
15	3.75	4.341	Smax/D = 0.1447
17.5	4.375	4.29	0.143
20	5	4.269	0.1423

- 2eme variante H = 6m et D = 1m (H/D = 6)

D'après le (tableau 4.26), le tassement normalisée en contact du mur $\frac{s_0}{D} = 0.3698\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H} = 0$, le tassement normalisée maximum $\frac{s_{max}}{D} = 0.645\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H} = 2.5$.

La distance de stabilisation du tassement $\frac{x}{H} = 2.50$.

Tableau 4.26 Tassement normalisé pour une hauteur de fouille de 6m

La distance x (m)	Distance normalisée x/H	Le tassement s(x) (mm)	Tassement normalisé s(x)/D
0	0	3.698	S0/D = 0.3698
2.5	0.4167	4.945	0.4945
5	0.833	5.63	0.563
7.5	1.25	6.068	0.6068
10	1.667	6.328	0.6328
12.5	2.083	6.438	0.6438
15	2.5	6.45	Smax/D = 0.645
17.5	2.9167	6.45	0.645
20	3.33	6.424	0.6424

4 | ETUDE DU TASSEMENT EN SURFACE D'UNE FOUILLE SOUTENUE PAR UN ECRAN

- 3eme variante $H = 8\text{m}$ et $D = 1\text{m}$ ($H/D = 8$)

D'après le (tableau 4.27), le tassement normalisée en contact du mur $\frac{s_0}{D} = 0.6\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H} = 0$. Notons aussi que le tassement normalisée maximum $\frac{s_{\max}}{D} = 1.1116\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H} = 2.5$, et enfin la distance de stabilisation du tassement $\frac{x}{H} = 2.50$.

Tableau 4.27 Tassement normalisé pour une hauteur de fouille de 8m

La distance x (m)	Distance normalisée x/H	Le tassement s(x) (mm)	Tassement normalisé s(x)/D
0	0	6	$S_0/D = 0.6$
2.5	0.3125	8	0.8
5	0.625	9.149	0.9149
7.5	0.9375	9.908	0.9908
10	1.25	10.437	1.0437
12.5	1.5625	10.782	1.0782
15	1.875	10.989	1.0989
17.5	2.1875	11.08	1.108
20	2.5	11.116	$S_{\max}/D = 1.1116$
22.5	2.8125	11.112	1.1112
25	3.125	11.112	1.1112
27.5	3.4375	11.103	1.1103

- 4eme variante $H = 10\text{m}$ et $D = 1\text{m}$ ($H/D = 10$)

D'après le (tableau 4.28), le tassement normalisée en contact du mur $\frac{s_0}{D} = 0.913\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H} = 0$

Le tassement normalisée maximum $\frac{s_{\max}}{D} = 1.706\%$ à la distance normalisée $\frac{x}{H} = 2.75$

La distance de stabilisation du tassement $\frac{x}{H} = 2.50$.

Tableau 4.28 *Tassement normalisé pour une hauteur de fouille de 10m*

La distance x (m)	Distance normalisée x/H	Le tassement s(x) (mm)	Tassement normalisé s(x)/D
0	0	9.1304	S0/D = 0.91304
2.5	0.25	11.696	1.1696
5	0.5	13.348	1.3348
7.5	0.75	14.522	1.4522
10	1	15.348	1.5348
12.5	1.25	15.913	1.5913
15	1.5	16.435	1.6435
17.5	1.75	16.739	1.6739
20	2	16.87	1.687
22.5	2.25	17	1.7
25	2.5	17.043	1.7043
27.5	2.75	17.06	Smax/D = 1.706
30	3	17.06	1.706
32.5	3.25	17.087	1.706

On voit d'après le (tableau 4.29) et la (figure 4.8) que le tassement maximum du sol argileux raide dépend de l'élançement du rideau H/D. Il augmente pratiquement de 0.145 à 1.71% lorsque H/D diminue de 1.33 à 10.

Tableau 4.29 *Tassements maximums des différentes variantes rideau/sol*

H(m)	D(m)	Smax/D	H/D	Position
4	3	0.145	1.33	3.75
6	1	0.645	6	2.5
8	1	1.111	8	2.5
10	1	1.706	10	2.75

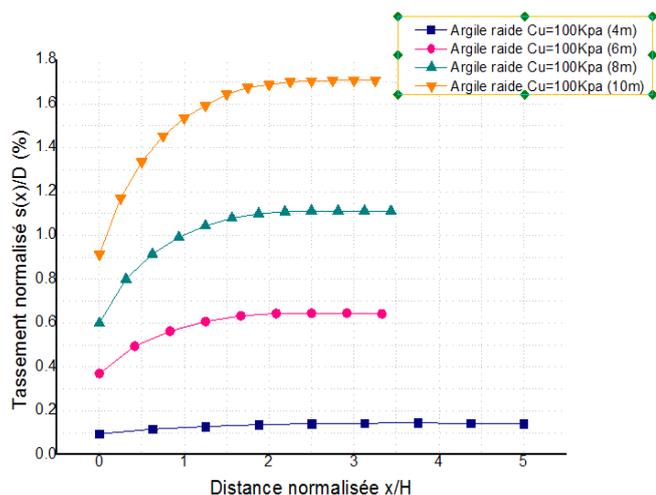


Figure 4-8 Variation du tassement normalisé en fonction de la distance normalisé

Comparaison :

Identiquement aux autres types d'argile, le tassement augmente en fonction de la hauteur de la fouille, et on remarque la différence considérable du tassement par rapport aux quatre différentes hauteurs de la fouille. On remarque aussi que le tassement maximum normalisé augmente avec l'élanement H/D du rideau.

Comparaison entre les trois sols :

On observant le tassement de chaque sol argileux, on remarque que celui de l'argile molle est bien plus grand par rapport aux autres vis-à-vis de sa cohésion ($C_u = 30\text{Kpa}$), donc en augmentant la cohésion le tassement diminue par contre quand on a une augmentation de la hauteur de la fouille le tassement augmente considérablement même si on augmente la fiche..

Pour ce qui est de la position du tassement max ça se différencie un peu, tout dépend de la hauteur de la fouille. On peut conclure que :

- Le degré de compacité du sol argileux (mou, ferme, raide) type du sol est considéré comme le critère déterminant vis-à-vis de la forme du tassement,
- Le tassement max se produit à proximité du soutènement et décroît progressivement en s'éloignant du soutènement.

Concernant le tassement en contact du mur, il est considérablement différent du tassement maximum et on remarque que les courbes ont une forme croissante jusqu'au tassement max ; ce

dernier commence à diminuer jusqu'à ce qu'il atteigne la distance de stabilisation. Enfin, lorsque l'élançement augmente on a une augmentation du tassement.

A titre d'application pratique, considérons en phase de conception du type de soutènement d'une fouille argileuse saturée et ferme dont la valeur moyenne de la cohésion non drainée est de 50 kPa, à ouvrir sur une hauteur de 7 m, la variante de soutènement par un rideau de palplanches autostable dont la fiche minimale lui assurant la stabilité est de 1 m. On se demande quel est le tassement en contact du rideau, le tassement maximum et la zone de stabilisation du tassement, sachant que le tassement admissible en surface du rideau est de 20 mm ?

D'après les tableaux 4-21 et 4-22, le tassement en surface en contact du rideau pour une hauteur de 6m est de 0.39% de D, alors que celui pour H=8 m est de 0.709%. Pour une hauteur de fouille de 7 m, le tassement normalisé est de $(0.39+0.709)/2=0.55\%$ de D, soit de 5.5 mm.

Selon ces deux tableaux, la zone de stabilisation du tassement s'étend sur $(2.5+2.81)/2=5.3$ de H, soit de $5.31 \times 7=37.2$ m.

D'après le tableau 4-24, le tassement maximum normalisé est $(0.648+1.12)/2=1.77\%$, soit un tassement de 17.7 mm, à une distance normalisée de 2.5H, soit de 2.5 m de la tête du rideau. On voit que le critère de tassement est respecté, ce qui permet de sélectionner cette variante de soutènement.

4.4 Conclusion :

D'après les différentes études numériques réalisées dans ce chapitre, on constate que le tassement du sol en amont d'un rideau auto-stable dépend de la nature du sol (sol pulvérulent ou sol fin saturé) et de son degré de compacité (lâche, dense, mou, ferme, raide, etc), ainsi que de l'élançement H/D du rideau. On a obtenu des résultats sous forme de grandeurs normalisées (sans dimensions) et regroupés sous forme de tableaux et graphes, qui peuvent être utilisées en phase préliminaire d'un projet de soutènement de fouille pour estimer le tassement du sol en amont causé par le creusement de la fouille soutenue par un rideau autostable (sans présence de tirants). En cas où le tassement estimé s'avère non admissible, la solution du soutènement par rideau autostable est à abandonner, en optant par exemple par celle du rideau ancré par des tirants ou un autre type de soutènement tel qu'une paroi moulée.

Chapitre5. ETUDE DE L'INTERACTION ECRAN/OUVRAGE AL'AMONT

5.1 Introduction :

Toute construction à la surface d'un sol a besoin d'une étude afin de vérifier l'équilibre global entre les réactions du sol et l'ensemble des charges apportées par la structure. L'influence de la structure dépend de sa charge et de la raideur verticale du sol, car ceci peut provoquer le tassement. Dans ce chapitre on fera un calcul par éléments finis via Zswalls (voir ANNEXE5), Il s'agit de déterminer pour une fiche D donnée et une hauteur H donnée, le tassement maximum s_{max} pour une surcharge q donnée à l'mont du rideau. On fait augmenter graduellement q jusqu'à ce que l'écran devienne instable et on tracera la courbe qui représente la surcharge normalisé $q/(\gamma H)$ en fonction du tassement maximum normalisé s_{max}/D .

5.2 Présentation du modèle d'éléments finis

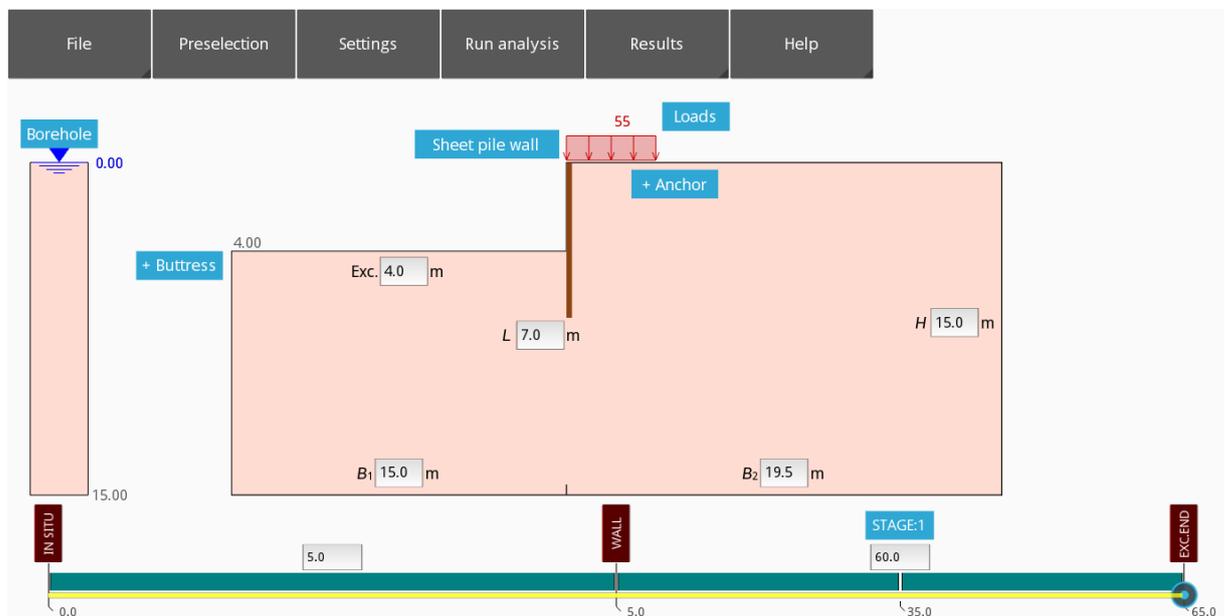


Figure 5-1 Exemple d'un modèle du rideau de palplanche et de la fouille dans la fenêtre principale de ZSWalls

La (Figure 5.1) représente un exemple d'une excavation soutenu par un rideau auto stable dans un sol en présence d'un ouvrage à l'amont de la fouille.

5.3 Présentation et discussion des résultats :

5.3.1 Courbe de chargement à l'amont d'un rideau soutenant une fouille d'argile saturée

5.3.1.1 Argile molle $C_u = 30\text{Kpa}$:

- Pour $H = 4\text{ m}$, $D = 3\text{ m}$ et ($H/D = 1.33$)

On cherche le tassement maximum pour une Fouille de hauteur 4 m dans une argile saturée molle $C_u = 30\text{ kPa}$ ayant un poids volumique saturé de 20kN/m^3 , à soutenir par un rideau auto-stable ayant une fiche de 3 m. A l'amont de la fouille existe un ouvrage reposant sur un radier général exerçant une pression verticale qu'on peut augmenter jusqu'à la valeur ultime $q = 33\text{ kPa}$.

Tableau 5.1 tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisée

Surcharge (Kpa)	Tassement maximum (mm)	Surcharge normalisé $\frac{q}{\gamma_{sat} \cdot H}$	Tassement maximum normalisé $\frac{s_{max}}{D}(\%)$
0	3.095	0	0.103
10	3.99	0.125	0.133
15	4.14	0.1875	0.138
20	4.56	0.25	0.152
25	5.1	0.3125	0.17
30	6.33	0.375	0.211
33	21.48	0.4125	0.716

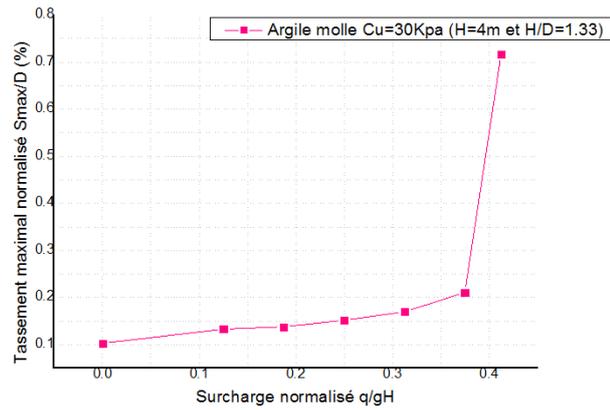


Figure 5-2 Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée

On voit d'après la (Figure 5.2) que le tassement maximum normalisé est de 0.716%, soit correspondant à un tassement de 21.42 mm. En phase de conception de la fouille, il faut donc vérifier si ce tassement est admissible pour l'ouvrage ou non avant de réaliser cette fouille et le rideau. Si on suppose que l'ouvrage existant est un bâtiment courant tel que son tassement admissible est égal à 50 mm : Tassement maximum = 21.42 mm < Tassement admissible = 50 mm. Donc ce tassement est admissible pour l'ouvrage et il est possible d'adopter les dimensions du rideau étudié pour soutenir la fouille.

- Pour $H = 5\text{ m}$, $D = 2\text{ m}$ et ($H/D = 2.5$):

On cherche le tassement maximal pour une fouille de hauteur 5 m dans une argile saturée molle $C_u = 30\text{ kPa}$ ayant un poids volumique saturé de 20 kN/m^3 , à soutenir par un rideau autostable ayant une fiche de 2 m. A l'amont de la fouille existe un ouvrage reposant sur un radier général exerçant une pression verticale $q = 21\text{ kPa}$.

Tableau 5.2 tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisée

Surcharge (Kpa)	Tassement maximum (mm)	Surcharge normalisée $\frac{q}{\gamma_{sat} \cdot H}$	Tassement maximal normalisé $\frac{s_{max}}{D}$ (%)
0	2.7	0	0.09
4	5.5	0.04	0.275
9	5.6	0.09	0.28
14	5.98	0.14	0.299
18	6.87	0.18	0.3435
21	9.34	0.21	0.467

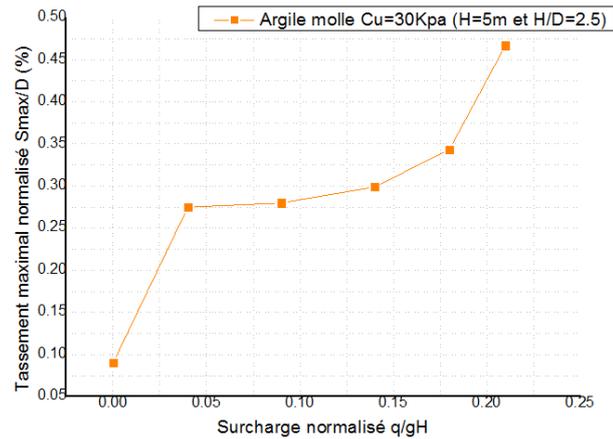


Figure 5-3 Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée

On voit d'après la (Figure 5.3) que le tassement maximum normalisé est de 0.467%, soit correspondant à un tassement de 9.34 mm. En phase de conception de la fouille, il faut donc vérifier si ce tassement est admissible pour l'ouvrage ou non avant de réaliser cette fouille et le rideau. Si le tassement admissible est égal à 50 mm : Tassement maximum = 9.34 mm < Tassement admissible = 50 mm

- Pour $H = 6 \text{ m}$, $D = 1 \text{ m}$ et $H/D = 6$:

On cherche le tassement maximal pour une fouille de hauteur 6 m dans une argile saturée molle $C_u = 30 \text{ kPa}$ ayant un poids volumique saturé de 20 kN/m^3 , à soutenu par un rideau autostable ayant une fiche de 1 m. A l'amont de la fouille existe un ouvrage reposant sur un radier général exerçant une pression verticale augmentant progressivement jusqu'à $q = 18 \text{ kPa}$.

Tableau 5.3 Tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisée

Surcharge (kpa)	Tassement maximum (mm)	Surcharge normalisée $\frac{q}{\gamma_{sat} \cdot H}$	Tassement maximal normalisé $\frac{S_{max}}{D}$ (%)
0	5.524	0	0.5524
4	7.08	0.033	0.708
6	7.55	0.05	0.755
8	8.2	0.067	0.82
10	9.44	0.083	0.944
18	25.21	0.15	2.521

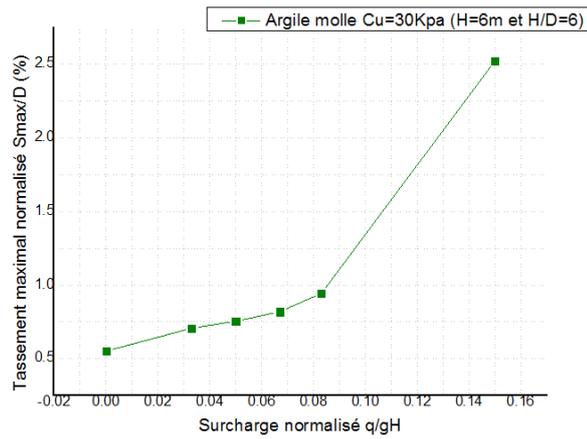


Figure 5-4 Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée

On voit d'après la (Figure 5.4) que le tassement maximum normalisé est de 2.521%, soit correspondant à un tassement de 25.21mm. En phase de conception de la fouille, il faut donc vérifier si ce tassement est admissible pour l'ouvrage ou non avant de réaliser cette fouille et le rideau. Le tassement admissible est égal à 50 mm. Tassement maximum = 25.21 mm < Tassement admissible = 50 mm

Donc ce tassement est admissible pour l'ouvrage donc il peut satisfaire les conditions de la stabilité de cet ouvrage

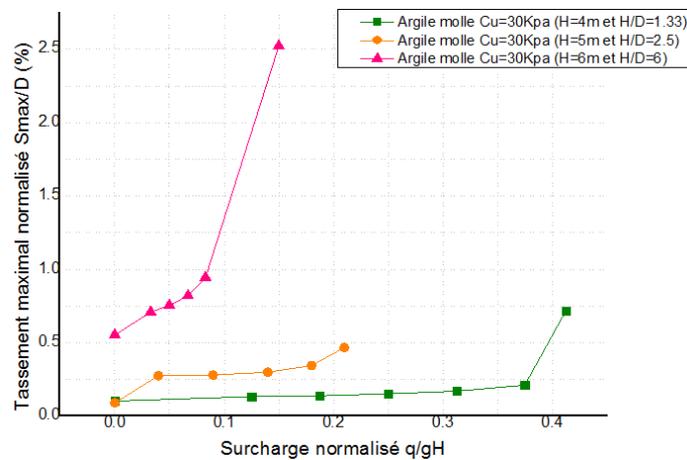


Figure 5-5 Compilation des courbes du tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée

5.3.1.2 Argile ferme Cu = 50Kpa :

- Pour H= 4m, D = 3m et (H/D = 1.33) :

On cherche le tassement maximal pour une fouille de hauteur 4 m dans une argile saturée ferme Cu= 50 kPa ayant un poids volumique saturé de 20kN/m³, à soutenir par un rideau autostableyant

une fiche de 3 m. A l'amont de la fouille existe un ouvrage reposant sur un radier général exerçant une pression verticale pouvant augmenter jusqu'à la valeur ultime $q = 85 \text{ kPa}$

Tableau 5.4 Tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisée

Surcharge(Kpa)	Tassement maximum (mm)	Surcharge normalisée $\frac{q}{\gamma_{sat} * H}$	Tassement normalisé $\frac{s_{max}}{D}(\%)$
15	3.45	0.1875	0.115
25	4.02	0.3125	0.134
35	4.61	0.4375	0.154
45	5.22	0.5625	0.174
55	5.87	0.6875	0.196
65	6.56	0.8125	0.219
75	8.66	0.9375	0.289
85	451.98	1.0625	15.066

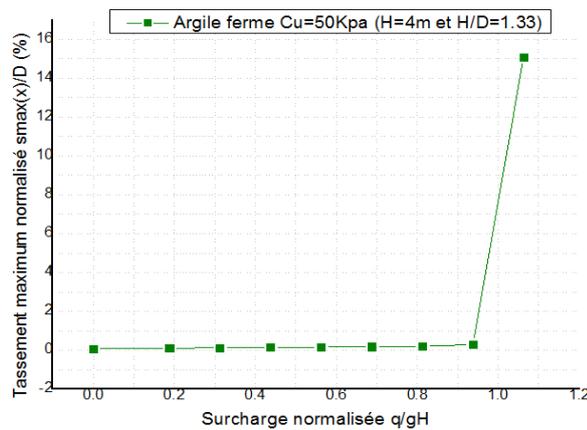


Figure 5-6 Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée

On voit d'après la (Figure 5.6) que le tassement maximum normalisé est de 15.066%, soit correspondant à un tassement de 451.98 mm. En phase de conception de la fouille, il faut donc vérifier si ce tassement est admissible pour l'ouvrage ou non avant de réaliser cette fouille et le rideau. Si le tassement admissible est égal à 50 mm, on aura Tassement maximum = 451.98 mm > Tassement admissible = 50 mm

Ce tassement n'est pas admissible pour l'ouvrage donc il peut provoquer des désordres de la structure et les structures voisine.

- Pour $H = 6\text{m}$, $D = 1\text{m}$ et $(H/D= 6)$:

On cherche le tassement maximal pour une fouille de hauteur 6 m dans une argile saturée ferme $C_u = 50\text{ kPa}$, à soutenir par un rideau autostable ayant une fiche de 1 m. A l'amont de la fouille existe un ouvrage reposant sur un radier général exerçant une pression verticale augmentant jusqu'à $q = 58\text{ kPa}$

Tableau 5.5 Tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisée

Surcharge (Kpa)	Tassement maximum (mm)	Surcharge normalisée $\frac{q}{\gamma_{sat} \cdot H}$	Tassement normalisé $\frac{s_{max}}{D}(\%)$
10	5.65	0.0833	0.565
20	5.72	0.167	0.572
40	7.51	0.333	0.751
50	9.28	0.417	0.928
57	13.63	0.475	1.363
58	18.42	0.483	1.843

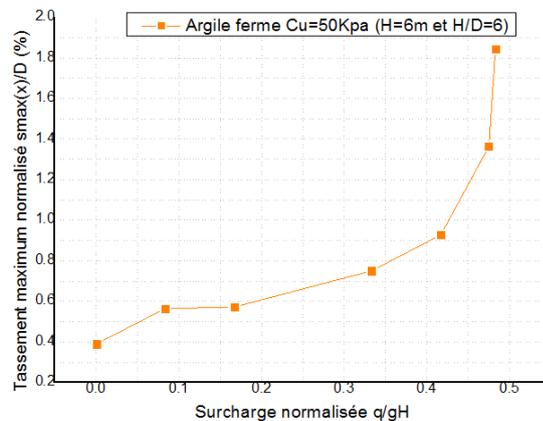


Figure 5-7 Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée

On voit d'après la (Figure 5.7) que le tassement maximum normalisé est de 1.843%, soit correspondant à un tassement de 18.42 mm. En phase de conception de la fouille, il faut donc vérifier si ce tassement est admissible pour l'ouvrage ou non avant de réaliser cette fouille et le rideau. Le tassement admissible est égal à 50 mm

$$\text{Tassement maximum} = 18.42\text{ mm} < \text{Tassement admissible} = 50\text{ mm}$$

Donc ce tassement est admissible pour l'ouvrage donc il peut satisfaire les conditions de la stabilité de cet ouvrage. En augmentant la charge on remarque une augmentation du tassement.

- Pour $H=8\text{m}$, $D=1\text{m}$ et $(H/D=8)$:

On cherche le tassement maximal pour une fouille de hauteur 8 m dans une argile saturée ferme à soutenir par un rideau auto-stable ayant une fiche de 1 m. A l'amont de la fouille existe un ouvrage reposant sur un radier général exerçant une pression verticale augmentant progressivement jusqu'à la valeur ultime $q=41\text{ kPa}$.

Tableau 5.6 tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisée

Surcharge (Kpa)	Tassement maximum (mm)	Surcharge normalisée $\frac{q}{\gamma_{sat} * H}$	Tassement normalisé $\frac{s_{max}}{D}(\%)$
7	9.76	0.04375	0.976
15	9.99	0.09375	0.999
25	11.31	0.15625	1.131
35	14.22	0.21875	1.422
40	23.9	0.25	2.39
41	29.48	0.25625	2.948

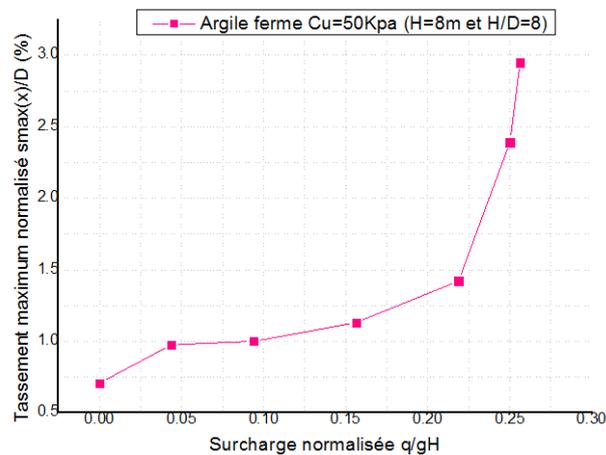


Figure 5-8 Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée

On voit d'après la (Figure 5.8) que le tassement maximum normalisé est de 2.948%, soit correspondant à un tassement de 29.48 mm. En phase de conception de la fouille, il faut donc vérifier si ce tassement est admissible pour l'ouvrage ou non avant de réaliser cette fouille et le

rideau. Le tassement admissible est égal à 50 mm. Tassement maximum = 29.48 mm < Tassement admissible = 50 mm

Donc, ce tassement est admissible pour l'ouvrage donc il peut satisfaire les conditions de la stabilité de cet ouvrage.

- Pour H = 10m, D= 1m et (H/D = 10):

On cherche le tassement maximal pour une fouille de hauteur 10 m dans une argile saturée ferme à soutenir par un rideau auto-stable ayant une fiche de 1 m. A l'amont de la fouille existe un ouvrage reposant sur un radier général exerçant une pression verticale croissante jusqu'à $q = 18$ kPa

Tableau 5.7 Tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisée

Surcharge(Kpa)	Tassement maximum (mm)	Surcharge normalisée $\frac{q}{\gamma_{sat} * H}$	Tassement normalisé $\frac{s_{max}}{D}$ (%)
4	17.38	0.02	1.738
8	18.66	0.04	1.866
10	19.51	0.05	1.951
14	21.97	0.07	2.197
16	26.01	0.08	2.601
18	30.28	0.09	3.028

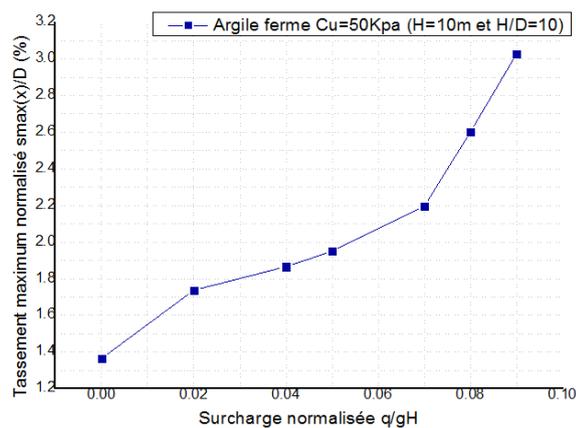


Figure 5-9 Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée

On voit d'après la (Figure 5.9) que le tassement maximum normalisé est de 3.028%, soit correspondant à un tassement de 30.28 mm. En phase de conception de la fouille, il faut donc vérifier si ce tassement est admissible pour l'ouvrage ou non avant de réaliser cette fouille et le

rideau. Le tassement admissible est égal à 50 mm. Le tassement maximum = 30.28 mm < Tassement admissible = 50 mm. Donc ce tassement est admissible pour l'ouvrage donc il peut satisfaire les conditions de la stabilité de cet ouvrage.

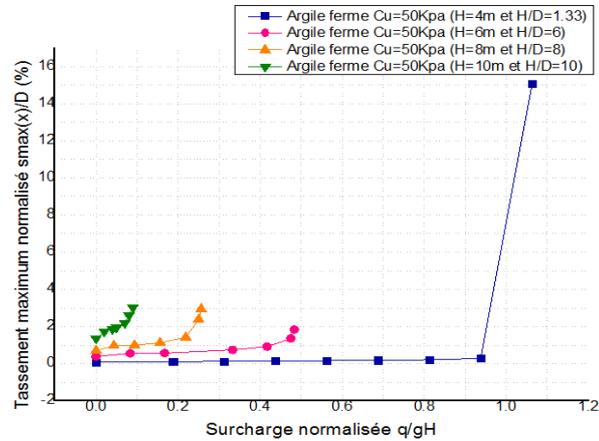


Figure 5-10 Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée de toutes les hauteurs

5.3.1.3 Argile raide Cu = 100Kpa :

- Pour H = 4m, D = 3m et (H/D = 1.33) :

On cherche le tassement maximal pour une fouille de hauteur 4 m dans une argile saturée raide Cu= 100 kPa ayant un poids volumique saturé de 20kN/m³, à soutenir par un rideau auto-stable ayant une fiche de 3 m. A l'amont de la fouille existe un ouvrage reposant sur un radier général exerçant une pression verticale croissante jusqu'à la valeur ultime q= 210 kPa.

Tableau 5.8 Tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisée

Surcharge q (Kpa)	tassement maximum (mm)	Surcharge normalisée $\frac{q}{\gamma_{sat} \cdot H}$	Tassement normalisé $\frac{s_{max}}{D}$ (%)
0	2.94	0	0.095
10	3.29	0.125	0.11
60	6.1	0.75	0.203
90	7.83	1.125	0.261
120	9.62	1.5	0.321
150	11.53	1.875	0.384
190	26.64	2.375	0.888
200	53.79	2.5	1.793
210	190.13	2.625	6.338

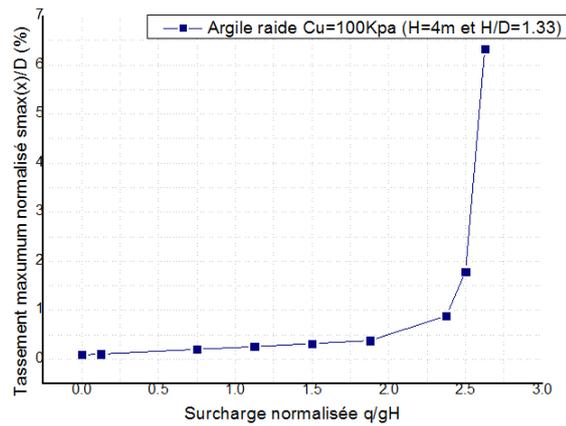


Figure 5-11 Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée

On voit d'après la (Figure 5.11) que le tassement maximum normalisé est de 6.338%, soit correspondant à un tassement de 190.13 mm. En phase de conception de la fouille, il faut donc vérifier si ce tassement est admissible pour l'ouvrage ou non avant de réaliser cette fouille et le rideau. Le tassement admissible est égal à 50 mm. Puisque le tassement maximum = 190.13 mm > Tassement admissible = 50 mm, ce tassement n'est pas admissible pour l'ouvrage donc il peut provoquer des désordres de la structure et les structures voisine.

- Pour H = 6m, D = 1m et (H/D=6) :

On cherche le tassement maximal pour une fouille de hauteur 6 m dans une argile saturée raide $C_u = 100$ kPa ayant un poids volumique saturé de 20 kN/m^3 , à soutenir par un rideau auto-stable ayant une fiche de 1 m. A l'amont de la fouille existe un ouvrage reposant sur un radier général exerçant une pression verticale $q = 163$ kPa

Tableau 5.9 Tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisée

Surcharge q (Kpa)	Tassement maximum (mm)	Surcharge normalisée $\frac{q}{\gamma_{sat} \cdot H}$	Tassement normalisé $\frac{s_{max}}{D}(\%)$
0	3.698	0	0.3698
20	5.62	0.167	0.562
40	6.29	0.333	0.629
80	9.24	0.667	0.924
100	10.83	0.833	1.083
130	13.66	1.083	1.366
150	17.02	1.25	1.702
160	22.3	1.333	2.23
163	72.81	1.358	7.281

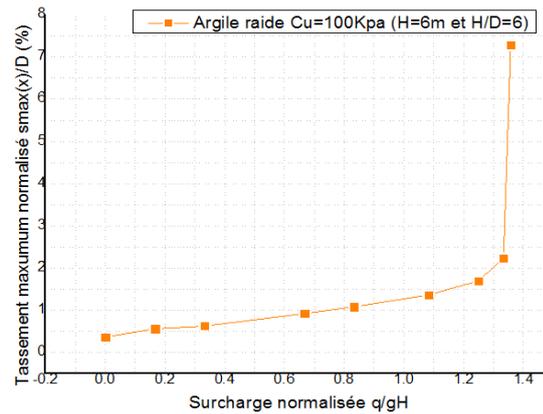


Figure 5-12 Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée

On voit d'après la (Figure 5.12) que le tassement maximum normalisé est de 7.281%, correspondant à un tassement de 72.81 mm. En phase de conception de la fouille, il faut donc vérifier si ce tassement est admissible pour l'ouvrage ou non avant de réaliser cette fouille et le rideau. Puisque le tassement maximum = 72.81 mm > Tassement admissible = 50 mm, ce tassement n'est pas admissible pour l'ouvrage donc il peut provoquer des désordres de la structure et les structures voisine

- Pour $H = 8\text{m}$, $D = 1\text{m}$ et ($H/D = 8$) :

On cherche le tassement maximal pour une fouille de hauteur 8 m dans une argile saturée raide $C_u = 100\text{ kPa}$ ayant un poids volumique saturé de 20 kN/m^3 , à soutenir par un rideau auto-stable ayant une fiche de 1 m. A l'amont de la fouille existe un ouvrage reposant sur un radier général exerçant une pression verticale $q = 145\text{ kPa}$

Tableau 5.10 tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisée

Surcharge q (kPa)	Tassement maximum (mm)	Surcharge normalisée $\frac{q}{\gamma_{sat} * H}$	Tassement normalisé $\frac{s_{max}}{D}(\%)$
0	6	0	0.6
10	9.49	0.125	0.949
30	9.59	0.1875	0.959
50	10.48	0.3125	1.048
70	12.53	0.4375	1.253
90	14.77	0.5625	1.477
110	17.35	0.6875	1.735
130	21.27	0.8125	2.127
145	33.1	0.9065	3.31

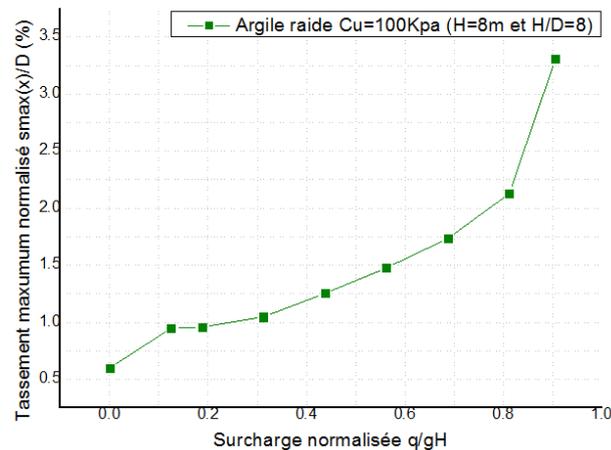


Figure 5-13 Tassement maximal normalisé en fonction de la surcharge normalisée

On voit d'après la (Figure 5.13) que le tassement maximum normalisé est de 3.31%, soit correspondant à un tassement de 33.1 mm. En phase de conception de la fouille, il faut donc vérifier si ce tassement est admissible pour l'ouvrage ou non avant de réaliser cette fouille et le rideau. Le tassement admissible est égal à 50 mm. Le tassement maximum = 33.1 mm < Tassement admissible = 50 mm.

Donc ce tassement est admissible pour l'ouvrage donc il peut satisfaire les conditions de la stabilité de cet ouvrage

- Pour $H = 10\text{m}$, $D = 1\text{m}$ et $(H/D = 10)$:

On cherche le tassement maximal pour une fouille de hauteur 10 m dans une argile saturée raide $C_u = 100\text{ kPa}$ ayant un poids volumique saturé de 20kN/m^3 , à soutenir par un rideau auto-stable ayant une fiche de 1 m. A l'amont de la fouille existe un ouvrage reposant sur un radier général exerçant une pression verticale augmentant jusqu'à $q = 130\text{ kPa}$.

Tableau 5.11 *tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisée*

Surcharge q (kPa)	tassement maximum (mm)	Surcharge normalisée $\frac{q}{\gamma_{sat} \cdot H}$	Tassement normalisé $\frac{s_{max}}{D}(\%)$
0	9.1304	0	0.91304
10	14.41	0.05	1.441
30	14.56	0.15	1.456
50	15.12	0.25	1.512
70	18.08	0.35	1.808
90	21.6	0.45	2.16
110	26.43	0.55	2.643
130	57.63	0.65	5.763

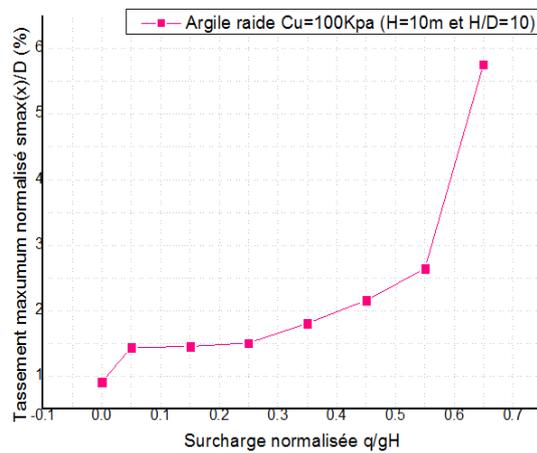


Figure 5-14 *Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée*

On voit d'après la (Figure 5.14) que le tassement maximum normalisé est de 5.736%, soit correspondant à un tassement de 57.36 mm. En phase de conception de la fouille, il faut donc vérifier si ce tassement est admissible pour l'ouvrage ou non avant de réaliser cette fouille et le rideau.

$$\text{Tassement maximum} = 57.36 \text{ mm} > \text{Tassement admissible} = 50 \text{ mm}$$

Ce tassement n'est pas admissible pour l'ouvrage donc il peut provoquer des désordres de la structure et les structures voisines.

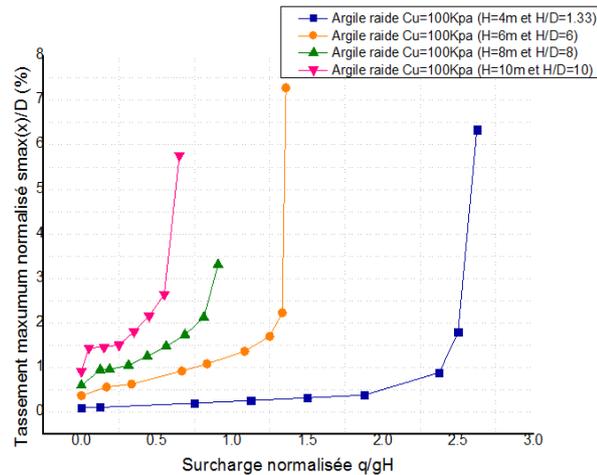


Figure 5-15 Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée de toutes les variantes étudiées

Conclusion :

On remarque des figures précédentes, pour les différents types d'argile étudiés, qu'en augmentant la charge il y a une augmentation du tassement maximum, mais en comparant les trois sols on remarque que la charge au-delà de laquelle le sol entre en rupture est plutôt différente car l'argile molle $q_{max} = 33 \text{ Kpa}$ est petite par rapport à l'argile ferme, et même celle de l'argile ferme comparée à l'argile raide, et cela à cause de la différence de cohésion, donc en augmentant la cohésion, le sol argileux peut supporter une valeur considérable de la charge. On conclut que les paramètres qui jouent un rôle vis-à-vis de la stabilité du terrain sont :

- La charge transmise par la structure,
- Le degré de compacité du sol argileux (mou, ferme, raide).

En comparant les tassements maximums, on remarque qu'à certaines hauteurs les tassements ne sont pas admissibles car la surcharge maximum dépend du degré de compacité du sol argileux, la hauteur de la fouille et la fiche d'ancrage D.

A titre d'application pratique des résultats obtenus sous forme de courbes normalisées (figures 5.5, 5.10 et 5.15), supposons qu'un bâtiment transmet une pression verticale de 40 kPa via un radier général à un sol argileux saturé raide caractérisé par une cohésion non drainée de 100 kPa et un poids volumique saturé de 21 kN/m³. Le projet consiste à réaliser une fouille haute de 10 m. une variante de soutènement consiste en un rideau de palplanches autostable fiché à 1 m. On se demande si le bâtiment ne subit pas un tassement additif non admissible ?

La surcharge normalisée est $q/\gamma H=(40/20/10)=0.190$, ce qui donne du tableau 5.11 un tassement maximum normalisé de $(1.456+1.512)/2=1.48\%$ de D, soit de 14.8 mm, ce qui est inférieure à la valeur admissible couramment fixée à 50 mm.

Si on suppose qu'il s'agit d'une tour lourde construite sur ce sol et transmettant une surcharge q égale à 130 kPa. Quelle est la fiche minimale à donner au rideau autostable qui soutient cette fouille haute de 6 m tel que le tassement soit admissible ?

Pour une fiche de 1 m ($H/D=10$), le tableau 5.11 donne directement un tassement maximum normalisé de 5.76% de D, soit 57 mm, ce qui n'est pas admissible. On peut proposer un soutènement par un rideau de palplanches autostable en augmentant la fiche D. En effet, en consultant la figure 5.15, on remarque que pour une surcharge normalisée $q/\gamma H=(130/20/10)=0.650$, la courbe correspondant à $H/D=8$ donne un tassement maximum normalisé égal à 1.72% de D, soit un tassement de $0.0172 \times (10/8)=21.5$ mm, ce qui est admissible, et la fiche proposée est $H/8=10/8=1.25$ m.

On peut aussi utiliser la courbe $H/D=6$, ce qui donne un tassement maximum normalisé de 1% de D, soit de 16.7 mm, avec une fiche égale à $H/6=10/6=1.60$ m, ce qui est plus coûteux que la solution précédente.

5.3.2 Courbe de chargement à l'amont d'un rideau soutenant une fouille de sable :

5.3.2.1 Sable lâche $\varphi=30^\circ$

- $H=4\text{m}$; $D=2\text{m}$ et ($H/D=2$) :

On cherche le tassement maximal pour une fouille de hauteur de 4m dans un sable sec lâche $\varphi=30^\circ$ ayant un poids volumique sec de 15 kN/m³ à soutenir par un rideau auto-stable ayant une fiche de 2m, à l'amont de la fouille existe un ouvrage reposant sur un radier général exerçant une pression verticale augmentant progressivement jusqu'à $q=12$ kPa.

Tableau 5.12 tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisé

surcharge q (kpa)	Le tassement maximum (mm)	La surcharge normalisée $\frac{q}{\gamma d \cdot H}$	Le tassement normalisé $\frac{s_{max}}{D}$ (%)
0	0.95	0	0.05
1	0.87	0.02	0.04
10	16.02	0.17	0.801
12	26.96	0.2	1.348

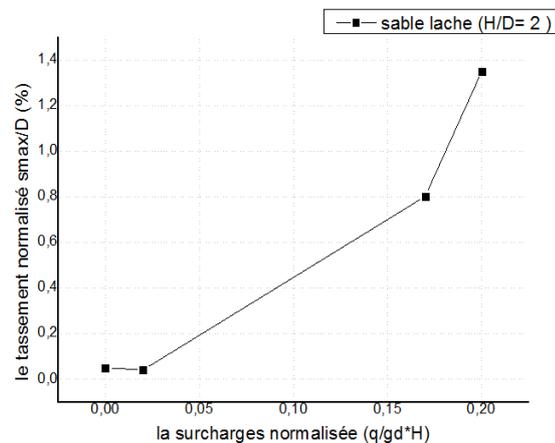


Figure 5-16 Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée

On voit d'après la (Figure 5.16) que le tassement maximum normalisé est de 1.35%, soit correspondant à un tassement de 26.96 mm. En phase de conception de la fouille, il faut donc vérifier si ce tassement est admissible pour l'ouvrage ou non avant de réaliser cette fouille et le rideau. Si on admet que pour un bâtiment courant le tassement uniforme admissible est de 5 cm, on aura :

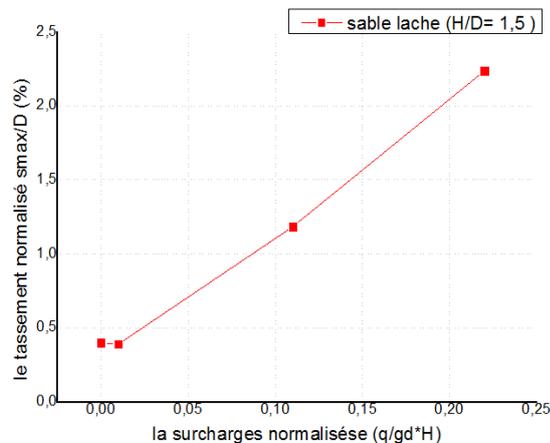
$$\text{Tassement maximum} = 26.96 \text{ mm} < \text{Tassement admissible} = 50 \text{ mm}$$

- H=6m D=2m (H/D=1.5)

On cherche le tassement maximal pour une fouille de hauteur de 6m dans un sable sec lâche $\varphi=30^\circ$ ayant un poids volumique sec de 15 kN/m^3 à soutenir par un rideau auto-stable ayant une fiche de 4m, à l'amont de la fouille existe un ouvrage reposant sur un radier général exerçant une pression verticale progressive jusqu'à $q=20 \text{ kpa}$.

Tableau 5.13 tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisé

La surcharge q (kpa)	Le tassement maximum (mm)	La surcharge normalisée $\frac{q}{\gamma d * H}$	Le tassement normalisé $\frac{s_{max}}{D}$ (%)
0	16.09	0	0.40
1	15.71	0.01	0.392
10	47.35	0.11	1.184
20	89.47	0.22	2.237

**Figure 5-17** Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée

On voit d'après la (Figure 5.17) que le tassement maximum normalisé est de 2.24%, soit correspondant à un tassement de 89.47mm. En phase de conception de la fouille, il faut donc vérifier si ce tassement est admissible pour l'ouvrage ou non avant de réaliser cette fouille et le rideau.

$$\text{Tassement maximum} = 89.47 \text{ mm} > \text{Tassement admissible} = 50 \text{ mm}$$

Ce tassement n'est pas admissible et dangereux, donc il ne satisfait pas les conditions de la stabilité de l'ouvrage.

- H=8m ; D=5m et (H/D=1.6) :

On cherche le tassement maximal pour une fouille de hauteur de 8m dans un sable sec lâche $\varphi=30^\circ$ ayant un poids volumique sec de 15 kN/m^3 à soutenir par un rideau auto-stable ayant une fiche de 5m, à l'amont de la fouille existe un ouvrage reposant sur un radier général exerçant une pression verticale $q=6 \text{ kpa}$.

Tableau 5.14 Tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisée

La surcharge q (kpa)	Le tassement maximum (mm)	La surcharge normalisée $\frac{q}{\gamma d \cdot H}$	Le tassement normalisé $\frac{s_{max}}{D}$ (%)
0	85.85	0	1.717
1	90.41	0.01	1.808
5	115.62	0.042	2.312
6	122.35	0.05	2.447

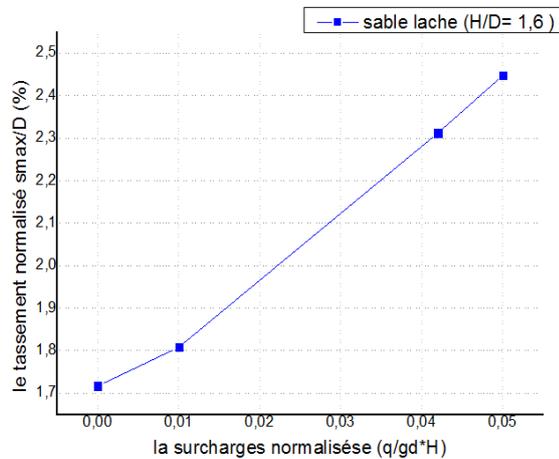


Figure 5-18 Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée

On voit d'après la (Figure 5.18) que le tassement maximum normalisé est de 2.45%, soit correspondant à un tassement de 122.35 mm. En phase de conception de la fouille, il faut donc vérifier si ce tassement est admissible pour l'ouvrage ou non avant de réaliser cette fouille et le rideau.

$$\text{Tassement maximum} = 122.35 \text{ mm} > \text{Tassement admissible} = 50 \text{ mm}$$

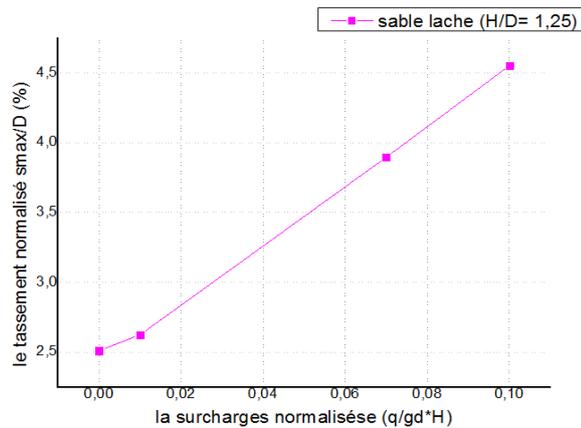
Ce tassement n'est pas admissible et dangereux, donc il ne satisfait pas les conditions de la stabilité de l'ouvrage.

- H=10m ;D=8m et (H/D=1.25) :

On cherche le tassement maximal pour une fouille de hauteur de 10 m dans un sable sec lâche $\varphi=30^\circ$ ayant un poids volumique sec de 15 kN/m^3 à soutenir par un rideau auto-stable ayant une fiche de 8m , à l'amont de la fouille existe un ouvrage reposant sur un radier général exerçant une pression verticale $q=15 \text{ kpa}$.

Tableau 5.15 Tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisé

La surcharge (Kpa)	Le tassement maximum (mm)	La surcharge normalisée $\frac{q}{\gamma d \cdot H}$	Le tassement normalisé $\frac{s_{max}}{D}$ (%)
0	200.84	0	2.510
1	209.93	0.01	2.624
10	308.74	0.07	3.895
15	364.11	0.1	4.551

**Figure 5-19** Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée

On voit d'après la (Figure 5.19) que le tassement maximum normalisé est de 4.55 %, soit correspondant à un tassement de 364.11 mm. En phase de conception de la fouille, il faut donc vérifier si ce tassement est admissible pour l'ouvrage ou non avant de réaliser cette fouille et le rideau.

Tassement maximum = 364.11 mm >>> Tassement admissible = 50 mm

Ce tassement n'est pas admissible et très dangereux, donc il ne satisfait pas les conditions de la stabilité de l'ouvrage.

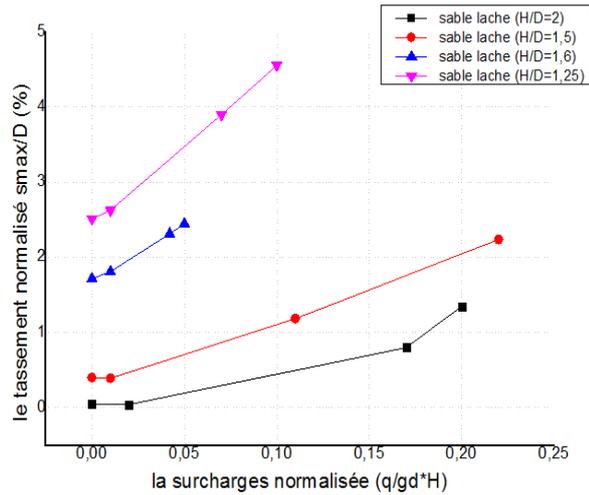


Figure 5-20 le tassement maximum normalisé ($\frac{s_{max}}{D}$ (%)) en fonction de la surcharge ($\frac{q}{\gamma d * H}$)

5.3.2.2 Sable moyennement dense $\varphi=35^\circ$

- H=4m ; D=1m et (H/D=4) :

On cherche le tassement maximal pour une fouille de hauteur de 4 m dans un sable sec moyennement dense $\varphi=35^\circ$ ayant un poids volumique sec de 15 kN/m^3 à soutenir par un rideau auto-stable ayant une fiche de 1 m , à l'amont de la fouille existe un ouvrage reposant sur un radier général exerçant une pression verticale $q=13 \text{ kpa}$.

Tableau 5.16 Tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisé

La surcharge q (kpa)	Le tassement maximum (mm)	La surcharge normalisée $\frac{q}{\gamma d * H}$	Le tassement normalisé $\frac{s_{max}}{D}$ (%)
0	0.84	0	0.084
1	0.75	0.017	0.075
5	0.74	0.083	0.074
10	1.91	0.167	0.191
13	22.54	0.217	2.254

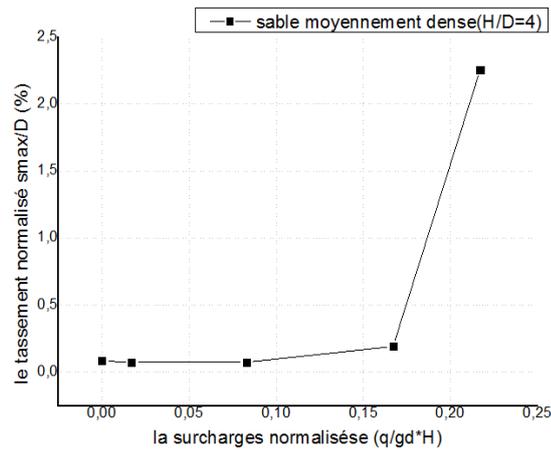


Figure 5-21 Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée

On voit d'après la (Figure 5.21) que le tassement maximum normalisé est de 2.25%, soit correspondant à un tassement de 22.54 mm. En phase de conception de la fouille, il faut donc vérifier si ce tassement est admissible pour l'ouvrage ou non avant de réaliser cette fouille et le rideau. Tassement maximum = 22.54mm < Tassement admissible = 50 mm

Ce tassement est admissible, donc il ne menace pas la stabilité de l'ouvrage.

- H=6m ;D=2m et (H/D=3) :

On cherche le tassement maximal pour une fouille de hauteur de 6 m dans un sable sec moyennement dense $\varphi=35^\circ$ ayant un poids volumique sec de 15 kN/m^3 à soutenir par un rideau auto-stable ayant une fiche de 2m , à l'amont de la fouille existe un ouvrage reposant sur un radier général exerçant une pression verticale $q=8 \text{ kpa}$.

Tableau 5.17 tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisé

La surcharge q (kpa)	Le tassement maximum (mm)	La surcharge normalisée $\frac{q}{\gamma d \cdot H}$	Le tassement normalisé $\frac{s_{max}}{D}$ (%)
0	2.02	0	0.101
1	1.48	0.011	0.074
5	6.31	0.056	0.316
7	13.69	0.078	0.685
8	17.62	0.088	0.881

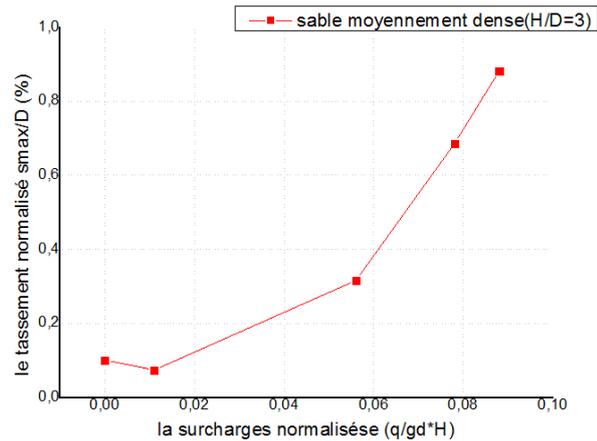


Figure 5-22 Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée

On voit d'après la (figure 5.22) que le tassement maximum normalisé est de 0.88%, soit correspondant à un tassement de 17.62 mm. En phase de conception de la fouille, il faut donc vérifier si ce tassement est admissible pour l'ouvrage ou non avant de réaliser cette fouille et le rideau.

$$\text{Tassement maximum} = 17.62\text{mm} < \text{Tassement admissible} = 50 \text{ mm}$$

Ce tassement est admissible, donc il ne menace pas la stabilité de l'ouvrage.

- $H=8\text{m}$; $D=4\text{m}$ et $(H/D=2)$:

On cherche le tassement maximal pour une fouille de hauteur de 8 m dans un sable sec moyennement dense $\varphi=35^\circ$ ayant un poids volumique sec de 15 kN/m^3 à soutenir par un rideau auto-stable ayant une fiche de 4m, à l'amont de la fouille existe un ouvrage reposant sur un radier général exerçant une pression verticale $q=19 \text{ kpa}$.

Tableau 5.18 Tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisé

La surcharge (kpa)	Le tassement maximum (mm)	La surcharge normalisée $\frac{q}{\gamma d * H}$	Le tassement normalisé $\frac{s_{max}}{D}$ (%)
0	9.5	0	0.238
1	30.11	0.008	0.573
10	51.34	0.083	1.284
15	77.19	0.125	1.930
17	86.67	0.142	2.167
19	98.66	0.158	2.467

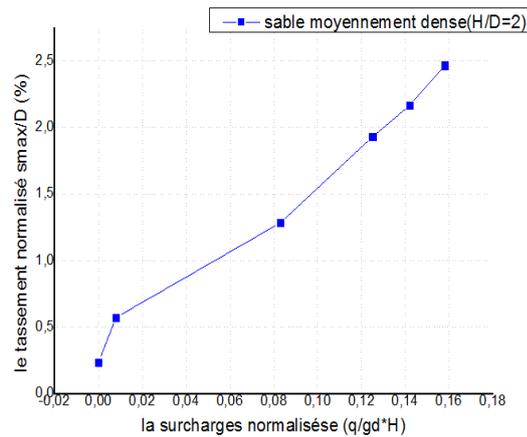


Figure 5-23 Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée

On voit d'après la (Figure 5.23) que le tassement maximum normalisé est de 2.47%, soit correspondant à un tassement de 98.66 mm. En phase de conception de la fouille, il faut donc vérifier si ce tassement est admissible pour l'ouvrage ou non avant de réaliser cette fouille et le rideau. Tassement maximum = 98.66 mm > Tassement admissible = 50 mm

Ce tassement n'est pas admissible et dangereux, donc il ne satisfait pas les conditions de la stabilité de l'ouvrage.

- H=10m ;D=6m et (H/D=1.67) :

On cherche le tassement maximal pour une fouille de hauteur de 10 m dans un sable sec moyennement dense $\phi=35^\circ$ ayant un poids volumique sec de 15 kN/m^3 à soutenir par un rideau auto-stable ayant une fiche de 6m , à l'amont de la fouille existe un ouvrage reposant sur un radier général exerçant une pression verticale qui augmente progressivement jusqu'à $q=47\text{kpa}$.

Tableau 5.19 Tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisé

La surcharge q(kpa)	Le tassement maximum (mm)	La surcharge normalisée $\frac{q}{\gamma d * H}$	Le tassement normalisé $\frac{s_{max}}{D}$ (%)
0	67.53	0	1.12
1	72.65	0.007	1.211
10	143.96	0.067	2.399
30	300.05	0.2	5
40	390.43	0.267	6.507
47	455.53	0.313	7.589

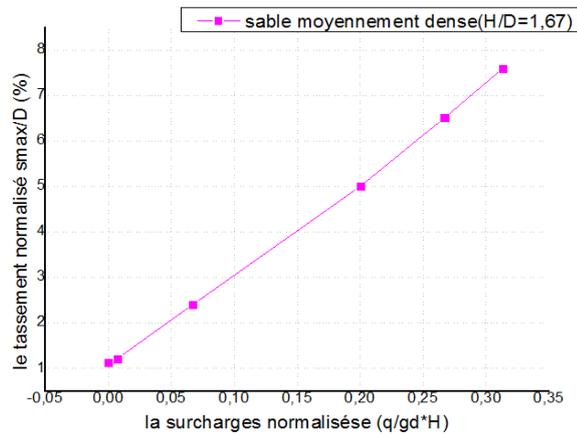


Figure 5-24 Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée

On voit d'après la (Figure 5.24) que le tassement maximum normalisé est de 7.59%, soit correspondant à un tassement de 455.53 mm. En phase de conception de la fouille, il faut donc vérifier si ce tassement est admissible pour l'ouvrage ou non avant de réaliser cette fouille et le rideau.

$$\text{Tassement maximum} = 455.53\text{mm} \gg \gg \text{Tassement admissible} = 50 \text{ mm}$$

Ce tassement n'est pas admissible et très dangereux, donc il ne satisfait pas les conditions de la stabilité de l'ouvrage.

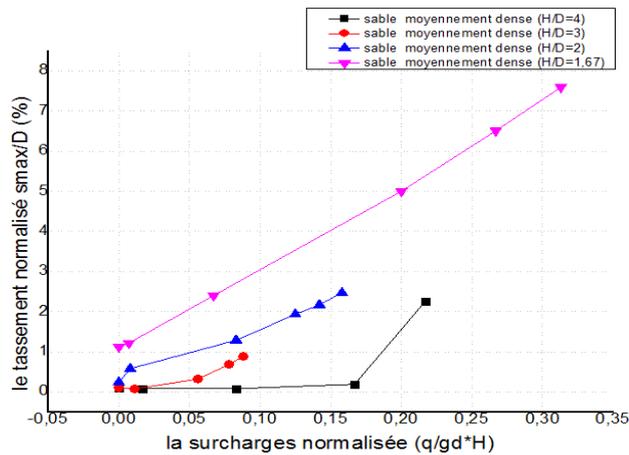


Figure 5-25 le tassement maximum normalisé ($\frac{s_{max}}{D}$ (%)) en fonction de la surcharge ($\frac{q}{\gamma d * H}$)

5.3.2.3 Sable dense $\varphi=40^\circ$

- $H=4\text{m}$; $D=1\text{m}$ et $(H/D=4)$:

On cherche le tassement maximal pour une fouille de hauteur de 4 m dans un sable sec dense $\varphi=40^\circ$ ayant un poids volumique sec de 15 kN/m^3 à soutenir par un rideau auto-stable ayant une fiche de 1m , à l'amont de la fouille existe un ouvrage reposant sur un radier général exerçant une pression verticale $q=25\text{kpa}$.

Tableau 5.20 *Tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisé*

La surcharge $q(\text{kpa})$	Le tassement maximum (mm)	La surcharge normalisée $\frac{q}{\gamma d * H}$	Le tassement normalisé $\frac{s_{\text{max}}}{D}(\%)$
0	0.86	0	0.086
1	0.78	0.017	0.078
10	0.76	0.167	0.076
20	0.75	0.333	0.075
22	0.75	0.367	0.075
25	12.43	0.417	1.243

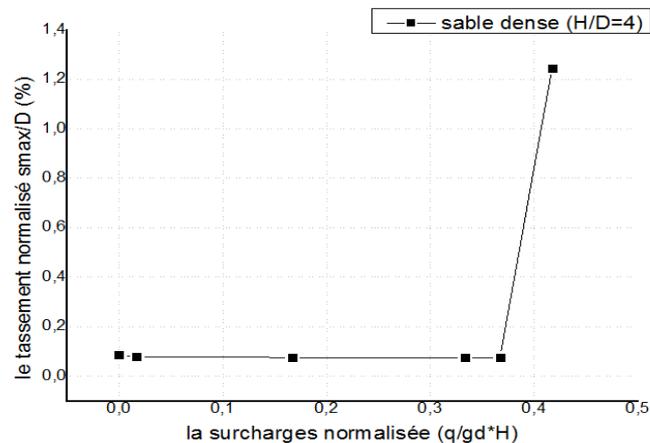


Figure 5-26 *Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée*

On voit d'après la (Figure 5.26) que le tassement maximum normalisé est de 1.24%, soit correspondant à un tassement de 12.43mm. En phase de conception de la fouille, il faut donc vérifier si ce tassement est admissible pour l'ouvrage ou non avant de réaliser cette fouille et le rideau.

$$\text{Tassement maximum } 12.43 \text{ mm} < \text{Tassement admissible} = 50 \text{ mm}$$

Ce tassement est admissible, donc il ne menace pas la stabilité de l'ouvrage.

- $H=6\text{m}$; $D=1\text{met}$ ($H/D=6$) :

On cherche le tassement maximal pour une fouille de hauteur de 6 m dans un sable sec dense $\phi=40^\circ$ ayant un poids volumique sec de 15 kN/m^3 à soutenir par un rideau auto-stable ayant une fiche de 1m , à l'amont de la fouille existe un ouvrage reposant sur un radier général exerçant une pression verticale $q=12\text{kpa}$.

Tableau 5.21 Tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisé

La surcharge (kpa)	Le tassement maximum (mm)	La surcharge normalisée $\frac{q}{\gamma d * H}$	Le tassement normalisé $\frac{s_{\max}}{D}$ (%)
0	1.77	0	0.177
1	1.59	0.011	0.159
5	1.59	0.056	0.159
7	1.58	0.078	0.158
10	1.58	0.111	0.158
12	1.57	0.133	0.157

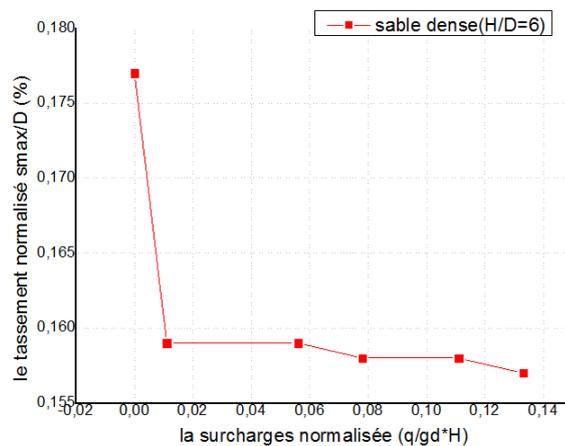


Figure 5-27 Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée

On voit d'après la(figure 5.27) que le tassement maximum normalisé est de 0.16 %, soit correspondant à un tassement de 1.57 mm. En phase de conception de la fouille, il faut donc vérifier si ce tassement est admissible pour l'ouvrage ou non avant de réaliser cette fouille et le rideau.

Tassement maximum 12.43 mm < Tassement admissible = 50 mm

Ce tassement est admissible, donc il ne menace pas la stabilité de l'ouvrage.

- $H=8\text{m}$; $D=2\text{m}$ et $(H/D=4)$:

On cherche le tassement maximal pour une fouille de hauteur de 8 m dans un sable sec dense $\phi=40^\circ$ ayant un poids volumique sec de 15 kN/m^3 à soutenir par un rideau auto-stable ayant une fiche de 2 m, à l'amont de la fouille existe un ouvrage reposant sur un radier général exerçant une pression verticale $q=6 \text{ kpa}$.

Tableau 5.22 Tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisé

La surcharge (kpa)	Le tassement maximum (mm)	La surcharge normalisée $\frac{q}{\gamma d \cdot H}$	Le tassement normalisé $\frac{s_{\max}}{D}$ (%)
0	3.72	0	0.186
1	3.08	0.008	0.154
3	3.08	0.025	0.154
5	3.07	0.042	0.153
6	32.57	0.05	1.629

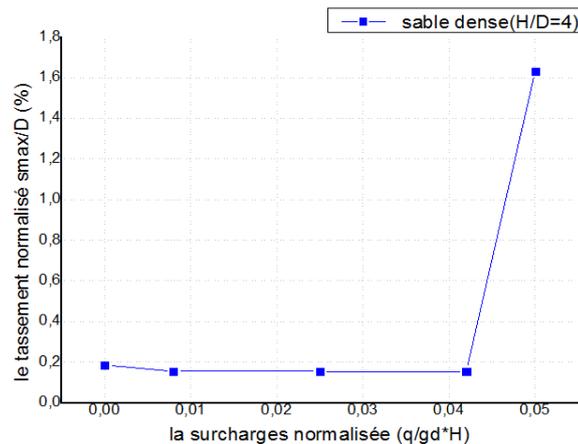


Figure 5-28 Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée

On voit d'après la (Figure 5.28) que le tassement maximum normalisé est de 1.63%, soit correspondant à un tassement de 32.57 mm. En phase de conception de la fouille, il faut donc vérifier si ce tassement est admissible pour l'ouvrage ou non avant de réaliser cette fouille et le rideau.

$$\text{Tassement maximum } 32.57\text{mm} < \text{Tassement admissible} = 50 \text{ mm}$$

Ce tassement est admissible, donc il ne menace pas la stabilité de l'ouvrage.

- $H=10\text{m}$; $D=4\text{m}$ et $(H/D=2.5)$:

On cherche le tassement maximal pour une fouille de hauteur de 10 m dans un sable sec dense $\phi=40^\circ$ ayant un poids volumique sec de 15 kN/m^3 à soutenir par un rideau auto-stable ayant une fiche de 4m à l'amont de la fouille existe un ouvrage reposant sur un radier général exerçant une pression verticale $q=17\text{ kpa}$.

Tableau 5.23 Tableau regroupant chaque tassement normalisé max et sa surcharge normalisé

La surcharge q (kpa)	Le tassement maximum (mm)	La surcharge normalisée $\frac{q}{\gamma d \cdot H}$	Le tassement normalisé $\frac{s_{\max}}{D}$ (%)
0	5.95	0	0.148
1	5.54	0.007	0.139
10	39.78	0.067	0.995
14	60.03	0.093	1.501
17	76.90	0.113	1.923

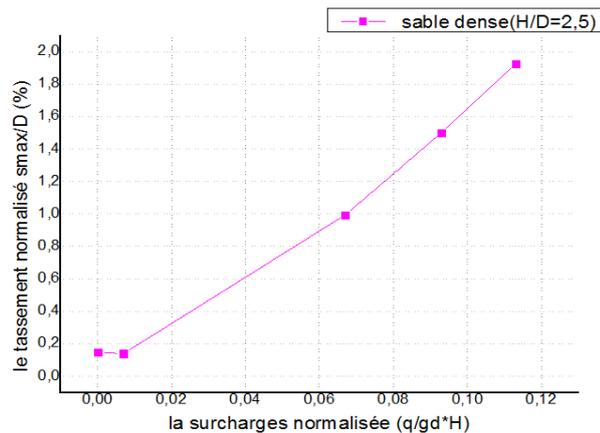


Figure 5-29 Tassement maximum normalisé en fonction de la surcharge normalisée

On voit d'après la (Figure 5.29) que le tassement maximum normalisé est de 1.92 %, soit correspondant à un tassement de 76.90 mm. En phase de conception de la fouille, il faut donc vérifier si ce tassement est admissible pour l'ouvrage ou non avant de réaliser cette fouille et le rideau.

Tassement maximum 76.90mm > Tassement admissible = 50 mm

Ce tassement n'est pas admissible et très dangereux, donc il ne satisfait pas les conditions de la stabilité de l'ouvrage.

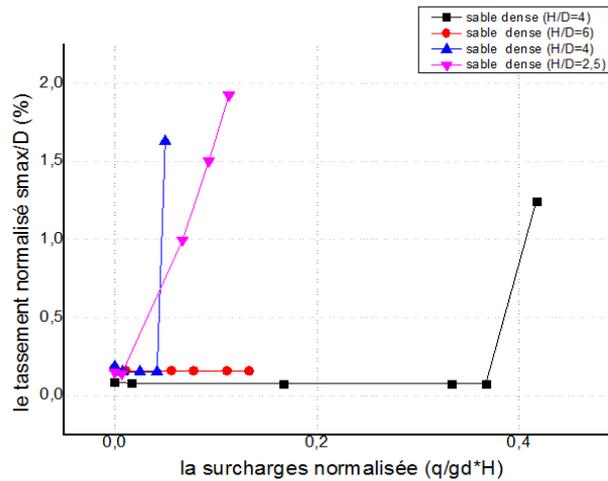


Figure 5-30 le tassement maximum normalisé ($\frac{s_{max}}{D}$ (%)) en fonction de la surcharge ($\frac{q}{\gamma d \cdot H}$)

A titre d'application des résultats obtenus pour les fouilles sableuses soutenues par un rideau auto-stable, considérons le cas d'un corps de chaussée exerçant une pression verticale maximale de 17 kpa sur un massif sableux dense ayant un poids volumique sec moyen de 15 kN/m³ et un angle de frottement de 40°. Une excavation d'une fouille de 5 m doit être soutenue. La première variante consiste à réaliser un rideau de palplanches auto-stable d'une fiche de 2 m. On se demande quel est le tassement maximum engendré par les travaux de soutènement, sachant que le tassement admissible du corps de chaussée est de 5 mm ?

La surcharge normalisée $q/\gamma H = 20/(15 \times 5) = 0.267$, et $H/D = 5/2 = 2.5$, ce qui correspond, d'après la figure 5.29 à un tassement maximum normalisé de 1.92% de D, soit de $0.0192 \times 2 = 38.4$ mm dépassant le tassement admissible de 5 mm. Il y'a lieu d'augmenter la fiche D du rideau ou opter pour un rideau ancré.

5.4 Conclusions

En conclusion, la réalisation d'une fouille soutenue par un rideau auto-stable dans un massif sableux ou argileux, quelle que soit sa densité, engendre un tassement maximum s_{max} d'autant plus grand que la surcharge q de cet ouvrage est grande, conformément à la figure 5.29. En général, ce tassement maximum augmente par contre lorsque l'élancement H/D diminue.

Par rapport au chapitre précédent, où nous avons traité la variation du tassement en absence de l'ouvrage ($q=0$), on remarque ici que sa présence ($q \neq 0$) cause un tassement important qui peut être un facteur clé dans le dimensionnement du rideau autostable. En général, on choisira la fiche D de telle manière que le tassement admissible exigé ne soit pas dépassé.

Chapitre6. ETUDE DE LA HAUTEUR CRITIQUE H_c D'UNE FOUILLE NON SOUTENUE

6.1 Introduction :

Le creusement d'une fouille non soutenue sur une certaine hauteur peut engendrer une instabilité et une rupture du sol, impliquant des conséquences des fois désastreuses pour l'ouvrage à l'amont. Une vérification préalable de stabilité des telles fouilles permet de trancher s'il est sécuritaire de les creuser sans soutènement ou avec soutènement.

Le problème se pose lorsque la hauteur H de la fouille non soutenue dépasse une certaine hauteur, dite hauteur critique et notée universellement par H_c . Il s'agit de la hauteur seuil au-delà de laquelle les parois de la fouille s'effondrent.

Ce chapitre a pour but d'étudier la hauteur critique d'une fouille non soutenue dans des sols argileux saturés et non surchargés, sur la base d'un calcul par éléments finis via le progiciel PLAXIS. La démarche est simple et consiste à augmenter la hauteur H de la fouille jusqu'à ce que le logiciel indique qu'il y'a une rupture. Les résultats obtenus seront par la suite comparés à ceux d'un calcul manuel selon la méthode d'équilibre limite.

La (Figure 6.1) représente une schématisation d'un modèle à introduire dans le logiciel PLAXIS avec H et B comme données. Ces dimensions ont été adoptées des thèses de Hazout (2007) et Ameer (2006), qui ont étudié le soutènement des fouilles par des écrans, et ont obtenu ces dimensions suite à un dimensionnement graduel du maillage d'éléments finis.

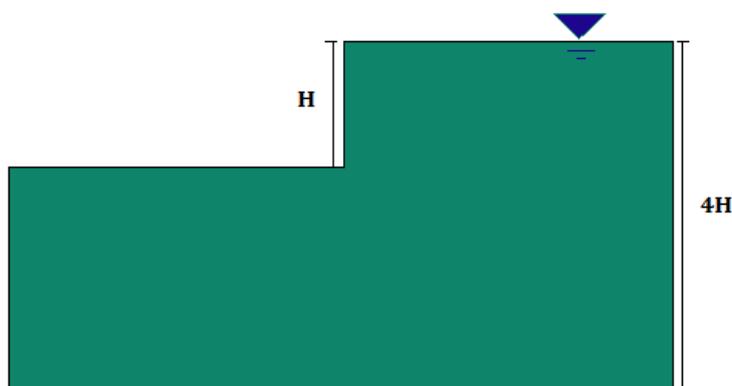


Figure 6-1 schématisation d'un modèle d'éléments finis d'une fouille non soutenue

6.2 Modélisation du problème

On considère, comme le schématise la figure 6.1, une fouille verticale ouverte au sein d'un massif d'argile saturée homogène, manifestant un comportement élasto-plastique parfait et obéissant au critère de rupture de Mohr-Coulomb. On considère que la fouille est suffisamment longue pour se comporter en déformations planes. On s'intéresse au comportement à court terme, c'est juste lors de l'ouverture de la fouille. Ce matériau se comporte ainsi à court terme d'une manière non drainée, et sera caractérisé par une cohésion non drainée C_u , un angle de frottement ϕ_u nul, et un poids volumique saturé γ_{sat} . On propose d'étudier le comportement de la fouille en considérant le cas d'une argile molle ($C_u = 30$ kPa), ferme ($C_u = 50$ kPa) et raide ($C_u = 100$ kPa).

On utilise un logiciel d'éléments finis pour concevoir un maillage en déformation planes, et vu la symétrie par rapport au plan vertical, on n'étudiera que la moitié de la fouille, comme l'illustreront les différentes figures ci-après relatives aux maillages d'éléments finis.

6.3 Présentation et discussion des résultats

6.3.1 Argile molle $C_u = 30$ Kpa :

6.4

6.4.1.1 Calcul via PLAXIS :

La 1ère modélisation est réalisée dans un sol argileux mou avec une cohésion de 30 Kpa et un poids volumique saturé de 20 KN/m³, on a fixé une hauteur de fouille, après on a commencé à augmenter la hauteur jusqu'à ce que le logiciel a indiqué qu'il y a une rupture pour une hauteur de fouille 7m et donc la hauteur critique pour ce sol est 6m.

La (Figure 6.2) représente le programme de calcul réalisé pour $H_c = 6$ m.

6 | ETUDE DE LA HAUTEUR CRITIQUE H_c D'UNE FOUILLE NON SOUTENUE

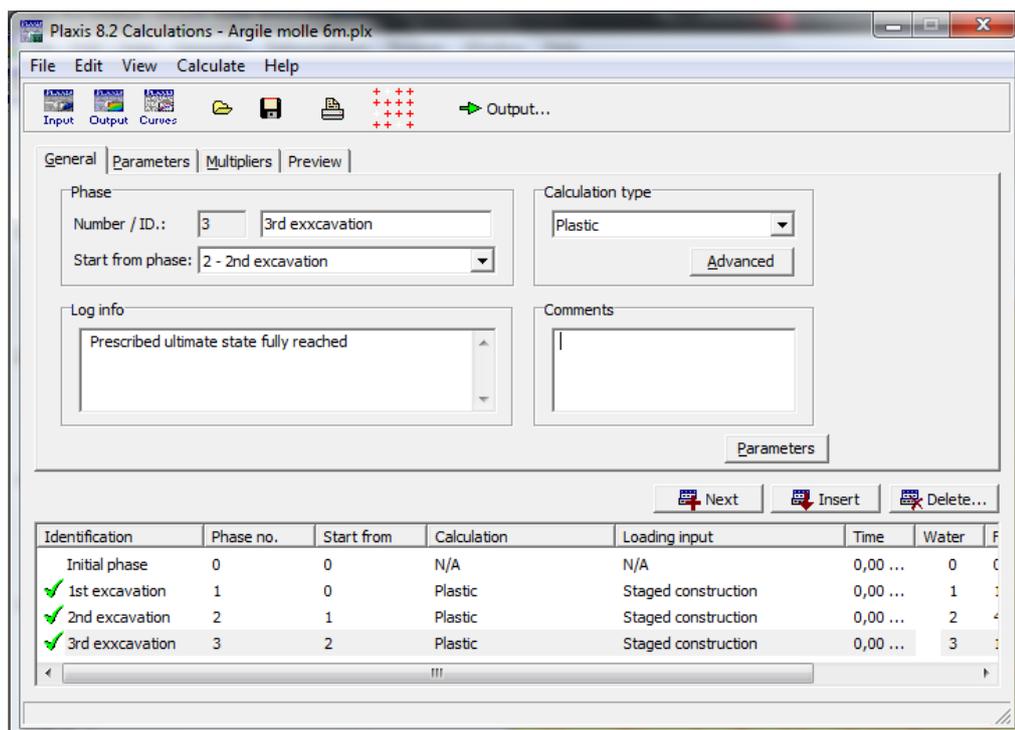


Figure 6-2 Interface du programme de calcul

La(Figure 6.2) représente les calculs réalisés sur PLAXIS avec une identification des excavations réalisées et validées par le logiciel et aussi avec l'information du journal (Log info) qui mentionne que l'état ultime est pleinement atteint. La(Figure 6.3) représente la déformée du maillage.

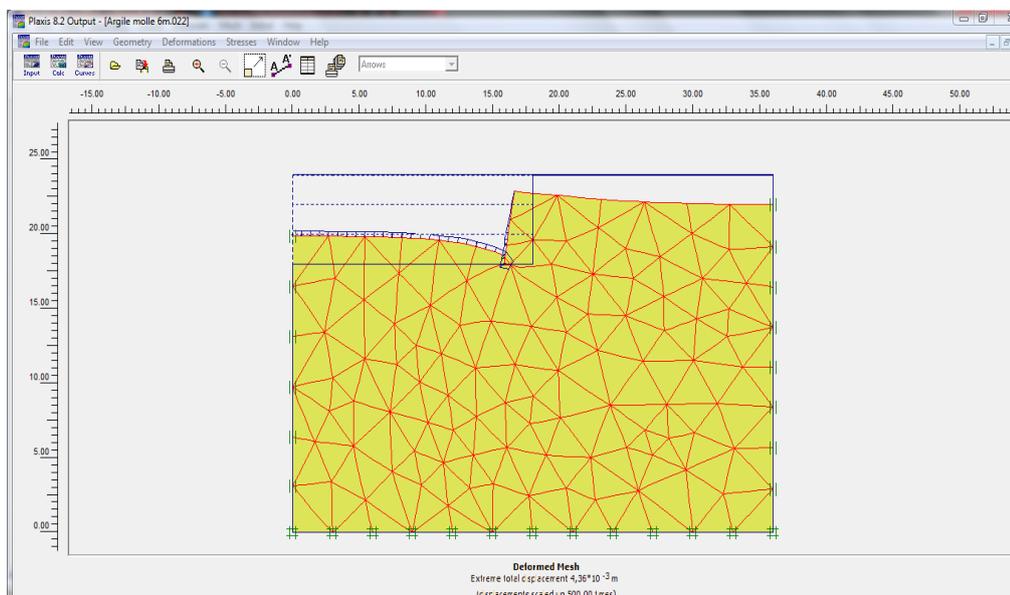


Figure 6-3 La déformée de maillage d'éléments finis

6 | ETUDE DE LA HAUTEUR CRITIQUE H_c D'UNE FOUILLE NON SOUTENUE

La (Figure 6.3) montre qu'on a un déplacement total extrême de 4.36 mm, et La (Figure 6.4) représente les déplacements horizontaux pour $H_c = 6m$.

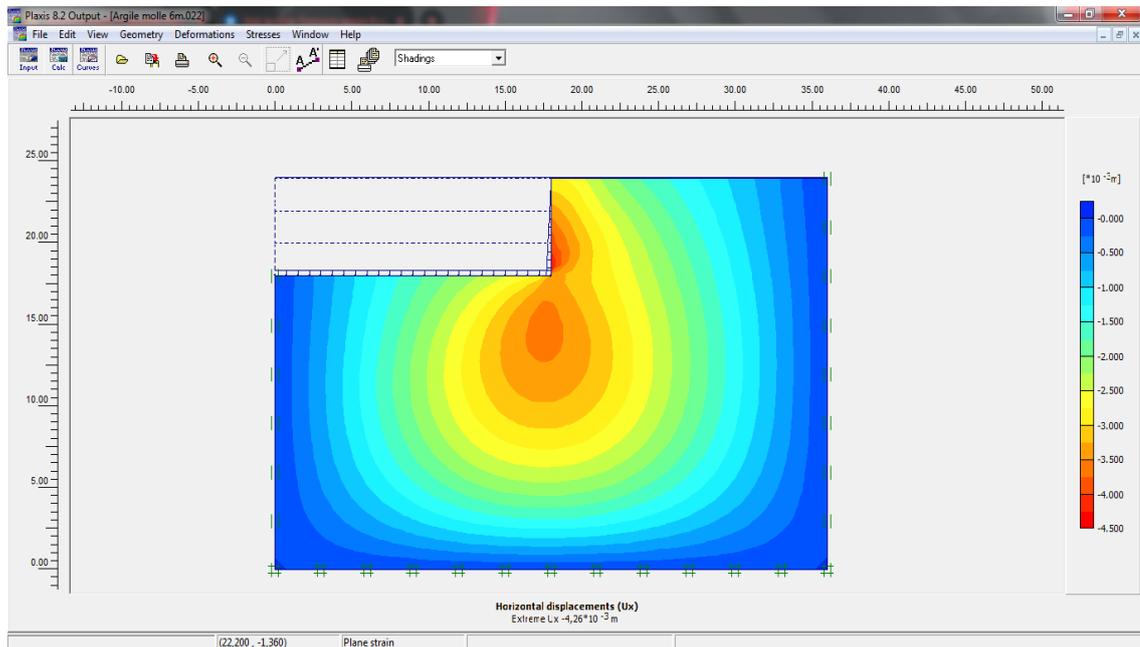


Figure 6-4 Contours de déplacements horizontaux (U_x)

D'après La (Figure 6.4) les déplacements horizontaux sont concentrés, avec des valeurs maximums à la base de la fouille en marquant une valeur de 4.26mm (partie de couleur rouge), et on remarque que sous la fouille et autour d'aspect de sa hauteur les déplacements horizontaux sont d'environ 3 à 3.5mm, en s'éloignant de la fouille les déplacements horizontaux diminuent. Enfin, La (Figure 6.5) montre le déplacement vertical pour $H_c = 5m$.

6 | ETUDE DE LA HAUTEUR CRITIQUE H_c D'UNE FOUILLE NON SOUTENUE

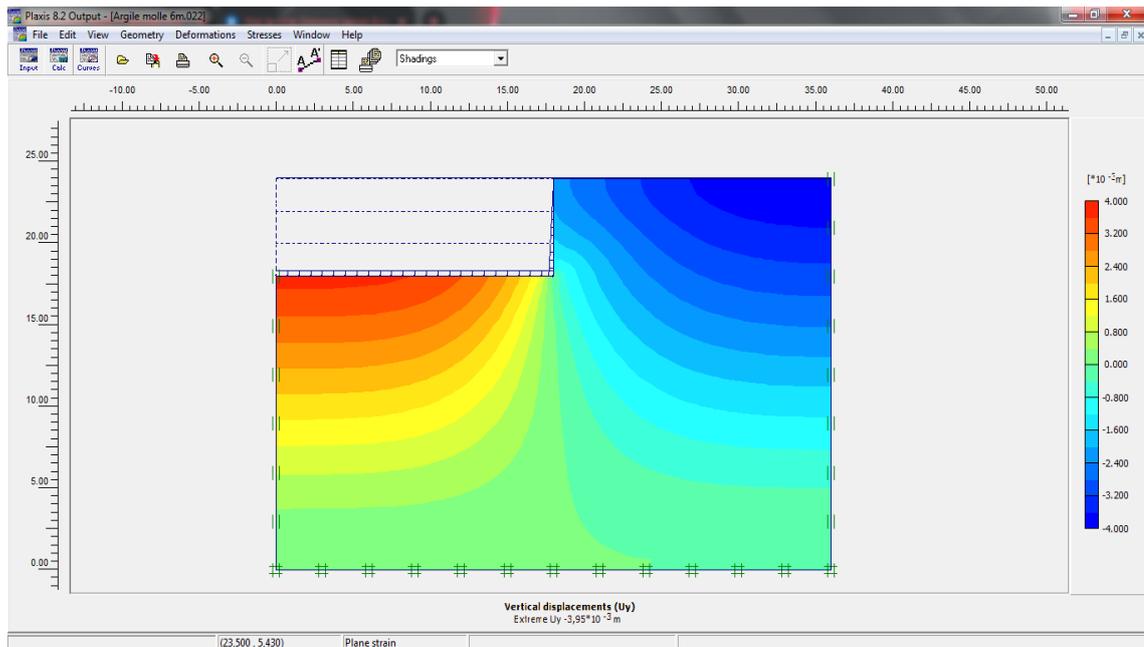


Figure 6-5 Contours de déplacement vertical (U_y)

D'après la (Figure 6.5) les valeurs maximums du tassement sont concentrées dans le coté aval de la fouille, car le tassement max atteint est d'environ 3.95 mm, on remarque aussi que le tassement sur les coté amont est négligeable. En s'éloignant de la fouille le tassement diminue jusqu'à ce qu'il se stabilise en arrivant a une certaine distance.

6.4.1.2 Calcul théorique :

Dans un cas d'une fouille dans un sol saturé, en comportement non drainé à court terme ($\phi = 0$), et absence d'une surcharge, la hauteur critique est :

$$H_c = 4 \times \frac{C_u}{\gamma}$$

$$H_c = 4 \times \frac{30}{20}$$

$$H_c = 6\text{m}$$

Comparaison :

En comparant les résultats obtenus par PLAXIS et celui obtenus avec le calcul théorique, on remarque qu'on a les mêmes valeurs.

6 | ETUDE DE LA HAUTEUR CRITIQUE H_c D'UNE FOUILLE NON SOUTENUE

6.4.2 Argile ferme $C_u = 50\text{Kpa}$:

6.4.2.1 Calcul via PLAXIS :

Pour ce 2eme modèle la modélisation se fait pour un sol argileux ferme et de cohésion 50 Kpa et d'un poids volumique saturé 20 KN/m³. Au début on a fixé une hauteur de fouille, après on a augmenté jusqu'à 11 m ou on a eu une rupture donc $H_c = 10\text{m}$. La (Figure 6.6) montre que pour une hauteur de 10 m on n'a pas de rupture.

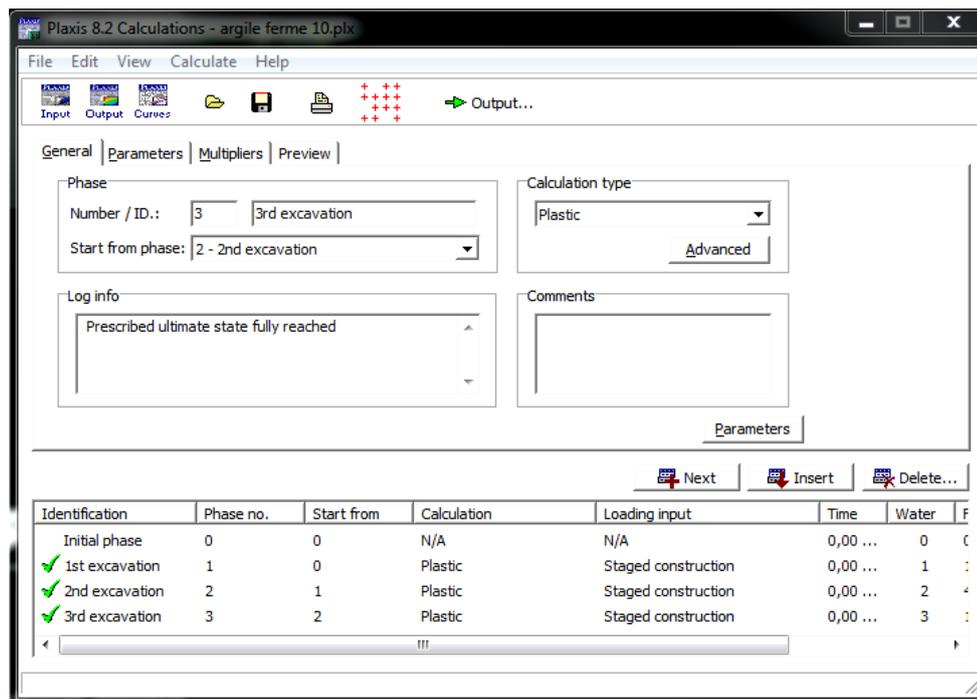


Figure 6-6 Interface de calcul pour $H = 10\text{m}$

La (Figure 6.6) représente les calculs réalisés sur PLAXIS avec une identification des excavations réalisées et validées par le logiciel et aussi avec l'information du journal (Log info) qui mentionne que l'état ultime est pleinement atteint. Enfin, La (Figure 6.7) montre la déformée du maillage.

6 | ETUDE DE LA HAUTEUR CRITIQUE H_c D'UNE FOUILLE NON SOUTENUE

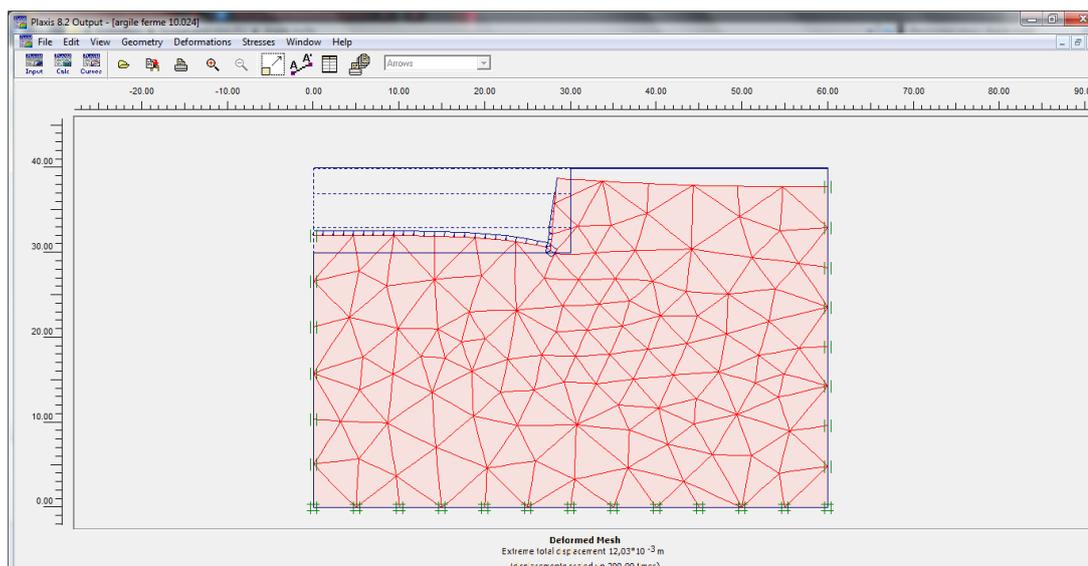


Figure 6-7 Maillage déformé d'éléments finis

La (Figure 6.7) montre que le déplacement total extrême est égale à 12.03mm, et La (Figure 6.8) montre les déplacements U_x causé par la fouille de hauteur $H_c=10m$.

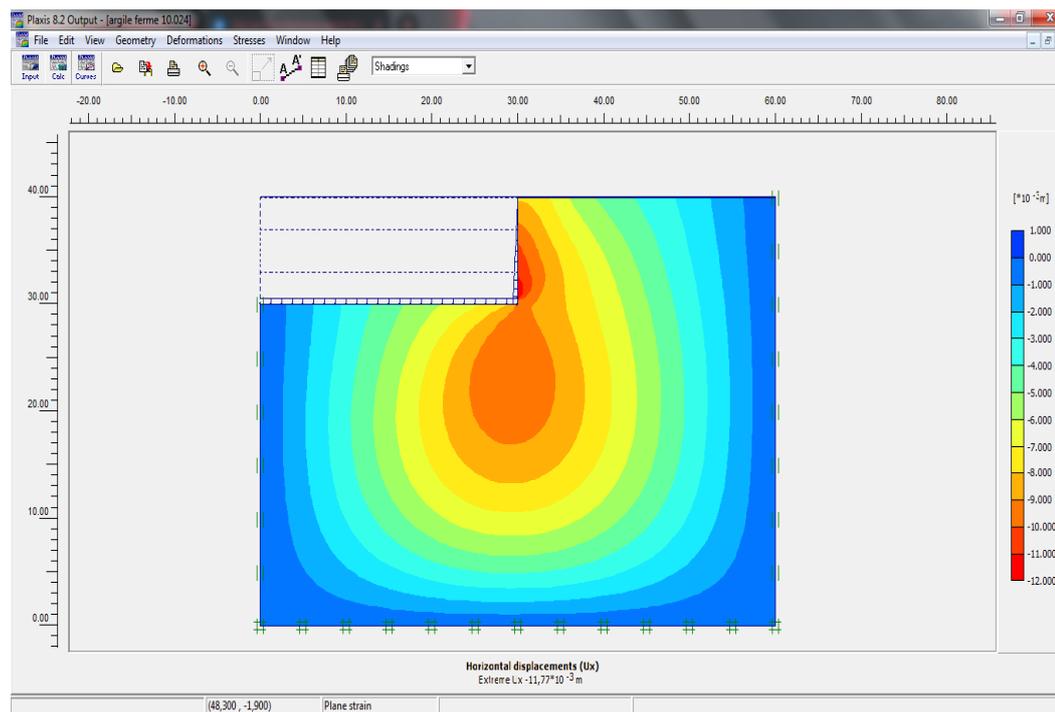


Figure 6-8 Déplacement horizontal U_x pour $H=10m$

On remarque selon la (Figure 6.8) que les valeurs maximums des déplacements U_x sont concentrées dans la partie inférieure de l'aspect de la fouille en marquant une valeur max de 11.77mm et diminue en s'éloignant de la fouille. La (Figure 6.9) montre les déplacements verticaux U_y causé par la fouille de hauteur $H_c = 10m$.

6 | ETUDE DE LA HAUTEUR CRITIQUE H_c D'UNE FOUILLE NON SOUTENUE

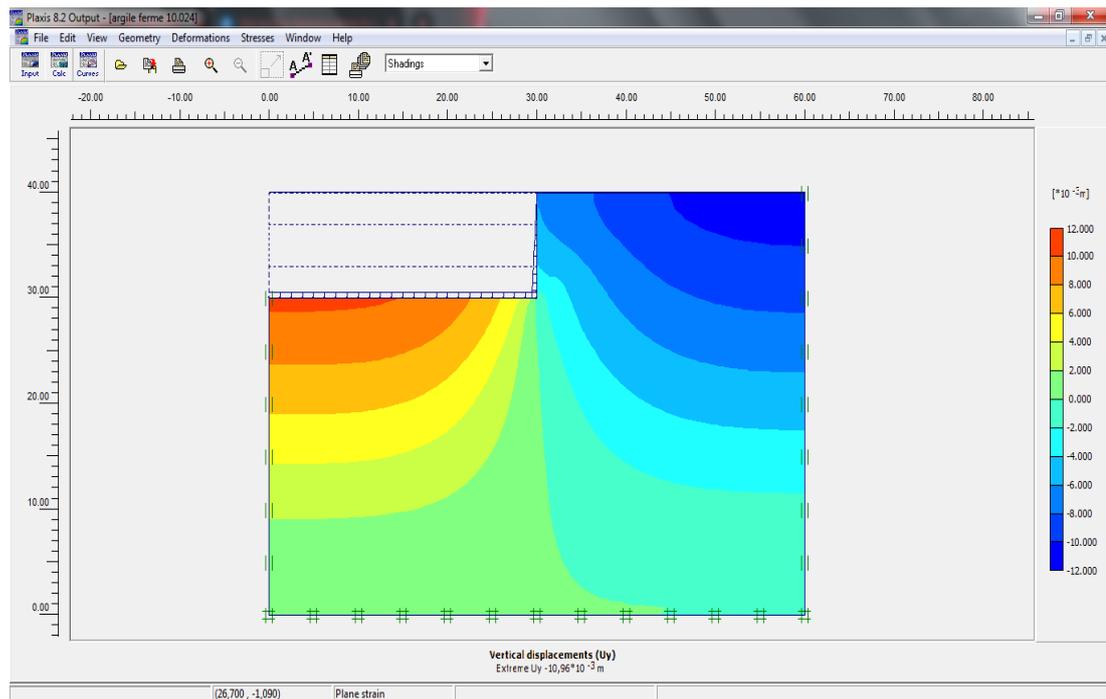


Figure 6-9 Déplacement vertical U_y pour $H= 11m$

D'après la (Figure 6.9) les déplacements U_y max sont situés dans le coté aval de la fouille en marquant un tassement max de 10.96 mm tandis que les coté amont on remarque qu'on a un tassement négligeable par rapport au tassement maximum, lorsqu'on s'éloigne de la fouille les tassements diminuent.

6.4.2.2 Calcul théorique :

Dans un cas d'une fouille dans un sol argileux ferme et saturé, et en absence d'une surcharge, la hauteur critique est :

$$H_c = 4 \times \frac{C_u}{\gamma}$$

$$H_c = 4 \times \frac{50}{20}$$

$$H_c = 10m$$

6 | ETUDE DE LA HAUTEUR CRITIQUE H_c D'UNE FOUILLE NON SOUTENUE

Comparaison :

En comparant les résultats obtenus par PLAXIS et celui obtenus avec le calcul théorique, on remarque qu'on a les mêmes valeurs.

On remarque que la hauteur critique du sol ferme est plus grande que celui du mou car la cohésion de ce dernier est petite par rapport à la cohésion du sol ferme, donc la hauteur critique est déterminée en fonction du degré de compacité du sol (mou, ferme, raide), c'est-à-dire en augmentant la cohésion la hauteur critique augmente.

Pour les déplacements, on remarque que les déplacements causés par la fouille de hauteur critique de 10m sont bien plus grands que ceux de 6m, donc les déplacements varient en fonction de la hauteur critique de la fouille, c'est-à-dire en augmentant la hauteur les déplacements augmentent considérablement.

6.4.3 Argile raide $C_u = 100\text{Kpa}$:

6.4.3.1 Calcul via PLAXIS :

Pour le 3eme modèle, la modélisation se fait pour un sol argileux raide de cohésion 100Kpa et d'un poids volumique saturé 20 KN/m^3 . Au début, on a fixé une hauteur de fouille, après on a augmenté jusqu'à 25 m, où on a eu une rupture donc $H_c = 24\text{m}$. La(Figure 6.10) montre que pour une hauteur de 24m on n'a pas de rupture.

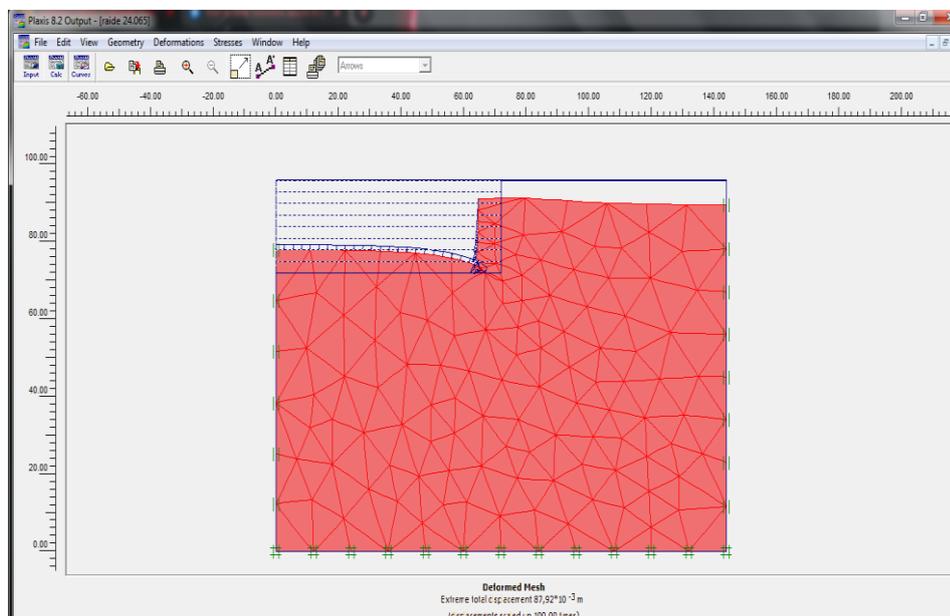


Figure 6-10 Le programme de calcul pour $H = 24\text{m}$

6 | ETUDE DE LA HAUTEUR CRITIQUE H_c D'UNE FOUILLE NON SOUTENUE

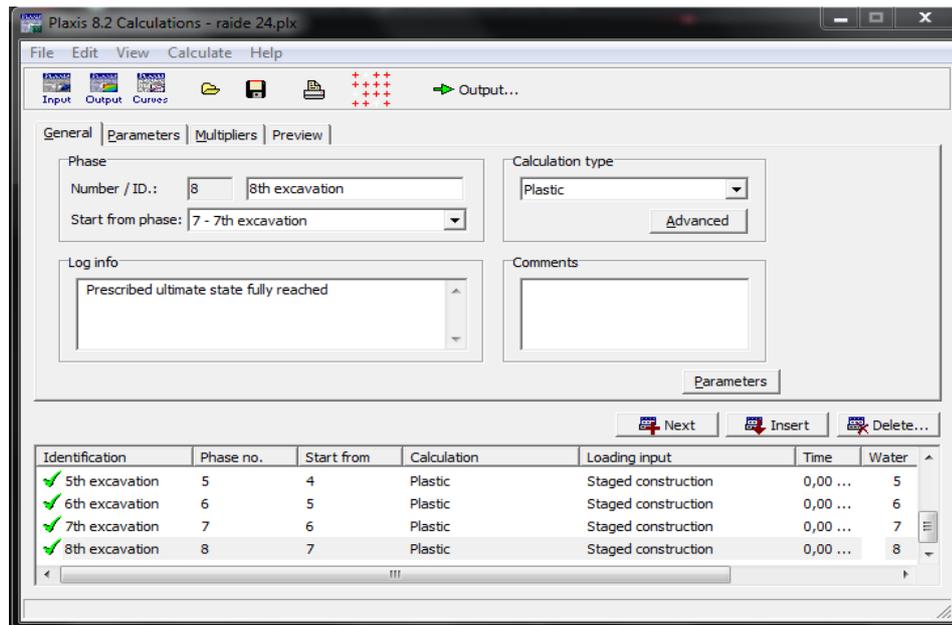


Figure 6-11 maillage déformé

La (Figure 6.10) représente les calculs réalisés sur PLAXIS avec une identification des excavations réalisées et validés par le logiciel, et aussi avec l'information du journal (Log info) qui mentionne que l'état ultime est pleinement atteint. La (Figure 6.11) montre la déformée du maillage

La (Figure 6.11) montre que le déplacement total extrême est égal à 87.92mm.

La (Figure 6.12) montre les déplacements U_x causé par la fouille de hauteur $H_c=24m$

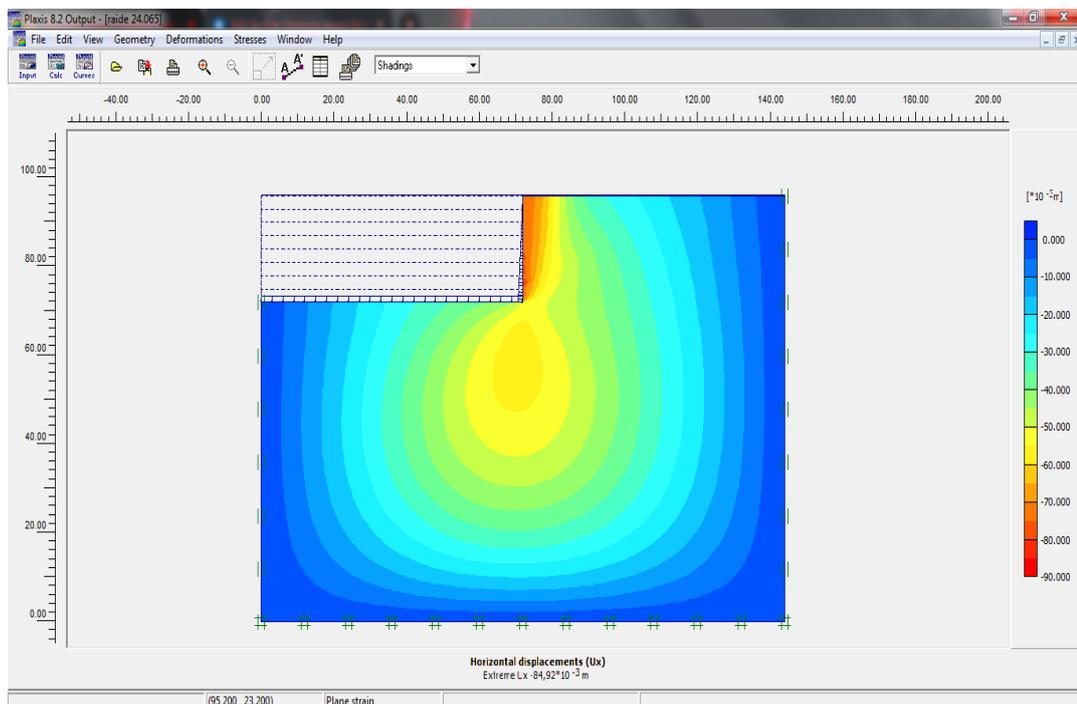


Figure 6-12 Déplacement horizontal U_x pour $H=24m$

6 | ETUDE DE LA HAUTEUR CRITIQUE H_c D'UNE FOUILLE NON SOUTENUE

D'après La (Figure 6.12) les déplacements horizontaux sont distribués et avec des valeurs maximales le long de la hauteur de la fouille, le déplacement horizontal max est d'environ 84.29mm.

On remarque qu'en s'éloignant de la fouille les déplacements horizontaux diminuent. Enfin, La (Figure 6.13) montre les déplacements verticaux U_y causé par la fouille de hauteur $H_c = 24m$.

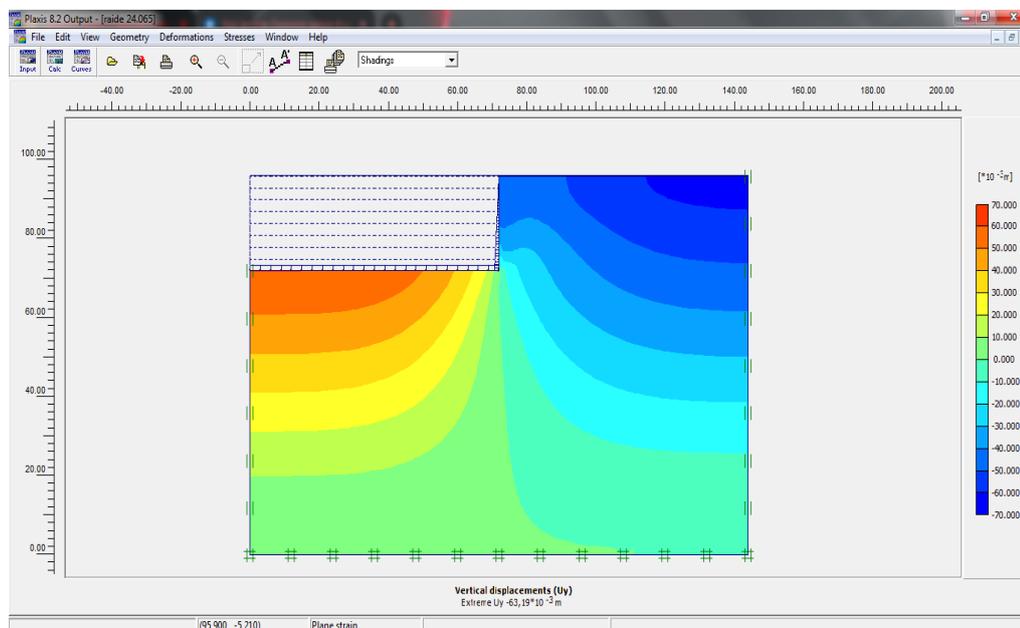


Figure 6-13 Déplacement vertical U_y pour $H = 24m$

D'après la (Figure 6.13) les valeurs maximum du tassement sont concentré dans le coté aval de la fouille avec un tassement max atteint est d'environ 63.19 mm, et en s'éloignant de cette dernière le tassement diminuent jusqu'à ce qu'il se stabilise en arrivant a une certaine distance. pour le coté amont le tassement est négligeable par rapport à l'aval.

6.4.3.2 Calcul théorique :

Dans un cas d'une fouille dans un sol saturé, la hauteur critique assurant une stabilité à court terme, avec ($\varphi = 0$) et absence d'une surcharge, est donnée par :

$$H_c = 4 \times \frac{C_u}{\gamma}$$

$$H_c = 4 \times \frac{100}{20}$$

$$H_c = 20m$$

Comparaison :

En comparant le résultat obtenus par PLAXIS et celui obtenus avec le calcul manuel, pour l'argile molle et ferme on obtient les mêmes résultats (H_c molle=6m et H_c ferme=10m). Concernant l'argile raide il existe une petite différence entre les valeurs : (H_c FEM=24m ; H_c manuel=20m)

Par comparaison des 3 sols argileux étudiés, on remarque que la hauteur critique du sol ferme est plus grande que celle de l'argile molle, et la hauteur critique de l'argile raide est la plus grande. Cela revient à la différence de la cohésion entre les sols, car la hauteur critique augmente avec l'augmentation de la cohésion.

6.5 Conclusions

Le calcul par la méthode des éléments finis entamés dans ce chapitre, mené en étudiant la stabilité d'une fouille verticale non soutenue dans un sol argileux saturé, en comportement à court terme (juste lors de l'ouverture de la fouille), a ainsi confirmé la formule de calcul théorique de la hauteur critique, issue de la théorie d'équilibre limite.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la recherche pour l'obtention d'un master génie civil, spécialité Géotechnique, et traite un problème très important dans le domaine de la géotechnique, et qui est l'étude du comportement d'un écran auto-stable sous sollicitations statiques.

La synthèse discutée dans le cadre de l'étude bibliographique dans la première partie de ce mémoire se concentre sur la description des écrans de soutènement utilisés dans le domaine de génie civil. Le développement et la diversification des écrans de soutènement (rideau de palplanche, paroi moulée, parois clouées et les parois composites, etc) rendront possible le soutènement d'une fouille ainsi que la construction des ouvrages à l'amont. Bien que ces écrans sont largement utilisés, leur mise en œuvre, le creusement de la fouille, leur installation ainsi que la gestion la nappe phréatique dans le sol ont une influence sur le comportement du sol, en modifiant les contraintes dans le sol, ce qui se traduit par des déformations verticale et horizontale de la surface du sol soutenu, et donc des déformations de la structure à l'amont de l'écran.

Le quatrième chapitre est dédié à l'étude de la variation du tassement en surface du sol à l'amont de l'écran, en cas d'absence de l'ouvrage (surcharge $q=0$) en utilisant une modélisation numérique par éléments finis via le logiciel « ZSwalls ». La 1ère partie de l'étude est faite dans un sol sableux de différents densités (sable lâche, moyennement dense et dense) et à plusieurs hauteurs de la fouille. Les résultats ont été regroupés, pour un usage pratique, sous forme de tableaux et des graphes comportant des courbes adimensionnels donnant le tassement normalisé en surface en fonction de la distance normalisée. D'après cette étude on a conclu que :

- Le tassement augmente avec la hauteur de la fouille, et diminue quand l'élanement H/D augmente.
- La position du tassement maximum varie d'un sol à l'autre et d'une hauteur de fouille à l'autre car on a remarqué que le tassement maximum dans le sable lâche est en contact avec le mur soit ($x/H=0$), tandis que le tassement maximum dans le sable dense est bien éloigné du mur.

La 2ème partie comporte une étude dans un sol argileux saturé de différents types (molle, ferme et raide) et à plusieurs hauteurs de la fouille, et on a conclu que :

- Le degré de compacité du sol argileux (mou, ferme, raide) est considéré comme le critère déterminant vis-à-vis de la forme du tassement,
- Le tassement max se produit à proximité du soutènement et décroît progressivement en s'éloignant du soutènement.

Dans l'ensemble, le tassement en surface du sol en amont d'un rideau auto-stable dépend de la nature du sol (sol pulvérulent ou sol fin saturé) et de son degré de compacité (lâche, dense, mou, ferme, raide, etc), ainsi que de l'élancement H/D du rideau.

Le 5eme chapitre comporte la détermination d'un tassement maximal dans un sol sableux ou argileux saturé avec une différence du degré de compacité pour une fiche D donnée et une hauteur H donnée et une surcharge q donnée à l'amont du rideau. Le calcul se fait par le logiciel ZSwalls, et le principe de calcul consiste à augmenter graduellement la charge q jusqu'à ce que l'écran devienne instable, et on tracera une courbe qui représente la surcharge normalisée $q/(\gamma H)$ en fonction du tassement maximum normalisé s_{max}/D . D'après les résultats obtenus à partir de ces courbes normalisées, on a conclu :

- Le tassement augmente en augmentant la charge q , et en diminuant l'élancement H/D
- La valeur du tassement maximum varie en fonction de la densité du sol.

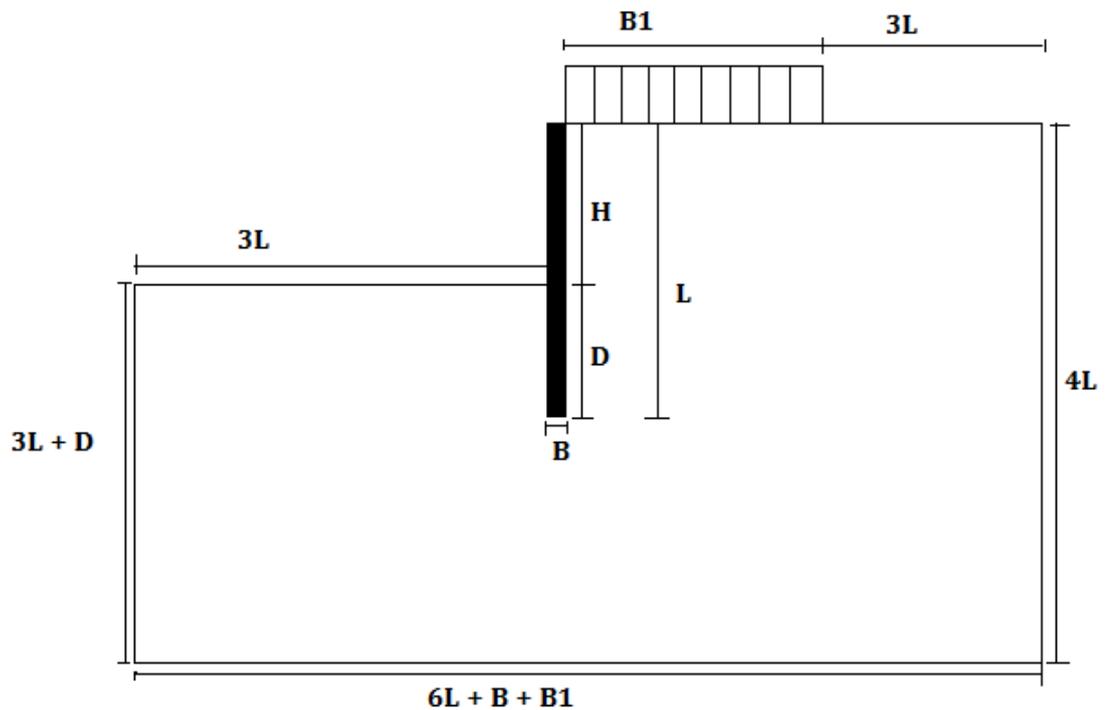
En comparant les résultats de ce chapitre avec ceux du chapitre précédent, on conclut que la présence d'une surcharge apportée par un ouvrage en amont, se traduit par des tassements considérables causés par le creusement de la fouille et son soutènement par un rideau auto-stable, aspect qu'il faut prendre en considération dans le dimensionnement des écrans soutenant des fouilles surchargées à l'amont par un ouvrage.

Le 6ème chapitre est consacré à l'étude de la hauteur critique d'une fouille non soutenue dans un sol argileux saturé homogène ayant différentes compacités (molles, ferme et raide), On a réalisé une modélisation par éléments finis via PLAXIS, et un calcul théorique à titre de comparaison. D'après les résultats obtenus dans ce chapitre, on a conclu que :

- La hauteur critique engendre beaucoup de déplacements du sol,
- La hauteur critique varie en variant la compacité du sol car on remarque qu'en augmentant la cohésion C_u de l'argile, la hauteur critique augmente.
- Le calcul par élément finis est en très bon accord avec celui donné par un calcul manuel basé sur la théorie d'équilibre limite.

LES ANNEXES

Annexe4 :



$L = H + D$: Longueur total de l'écran

B : Largeur de l'écran ($B = 0.5m$)

$B1$: Largeur du radier ($B1 = H \times \text{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)$)

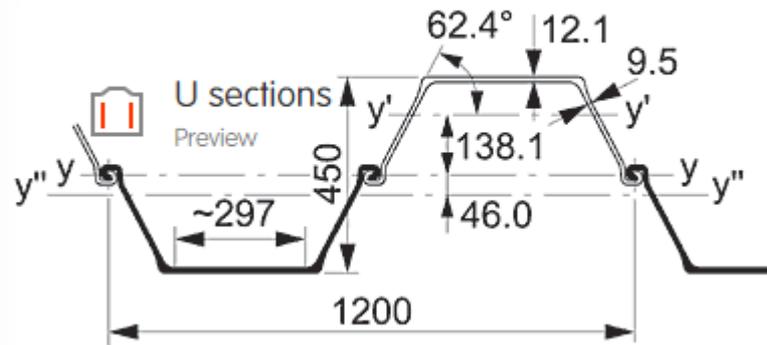
d : distance du radier de la tete de l'écran ($d = 0$)

H : hauteur de la fouille

D : fiche de l'écran

Annexe4.1 : Le modèle FEM introduit dans le logiciel ZSwalls (thèses de Hazout (2007) et Ameer (2006),)

Profile : PU 22



	Sectional area	Mass per m	Moment of inertia	Elastic section modulus	Radius of gyration	Coating area*
	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm	m ² /m
Per S	109.7	86.1	8740	546	8.93	0.90
Per D	219.5	172.3	59360	2640	16.45	1.79
Per T	329.2	258.4	82060	3025	15.79	2.68
Per m of wall	182.9	143.6	49460	2200	16.45	1.49

*One side, excluding inside of interlocks

S = Single pile: considered neutral axis y'-y'

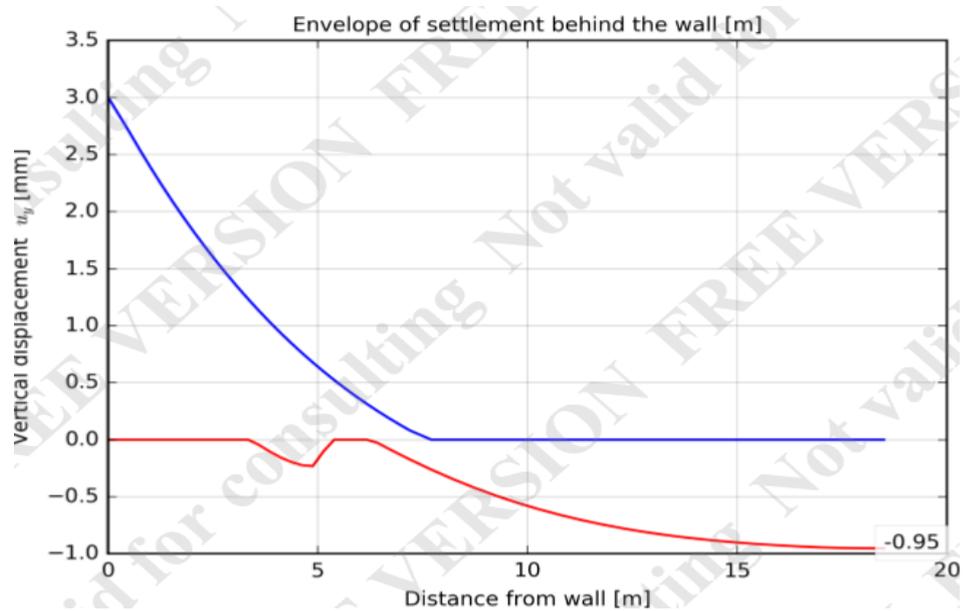
D = Double pile: considered neutral axis y-y

T = Triple pile: considered neutral axis y''-y''

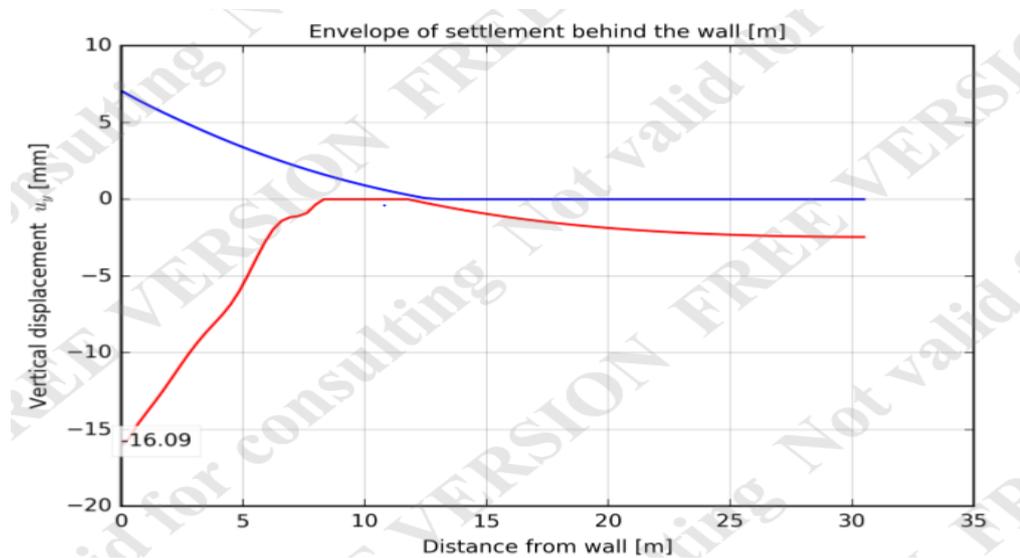
Annexe 4.2 : caractéristiques géométriques du profilé PU22

Les courbes obtenues à partir de la modélisation numérique par « ZSwalls », en cas d'absence de l'ouvrage $q=0$

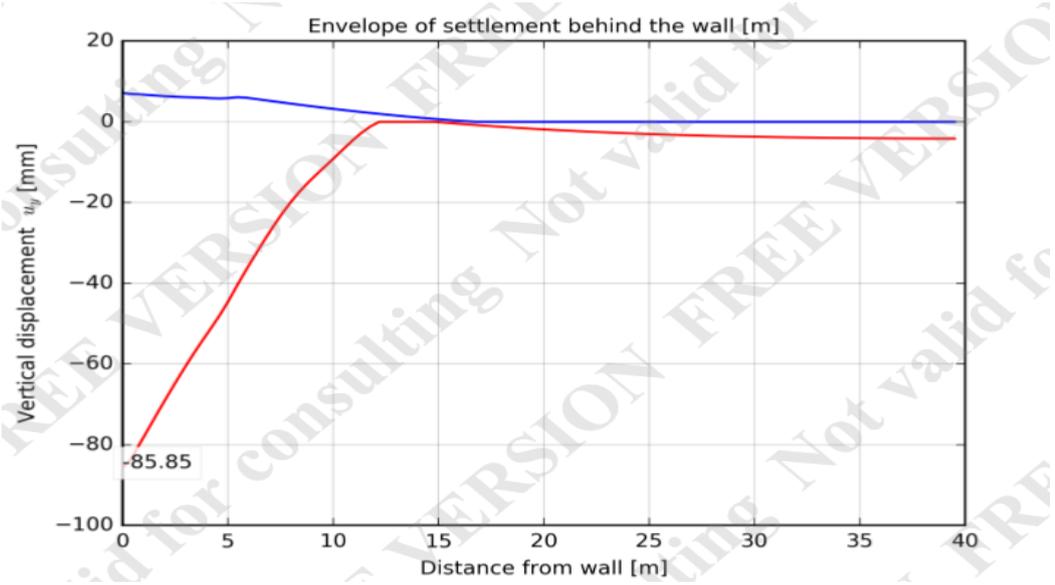
- **Sable lâche :**



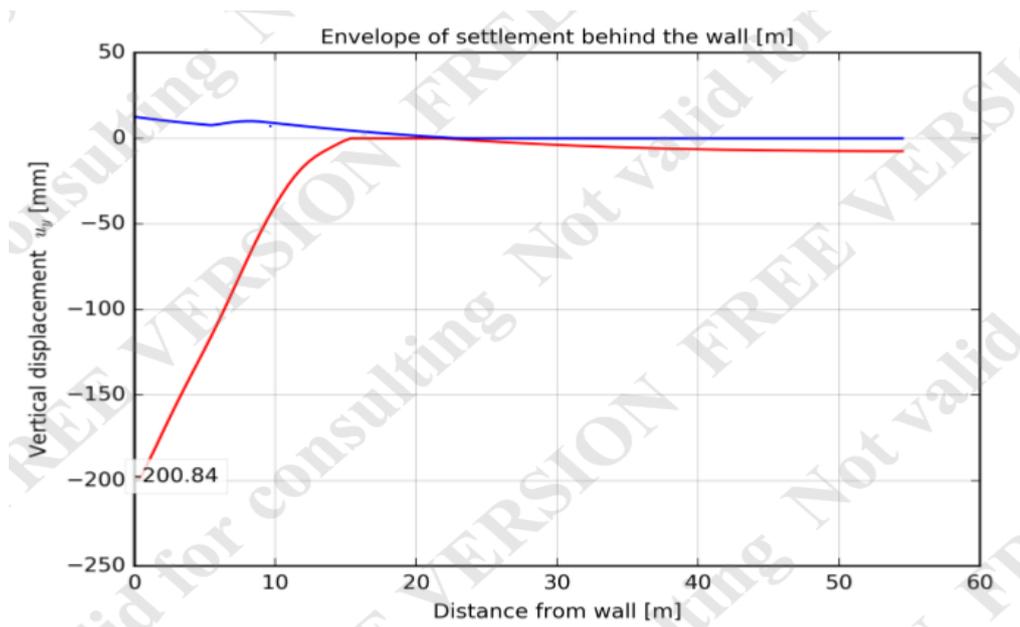
Annexe 4.3 Courbe de tassement en fonction de la distance pour $H=4\text{m}$ $D=2\text{m}$



Annexe4.4 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour $H=6\text{m}$ $D=4\text{m}$

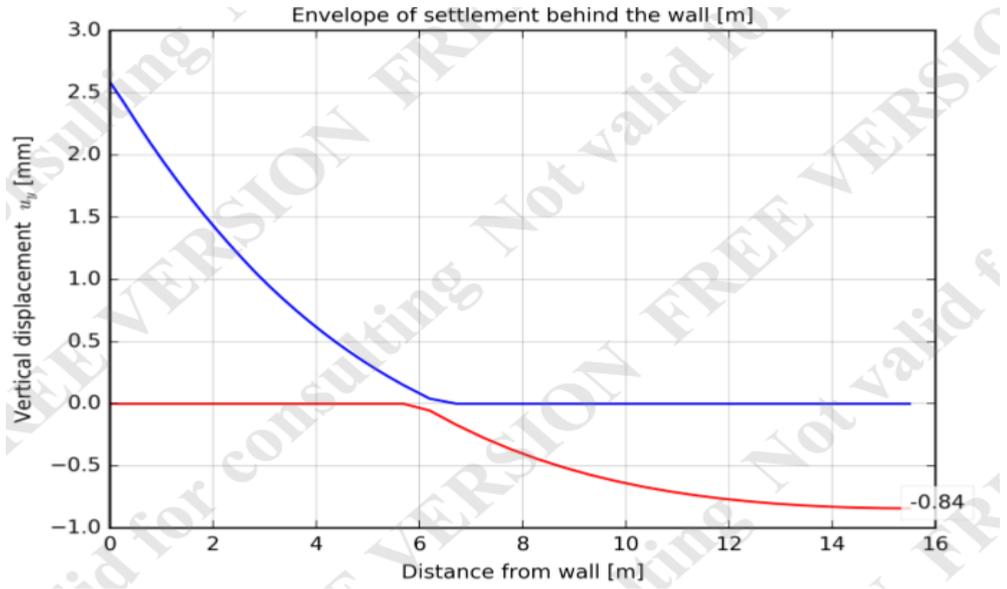


Annexe4.5 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=8m D=5m

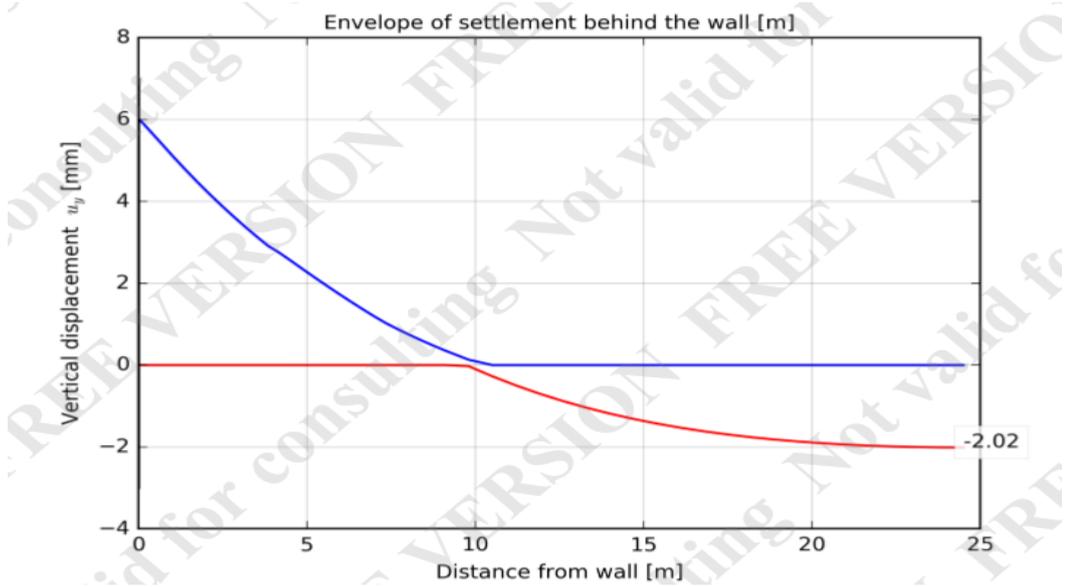


Annexe4.6 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=10m D=8m

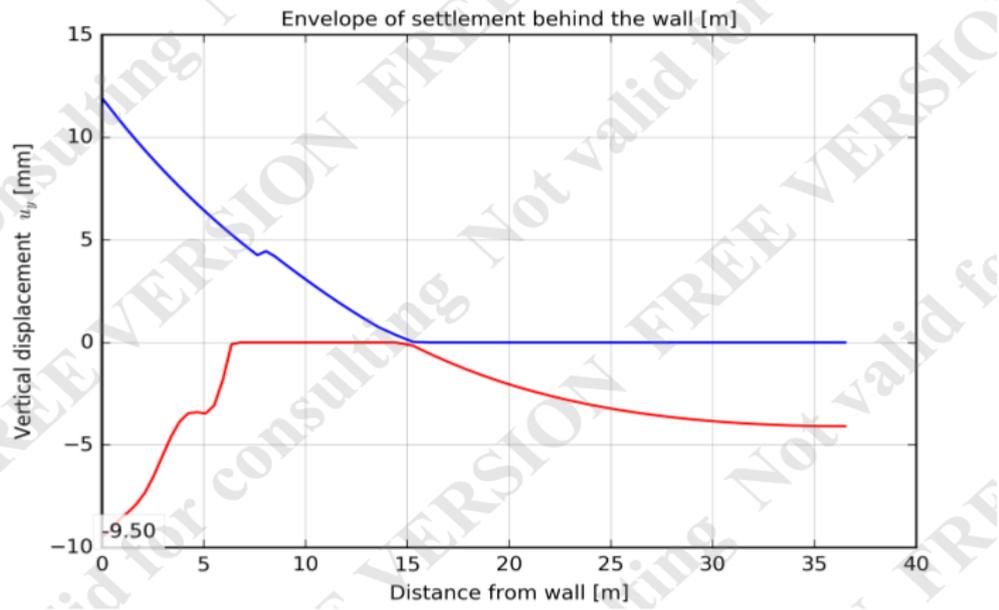
- sable moyennement dense :



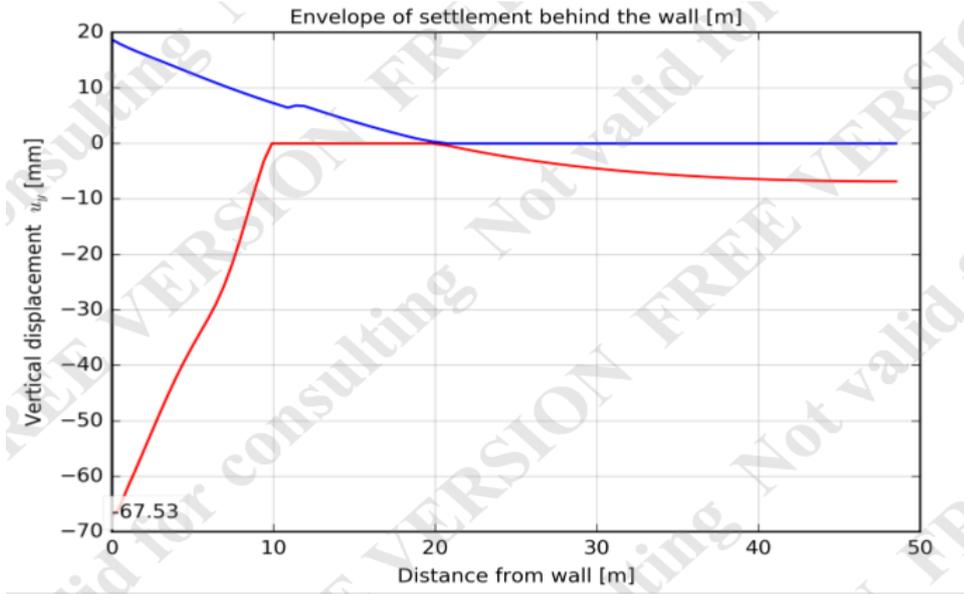
Annexe4.7 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=4m D=1m



Annexe4.8 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=6m D=2m

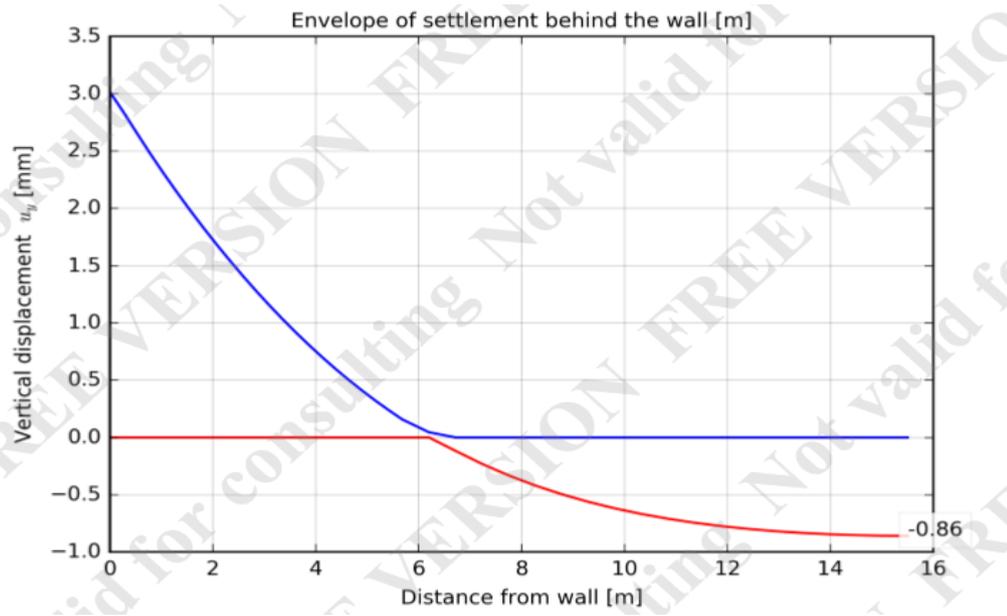


Annexe4.9 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=8m D=4m

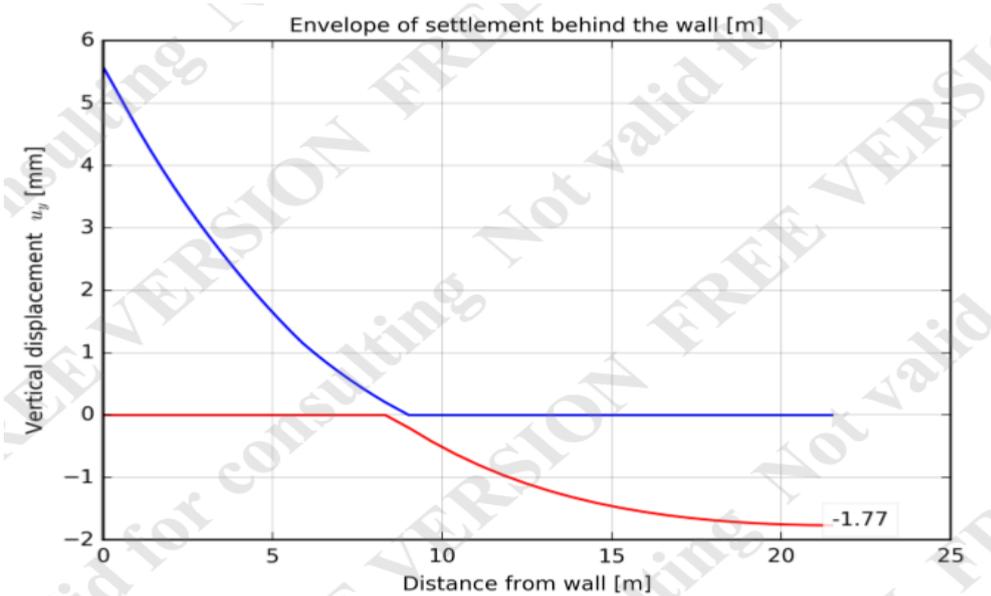


Annexe4.10 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=10m D=6m

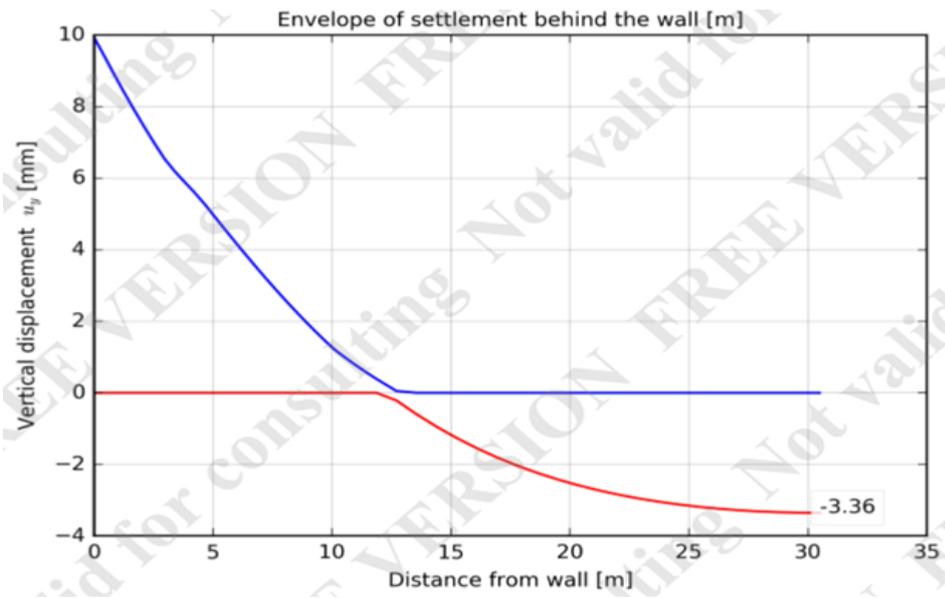
- **Sable dense :**



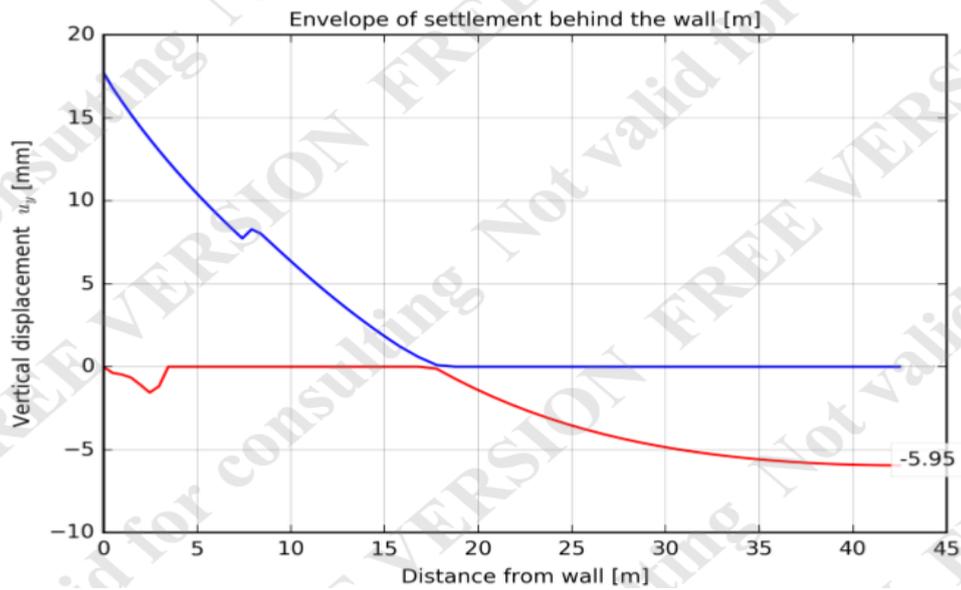
Annexe4.11 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=4m D=1m



Annexe4.12 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=6m D=1m

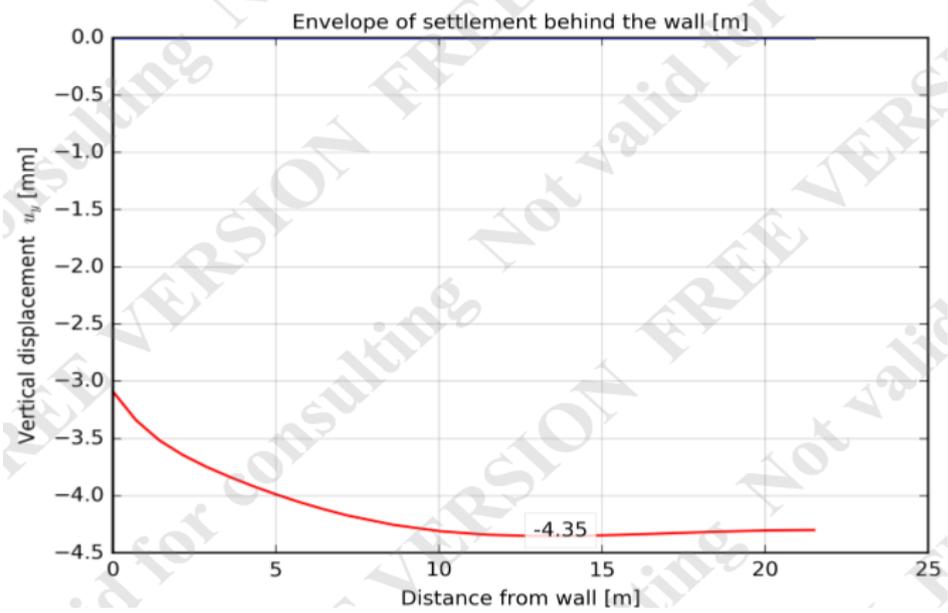


Annexe4.13 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=8m D=2m

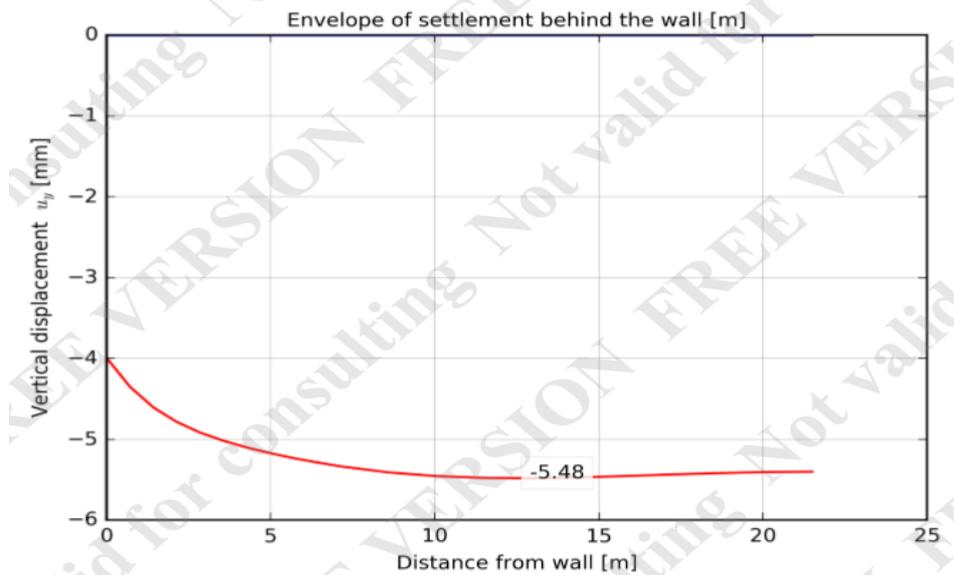


Annexe4.14 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=10m D=4m

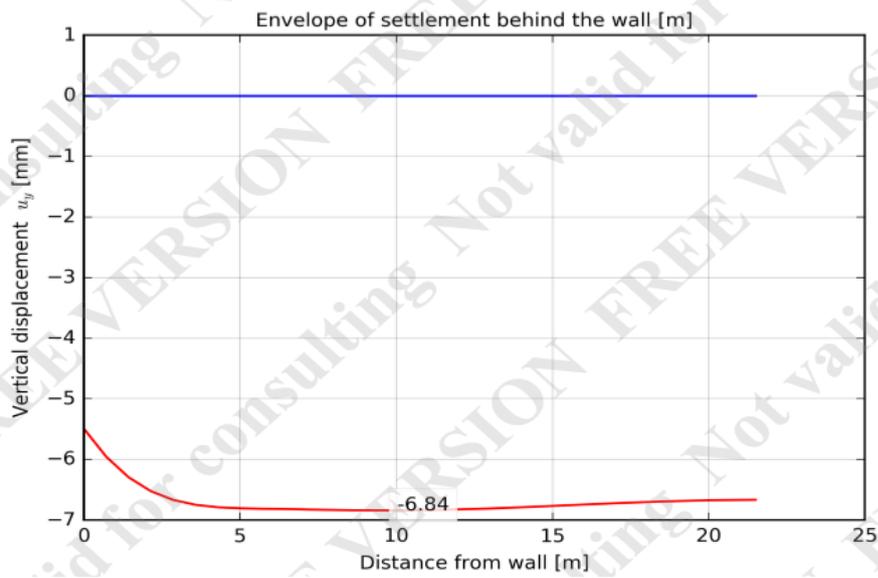
- Argile molle :



Annexe4.15 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=4m D=3m

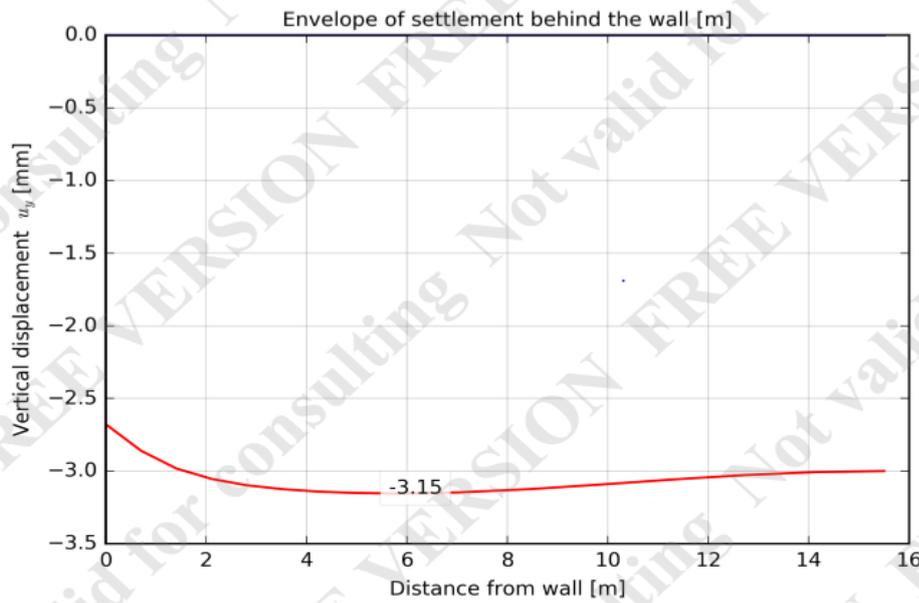


Annexe4.16 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=5m D=2m

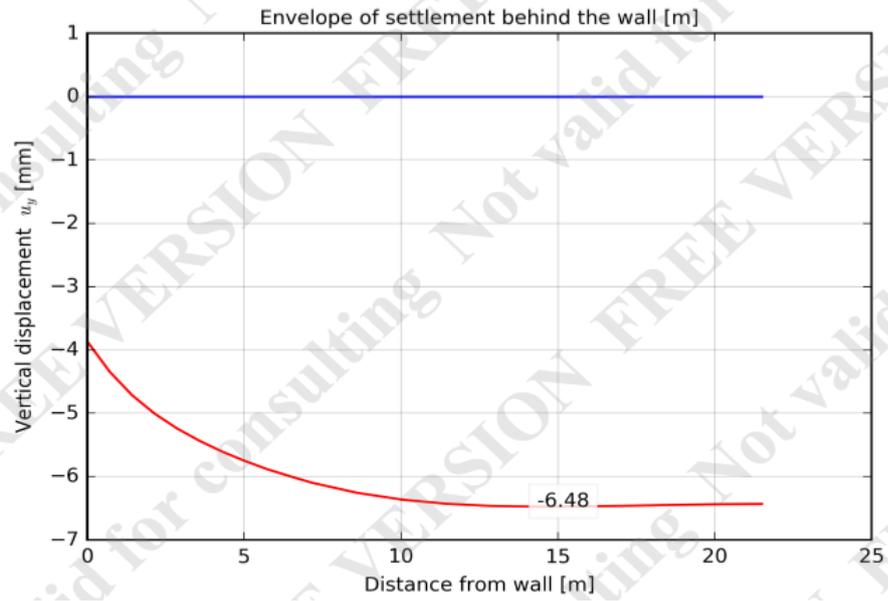


Annexe4.17 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=6m D=1m

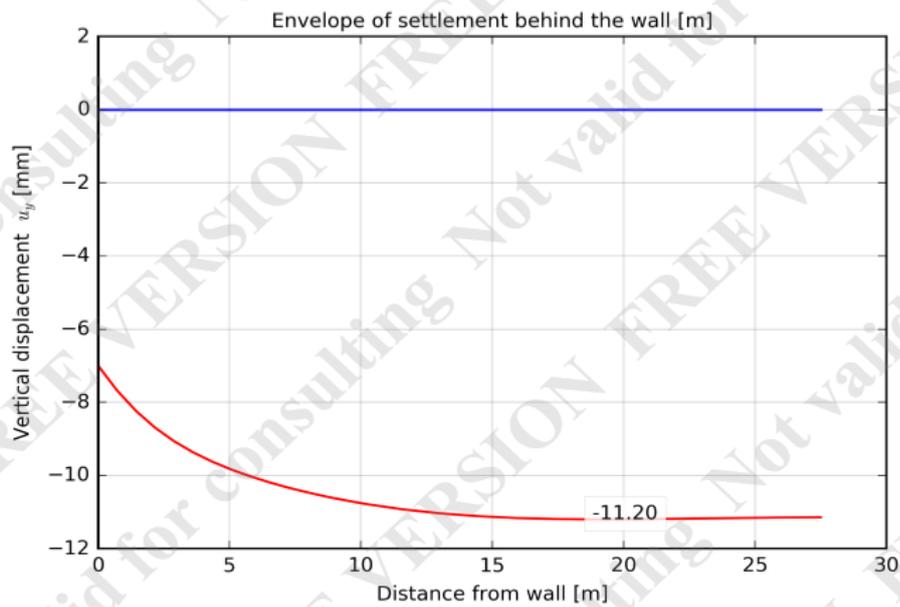
- Argile ferme :



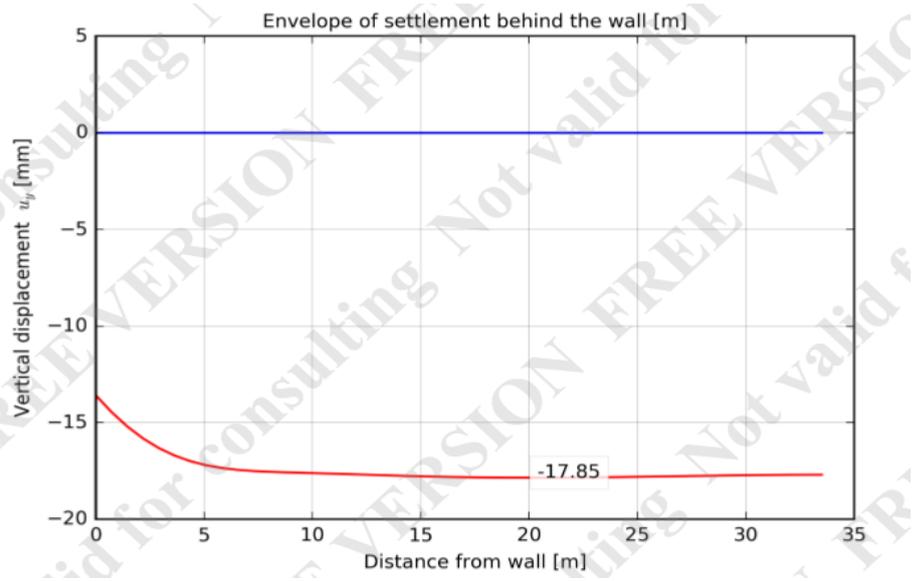
Annexe4.18 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=4m D=3m



Annexe4.19 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=6m D=1m

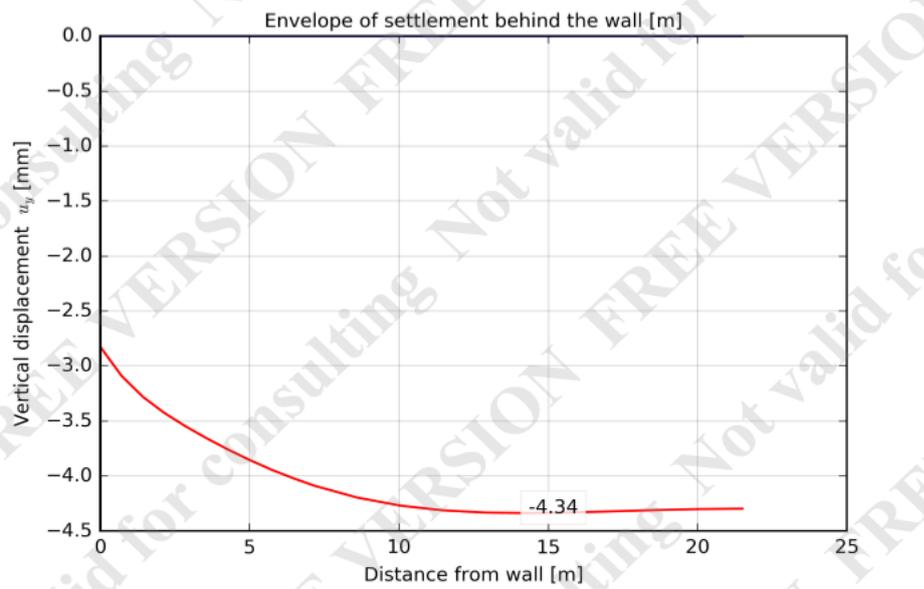


Annexe4.20 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=8m D=1m

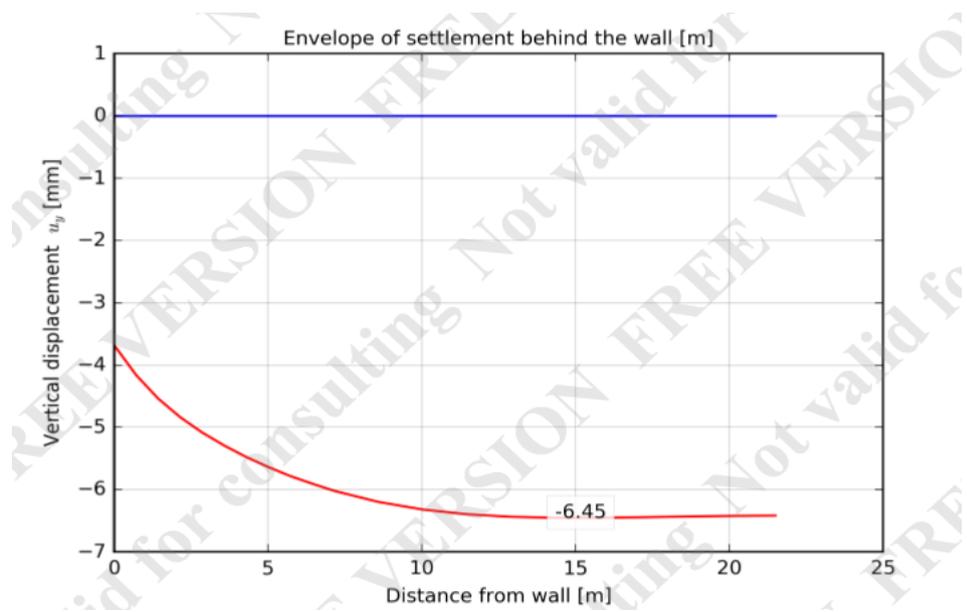


Annexe4.21 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=10m D=1

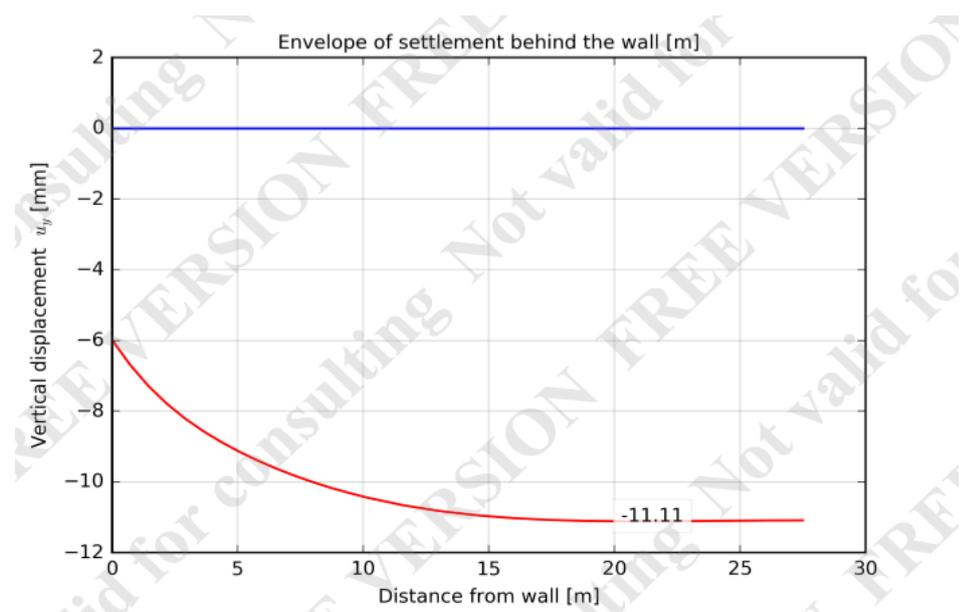
- Argile raide



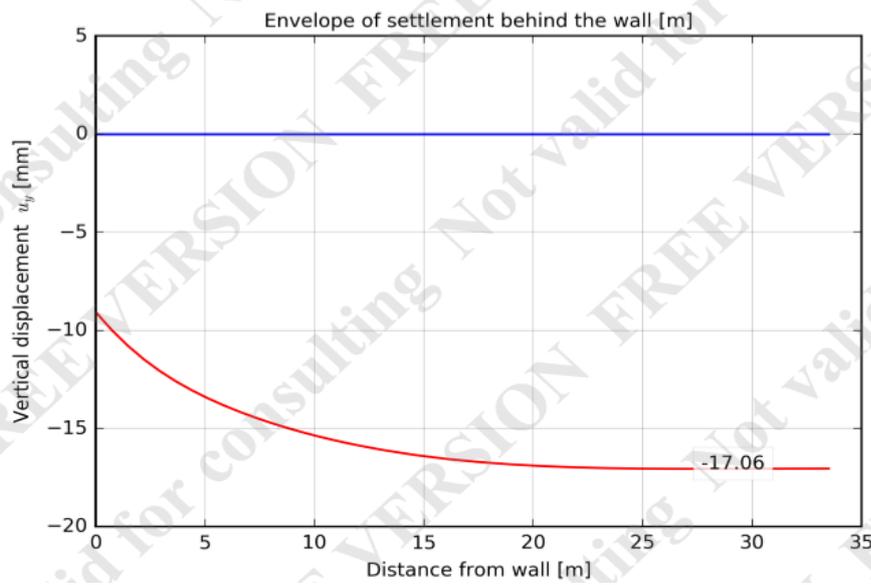
Annexe4.22 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=4m D=3m



Annexe4.23 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=6m D=1m



Annexe4.24 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=8m D=1m

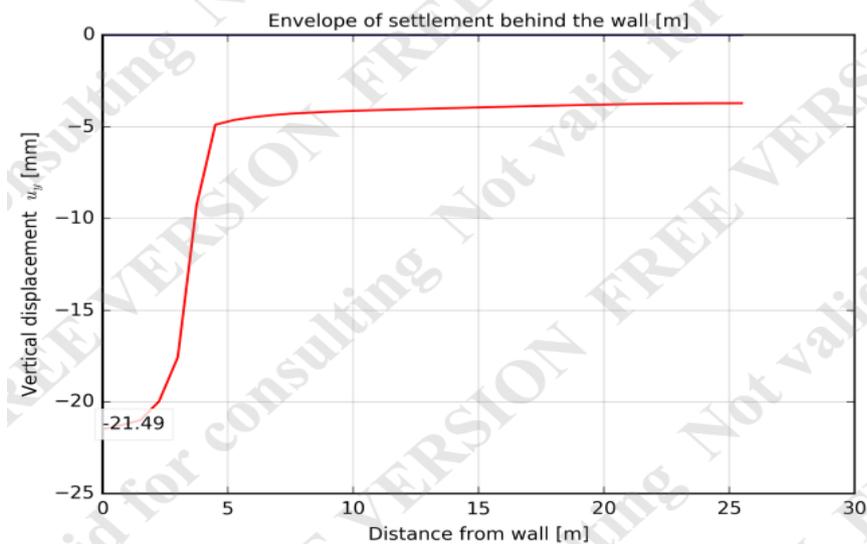


Annexe4.25 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=10m D=1m

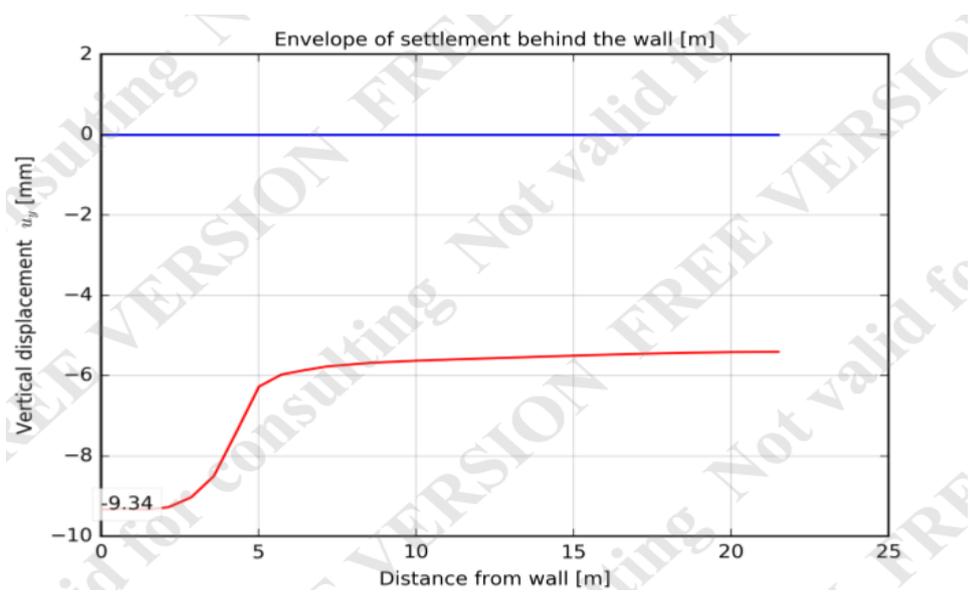
Annexe5:

Les courbes obtenues à partir de la modélisation numérique par « ZSwalls », en cas d'absence d'ouvrage ($q \neq 0$)

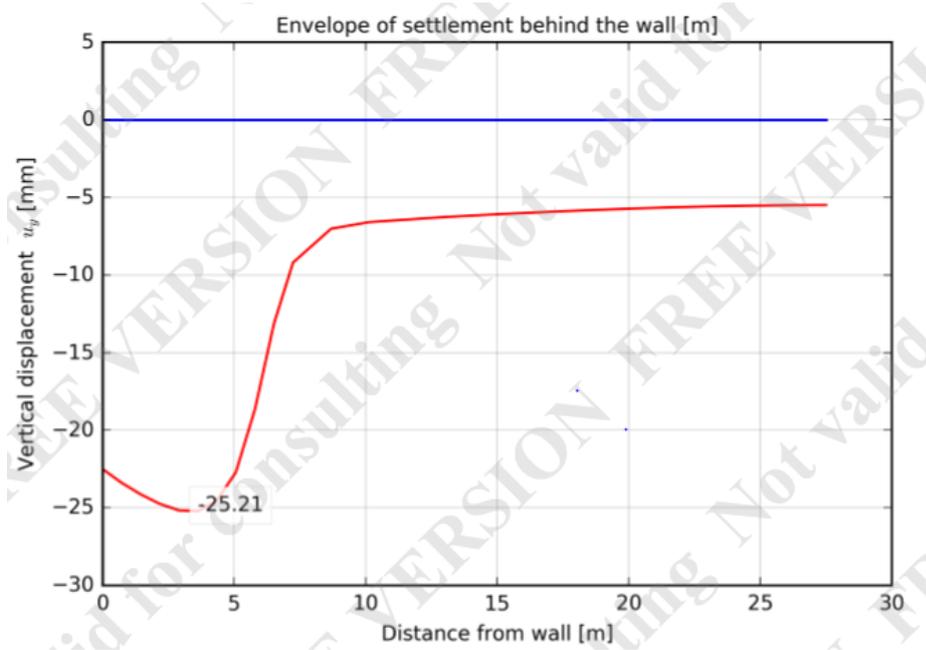
- Argile molle



Annexe5.1 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=4m D=3m $q=33$ kpa

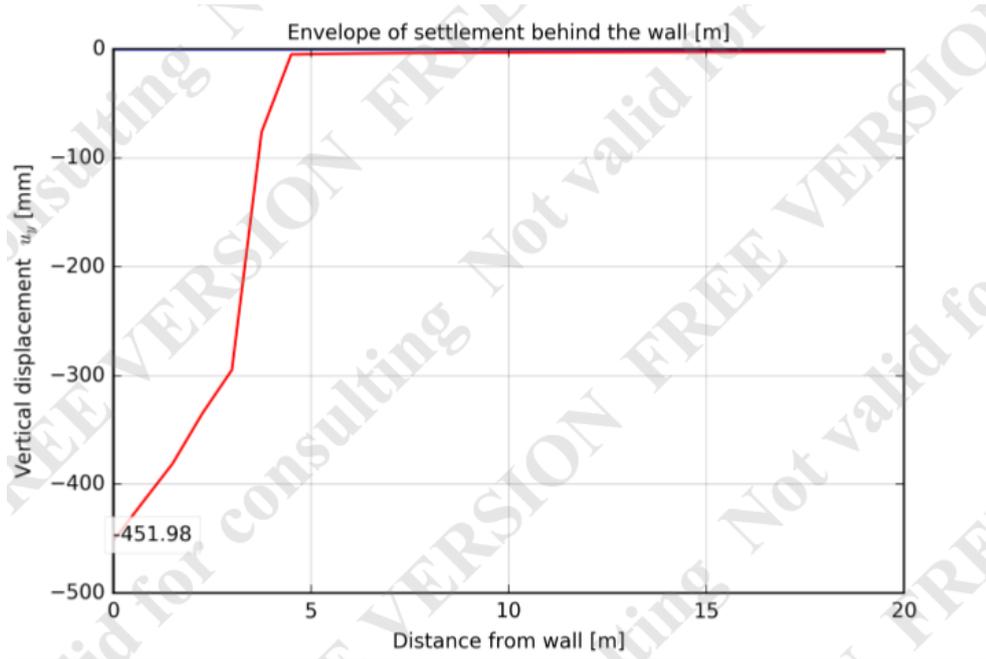


Annexe5.2 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=5m D=2m q=21kpa

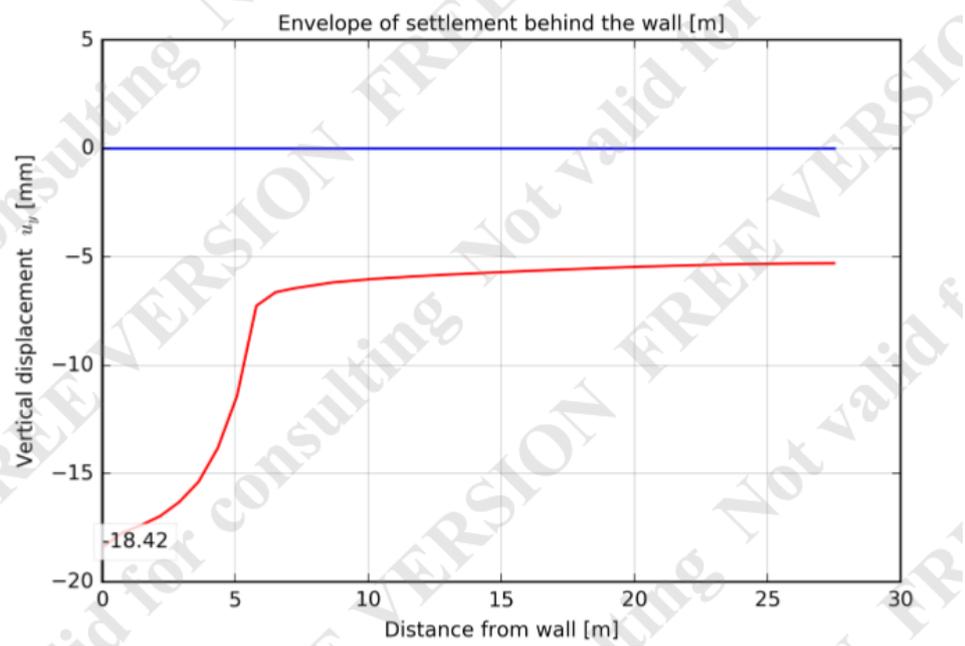


Annexe5.3 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=6m D=1m q=12ka

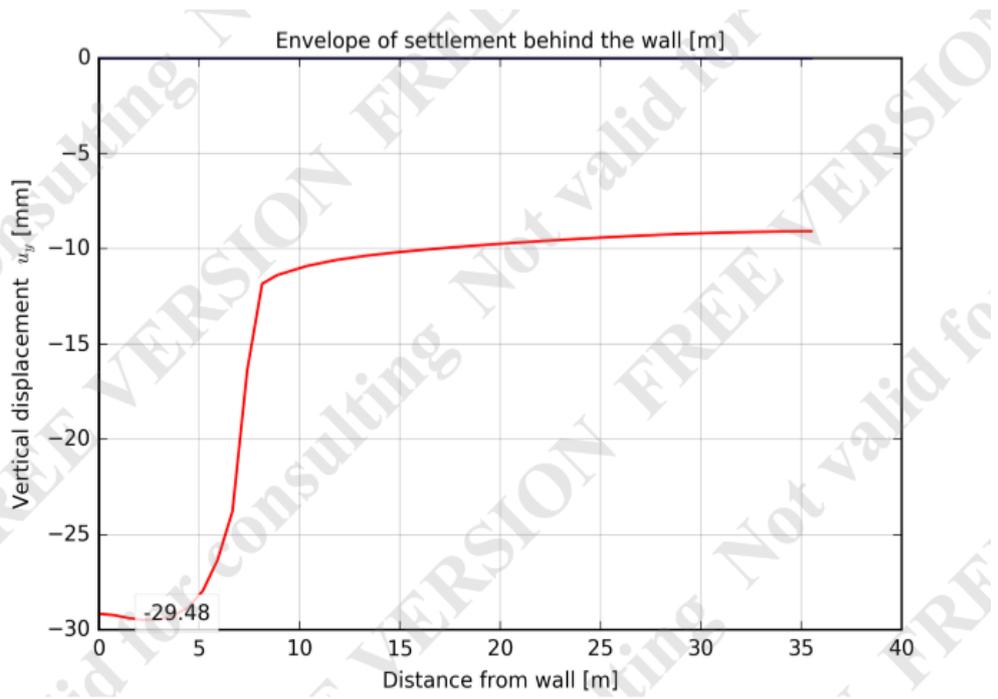
- Agile ferme



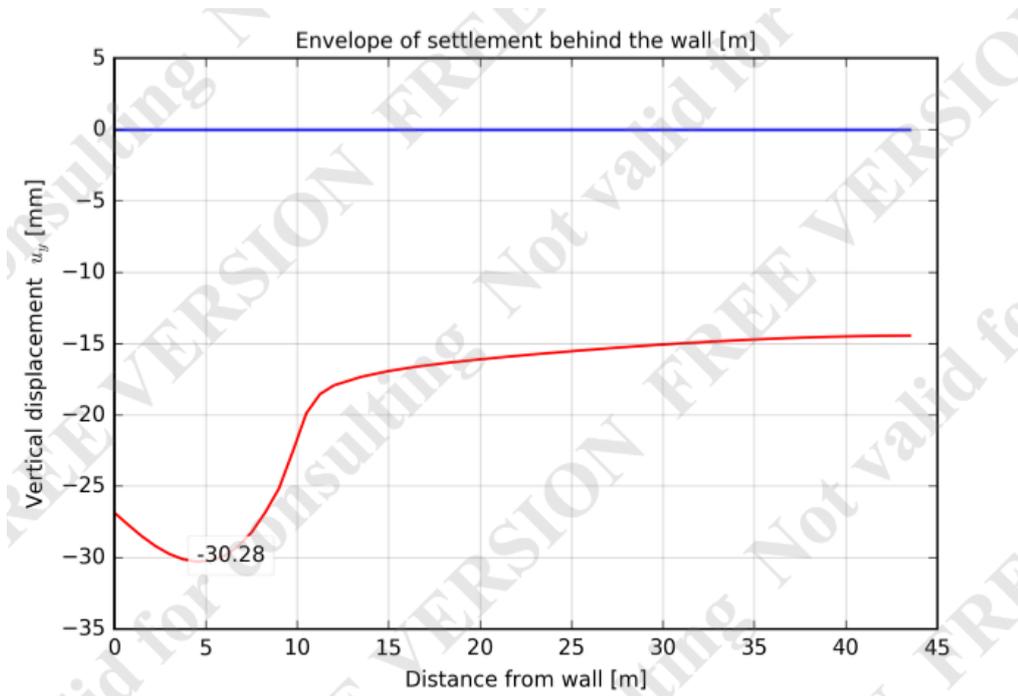
Annexe5.4 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=4m D=3m q=85kpa



Annexe5.5 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=6m D=1m q=58kpa

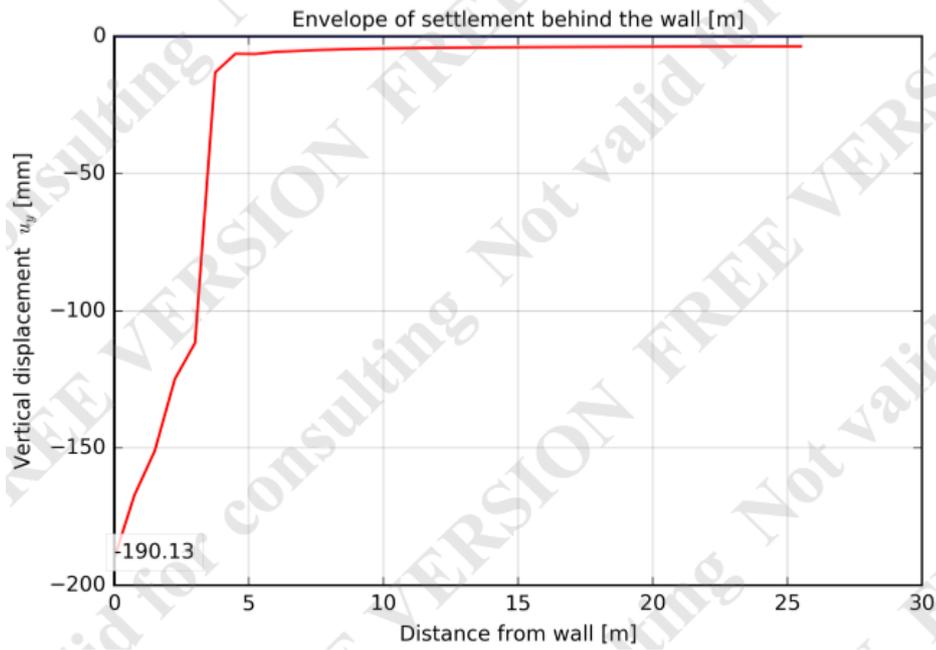


Annexe5.6 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=8m D=1m q=41kpa

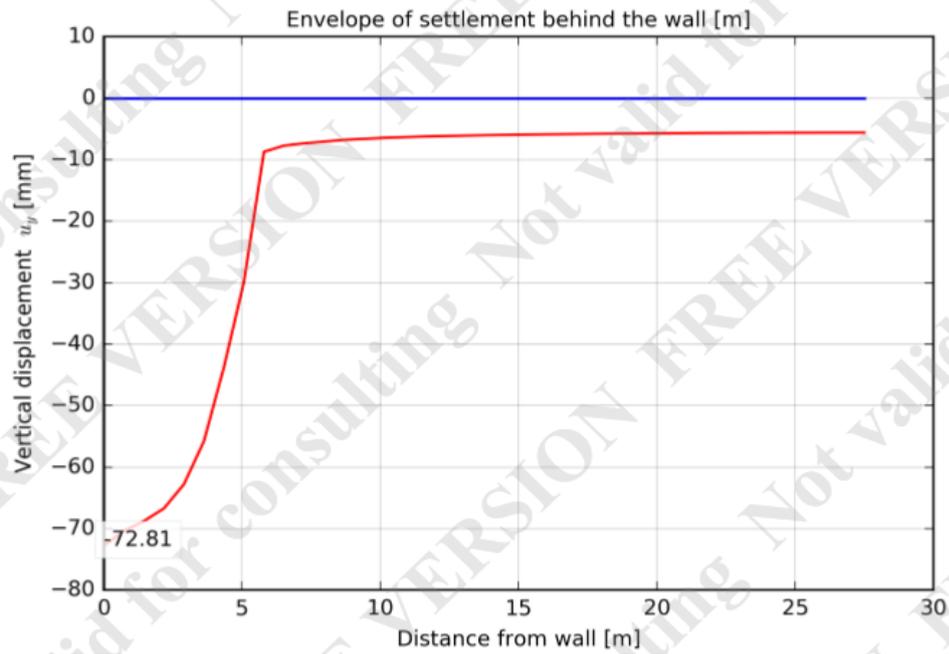


Annexe5.7 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=10m D=1m q=18kpa

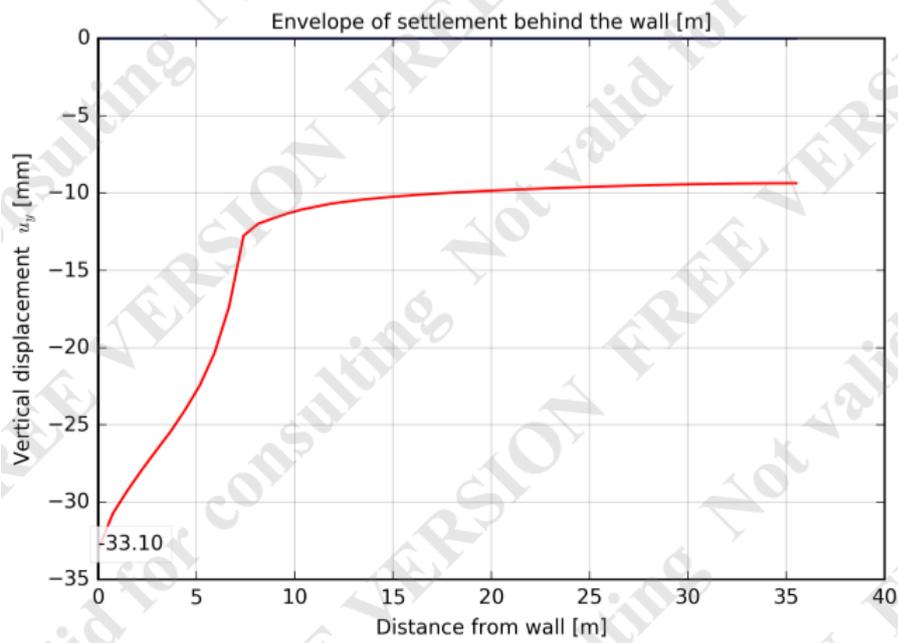
- Argile raide



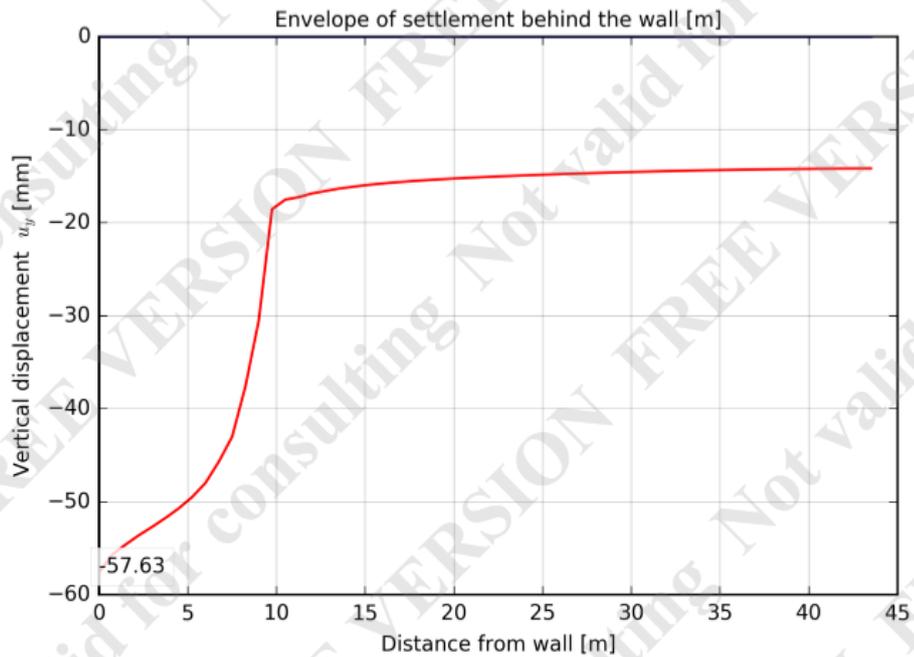
Annexe5.8 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=4m D=3m q=210kpa



Annexe5.9 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=6m D=1m q=163kpa

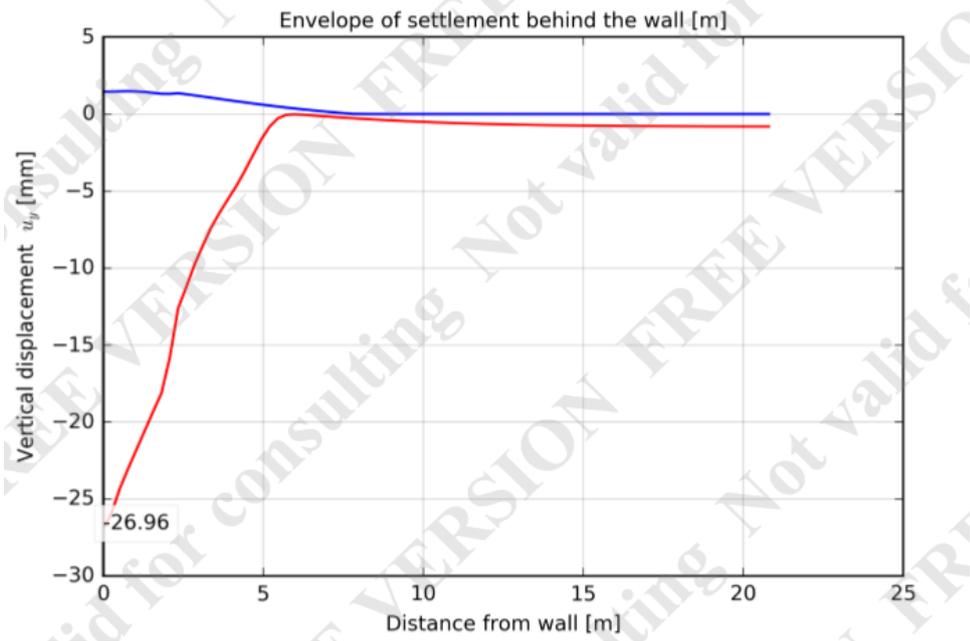


Annexe5.10 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour $H=8m$ $D=1m$
 $q=145kpa$

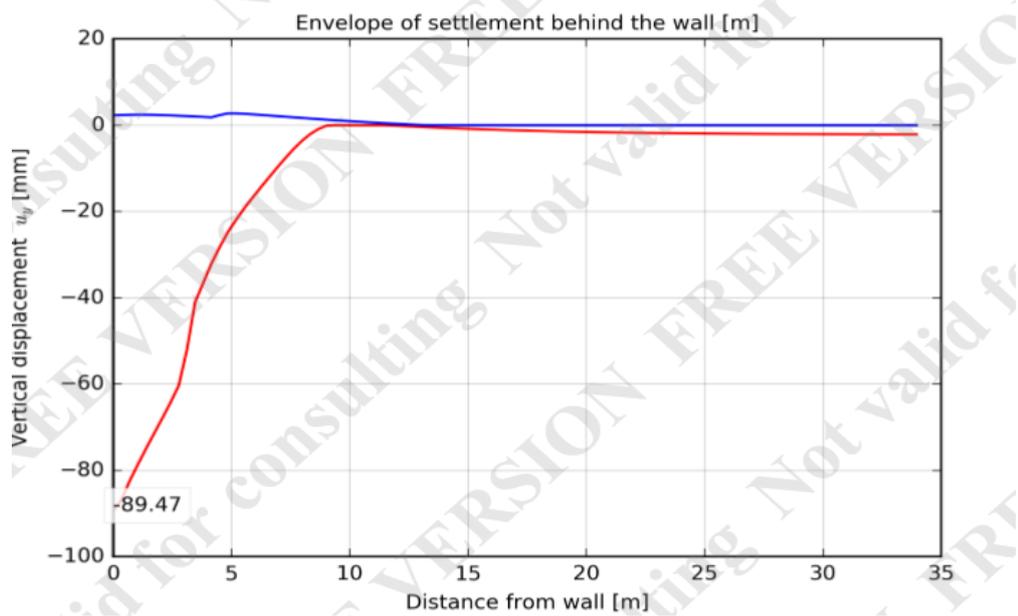


Annexe5.11 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour $H=10m$ $D=1m$
 $q=130kpa$

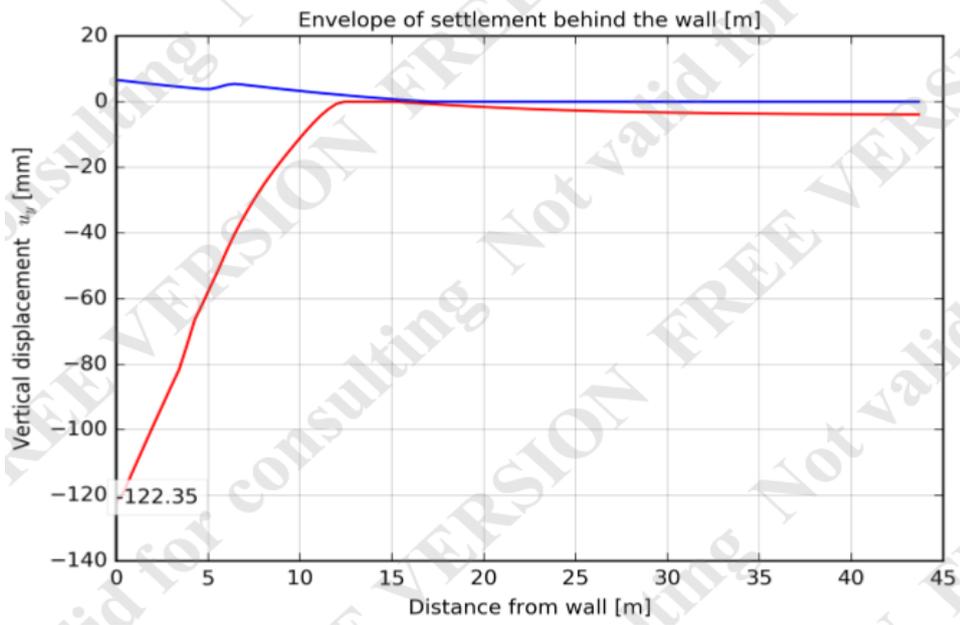
- Sable lâche



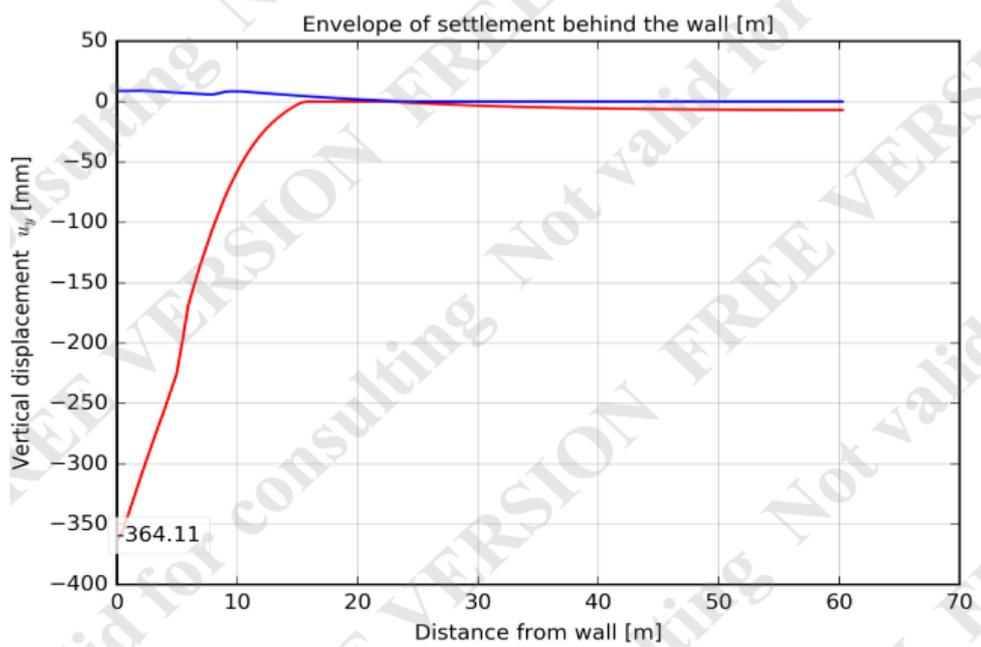
Annexe 5.12 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=4m D=2m q=12kpa



Annexe 5.13 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=6 D=4m q=20kpa

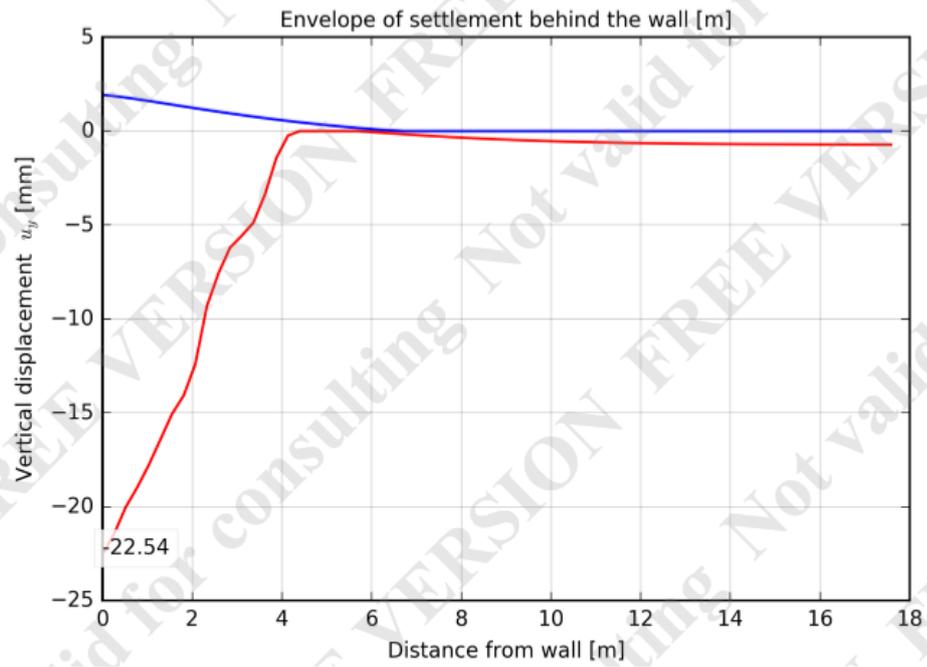


Annexe5.14 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=8m D=5m q=6kpa

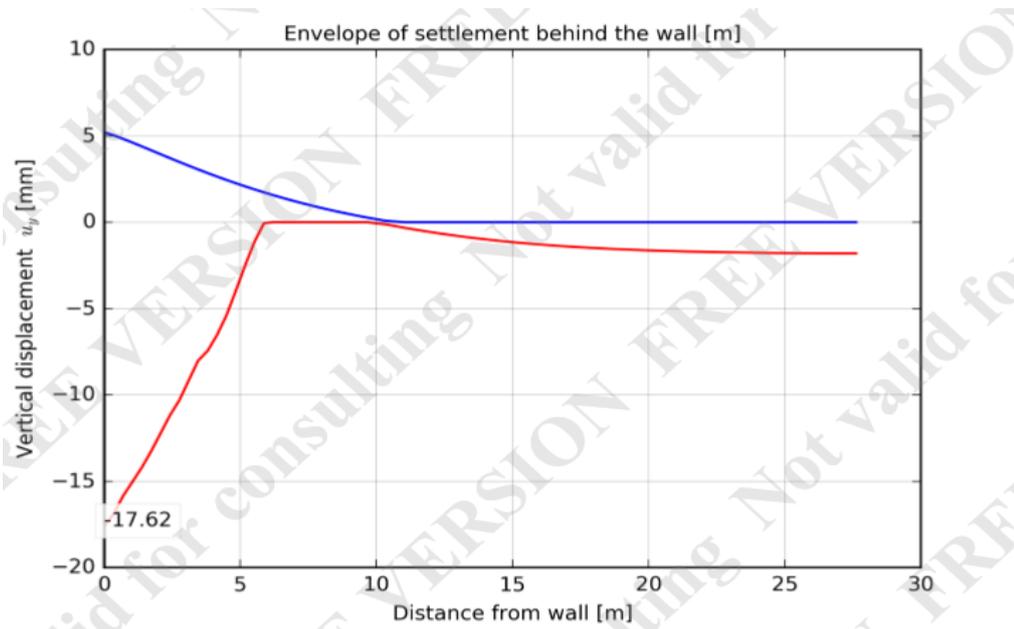


Annexe5.15 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=10m D=8m q=15kpa

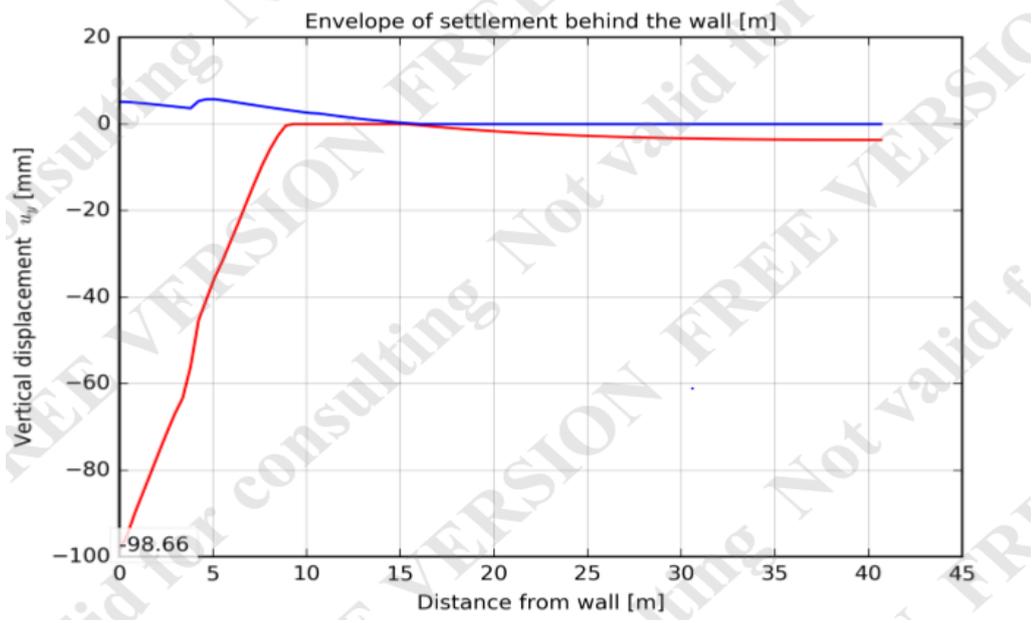
- Sable moyennement dense



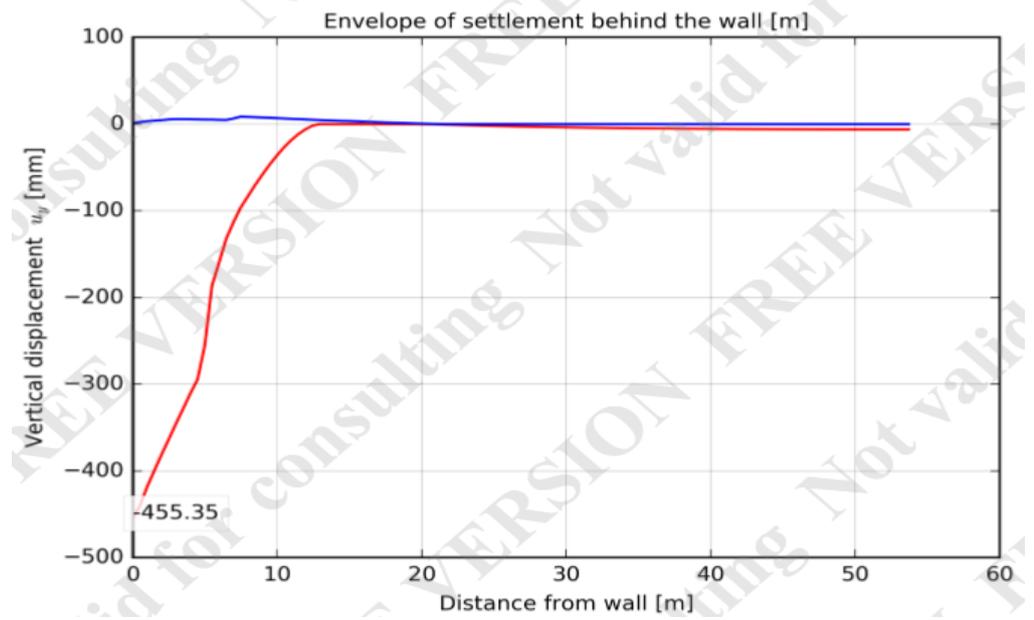
Annexe5.16 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=4m D=1m q=13kpa



Annexe5.17 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=6m D=2m q=8kpa

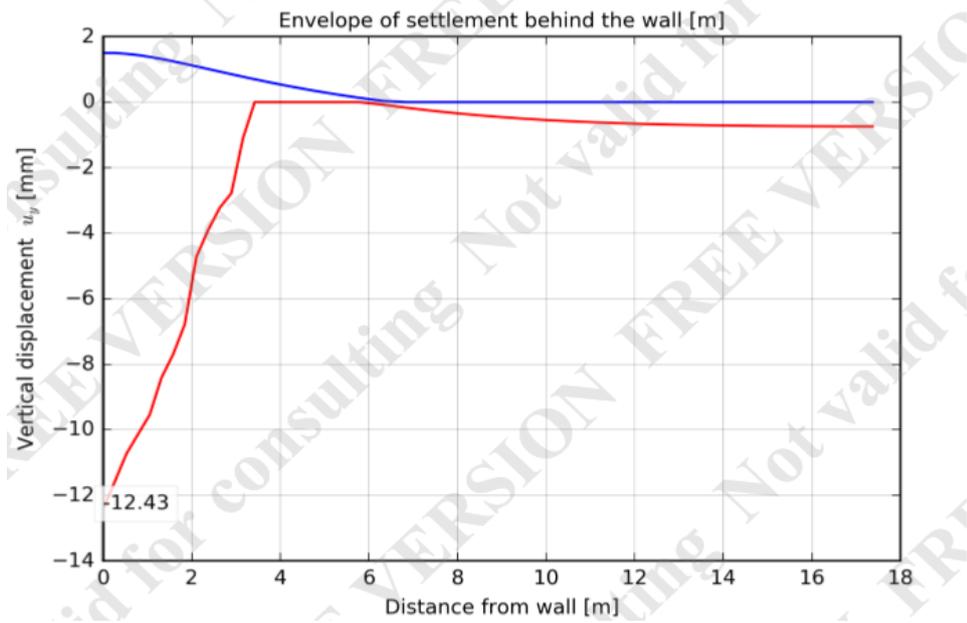


Annexe5.18: Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=8m D=4m q=19kpa

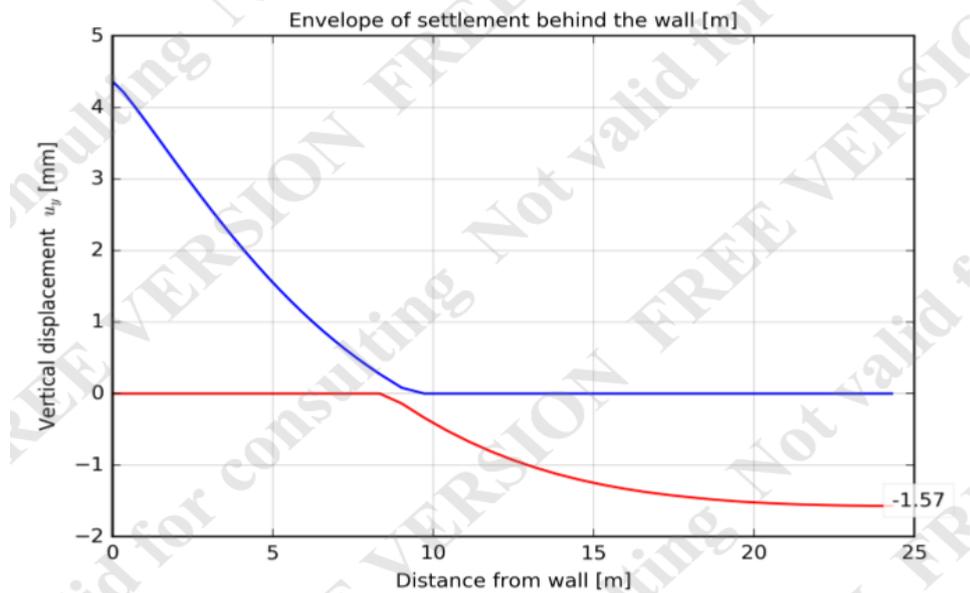


Annexe5.19 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=10m D=6m q=47kpa

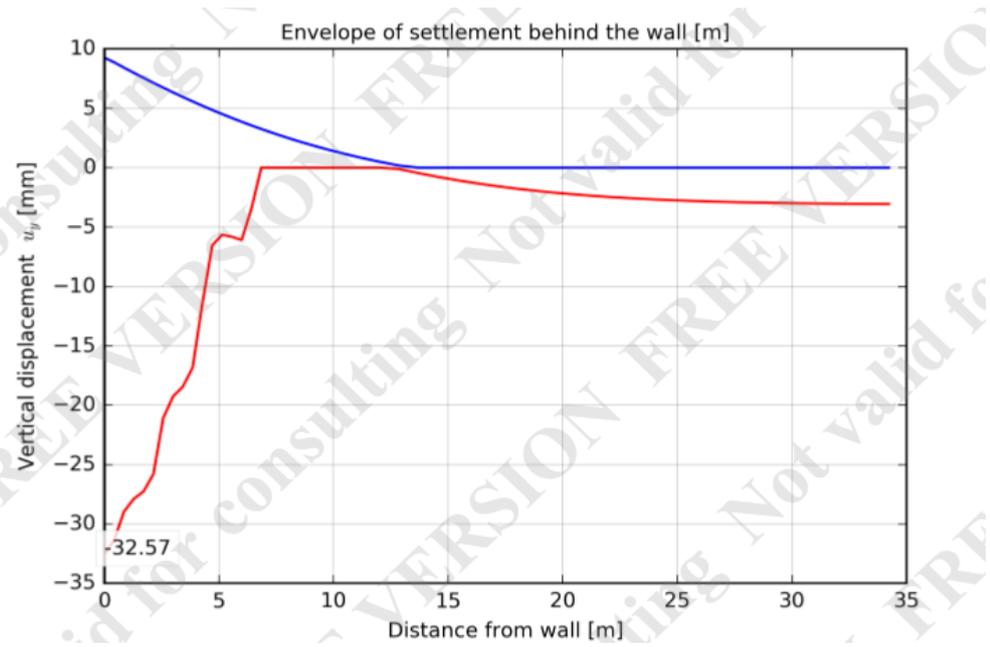
- Sable dense



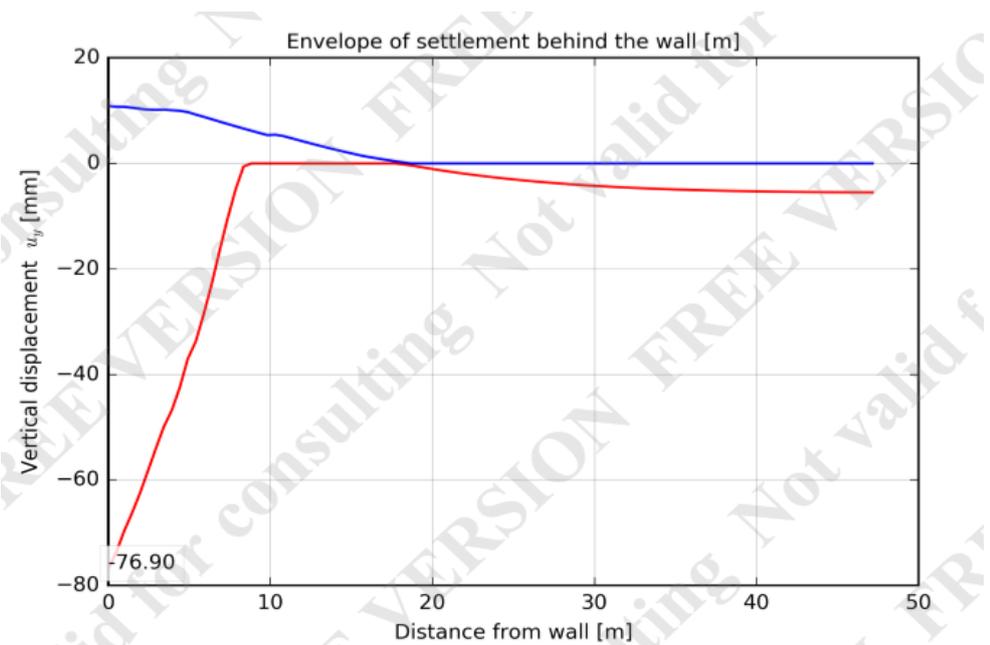
Annexe5.20 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=4m D=1m q=25kpa



Annexe5.21: Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=6m D=1m q=12kpa



Annexe5.22 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=8m D=2m q=6kpa



Annexe5.23 : Courbe de tassement en fonction de la distance pour H=10m D=4m
Q=17kpa

LISTE DES REFERENCES

- 1) **Ali BOUAFIA(2018)**, livre électronique calcul des ouvrages géotechnique problèmes résolue
- 2) **LCPC (2003)**, laboratoire central des ponts et chaussées, guide technique sur ouvrage de soutènement recommandations pour l'inspection détaillée le suivi et le diagnostic des rideaux de palplanches métallique. juillet/2003, 58, bd lefebve, F75732,paris cadex15
- 3) **LCPC(2003)**, laboratoire central des pont et chaussées, guide technique sur les ouvrage de soutènement recommandations pour l'inspection détaillée le suivi et le diagnostic des parois moulées et préfabriquées .juillet2003, 58,bdlefebvre,F 75732, paris cadex15
- 4) **LCPC(2003)**, laboratoire central des pont et chaussées, guide technique sur les ouvrage de soutènement recommandations pour l'inspection détaillée le suivi et le diagnostic des parois clouées.juillet2003, 58,bdlefebvre,F 75732, paris cadex15
- 5) **LCPC (juillet 2003)**, laboratoire central des pont et chaussées, guide technique sur les ouvrage de soutènement recommandation pour l'inspection détaillée le suivi et la diagnostic des ouvrages de soutènement en paroi composite. juillet 2003,58, bd lefebve, F75732, paris cadex15.
- 6) **Younés AMEUR (2006)**, analyse expérimentale et numérique de l'interaction sol-soutènement rigide,thèse de magister en génie civil soutenue par le 22/02/2006 à l'université de Blida.
- 7) **Leila HAZOUT (2007)**, modélisation numérique de l'effet de la proximité d'un ouvrage sur un mur de soutènement-Etude paramétrique, thèse de magister en génie civil soutenue par 13/05/2007 à l'université de Blida.
- 8) **Karim CHAREF (2011)**,modélisation de l'interaction sol-structure pour le cas des palplanches(cas d'un écran de palplanches à AZEFFOUN) mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de master 2.

9) **Delattre Luc, (2004)**- Un siècle de méthodes de calcul d'écrans de soutènement : III. La modélisation des écrans de soutènement par la méthode des éléments finis, Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées 252-253, Réf.4529-PP.95-1

10) **ZSwalls 2D (2018)**, manuel référence, 23/02/2018

11) **PLAXIS 2D v 8.2 (2004)**, manuel référence version 8