

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Ibn-Khaldoun de Tiaret  
Faculté des Sciences Appliquées  
Département de Génie Civil



En vue de l'obtention du Diplôme de  
MASTER ACADEMIQUE  
Option : Géotechnique

***THEME***

*Etude d'une palplanche près d'une usine dans la zone industrielle d'Oran : "  
modélisation des interactions sol-structure avec Geo5 et Plaxis "*

Présenté par:

MESSAOUDI MOHAMED ZINE ELAABIDINE  
HATTAB OUM ELDJILALI

Le jury compose de:

Mme : Z. RENNAK - Président  
Mr : B. SERBAH - Encadrant  
Mr : M. BEKKI - Examinatrice  
Mme : A. DRAOUI - Examinatrice

Année universitaire: 2024/2025

## *Remerciements*

### *Au nom d'Allah, Le Tout Miséricordieux, Le Très Miséricordieux*

En premier lieu, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos remerciements les plus sincères à notre encadreur, Monsieur **Serbah Boumediene**, qui nous a fait l'honneur de travailler sous sa direction pour obtenir notre diplôme de master.

Nos sincères remerciements vont vers les membres du jury :

- Monsieur M. BEKKI, Professeur à l'Université Ibn-Khaldoun de Tiaret.
- Dr Z. RENNAK.
- Dr A. DRAOUI.

Sans oublier Monsieur Y. TLIDJI avec Monsieur A.RABAHI pour ses remarques et ses conseils pertinents ainsi que pour son soutien.

Je voudrais également adresser mes sincères remerciements à M. FELLOUH Mohammed et à mon cher ami ALLAK ABDELHADI, qui ont été généreux en m'aidant, en me conseillant et en me motivant.

Pour finir, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de cette mémoire dans de bonnes conditions.

## *Dédicaces*

*À moi-même...*

*Tu as travaillé dur, tu as veillé tard, tu as persévéré... et voilà le fruit de tes efforts.*

*Je te dédie ce travail en hommage à ta force et à ta patience.*

*Je suis fière du chemin que tu as parcouru.*

*À mes véritables piliers...À ceux qui ont été, après Dieu, la source de mon courage, de ma persévérance et de ma réussite...*

*À ma mère, pour son amour inconditionnel, ses sacrifices et son soutien sans faille tout au long de ma vie.*

*À mon père, dont les conseils et la confiance m'ont toujours guidé, Merci pour votre soutien sans faille et vos prières constantes...*

*À mes sœurs, mon appui et ma fierté : merci pour son encouragement constant et sa présence rassurante dans les moments difficiles.*

*À mes amis et collègues qui ont partagé avec moi cette belle aventure, je vous adresse toute ma reconnaissance...*

*Enfin, à toutes les personnes qui ont cru en moi, de près ou de loin : ce mémoire est aussi le vôtre.*

*MOHAMED ZINE ELAABIDINE*

## *Résumé*

Face aux dégradations croissantes des infrastructures, notamment dues à l'instabilité des sols, l'usage des palplanches s'impose comme une solution efficace, économique et fiable, largement utilisée dans les fondations, les ouvrages côtiers, les ports et les ponts.

Nous avons commencé par étudier les mouvements du sol et leurs aspects géotechniques, puis appliqué différentes méthodes de calcul et de renforcement. L'étude de la stabilité du terrain a été basée sur la méthode des éléments finis, et la modélisation de notre cas a été effectuée avec le logiciel PLAXIS 2D afin de déterminer le déplacement et le facteur de sécurité. Cette analyse nous a permis de juger de l'instabilité du sol et de prévoir un type de renforcement approprié.

Dans la première tentative de notre modélisation, nous avons constaté que le coefficient de sécurité est inférieur à 1.5 ( $F_s = 1.399$ ), ce qui indique que le terrain est instable. Nous avons observé une déformation importante et un déplacement total de 5.5 cm.

Après avoir observé l'instabilité du talus, nous avons proposé comme solutions adéquates l'utilisation de palplanche avec excavation dans la zone de pied de la surface de rupture.

---

**Mots clés :** Infrastructures, facteur de sécurité, renforcement, palplanche, PLAXIS 2D

---

## المخلص:

في ظل التدهور المتزايد للبنى التحتية، خصوصًا بسبب عدم استقرار التربة، يبرز استخدام الألواح المعدنية (البليباينش) كحل فعال، اقتصادي وموثوق، ويُستخدم على نطاق واسع في الأساسات، والمنشآت الساحلية، والموانئ، والجسور.

بدأنا بدراسة الحركات والجوانب الجيوتقنية للتربة، ثم استكشفنا طرقًا مختلفة للحساب والتدعيم. وقد استندت دراسة استقرار التربة إلى طريقة العناصر المحددة، وتم نمذجة حالتنا باستخدام برنامج PLAXIS 2D بهدف تحديد الإزاحة ومعامل الأمان. وقد مكّنتنا هذه التحليلات من تقييم عدم استقرار التربة واقتراح نوع التدعيم المناسب.

في المحاولة الأولى للنمذجة، لاحظنا أن معامل الأمان كان أقل من 1.5 ( $F_s = 1.399$ )، مما يدل على أن التربة غير مستقرة. كما تم تسجيل تشوه كبير وإزاحة كلية بلغت 5.5 سم.

بعد ملاحظة عدم استقرار المنحدر، اقترحنا حلولًا مناسبة، تمثلت في استخدام الألواح المعدنية (البليباينش)،

مع الحفر في منطقة قدم سطح الانهيار.

---

الكلمات المفتاحية: البنية التحتية، معامل الأمان، التدعيم، الألواح المعدنية، PLAXIS 2D

---

## **Abstract**

Faced with the increasing deterioration of infrastructure, notably due to soil instability, the use of sheet piles has emerged as an effective, economical, and reliable solution, widely used in foundations, coastal structures, ports, and bridges.

We began by studying the movements and geotechnical aspects of the land, then explored various calculation and reinforcement methods. The analysis of soil stability was based on the finite element method, and the modeling of our case was carried out using PLAXIS 2D software in order to determine displacement and the safety factor. This analysis enabled us to assess the soil instability and to propose an appropriate type of reinforcement.

In the first attempt of our modeling, we found that the safety factor was below 1.5 ( $F_s = 1.399$ ), indicating that the ground was unstable. Significant deformation was observed, with a total displacement of 5.5 cm.

After observing the slope instability, we proposed suitable solutions such as the use of sheet piles, with excavation at the toe zone of the failure surface.

---

**Keywords:** Infrastructure, safety factor, reinforcement, sheet pile, **PLAXIS 2D**

---

## *Sommaire*

Résumé .....	iv
Liste des symboles.....	x
Liste des figures .....	XI
Liste de tableau.....	XIV
Introduction général .....	16
<b>Chapiter 1 : Généralités sur les palplanches .....</b>	<b>17</b>
Introduction .....	18
1.1 Définitions .....	18
1.2 Types de palplanches .....	20
□ Selon la géométrie et la forme .....	20
□ Selon leur utilisation.....	20
1.2.1 Les palplanches en bois .....	20
1.2.2 Les palplanches en béton armé .....	22
1.2.3 Palplanches PVC.....	22
1.2.4 Palplanches métalliques .....	24
1.3 Les serrures .....	31
1.4 Mise en œuvre des palplanches.....	33
1.4.1 Battage.....	33
1.4.2 Vibrofonçage.....	35
1.4.3 Mise en place par presse hydraulique.....	38
1.5 Conclusion .....	40
<b>Chapitre 2 : Méthodes de calcul pour les palplanches .....</b>	<b>41</b>
2.1 Introduction.....	42
2.2 Définition de la poussée et de la butée .....	42
2.3 Méthodes de calcul pour les palplanches.....	43
2.3.1 La méthode classique .....	43
2.3.2 Méthode de Blum: dite de la « poutre équivalente ».....	50
2.3.3 Méthode de coulomb .....	53
2.3.4 Méthode de Rankine.....	55
2.3.5 Méthode de Boussinesq .....	56
2.3.6 La méthode de Rowe ou des moments réduits.....	58

2.3.7	Méthode du coefficient de réaction .....	59
2.3.8	Méthodes des éléments finis .....	60
2.4	Conclusion .....	62

### **Chapitre 3 : Présentation de PLAXIS 2D.....63**

3.1	Introduction.....	64
3.2	Fonctionnalités de PLAXIS .....	65
3.2.1	Programme d'entrée (Input).....	65
3.2.2	Le programme calcul ( Calculation ).....	67
3.2.3	Programme sortie Out put.....	68
3.2.4	Les programmes courbes (Curves).....	69
3.3	.Types de calcul dans PLAXIS .....	69
3.3.1	Calcul en plastique .....	69
3.3.2	Analyse de consolidation.....	69
3.3.3	Analyse de la réduction $\phi$ et C.....	70
3.4	Propriétés des matériaux.....	70
3.5	Le modèle de Mohr-Coulomb dans le code Plaxis .....	70
3.5.1	Module de Young $E_{ref}$ .....	71
3.5.2	Coefficient de Poisson $\nu$ .....	71
3.5.3	Angle de frottement $\phi_{ref}$ .....	71
3.5.4	Cohésion $C_{ref}$ .....	71
3.5.5	L'angle de dilatance $\psi$ .....	72
3.5.6	Le facteur de réduction de l'interaction (R inter) .....	72
3.6	Génération du maillage.....	73
3.7	Les conditions initiales .....	73

### **Chapitre 4 : Modélisation d'une usine dans la zone industrielle d'Oran par le logiciel PLAXIS 2D .....75**

4.1	Présentation géométrique d'étude de la zone industrielle d'Oran .....	76
4.2	Analyse de Stabilité du Talus .....	77
4.2.1	Propriétés des couches de sols et des interfaces .....	77
4.3	Les conditions aux limites .....	79
4.4	Génération du Maillage .....	79
4.5	Condition initiale ( $u, \sigma'$ ).....	80
4.5.1	Calculs des Pressions Interstitielles au repos.....	80

4.5.2	Génération des contraintes effectives initiales.....	82
4.6	Procédure de calcul .....	83
4.7	Les résultats de la modélisation .....	84
4.8	Conclusion .....	87
4.9	La stabilité des talus renforcés par palplanche.....	88
4.9.1	Cas 01 (Un rideau palplanche).....	89
4.9.2	Cas 02 (Un rideau palplanches avec excavation).....	93
<b>Conclusion générale.....</b>		<b>97</b>

## *Liste des symboles*

***H*** : La profondeur (m)

***Ka*** : coefficient de poussée

***kp*** : coefficient de poussée

***E*** : module d'élasticité de l'acier de la palplanche (N/mm<sup>2</sup>)

***I*** : moment d'inertie (m<sup>4</sup>)

***L*** : hauteur de rideau de palplanche (m)

***Fa*** : La force de poussée (kN)

***Fb*** : La force de butée (kN)

***Δa*** : Déplacement coté de poussée (mm)

***Δp*** : Déplacement coté de butée (mm)

***T*** : L'effort d'ancrage (kN)

***Mmax*** : moment de flexion maximum (kN.m)

***σa*** : La contrainte admissible de rideau de palplanche (kN/m<sup>2</sup>)

***σe*** : La limite d'élasticité de rideau de palplanche (kN/m<sup>2</sup>)

***δa*** : l'angle d'inclinaison d'effort de poussée (deg)

***δp*** : l'angle d'inclinaison d'effort de butée (deg)

***φ*** : l'angle de frottement (deg)

***v*** : Coefficient de Poisson

***Ψ*** : coefficient de dilatation

***Kx*** : Perméabilité horizontale (m/day)

***Ky*** : Perméabilité verticale (m/day)

***τ*** : Contraintes tangentiel (kN/m<sup>2</sup>)

***Fs*** : Coefficient de sécurité

## Liste des figures

### Chapitre 1 : Généralités sur les palplanches

<b>Figure 1.1</b> :les palplanches à module.....	19
<b>Figure 1.2</b> : les palplanches plates.....	19
<b>Figure1.3</b> : les palplanches plates.....	21
<b>Figure 1.4</b> : Exemples de l'utilisation de palplanches es bois .....	21
<b>Figure1.5</b> : les palplanches en béton armé.....	22
<b>Figure 1.6</b> : Palplanches PVC .....	23
<b>Figure 1.7</b> : Exemples de l'utilisation de palplanches en PVC .....	24
<b>Figure 1.8</b> : palplanches métalliques .....	25
<b>Figure 1.9</b> : Exemples de l'utilisation de palplanches en acier .....	25
<b>Figure 1.10</b> : Palplanches Lackawanna .....	26
<b>Figure 1.11</b> : Palplanche Universal .....	26
<b>Figure 1.12</b> : Palplanche Senelle .....	27
<b>Figure 1.13</b> : Palplanche Terres-Rouges.....	27
<b>Figure 1.14</b> : Palplanche Belval .....	28
<b>Figure 1.15</b> : Palplanche Rombas.....	28
<b>Figure 1.16</b> : Palplanche Larsen.....	29
<b>Figure 1.17</b> : Serrure à la jonction de deux palplanches.....	31
<b>Figure 1.18</b> : Différents types de raccords.....	<b>31</b>
<b>Figure 1.19</b> : Raccordement Omega.....	32
<b>Figure 1.20</b> : Serrure des différents profilés .....	32
<b>Figure 1.21</b> : Exemple d'application des profilés .....	33
<b>Figure 1.22</b> : Principe de fonctionnement du marteau hydraulique (brochure IHC) .....	34
<b>Figure 1.23</b> : Chantier de battage .....	35
<b>Figure 1.24</b> : Principe mécanique du vibreur.....	36
<b>Figure 1.25</b> : Principe de fonctionnement d'un vibreur (brochure ICE).....	36
<b>Figure 1.26</b> : Un guide de contrôle .....	<b>Figure 1.27</b> : Perforage avant fonçage .....
<b>Figure 1.28</b> : Principe de la presse hydraulique .....	38
<b>Figure 1.29</b> : La presse hydraulique.....	39

### Chapitre 2 : les méthodes de calcul pour les palplanches

<b>Figure 2.1</b> :Principe de la poussée et de la butée .....	43
<b>Figure 2.2</b> : Distribution des contraintes sur un mur de soutènement.....	44
<b>Figure 2.3</b> : Pression des terres à court terme sur un rideau battu dans une argile. ....	45
<b>Figure 2.4</b> : Mécanisme de rupture d'un écran simplement buté d'après Delattre (2001) .....	46
<b>Figure 2.5</b> :Cinématique d'un écran rigide ancré et distribution résultante des pressions (cas d'un terrain frottement homogène d'après Delattre (2001) .....	46
<b>Figure 2.6</b> : Rideau simplement buté en pied .....	47
<b>Figure 2.7</b> : Cas de la présence d'eau. ....	48
<b>Figure 2.8</b> : Calcul à l'état limite d'un rideau encastré et non ancré en tête.....	48
<b>Figure 2.9</b> : Hypothèse admises pour le calcul d'un rideau non ancré .....	49
<b>Figure 2.10</b> : Schéma statique d'un écran ancré encastré en pied .....	50

<b>Figure 2.11:</b> Détermination du point de moment nul. ....	51
<b>Figure 2.12:</b> Méthode de Blum .....	51
<b>Figure 2.13:</b> EQUILIBRE DU PIONT DE COULOMB.....	53
<b>Figure 2.14:</b> Calcul élastique de contrainte horizontale apportée sur un écran par des surcharges (d'ap. Schlosser).....	55
<b>Figure 2.15:</b> Equilibre de Boussinesq et de Rankine.....	56
<b>Figure 2.16:</b> Abaque de Rowe pour déterminer le moment réduit MR.....	58
<b>Figure 2.17:</b> modélisation du comportement du sol $p=ky$ [3].....	59
<b>Figure 2.18:</b> Incompatibilité entre l'hypothèse du module de réaction et le développement d'un effet de voûte. ....	60
<b>Figure 2.19:</b> Le principe des éléments finis. ....	61

### *Chapitre 3 : présentations de plaxis 2D*

<b>Figure 3.1:</b> Différents programmes de calcul en PLAXIS 2D.....	65
<b>Figure 3.2:</b> Fenêtre principale du programme d'entrée des données (Input) (Mode de création géométrique). ....	65
<b>Figure 3.3:</b> Le programme de calcul.....	67
<b>Figure 3.4:</b> Barre d'outils de la fenêtre principale du programme output.....	68
<b>Figure 3.5:</b> Le programme courbe (Curves). ....	69
<b>Figure 3.6:</b> Fenêtre des propriétés des matériaux (bas de données du projet et base de données globale). ....	70
<b>Figure 3.7:</b> Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb. ....	71
<b>Figure 3.8:</b> Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb.....	72
<b>Figure 3.9:</b> Fenêtre de génération de la densité élémentaire du maillage.....	73

### *Chapitre 4 : MODELISATION d'une usine dans la zone industrielle d'Oran par le logiciel PLAXIS 2D*

<b>Figure 4.1:</b> La zone industrielle d'Oran .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Figure 4.2:</b> Définition le modèle. ....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Figure 4.3:</b> Géométrie du modèle.....	79
<b>Figure 4.4:</b> Maillage du modèle. ....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Figure 4.5:</b> Position de La nappe phréatique. ....	81
<b>Figure 4.6:</b> Répartition des pressions interstitielles initiales.....	67
<b>Figure 4.7 :</b> Nous avons généré des pressions effectives.....	67
<b>Figure 4.8:</b> Génération des pressions effectives.....	68
<b>Figure 4.9:</b> Phases de calcul.....	69
<b>Figure 4.10:</b> Déformation du maillage.....	69
<b>Figure 4.11:</b> Déplacement total.....	70

<b>Figure 4.12:</b> Forme et position de la surface de déformation plus les charges (Shadings).....	71.
<b>Figure 4.13:</b> Valeur de coefficient de sécurité avec les charges.....	73.
<b>Figure 4.14:</b> Modélisation de confortement de déformation cas 01.....	75
<b>Figure 4.15:</b> L’aperçu de la fenêtre pour afficher les résultats et les calculs.....	76.
<b>Figure 4.16:</b> Les charges et les éléments de renforcement sont désactivés.....	77
<b>Figure 4.17:</b> Activez les charges et les éléments de renforcement.....	77
<b>Figure 4.18:</b> Position de la surface de déformation cas 01(Shadings).....	78
<b>Figure 4.19:</b> Valeur de coefficient de sécurité cas 01.....	78
<b>Figure 4.20:</b> Modélisation de confortement de déformation cas 02.....	79.
<b>Figure 4.21:</b> L'aperçu de la fenêtre pour afficher les résultats et de calculs. ....	93
<b>Figure 4.22:</b> Les charges et les éléments de renforcement sont désactivés. ....	94
<b>Figure 4.23:</b> Activez les charges et les éléments de renforcement. ....	95
<b>Figure 4.24:</b> position de la surface de déformation cas 02 (Shadings).....	95
<b>Figure 4.25:</b> Valeur de coefficient de sécurité cas 02. ....	96

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau 2.1:</b> Caractéristique Des Palplanches Usuelle. ....	30
<b>Tableau 4.1:</b> Coordonnée du modèle géométrique du talus .....	77
<b>Tableau 4.2:</b> Les caractéristiques géotechniques de chaque matériau .....	78
<b>Tableau 4.3:</b> Coordonnée de la nappe phréatique.....	80
<b>Tableau 4.4:</b> Les valeurs de coefficients de sécurité. ....	87
<b>Tableau 4.5:</b> Propriétés des palplanches. ....	88
<b>Tableau 4.6 :</b> Tableau récapitulatif les résultats des calculs .....	98

# *Introduction Général*

## ***Introduction général :***

Dans les projets de construction et de génie civil, de nombreux défis liés à la stabilité des sols, aux infiltrations d'eau et à l'effet des charges latérales existent, ce qui nécessite la recherche de solutions efficaces pour assurer la sécurité et la durabilité des structures. Ces problèmes comprennent les glissements de terrain résultant d'excavations profondes, l'élévation du niveau des eaux souterraines et l'instabilité des sols dans ou à proximité des zones côtières. Les rivières nécessitent en plus de construire des murs de soutènement solides pour résister aux pressions latérales.

Pour relever ces défis, les barrières à panneaux sont utilisées comme une solution pratique et efficace dans de nombreux projets, offrant un support solide au sol, empêchant les fuites d'eau, aidant à créer des structures résistantes à l'effondrement et permettant une installation rapide, contribuant ainsi à réduire la période de mise en œuvre et les coûts associés à la construction.

Dans ce contexte, ce travail s'intéresse à la modélisation numérique et l'analyse du comportement d'un écran de soutènement du type palplanche métallique par la méthode numérique aux éléments finis en utilisant le logiciel Plaxis 2D v8.2 . Outre ce travail est considéré comme une initiation à la recherche dans le domaine de la simulation numérique en 2D.

Le mémoire, est composé de 4 chapitres, comme indiqué au sommaire ci-dessus

***La première chapitre :*** Cette étude bibliographique explore la définition le rideau de palplanches, tel que les types de palplanches, leur utilisation et la mise en œuvre.

***Le deuxième chapitre :*** est consacrée aux méthodes de calcul de la stabilité et les palplanches

***Le troisième chapitre :*** sont consacré à l'explication du logiciel PLAXIS 2D, au dimensionnement ainsi qu'à l'étude de déformation pour déterminer la surface de rupture et son coefficient de sécurité.

***Le quatrième chapitre :*** contient la modélisation d'une zone industrielle à Oran à l'aide du logiciel PLAXIS 2D V8.2 ainsi que les méthodes de renforcement

Enfin, notre travail se termine par une conclusion générale qui résume les points les plus importants de notre mémoire.

# *Chapitre 1*

## *Généralités sur les palplanches*

## *Chapitre 1 : Généralités sur les palplanches*

---

### ***Introduction :***

La recherche de nouvelles technologies dans le domaine de la construction est devenue une nécessité, en raison de l'augmentation des dommages subis par les infrastructures sous l'effet de divers facteurs, notamment les problèmes liés à la stabilité des sols. Face à ces défis, les ingénieurs et les chercheurs se tournent vers des méthodes de construction à la fois efficaces, pratiques et économiques, comme l'utilisation des pieux en béton. Ces derniers jouent désormais un rôle central dans le secteur du bâtiment et des travaux publics. On les retrouve dans de nombreuses applications d'ingénierie, telles que la réalisation de fondations, la protection des littoraux, ainsi que la construction de ports et de ponts. Leur utilisation constitue ainsi l'une des solutions les plus fiables pour garantir la stabilité des structures et préserver les infrastructures face aux risques naturels et techniques.

### **1.1 Définitions :**

Le mot désigne généralement aujourd'hui un pieu profilé conçu pour être battu en terre ou dans le sédiment et s'enclenchant aux pieux voisins par l'intermédiaire de nervures latérales appelées serrures.

Les palplanches permettent de constituer un mur de soutènement, un batardeau, une palée ou un écran imperméable.

Les rideaux qu'elles constituent sont assimilables à des murs ou des parois supportant la poussée des terres en place, ou des remblais et des dénivelés d'eau.

On distingue :

- les palplanches à module ou à inertie.
- les palplanches plates.

Les premières se comportent comme des poutres verticales, mobilisant la butée au niveau de leur encastrement dans le sol et supportant les poussées dues aux dénivellations de terrain et d'eau (palplanches Larsen).

Les secondes permettent de réaliser des enveloppes cylindriques fermées, contenant des matériaux dont les poussées engendrent des tractions importantes dans les joints, ces derniers sont, de ce fait, conçus pour résister à des efforts.[2]

## Chapitre 1 : Généralités sur les palplanches

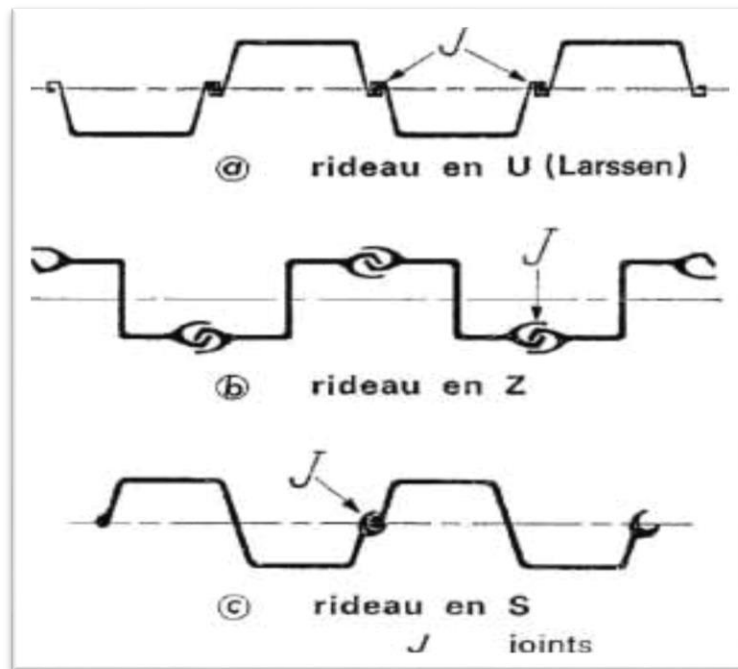


Figure1.1 : les palplanches à module

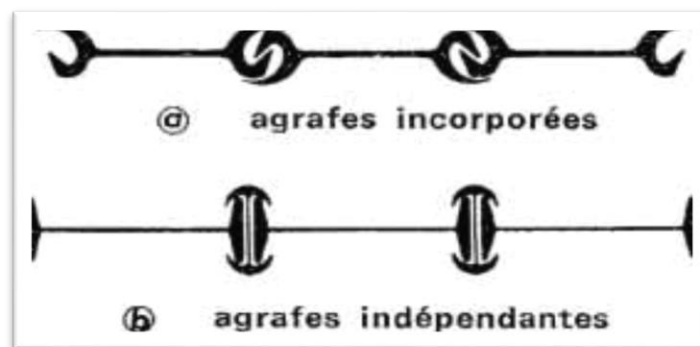


Figure1.2: les palplanches plates

## *Chapitre 1 : Généralités sur les palplanches*

### **1.2 Types de palplanches :**

#### **❖ Selon la géométrie et la forme**

On trouve :

- Palplanches en porte à faux
- Palplanches avec étais ou ancrage

#### **❖ *Palplanches en porte à faux***

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

- \_ Le choix de matériaux dépend des conditions de terrain et d'autres facteurs.
- \_ La hauteur des palplanches en porte à faux est limitée entre 3 et 4 m.

#### **❖ Selon leur utilisation**

##### **➤ A titre provisoire**

Elles peuvent être utilisées pour la construction des ouvrages (batardeau en rivière, écran d'étanchéité, blindage de fouille). Dans ce cas, les palplanches doivent être arrachées lors de leur mise en œuvre, on devra éviter un battage intensif pouvant occasionner des déformations rendant impossible leur récupération.

##### **➤ A titre définitif**

Lorsqu'elles sont incorporées dans les ouvrages (quais, écluses, protections de berge, murs de soutènement, parafeuilles). Les palplanches sont :

- en bois.
- en béton armé, préfabriquées, moulées dans le sol.
- en acier.[1]

### **1.2.1 Les palplanches en bois**

A l'origine, les palplanches étaient réalisées en bois, il s'agissait de pieux faits de planches qu'on enfonçait en terre pour former un encaissement dans l'eau (palplanches). La technique des écrans de soutènement consistant à opposer à la poussée des terres des éléments de structure fichés dans le sol et résistants à la flexion a fait, dans un premier temps, appel à des pieux en bois juxtaposés les uns aux autres de façon à constituer un écran continu.

Cette technique était en particulier utilisée pour la réalisation de batardeaux en rivière, ces derniers étant constitués de deux rideaux de pieux entre lesquels on disposerait un remblai d'argile.

La fonction d'étanchéité du batardeau était ainsi assurée par le noyau d'argile, tandis que les rideaux de pieux permettaient de maintenir le confinement de ce noyau.

Ces premiers batardeaux, utilisant des pieux plus ou moins bien équarris, devaient présenter une forte sensibilité à l'érosion, l'eau pouvant s'infiltrer entre les pieux et entraîner le sol. [1]

## Chapitre 1 : Généralités sur les palplanches

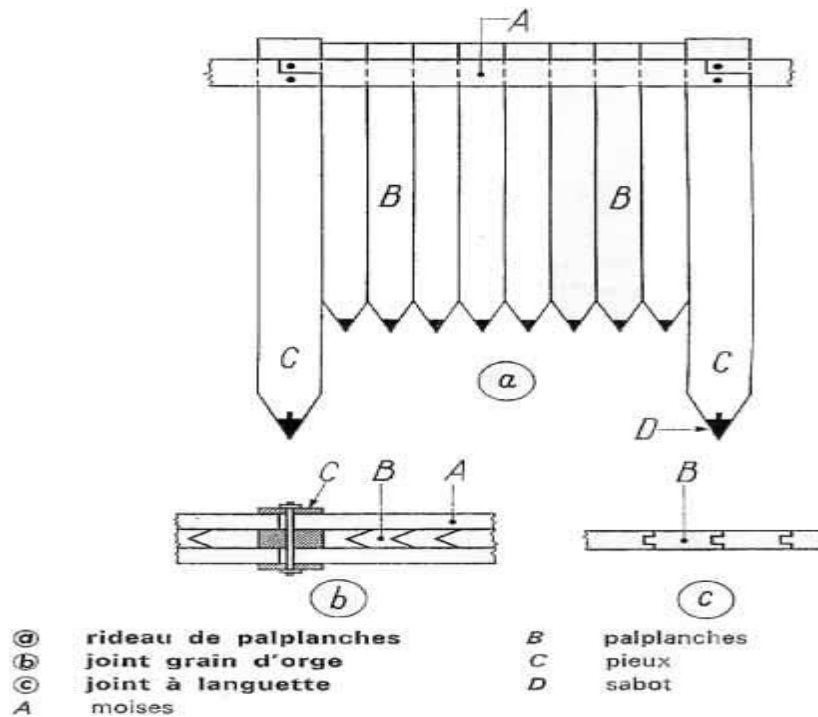


Figure1.3:les palplanches plates

- **Domaine d'emploi :**

Lorsque le terrain s'y prête, terrain homogène et sans blocs les palplanches en bois sont plus économiques que les palplanches en acier ou en béton. Lors des dommages dus à la navigation, la grande élasticité du bois révèle des avantages importants par rapport au béton ou à l'acier, moins d'endommagement du bateau du fait que le bois peut supporter des modifications de forme relativement importante et absorber en partie l'énergie cinétique en cas de choc.

Ces palplanches peuvent aussi s'utiliser pour :

- ❖ Protection de berge, dans les travaux de coffrage lors du blindage.
- ❖ Seuils déversoirs.
- ❖ Un système à lierne et un tirant.[1]



Figure1.4: Exemples de l'utilisation de palplanches es bois

## *Chapitre 1 : Généralités sur les palplanches*

### **1.2.2 Les palplanches en béton armé**

C'est ainsi que, dès le début du XX<sup>e</sup> siècle, les palplanches en béton armé ou en acier se sont inspirées des palplanches en bois. L'emploi des palplanches en béton armé ne connaîtra pas de réel développement, du fait du poids de ces structures, de leur fragilité, des difficultés de battage qu'elles présentaient ainsi que des difficultés d'étanchement des joints entre palplanches.[2]



**Figure1.5:** les palplanches en béton armé

### **B.1 Palplanches en béton préfabriqué :**

Les pieux en béton préfabriqué sont fabriqués avec une coupe transversale carrée ou rectangulaire et sont enfoncés de la même manière que les pieux en bois pour former une paroi continue. Le verrouillage entre deux pieux est généralement assuré par un système de languette et de rainure qui s'étend sur toute la longueur des pieux [2]

### **B.2 Palplanches en béton précontraint :**

En raison des nombreux avantages du béton précontraint par rapport au béton armé classique, les palplanches en béton précontraint sont couramment utilisées. Ces palplanches sont renforcées sur les deux faces, ce qui permet de les manipuler facilement de chaque côté. Elles sont plus légères, plus durables et plus économiques à long terme. Elles sont particulièrement avantageuses dans les environnements marins, où le risque de fissuration du béton est minime et la corrosion des armatures est réduite [2]

### **1.2.3 Palplanches PVC**

Les palplanches en PVC sont différentes des autres questions matériau et utilisation, En effet, la matière étant inerte, elle ne se dissout donc pas au contact de produits chimiques qui apparaissent souvent. De plus, les matériaux toxiques ne se répandent pas dans le sol ou dans l'eau. L'application du bois dur est de plus en plus impopulaire puisqu'elle menace les forêts tropicales. A cause de ses conservateurs nuisibles, ce bois appliqué devient dangereux pour l'environnement.

## *Chapitre 1 : Généralités sur les palplanches*

Ainsi, on utilise de plus en plus des plantations adaptées pour installer des protections de rives naturelles sur des versants peu profonds. Lorsque cette solution n'est pas possible, on utilise des palplanches en PVC. Ces cas sont les suivants : les versants abrupts, la présence de courant fort et une grande profondeur d'eau.[2]



**Figure 1.6: Palplanches PVC**

- **Domaine d'emploi :**

Elles sont utilisées aux endroits où des bateaux sont amarrés et où une charge locale de la paroi peut apparaître. L'avantage d'une palplanche en vinyle par rapport aux matériaux alternatifs concerne la durée de fonctionnement combinée à une solution non polluante. En effet, la matière étant inerte, elle ne se dissout donc pas au contact de produits chimiques qui apparaissent souvent.

De plus, les matériaux toxiques ne se répandent pas dans le sol ou dans l'eau. L'application du bois dur est de plus en plus impopulaire puisqu'elle menace les forêts tropicales. A cause de ses conservateurs nuisibles, ce bois appliqué devient dangereux pour l'environnement.

Ainsi, on utilise de plus en plus des plantations adaptées pour installer des protections de rives naturelles sur des versants peu profonds. Lorsque cette solution n'est pas possible, on utilise des palplanches en PVC.

Ces cas sont les suivants :

- ❖ \_ Les versants abrupts, la présence de courant fort et une grande profondeur d'eau.
- ❖ \_ Protection de berge en palplanches PVC recyclés.
- ❖ \_ Travaux de soutènement pour VRD.[1]



Figure 1. 7: Exemples de l'utilisation de palplanches en PVC

### 1.2.4 Palplanches métalliques :

Les premières palplanches métalliques sont apparues au début du XXème siècle grâce au développement de la sidérurgie. [1]

#### ❖ Définition:

Une palplanche métallique est une barre d'acier dont la section épouse généralement la forme d'un "U". Que l'on plante dans le sol et qui s'emboîte avec les barres voisines grâce à des nervures latérales. À partir des cloisons étanches ainsi formées, on bâtit des digues, ou encore un mur de soutènement pour conforter une berge naturelle ou un quai.

Les principaux types de palplanches métalliques à module en forme de U, Z, S, caisson et de palplanches plates avec agrafes incorporées ou indépendantes. À quelques nuances de dimensionnement près, tous ces types de palplanches sont produits par les fabricants mondiaux, mais la forme et les performances des joints restent une de leurs principales particularités.

Les performances des palplanches à module sont considérablement augmentées par l'emploi d'acier à haute résistance. [2]

#### ❖ Caractéristiques :

Le poids au mètre linéaire varie selon le profil, de 20 à plus de 120 Kg et l'épaisseur de 5 à plus de 20 mm (chiffres indicatifs). La longueur livrée varie de 1 à plus de 30 mètres. Les principaux types de palplanches métalliques à module en forme de U, Z, caisson et de palplanches plates avec agrafes incorporées ou indépendantes. À quelques nuances de dimensionnement près, tous ces types de palplanches sont produits par les fabricants mondiaux, mais la forme et les performances des joints restent une de leurs principales particularités.[2]

## Chapitre 1 : Généralités sur les palplanches



Figure 1.8: palplanches métalliques

### ❖ Domaine d'emploi :

Les palplanches métalliques sont particulièrement bien adaptées pour la réalisation d'ouvrages de soutènement et d'étanchement en site aquatique et, d'une manière plus générale, en présence d'eau dans la nappe phréatique. Elles sont très couramment utilisées aujourd'hui encore pour la réalisation d'ouvrages provisoires tels que batardeaux et blindages de fouilles sous la nappe, et d'ouvrages définitifs tels que murs de quais maritimes ou fluviaux, soutènements de rives et protections de berges.

Elles s'utilisent aussi pour :

- ❖ \_ Quais d'accostage (construire un quai permettant l'accostage de superpétroliers).
- ❖ \_ Travaux à but portuaire (canaux navigables).
- ❖ \_ Ouvrages d'art (déviation d'une route). [1]

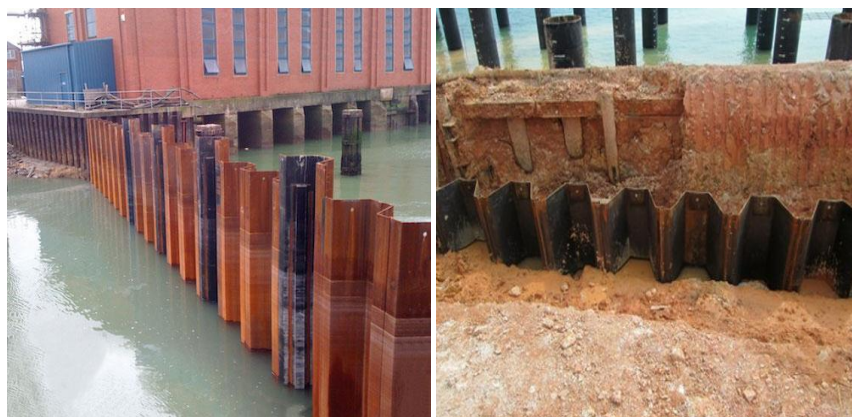


Figure 1.9: Exemples de l'utilisation de palplanches en acier

## Chapitre 1 : Généralités sur les palplanches

### ❖ Types de palplanches métalliques :

#### 1.2.4.1 Palplanche Lackawanna :

C'est une palplanche plate à faible inertie, légère, pratique et économique, qui convient parfaitement aux rideaux peu chargés ou travaillant en traction car le joint résiste bien aux efforts de déboitement (180 tau mètre courant).

Ce joint permet également des changements de direction (jusqu'à 20°) convenant aux rideaux courbes. Il présente une bonne étanchéité.[3]

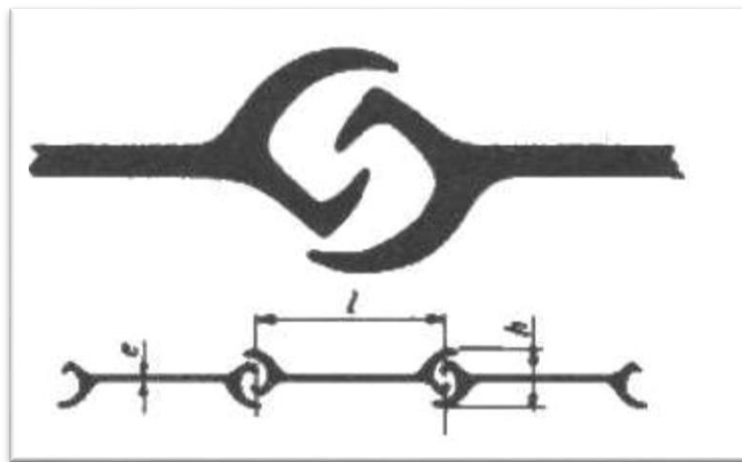


Figure1.10: Palplanches Lackawanna

#### 1.2.4.2 Palplanche Universal :

Elle est constituée par des fers à I avec une agrafe de jonction spéciale formant le joint.[3]

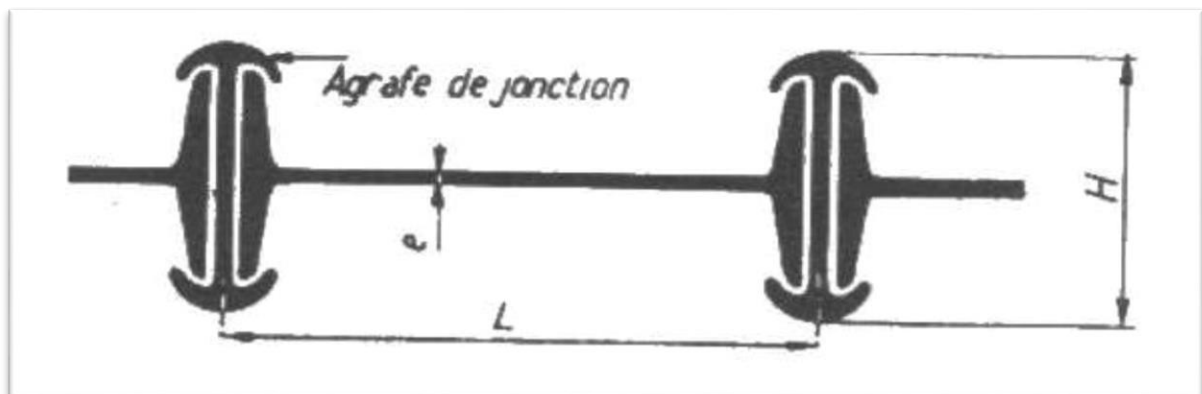


Figure1.11: Palplanche Universal

## Chapitre 1 : Généralités sur les palplanches

### 1.2.4.3 Palplanche Senelle :

Ce type, très semblable au précédent, comprend comme lui des palplanches plates avec des agrafes de jonction spéciales.[3]

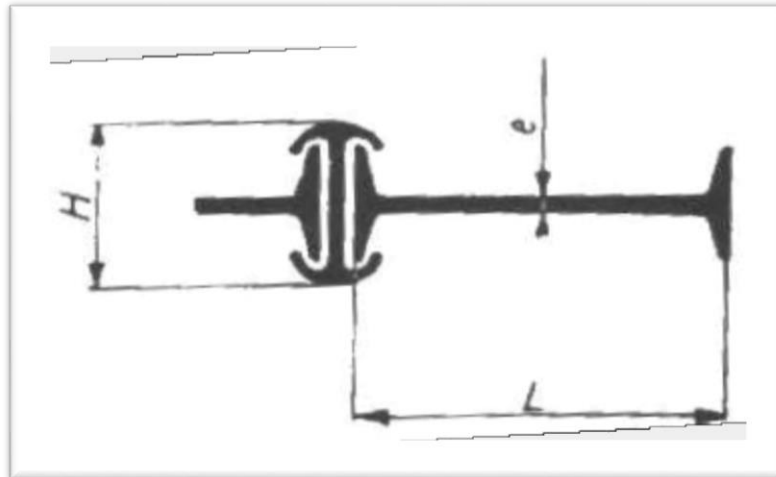


Figure1.12: Palplanche Senelle

### 1.2.4.4 Palplanche Terres-Rouges :

C'est une palplanche à double ondulation, donc à grand moment d'inertie, qui convient aux rideaux chargés à forte poussée transversale et particulièrement aux rideaux courbes.[3]

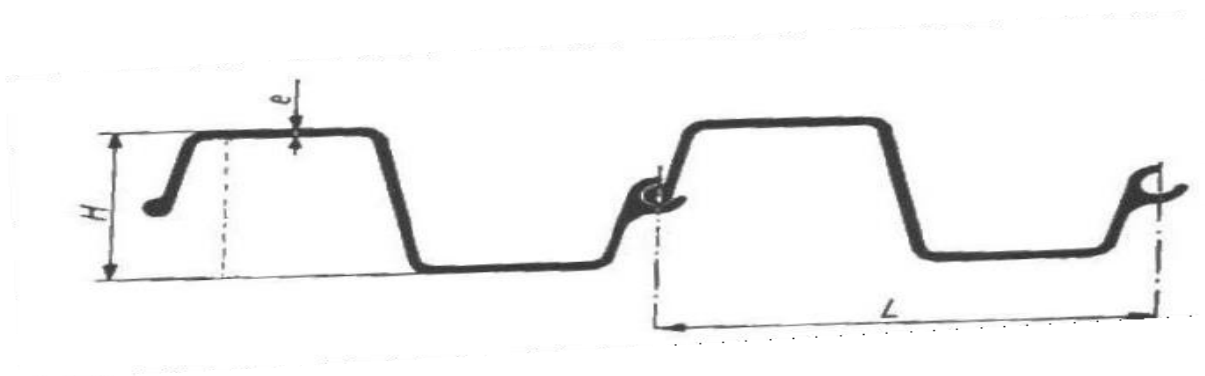


Figure1.13 : Palplanche Terres-Rouges

## Chapitre 1 : Généralités sur les palplanches

### 1.2.4.5 Palplanche Belval :

C'est une palplanche à onde simple réalisée en Z avec joint sur la lace externe de l'onde. Le joint BELVAL est très serré et très étanche, il se prête bien aux rideaux droits.[3]

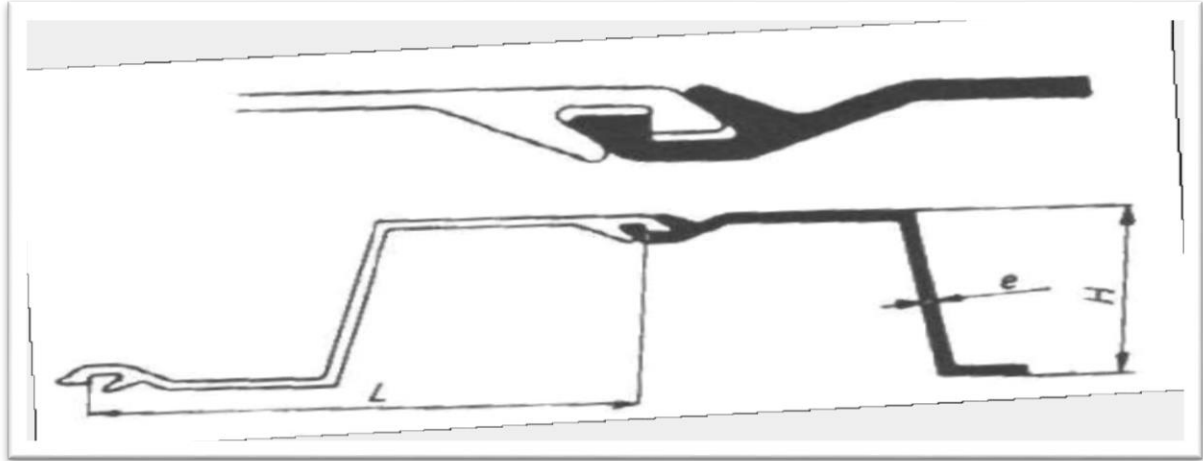


Figure1.14: Palplanche Belval

### 1.2.4.6 Palplanche Rombas :

C'est également une palplanche à onde simple réalisée en Z avec joint sur la face externe de l'onde.

Le joint est identique à celui de la palplanche LACKAWANNA et convient aux rideaux courbes. Le rideau peut être à tracé chevronné ou crénelé.

Ce type de palplanche combiné avec la palplanche LACKAWANNA du type renforcé permet la construction de rideaux mixtes.[3]

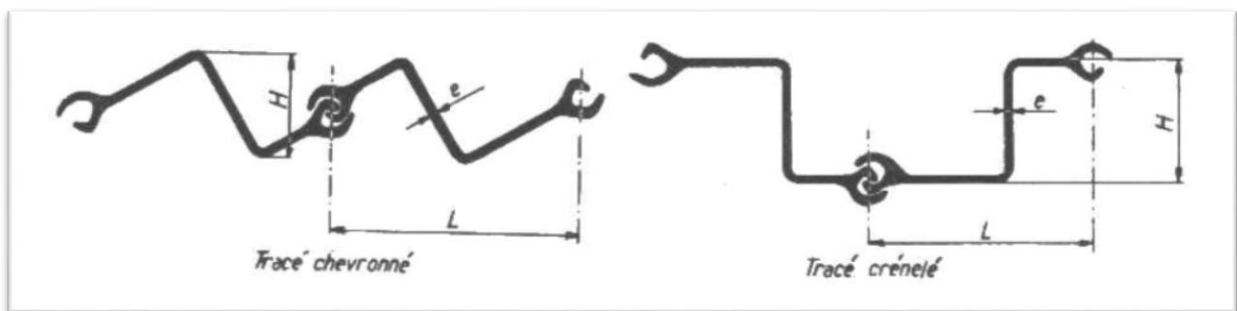


Figure1.15: Palplanche Rombas

## Chapitre 1 : Généralités sur les palplanches

### 1.2.4.7 Palplanche Larsen :

C'est une palplanche à onde simple comme la précédente, mais dont le joint est dans l'axe du rideau (profil en U).

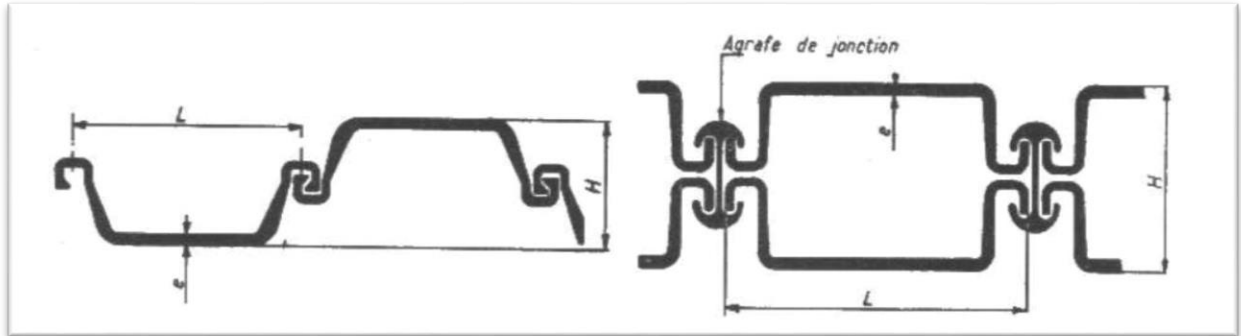


Figure1.16: Palplanche Larsen

Généralement on bat ces palplanches par paires après avoir pincé le joint pour le resserrer. Pour les rideaux très chargés, on utilise la palplanche caisson constituée par deux palplanches accolées avec agrafe de jonction.[3]

## *Chapitre 1 : Généralités sur les palplanches*

Ce chapitre par un tableau résumant les caractéristiques essentielles :

**Tableau 0.1:**Caractéristique Des Palplanches Usuelle.[3]

TYPE	Larguer (mm)	Haut eur (mm)	Épaisseur (mm)	Poids		Module de résistance I/V cm <sup>3</sup> par ml de rideau
				Par ml de palp.(kg)	Par m <sup>2</sup> de rideau (kg)	
Lackawanne :-Type normal	324	95	9,5	55	170	204
-Type renforcé	324	98	12,7	61,9	192	207
Universal.....	381	127	9,9	58,8	209	446
Senelle :Type normal.....	420	80	8-10-12	32-38-44	122-135-150	108-109-110
Type allégé.....	420	47	8	26,7	81	22
Terres Rouges : TRI.....	380	80	7,5	32	84	230
TRIIB.....	380	130	7,5	35,4	93	400
Belval normal :BZ I N.....	420	165	8	42	100	700
BZ II N..	450	220	9,5	54,9	122	1200
BZ III N....	450	260	12,5	69,8	155	1750
BZ IV N..	450	300	14,15	79,2	176	2350
Renforcé : BZ I R.....	420	167	10	51,2	122	850
BZ II R.....	450	222	11	63	140	1350
BZ III R.....	450	263	15	83,3	185	2100
BZ IV R.....	450	304	17,5	96,8	215	2850
Rombas : Tracé chevronné.	458	210	12,7	90,6	197	624
Tracé crénelé.....	400	317	12,7	90,6	226	2033
Larssen profil : I.....	400	150	8	38	96	500
II.....	400	200	10,5	49	122	849
III.....	400	247	14,5	62	155	1363
IV.....	400	310	15,5	75	187	2037
V.....	420	344	22	100	238	2962
VI.....	420	440	22	123	293	4170
Caisson I.....	460	276	13,5	135,4	337,8	3174
Caisson II .....	460	369	14,5	155	380,4	4800

### 1.3 Les serrures :

Des serrures permettent d'assembler des rideaux de palplanches continus en les fixant les uns aux autres. Les premiers profilés possédant de telles serrures ont été utilisés aux Etats Unis vers 1910 (voir figure 1.17).[4]



Figure1.17: Serrure à la jonction de deux palplanches.

#### I.1.1 Les différents types de raccordement

Les palplanches en acier ont connu un développement important. Initialement, elles ne différaient pas des profilés métalliques et notamment en construction métallique. Il s'agit de profilés en I ou en U assemblés de sorte à constituer des écrans continus, le raccord étant constitué d'un profil en I dont les ailes ont été recourbées. L'utilisation de telles palplanches est à réviser (voir figures 1.18 et 1.19).[4]

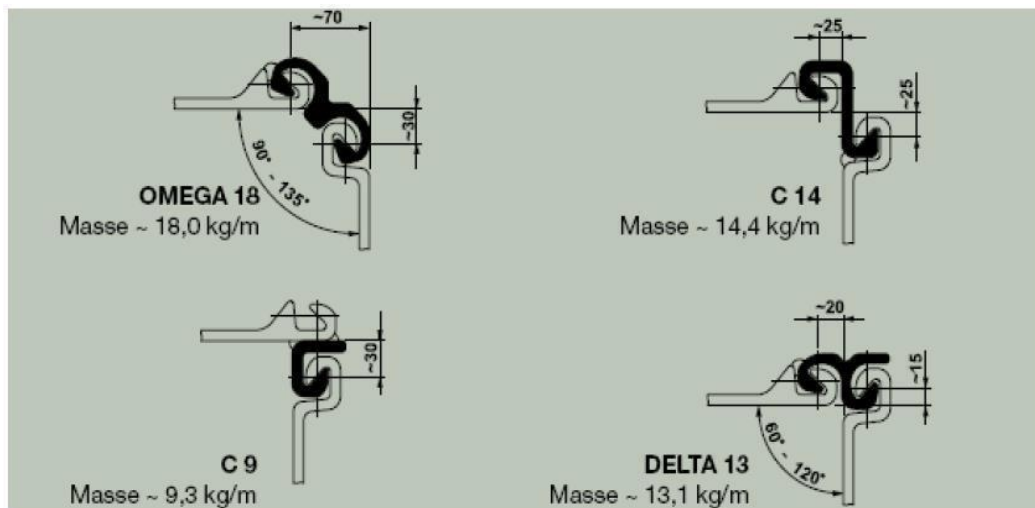


Figure1.18: Différents types de raccordements



Figure1.19: Raccordement Omega

I.1.2 Différents types de profilés : (voir figure 1.20).

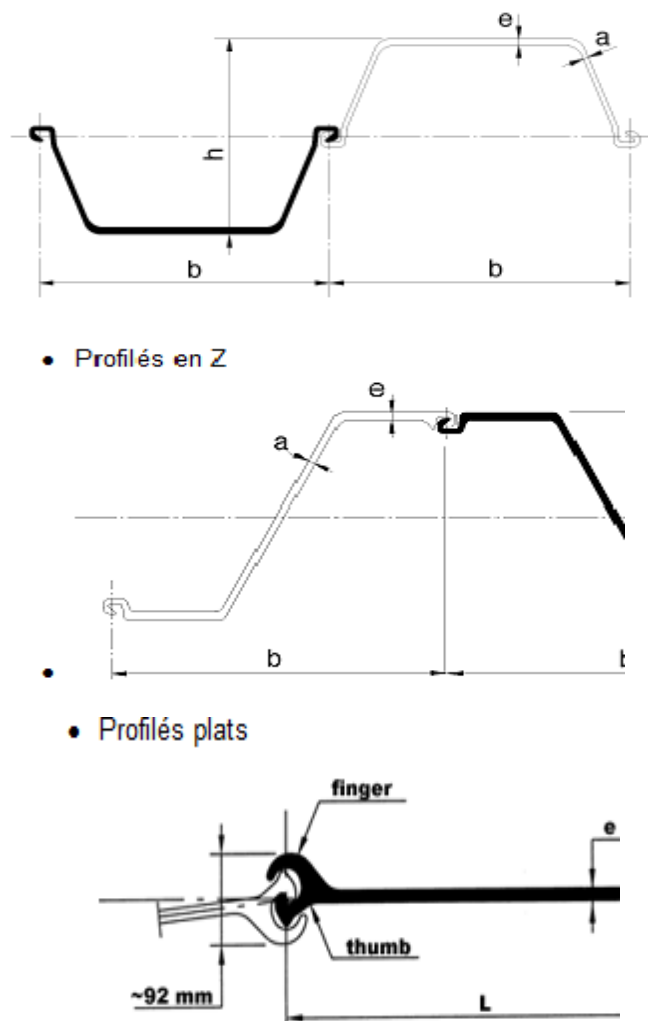


Figure1.20: Serrure des différents profilés

## Chapitre 1 : Généralités sur les palplanches

### **I.1.3 Application des profilés :**

Les profilés en Z et en U sont utilisés pour supporter des charges de flexion. Les profilés plats sont utilisés pour supporter des charges de traction.

Les profilés en Z et en U peuvent être employés indépendamment ou combinés avec des pieux tubulaires ou des pieux HP pour les cloisons combinées.



**Figure1.21:** Exemple d'application des profilés

- Mais aussi : pieux tubulaires (utilisés en combinaison avec des profilés en Z ou en U dans la cloison combinée).
- Et les pieux HP, ou pieux de fondation. Egalement possible en combinaison avec des profilés en Z ou en U. [2][18]

### **1.4 Mise en œuvre des palplanches**

La mise en œuvre des palplanches verticalement dans le sol se fait généralement par battage, vibrage ou par presse hydraulique.[18]

#### **1.4.1 Battage**

##### **❖ Principe du marteau hydraulique**

Pour les marteaux hydrauliques, un cycle d'opération débute par la levée de la masse frappante monobloc. La soupape P positionnée sur le circuit de pression est ouverte et la soupape R placée dans le circuit de retour est fermée. Une fois que la course de levage préréglée, en fonction de l'énergie souhaitée, est atteinte alors le fonctionnement des soupapes s'inverse.[18]

La masse est alors libérée. Après l'impact, le cycle se répète automatiquement. La masse frappante est guidée en haut et en bas. Grâce au gaz pressurisé, le marteau peut fonctionner sous toutes les inclinaisons, même horizontalement. A chaque impact, la masse frappante percute une enclume. Elle est la pièce maîtresse, pour le transfert de l'énergie, du casque de battage qui a différentes formes en fonction du type de palplanche à mettre en fiche.

## Chapitre 1 : Généralités sur les palplanches

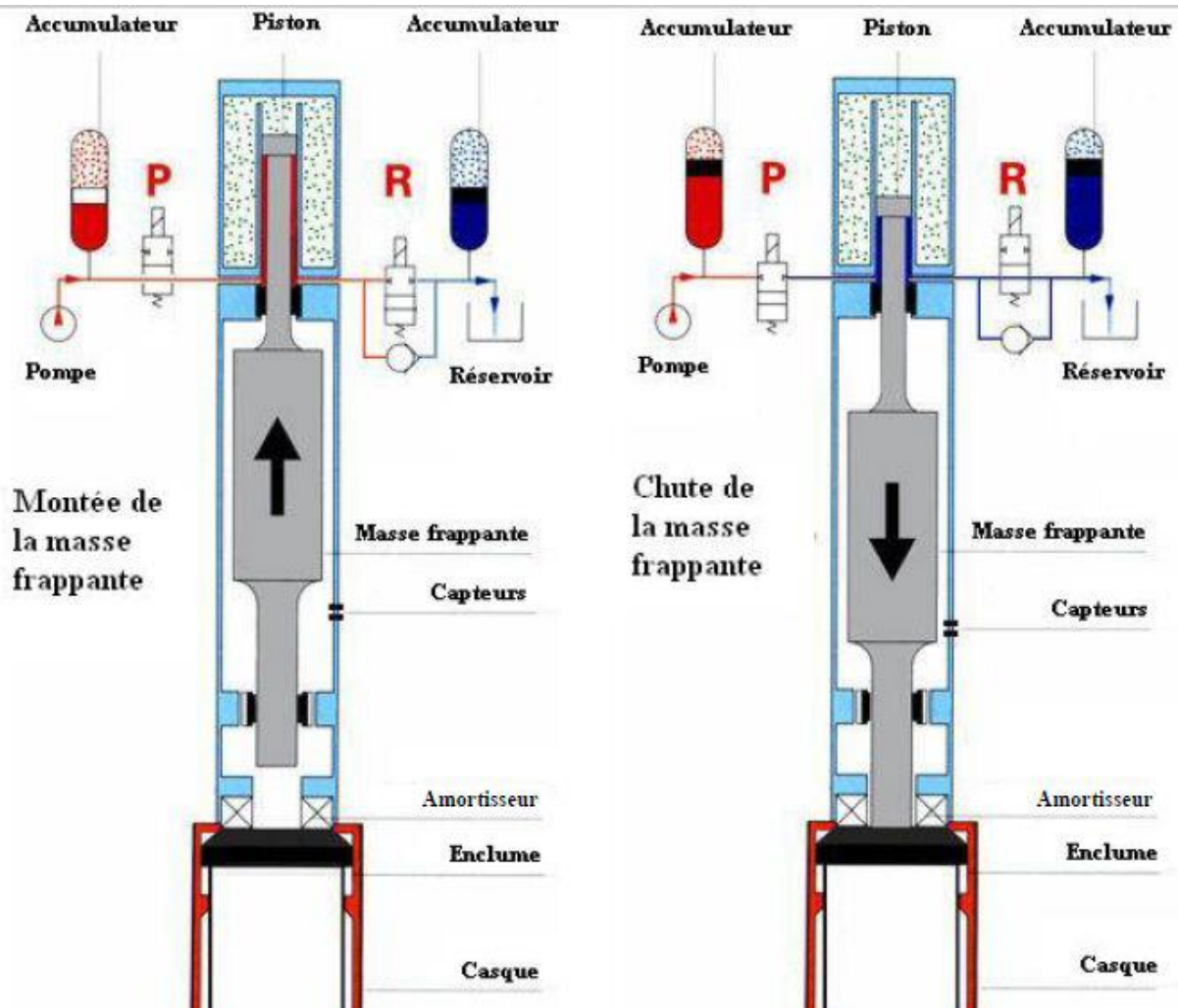


Figure 1.22: Principe de fonctionnement du marteau hydraulique (brochure IHC)

### ❖ Matériels

Le fonçage par battage d'un élément rigide dans le sol nécessite l'utilisation d'un mouton et d'un système de guidage.

### ❖ Systèmes de guidage

Le mouton venant se poser sur l'élément à foncer, il est indispensable d'utiliser un système de guidage. Il se fait principalement suivant deux méthodes (le mât de battage ou le guide de battage).

#### I. Mât de battage

En mode guidé sur mât, le porteur hydraulique (engin de chantier) est équipé d'un mât de guidage sur lequel coulisse le mouton dans un système de rails : le mouton est solidaire du mât. Le positionnement et le contrôle de la verticalité ou de l'inclinaison sont grandement facilités. Ce mode est le plus adapté à la mise en oeuvre d'éléments inclinés.

## Chapitre 1 : Généralités sur les palplanches

### II. Guide de battage

En mode pendulaire, le mouton est suspendu au câble d'une grue à flèche. Avant de positionner le mouton sur l'élément à battre, il est nécessaire de le maintenir dans un guide de fonçage à la différence de la méthode précédente.

### III. Moutons ou marteaux

Le choix du système de battage approprié est essentiel pour fonder convenablement les palplanches et parvenir à la cote souhaitée en toute sécurité. Les différents types de moutons utilisables pour le fonçage par battage sont :

- les moutons à chute libre.
- les moutons diesel.
- les moutons hydrauliques à double effet.
- les trépieds ou les moutons à double effet à l'air comprimé et à frappes rapides. [2][13]



Figure1.23: Chantier de battage

### 1.4.2 Vibrofonçage

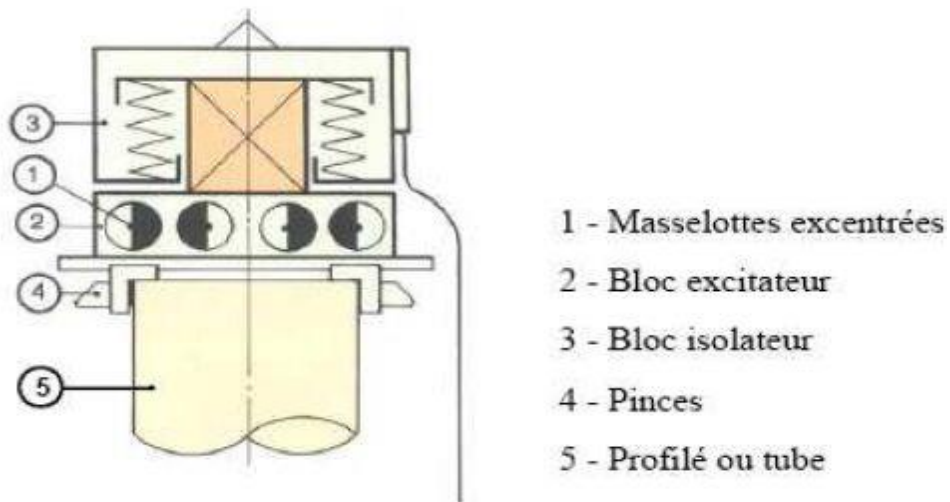
#### I. Principe

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. [18]

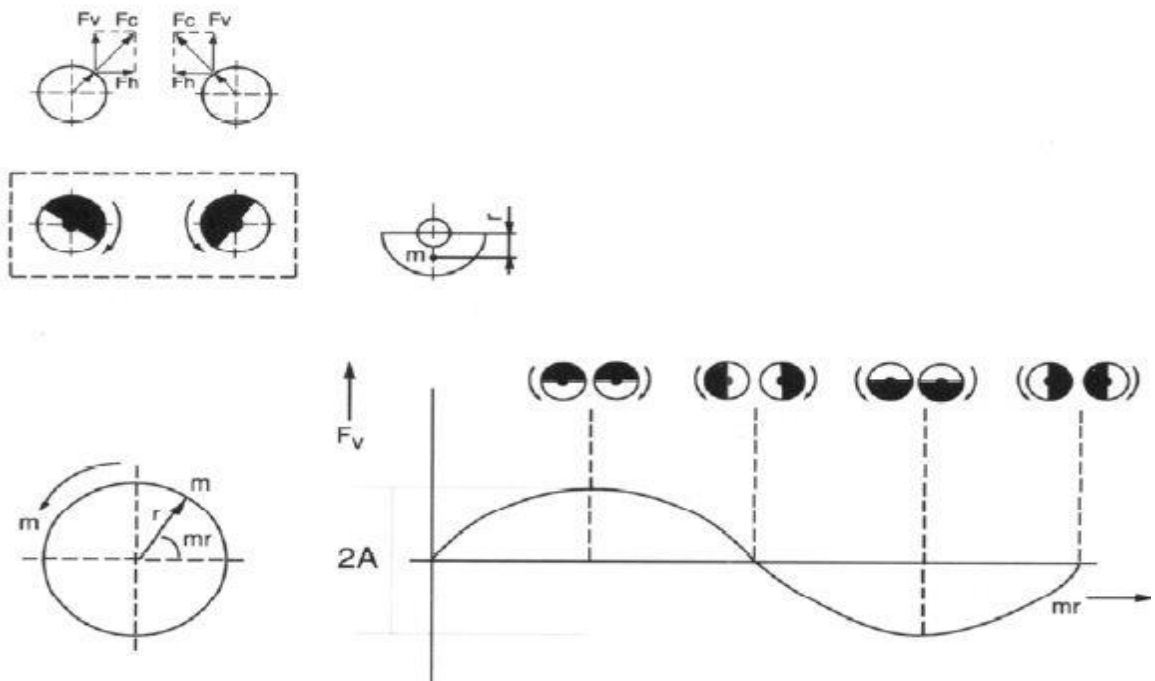
La vibration est générée par des balourds de masse  $m$  ou masses excentriques, en nombre pair, tournant à la même vitesse, mais en sens opposés, de sorte que les composantes horizontales ( $F_h$ ) de la force centrifuge ( $F_c$ ) s'annulent. La résultante est une force verticale ( $F_v$ ) d'intensité sinusoïdale.

## Chapitre 1 : Généralités sur les palplanches

Actuellement, les masses excentrées sont entraînées par des moteurs hydrauliques, alimentés par une centrale à débit variable. La motorisation hydraulique présente de nombreux avantages tels qu'un bon rapport poids et la puissance, une grande souplesse d'utilisation avec des performances élevées et des possibilités de réglage de la vitesse de rotation et donc de la fréquence des masses excentrées. Selon le vibreur hydraulique, les masses excentrées tournent à des vitesses comprises entre 1200 et 3000 t/mn, soit des fréquences de 20 à 50 Hz.[2][13]



**Figure 1.24:** Principe mécanique du vibreur.



**Figure 1.25:** Principe de fonctionnement d'un vibreur (brochure ICE)

## Chapitre 1 : Généralités sur les palplanches

### II. Matériels

- **1 ou 2 grues** mobiles qui auront pour rôles : manutention des palplanches, guides, mise en place du vibreur sur les palplanches, mise en place des guides et tréteaux pour les palplanches.

- **1 vibreur hydraulique** : les vibreurs sont alimentés par un groupe hydraulique, il est constitué d'un boîtier vibrant, d'un étrier de suspension, d'un casque, et d'une masse statique. Il existe 2 types de vibreur : Vibreur à moment fixe adapté pour les palplanches et les profilés de grandes dimensions en conditions difficiles. Vibreur à moment d'excentricité qui fonctionne avec un déphasage des masses excentriques, lors des phases de démarrage et d'arrêt, il peut être piloté par un ordinateur pour permettre de contrôler l'excentricité. Les vibreurs et les marteaux hydrauliques peuvent être utilisés aussi bien en site terrestre, à l'air libre, qu'en site aquatique sous l'eau.

- **guides** : ils permettent de caler les palplanches avant et pendant leur enfoncement. Ils mesurent généralement une dizaine de mètres. [2]

#### • Types de Mise en Fiche

- Pelle Mécanique pour sol sableux, terre marécageuse ou vaseuse.
- Vibrofonçage pour sol moyen de type Limon, Sable, Grave.
- Marteau permettant la pénétration dans les sols durs de type Marne.
- Brise Roche avec guide ou palplanche acier jumelé dans des sols difficiles.



**Figure1.26:** Un guide de contrôle



**Figure1.27:** Perforage avant fonçage

### 1.4.3 Mise en place par presse hydraulique

#### I. Principe

Ce système est plus lent que les systèmes de vibrofonçage et battage. Il peut rencontrer quelques difficultés dans les terrains durs. Les trois premières palplanches doivent être mises en place grâce à un gabarit conçu spécialement pour la presse. Ensuite cette presse s'auto porte de palplanche en palplanche et assure sa stabilité en s'accrochant sur les trois dernières palplanches mises en place. En s'appuyant sur les trois dernières palplanches par des mouvements répétitifs, la presse enfonce la totalité de la palplanche.

Le procédé pour l'extraction des palplanches est identique que la mise en place, la presse soulève par étapes les palplanches les unes après les autres. Son avantage est : Peu de nuisances sonores et pas de vibration.[2][13]

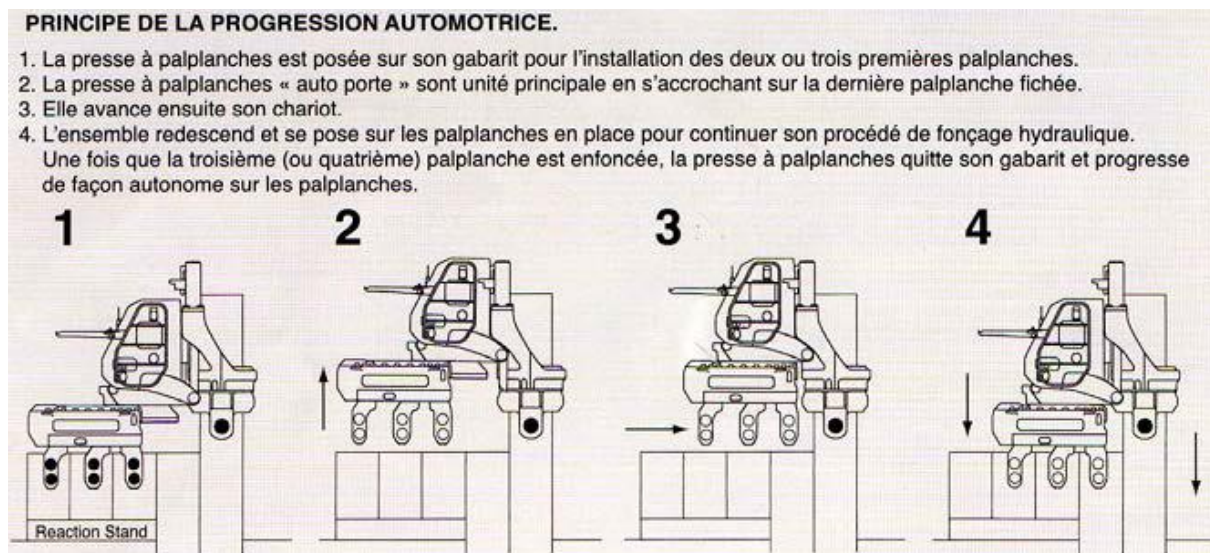


Figure1.28: Principe de la presse hydraulique

## *Chapitre 1 : Généralités sur les palplanches*

---

### **II. Matériels**

On distingue les engins suivants : presse hydraulique, groupe électrogène, pelle à câble ou grue et une pelle hydraulique.[2]



**Figure1.29:** La presse hydraulique.

### **1.5 Conclusion**

Les palplanches représentent une solution essentielle dans le domaine du soutènement, tant pour les ouvrages temporaires que définitifs. Elles se déclinent en plusieurs types, notamment les palplanches en acier, en béton et en matériaux composites, chacun adapté à des contextes géotechniques spécifiques. Leur mise en œuvre est guidée par les exigences du projet, incluant la profondeur d'ancrage, la nature du sol et les sollicitations attendues. Les connexions entre les palplanches se font généralement par emboîtement via des verrous latéraux, permettant la continuité de l'écran et assurant l'étanchéité, particulièrement critique en présence d'eau.

Actuellement, les **palplanches métalliques interconnectées (ou palplanches mixtes)** s'imposent comme les plus performantes et les plus utilisées. Elles se distinguent par leur grande résistance mécanique, leur flexibilité d'installation, leur aptitude au réemploi, ainsi que par la possibilité d'intégrer des éléments renforcés ou étanches selon les besoins. Grâce à leur capacité à supporter des efforts importants et à s'adapter à des configurations complexes, elles offrent une solution fiable et optimisée pour les projets modernes d'infrastructure, de génie civil et de travaux maritimes.

Pour mieux comprendre le comportement des palplanches vis à vis de l'interaction sol structure, le prochain chapitre sera consacré aux méthodes de calcul utilisées dans leur pré dimensionnement.

# *Chapitre 2*

## *Méthodes de calcul pour les palplanches*

## **2.1 Introduction**

Ce second chapitre récapitule brièvement les méthodes de dimensionnement des ouvrages de soutènement, leurs hypothèses de calcul et leurs limites. Le dimensionnement des écrans de soutènement pour résister à la poussée des terres qu'ils doivent retenir est un problème dans l'ingénierie civile.

L'accent est porté sur la prise en compte des surcharges pouvant s'exercer sur le sol soutenu par l'écran.

Cependant de nombreux scientifiques ont élaborés plusieurs travaux concernant le développement de la mécanique des sols dans lequel les écrans prennent une place importante (Verdeyen 1959).[3]

L'usage veut, quand on parle des méthodes de calcul des écrans de soutènement, que l'on distingue deux ensembles : les méthodes classiques et les méthodes modernes.

Les critères permettant d'opérer cette partition sont multiples : l'état d'équilibre du sol considéré par les méthodes (les méthodes classiques considèrent les états d'équilibre limites du sol tandis que les autres méthodes considèrent des états intermédiaires entre l'état initial et les états d'équilibre limites) en sont deux exemples.

## **2.2 Définition de la poussée et de la butée**

Imaginons qu'un écran soit encastré à la surface d'un massif de sable. Si l'on procède à un remblayage par dépôt successif de couches horizontales minces d'un côté du mur, tout en appliquant une résultante  $F_0$  du côté opposé de façon à empêcher tout déplacement, on exerce à la fin du remplissage une force  $F$  horizontale appelée poussée au repos. Si on réalise une translation horizontale de l'écran, deux cas sont possibles :

### **A: Butée**

D'une part le déplacement est imposé vers l'intérieur du remblai à droite, la force  $F$  croît jusqu'à une valeur maximale  $F_p$  qui correspond à la mobilisation totale de la butée. [4][13].

### **B: Poussée**

D'autre part, partant d'une situation initiale identique, le déplacement se fait en s'éloignant du remblai, alors  $F$  décroît jusqu'à une valeur  $F_a$  inférieure à  $F_0$ , qui traduit l'établissement de l'état de poussée. On notera que le déplacement  $p$  nécessaire à la mobilisation totale de l'état de butée est beaucoup plus important que celui causant la situation de poussée. Si  $H$  est la hauteur hors fiche du mur, on admettra les ordres de grandeur suivants : (voir figure 2.1)[4][13].

$$\Delta p \approx H / 100 \text{ et } \Delta a \approx H / 1000$$

Dans ces deux cas extrêmes, on parle de poussée et butée limites correspondant à la rupture du massif de sol [4].

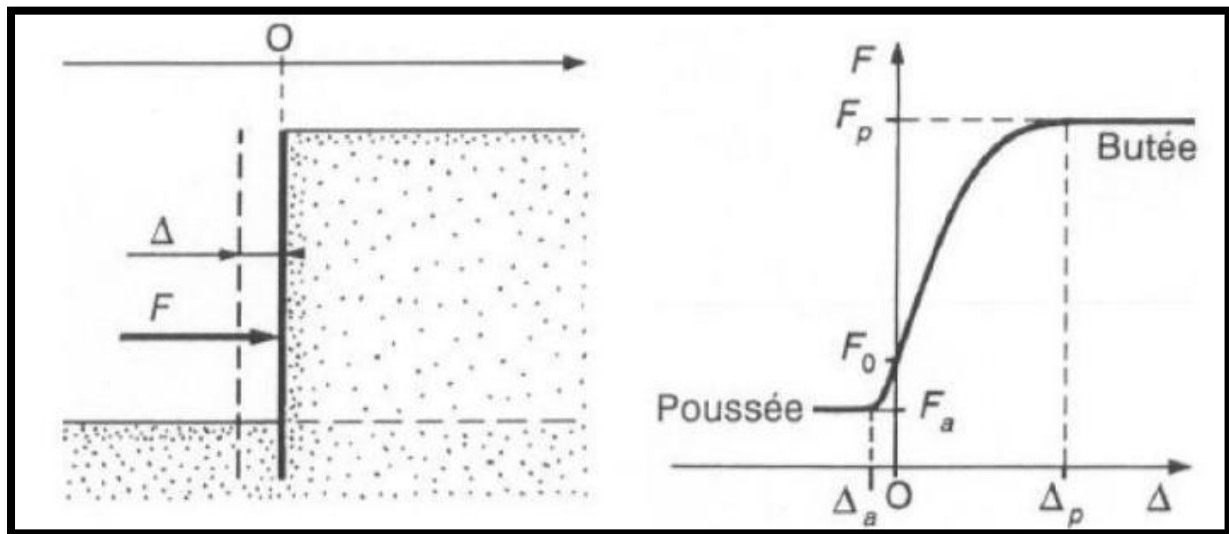


Figure 2.1: Principe de la poussée et de la butée

## 2.3 Méthodes de calcul pour les palplanches

### 2.3.1 La méthode classique

On présentera les travaux réalisés suivant la première méthode décrite précédemment. Cette méthode utilise le critère de rupture et ne tient pas compte de la rigidité propre des rideaux. Cette méthode a l'avantage de simplicité. L'évaluation des efforts dans les murs de soutènement et en particulier les moments fléchissant maximaux est grossière. Ces efforts serviront au choix du type de mur. La méthode classique ne peut être utilisée qu'en avant projet ou en petits ouvrages.[4]

#### a) Rideaux sans ancrage :

La stabilité du mur est assurée uniquement par les réactions du sol sur la partie enterrée que l'on appelle la fiche, c'est le cas de la plupart des batardeaux.

La théorie classique considère que le rideau pivote autour d'un axe situé au dessus de son extrémité inférieure (voir figure 2.2.a et b) .[20]

- à partir du sommet du rideau et jusqu' au voisinage de l'axe de rotation, la distribution des contraintes est de Boussinesq.
- à partir de l'axe de rotation, la contrainte à droite augmente brusquement du fait de la contre-butée, mais à gauche au contraire elle tend assez vite vers zéro.
- Pour les besoins de calcul, on simplifie le schéma comme montré sur la figure.2.2.c

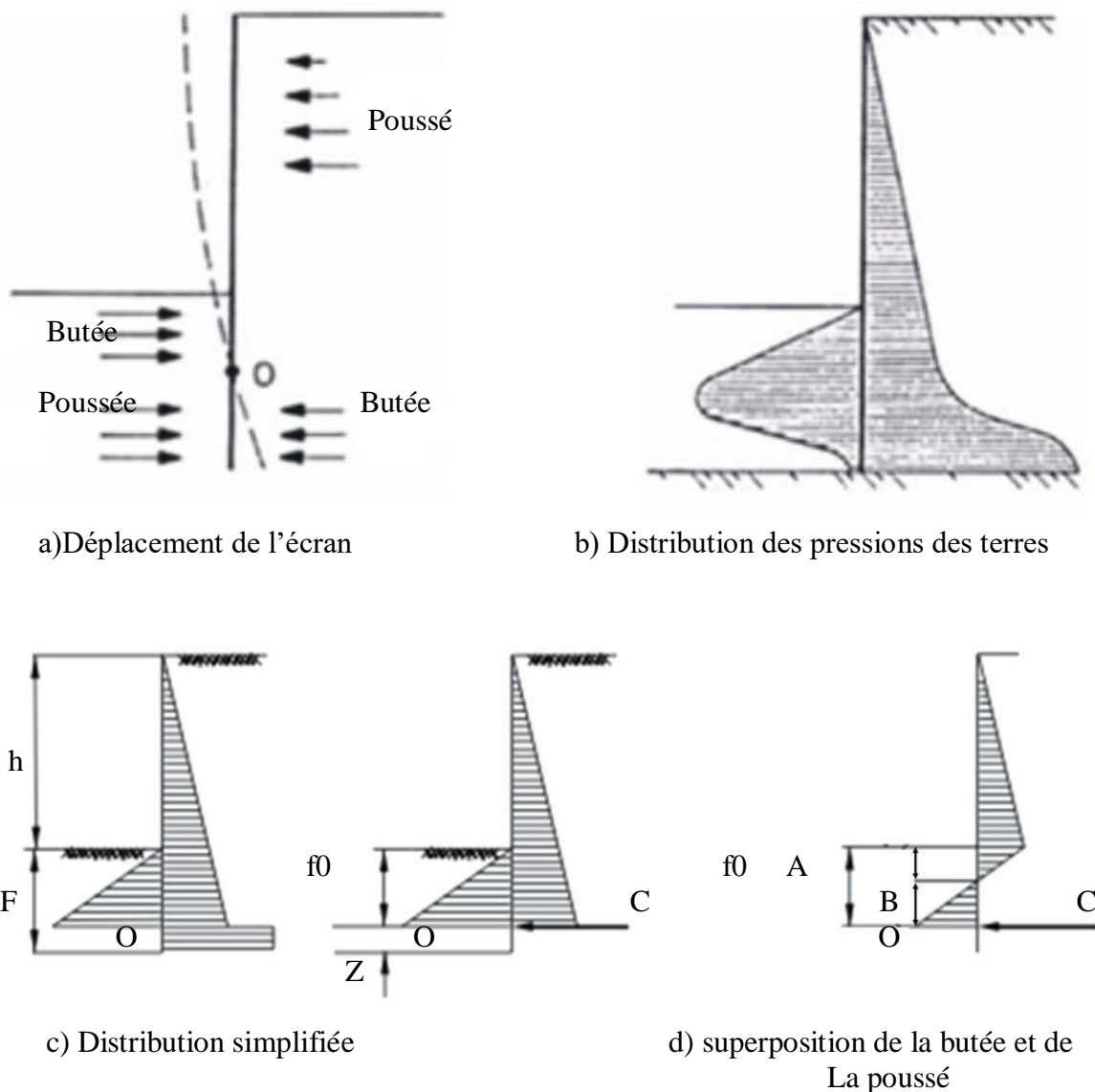


Figure 2.2: Distribution des contraintes sur un mur de soutènement

On a un système est isostatique comportant deux inconnues  $f_0$  et  $C$

- La valeur de  $f_0$  est déterminée en écrivant l'équilibre des moments autour du point O, ce qui donne une équation du troisième degré en  $f_0$ .
- La fiche totale est égale :  $f = f_0 + z = f_0 + 0.2 f_0$  (la contre butée est mobilisée sur une hauteur égale à 20% de la hauteur  $f_0$  sur laquelle est mobilisée la butée) donc  $f = 1.2 f_0$ .
- la contrebutée C s'obtient par la différence des forces de butée et de poussée. [4]
- Pour tenir compte d'un coefficient de sécurité par rapport à l'équilibre limite ainsi calculé, on considère que la butée n'est pas totalement mobilisée. ce qui, dans les calculs, conduit à remplacer  $K_p$  par  $K_p/F_s$  tel que : ( $F_s = 1.5 / 2$ ).

- Il est alors possible de déterminer la valeur maximale du moment fléchissant  $M_{max}$  dans l'écran à partir du diagramme des pressions de terres, ainsi le module de résistance  $W$  est calculé à partir de l'expression suivante 2.1, qui permet de choisir le type de palplanche ou l'épaisseur et le ferrailage de la paroi moulée.

$$W = M_{max} / \sigma'_s$$

$\sigma'_s$  : la contrainte admissible de l'acier.[4]

#### ❖ Cas des rideaux fichés dans l'argile

Les rideaux fichés dans l'argile et supportant un remblai de sol pulvérulent, ou les rideaux foncés entièrement dans de l'argile, se calculent par des méthodes tout à fait analogues. Il faut cependant noter que, pour l'argile, le calcul doit être fait à la fois à court terme ( $c_u, \varphi_u=0$ ) et à long terme ( $c', \varphi'$ ). Ainsi, l'étude d'un rideau battu dans une argile est plus complexe que celle d'un rideau battu dans un sable, puisqu'il faut tenir compte de l'évolution dans le temps du comportement de l'argile.[2][19]

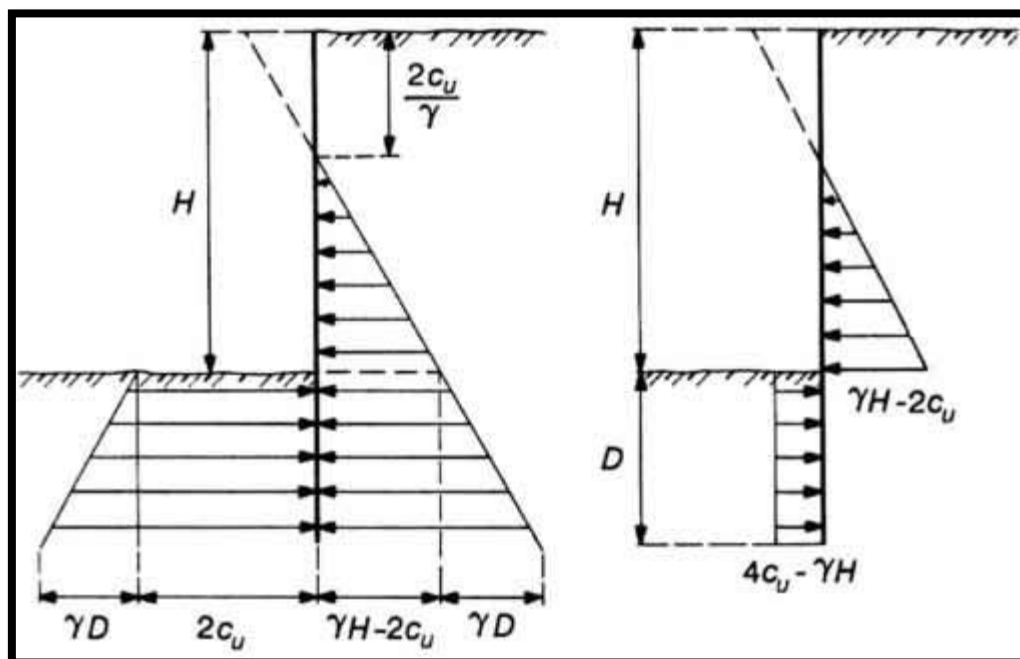


Figure 2.3: Pression des terres à court terme sur un rideau battu dans une argile.

L'équilibre des poussées et des butées s'exerçant sur un rideau non ancré dans une argile n'est possible que si l'on a l'inégalité :

$$c_u \geq \gamma H / 4$$

b) Rideaux ancrés

➤ Rideau ancré simplement buté en pied (butée simple)

La plus immédiate des méthodes de calcul des écrans de soutènement, et probablement la première pour le dimensionnement des écrans de soutènement, tels les rideaux de palplanches, s'est inspirée de la théorie des murs de soutènement rigides.

**Hypothèses**

Dans cette approche,

- le rideau ou écran de soutènement est supposé rigide.
- il est soumis aux forces de poussée et butée de Rankine.
- le pied est libre de se déplacer, la tête tourne autour de l'ancrage.

Dans cette situation, le mécanisme de rupture est celui d'une rotation autour du point d'ancrage.[3][14]

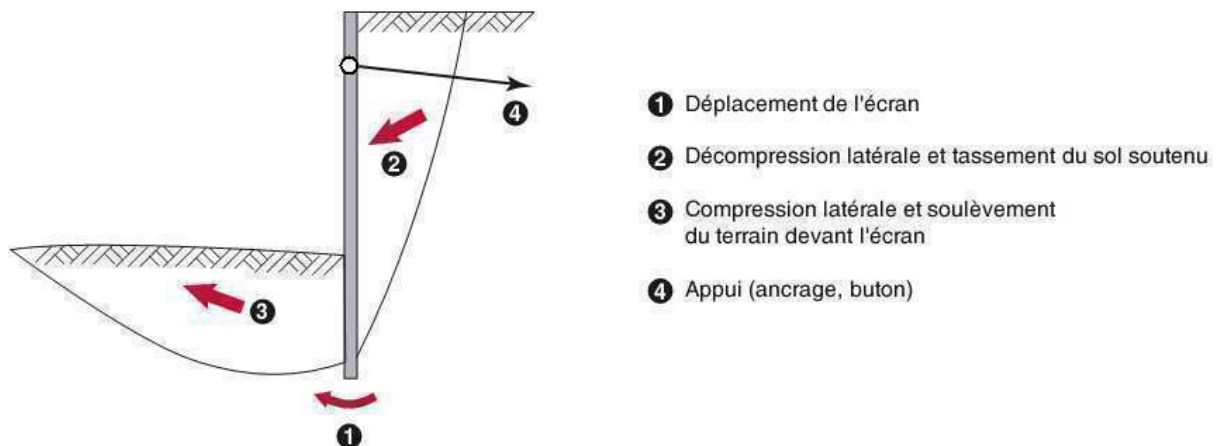


Figure 2. 4: Mécanisme de rupture d'un écran simplement buté d'après Delattre (2001)

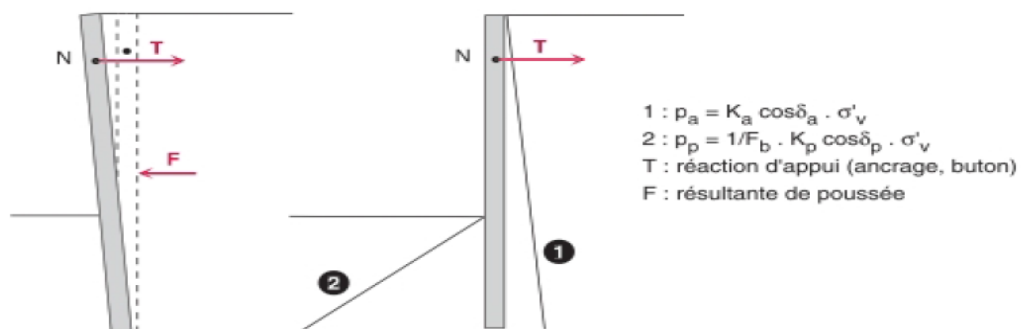


Figure 2.5: Cinématique d'un écran rigide ancré et distribution résultante des pressions Delattre (2001)

A la rupture, le mur est en rotation autour de l'ancrage (ou tirant), placé à proximité du haut du rideau. On peut donc considérer qu'il y a mobilisation complète des pressions des

terres passives d'un côté du mur et actives de l'autre : on parle de rideau ancré et simplement buté en pied. La figure 2-5 montre la répartition de la pression des terres.

On notera qu'en pratique le tirant n'est pas en poussée. Cependant, Fourrie et Potts (1988) ont étudié numériquement l'influence de la position de l'ancrage et en ont conclu que l'hypothèse de mobilisation totale des pressions actives (ou poussée) des terres reste acceptable si le tirant est situé dans le tiers supérieur de l'excavation.

Le problème se résout en écrivant :

• l'équilibre horizontal en force :  $T + F_p = F_a$

• la nullité du moment autour de l'ancrage :  $F_a [2/3(H+d)-B] = F_p [2/3d+H-B]$

Avec les résultantes de poussée des terres  $F_a = K\gamma'(D+H)^2/2$  et  $F_p = K\gamma'D^2/2$

Le problème est statiquement déterminé : l'équation en moment est un polynôme de 3<sup>o</sup> degré en D avec une seule racine réelle positive. L'équilibre horizontal des efforts permet ensuite le calcul de la force T à appliquer au tirant.[3][14]

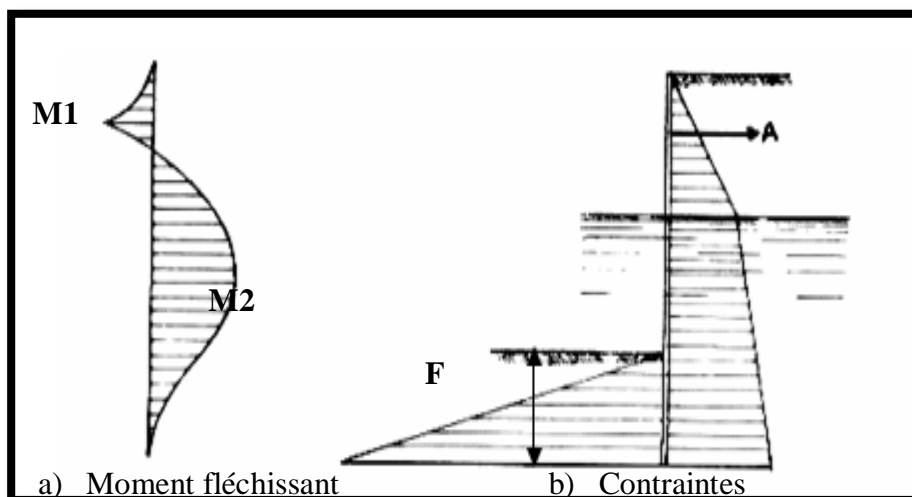


Figure 2.6: Rideau simplement buté en pied. [21]

#### A. Cas de la présence d'eau :

Nous avons jusqu'ici supposé implicitement que le matériau était sec. Dans le cas où de l'eau est présente dans le massif, le calcul doit la prendre en compte.

La stabilité de l'ouvrage se calcule alors en incluant les efforts dus à l'eau et calculés séparément, comme indiqué sur la figure 2-7. S'il y a écoulement d'eau dans le massif, il faudra commencer par résoudre le problème hydraulique.[2]

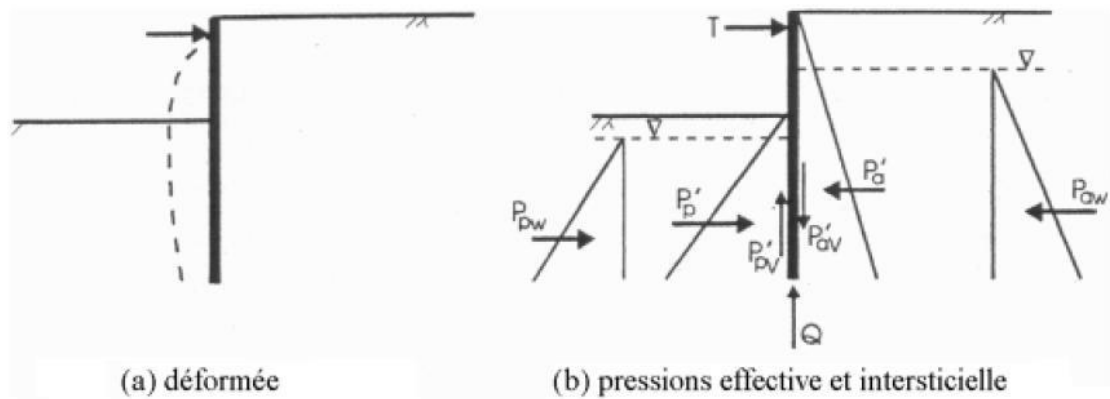


Figure 2.7: Cas de la présence d'eau.

➤ Rideau non ancré en tête et encastré en pied

Un rideau non ancré, battu dans un sol pulvérulent, subit une rotation autour d'un point O situé dans sa partie en fiche. La figure ci après montre les déplacements du rideau et les efforts normaux correspondants.[2]

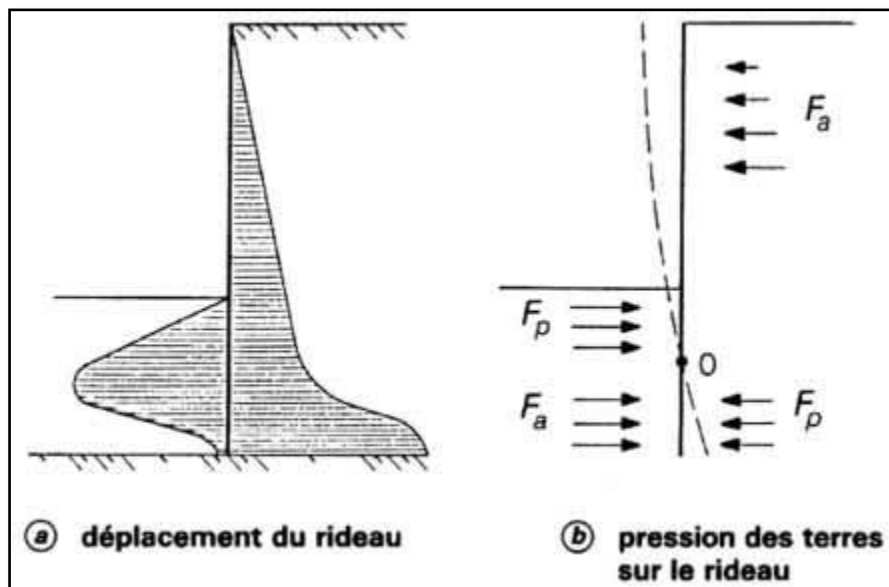


Figure 2. 8: Calcul à l'état limite d'un rideau encastré et non ancré en tête

Le calcul est fait par la méthode de Rankine, à partir des hypothèses simplificatrices 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 FC appliquée au niveau du centre de rotation O.

On prend généralement une hauteur de contrebutée égale à 20% de la hauteur de butée Z0. Cela réduit les inconnues du problème au nombre de deux :

- la hauteur de butée Z0.
- la force de contrebutée FC.

Elles peuvent alors être calculées par les équations de la statique traduisant l'équilibre du rideau. La valeur de Z0 est déterminée en écrivant l'équilibre des moments autour du point O, ce qui donne une équation du troisième degré en Z0, analogue à celle donnant la valeur de la fiche D par la formule

$$2(Kp - Ka)D^3 + [3(H - a)Kp - 3(2H - a)Ka]D^2 - 6H(H - a)KaD - H^2(2H - 3a)Ka = 0 \quad (\text{figure 2.9})$$

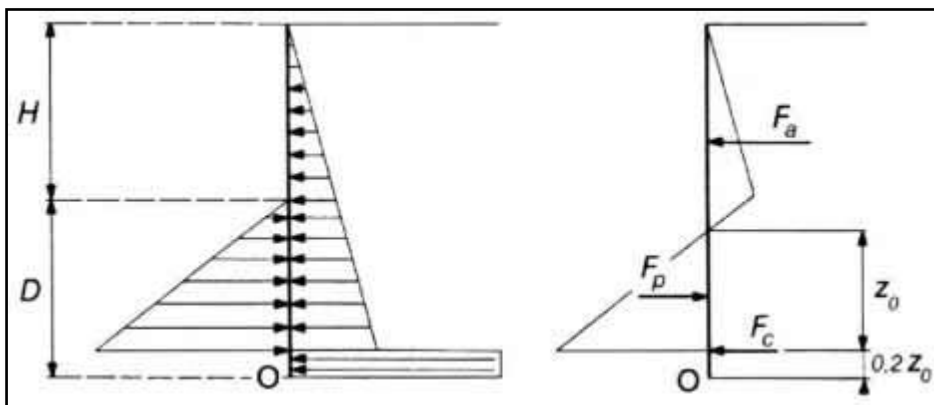


Figure 2.9: Hypothèse admises pour le calcul d'un rideau non ancré

La fiche du rideau a alors pour expression :

$$D = \frac{H}{K_p^2 - 1} + z_0 + 0,2z_0$$

La force de contre-butée FC s'obtient en écrivant qu'en projection horizontale la résultante générale des forces s'exerçant sur le rideau est nulle, soit :

$$FC = Fp - Fa$$

Pour tenir compte d'un coefficient de sécurité par rapport à l'équilibre limite ainsi calculé, on considère que la moitié de la butée est mobilisée, ce qui, dans les calculs, conduit à remplacer  $KP$  par  $1/2 KP$ . Il est alors possible de déterminer la valeur maximale du moment fléchissant dans le rideau à partir du diagramme des pressions de figure 2-9, et de choisir un type de palplanche d'inertie convenable. [3]

### 2.3.2 Méthode de Blum: dite de la « poutre équivalente »

La figure 2.10.a représente la distribution des moments fléchissant dans un écran encasté en pied, telle qu'on peut la calculer par la méthode de la ligne élastique. On constate qu'au point  $O'$  situé légèrement en dessous du fond de fouille, le moment fléchissant est nul.

L'idée de Blum consiste à rendre le problème isostatique en fixant a priori la position de ce point  $O'$  de moment nul.

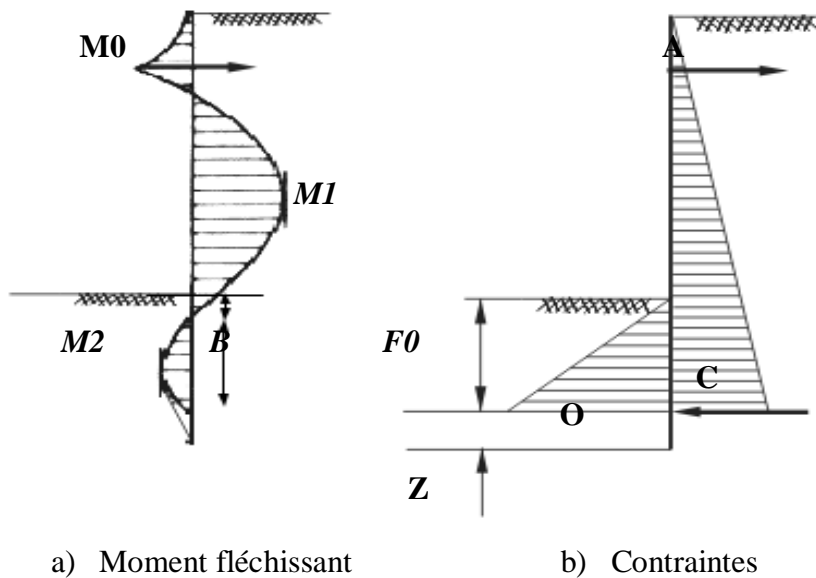


Figure 2.10: Schéma statique d'un écran ancré encastré en pied. [21]

En appliquant la méthode de la ligne élastique à de nombreux cas particuliers, Blum a établi une relation empirique entre la position du point de moment nul (déterminée par la longueur  $a$  de la figure.2.10.a et l'angle de frottement interne du terrain (voir figure 2.11)

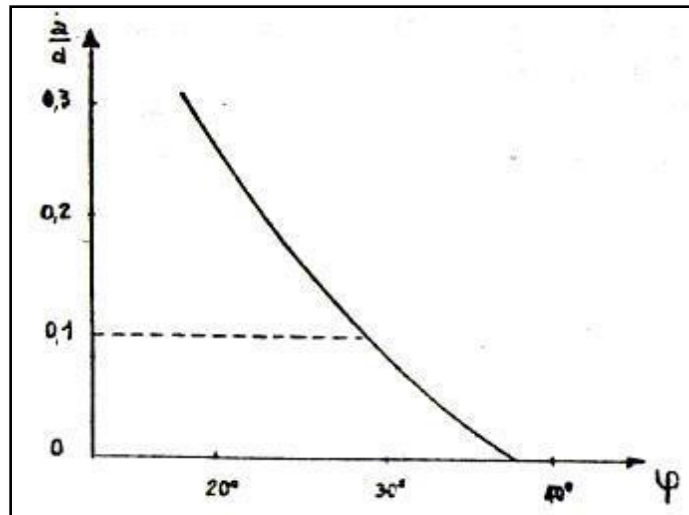


Figure 2.11: Détermination du point de moment nul. [21]

#### Méthodes de Blum

En pratique, lorsque  $\varphi$  est compris entre  $25^\circ$  et  $30^\circ$ , on peut admettre  $a = 0.1d$ , on rend ainsi le problème isostatique. Le calcul ne représente alors aucune difficulté.

Blum a observé que pour les écrans encastrés, le point de moment nul est relativement proche du point de pression résultante nulle. Il a proposé que le moment fléchissant est nul au point de pression nulle.

Il faut remarquer que le moment fléchissant maximal est généralement celui qui se produit vers le milieu de la palplanche, là où la poussée est égale à l'effort d'ancrage (moment  $M_1$  de la figure 2.10 a). Il est bien rare que le moment maximal dans la partie inférieure de la fiche (moment  $M_2$ ) lui soit supérieur.

Il faut s'assurer que le moment au point d'ancrage (moment  $M_0$ ) n'a pas une valeur plus forte, ce qui peut arriver lorsque l'ancrage est placé assez bas.[4]

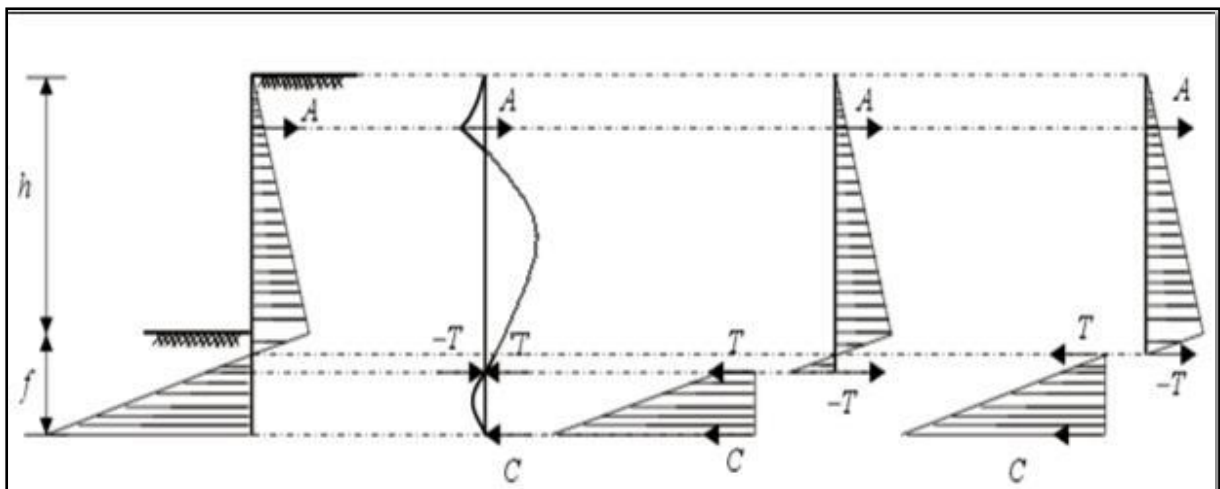


Figure 2.12: Méthode de Blum [21]

L'écran sera décomposé en deux parties:

1- La partie au-dessus de point de moment nul peut être traitée comme une poutre droite soutenue sur deux appuis, au point d'ancrage A et au point de moment nul. Suivant les indications du figure.2.12, les réactions A et T ; et les moments de flexion peuvent alors être déterminés à partir de la théorie statique de la poutre simple.

2- La partie inférieure, au-dessous du point de moment nul, peut également être analysée comme une poutre droite de portée inconnue reposant sur deux appuis, au point de moment nul et au point d'action de la contre butée C. La portée est inconnue, mais par contre on connaît la réaction d'appui R, les deux inconnues dans le calcul de cette deuxième poutre sont donc la portée  $b=f_0-a$  et l'autre réaction d'appui, c'est à dire la contre butée. Enfin, comme pour les murs non ancrés, on adoptera  $f=1.2f_0$  [4][22].

#### **a) Choix d'une palplanche et vérification**

Le choix de la palplanche sera déterminé par la valeur du moment maximal que doit reprendre cette palplanche tel que :  $M_{max} \leq M_{résistantes\ palplanches}$

Avec :  $I/V = M_{max} / \sigma_{adm}$  et  $\sigma_{adm} = 2/3 \sigma_e$  Où  $\sigma_e$  est la limite élastique de l'acier (la nuance d'acier en MPa). La détermination de  $I/V$  mini ou  $W_e$  (moment d'inertie) permet de choisir une palplanche. La méthode de Blum se base sur des hypothèses nombreuses, ce qui résulte que la méthode est approximative. [4]

#### **b) Critique des méthodes classiques**

Dans le traité classique de la mécanique des sol, le calcul d'un rideau simplement buté en pied s'accompagne toujours de l'utilisation d'un coefficient de sécurité, ce qui conduit à adopter pour la fiche une valeur bien supérieure à celle qui correspond effectivement à la rupture du rideau par défaut de butée. On peut se demander quelle est la signification du moment maximal calculé, puisque ce moment se rapporte à une palplanche travaillant vraisemblablement dans des conditions toutes différentes des conditions réelles, donc le comportement réel du rideau n'a rien à voir avec le comportement théorique, dit aussi classique. [4]

### 2.3.3 Méthode de coulomb

Luc Delattre indique que Charles Augustin Coulomb (1736-1806) a été d'abord un ingénieur du génie militaire avant de devenir plus tard un physicien encore plus célèbre par ses mémoires sur l'électricité et le magnétisme entre 1785 et 1791. Cependant l'équilibre des écrans de soutènement, fait appel à la méthode de Coulomb qui est le mode de calcul mis en défaut sur le plan expérimental ainsi que sur le plan théorique.

La théorie de coulomb repose sur deux hypothèses :

- Le sol se rompt suivant une surface de rupture plane
- La force agissant sur le mur a une direction connue .en d'autre terme cela signifie que l'angle de frottement entre l'écran et le mur est connu, ces deux hypothèses faites, la force agissante sur le mur est calculée par de simples considérations d'équilibres statique à partir d'une règle d'extremum. [4]

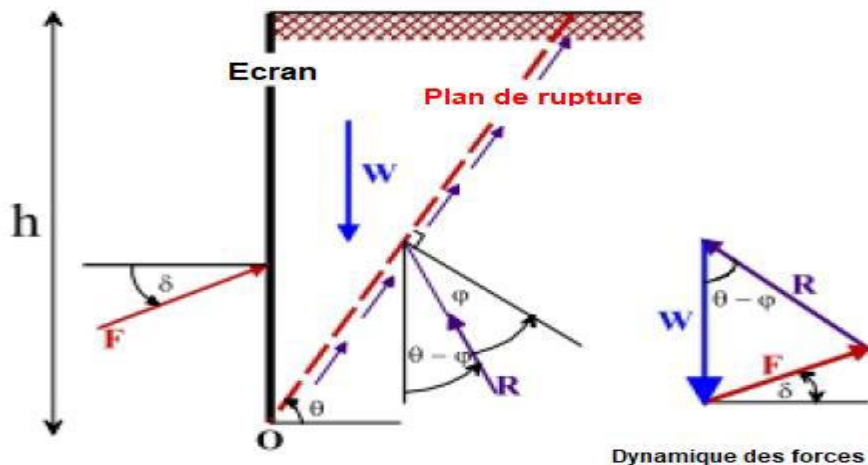


Figure 2.13: EQUILIBRE DU PIONT DE COULOMB

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  $\theta$  avec l'horizontal.

On fait l'hypothèse que la contrainte de cisaillement  $\tau = \sigma' \tan \varphi$  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.

La réaction totale du sol R sur lequel glisse le coin de coulomb est donc incliné de l'angle  $\varphi$  sur la normale au plan de rupture. [3]

En application de la méthode de coulomb, on calcule la poussée en supposant que  $\delta = 0^\circ$  coulomb a défini les coefficients de pression de terre actifs et passifs respectivement par les expressions :

$$ka = \left[ \frac{\sin(\alpha - \varphi) / \sin\alpha}{\sqrt{\sin(\alpha + \delta)} - \sqrt{\frac{\sin(\alpha + \delta) \sin(\varphi - \beta)}{\sin(\alpha - \beta)}}} \right]^2$$

$$kp = \left[ \frac{\sin(\alpha + \varphi) / \sin\alpha}{\sqrt{\sin(\alpha - \delta)} - \sqrt{\frac{\sin(\alpha + \delta) \sin(\varphi + \beta)}{\sin(\alpha - \beta)}}} \right]^2$$

OU :

$\varphi$ : Angle de frottement interne du sol.

$\delta$  : Angle de frottement sol-écran.

$\alpha$ : Inclinaison du mur avec l'horizontale.

$\beta$  : Inclinaison de la surface du sol avec l'horizontale.

Dans les problèmes passives si  $\delta > \varphi / 3$ , la courbure de la surface de rupture derrière le mur doit être tenue en compte, d'où l'équation (**Ka** et **Kp**) mène a une surestimation de la pression de terre.

Très vite ce mode calcul est mis en défaut tant sur le plan expérimental que sur le plan théorique, dans la validité des suppositions de sa théorie coulomb n'a payé aucune. Attention du tout au mode de mouvement du mur et ça supposé que la distribution de pression latéral de la terre ait été simplement hydrostatique, il avait restreint l'application des règles de « Maximis et Minimis » dans le cas de la poussée a des familles de surfaces de ruptures planes.

La discussion de cette hypothèse fondamentale à la fin du 19ieme siècle, a été acceptable pour l'étude de la majorité des problèmes de poussée posés par l'ingénieur.

Elle reste encore largement acceptée un siècle plus tard.

En revanche, l'hypothèse de planéité des surfaces de rupture est remise en cause pour l'étude de la butée, il est ainsi montré que l'adoption des lignes brisées, d'arcs de cercles, d'arcs spirales logarithmiques, de combinaisons de surfaces planes et d'arcs de cercles, pour la modélisation de surfaces de rupture, permet d'obtenir des « Minimis » de la valeur de résistance en butée inferieure a ceux données par des surfaces planes. [3]

### 2.3.4 Méthode de Rankine

Luc Delattre indique que Rankine considère l'état de l'équilibre plastique limite (tout juste avant la rupture).

Cette théorie rajoute une hypothèse que la présence de mur ou d'un écran de soutènement ne modifie pas la répartition des contraintes dans le massif.

#### Cas général :

Avec cette hypothèse on peut déterminer la répartition des contraintes de pousse ou de butée le long d'un plan OD, dans le cas d'un sol présent pulvérulent ( $\gamma, \varphi$ ) non surchargé.

#### Cas particuliers :

La méthode de Rankine peut prendre en compte des surcharges uniformes réparties sur toute la surface du sol. Cependant, el est impossible de réaliser un calcul littéral dans trois cas simples représentés sur les figures suivantes.

Pour ces situations .la solution communément adoptée consiste à calculer des contraintes appliquées au mur en l'absence de surcharge et à y superposer les efforts dus a la seule surcharge et calculés par la formule élastique de Boussinesq.

Cette approche n'est pas pleinement satisfaisante, le principe de superposition ne pouvant être appliqué en toute rigueur. Une alternative pouvant être trouvée dans la résolution numérique du problème, avec un algorithme d'éléments finis par exemple. [3]

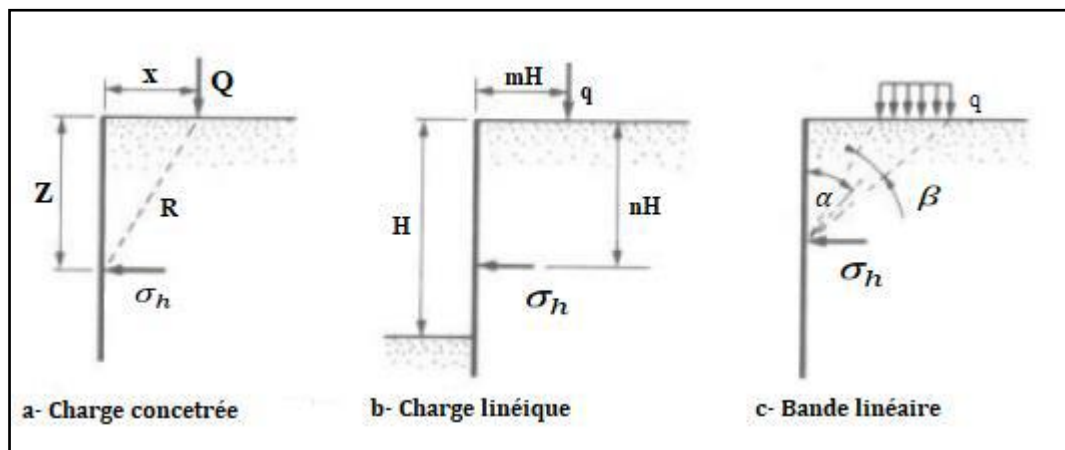


Figure 2.14: Calcul élastique de contrainte horizontale apportée sur un écran par des surcharges (d'ap. Schlosser)

Les surcharges correspondant à ces 3 cas sont données par les formules suivantes avec :

- a :  $\sigma h = \frac{3Q}{2\pi} x^2 \frac{z}{R^5}$
- b :  $\sigma h = 1.27 \frac{q}{H} \frac{m^2 n}{(m^2 + n^2)^2}$  si  $m > 0.4$  et  $\sigma h = 0.203 \frac{q}{H} \frac{m}{(0.16 + n^2)^2}$  si  $m < 0.4$
- c :  $\sigma h = \frac{2q}{\pi} [(\beta + \sin\beta)\sin^2\alpha(\beta - \sin\beta)\cos^2\alpha]$

### 2.3.5 Méthode de Boussinesq

Luc Delattre indique que Boussinesq (1882) a amélioré la théorie de Rankine en prenant l'interaction réelle entre le sol et l'écran, c'est-à-dire en choisissant la valeur de l'angle de frottement  $\delta$  sol-écran. Dans cet équilibre, Boussinesq considère une première zone où on a l'équilibre de Rankine se raccordant à une zone où il tient compte des conditions aux limites sur l'écran. [3]

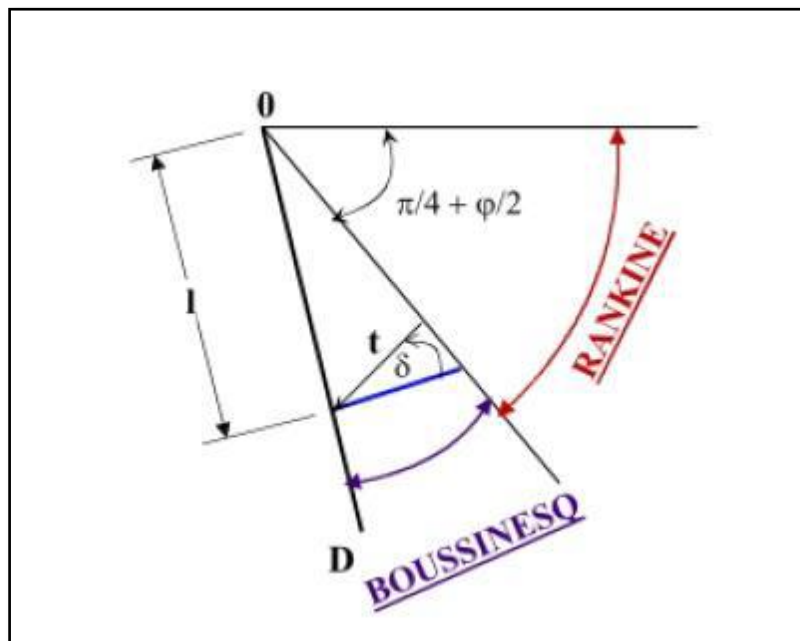


Figure 2.15: Equilibre de Boussinesq et de Rankine

Boussinesq garde les résultats de Rankine concernant la répartition des contraintes sur l'écran :

- L'obliquité des contraintes est constante sur le long de l'écran OD, elle est choisie et fixée à  $\delta$
- La répartition des contraintes sur l'écran est triangulaire :

$$ta = Ka * \gamma * l$$

Si Boussinesq avait bien posé le problème, il n'a été résolu qu'en 1948 par Caquot et Kerisel qui en ont donné la démonstration suivante.

On travaillera en coordonnées polaires, pour lesquelles les équations d'équilibre  $\text{div} \tau + F = 0$  s'écrivent :

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau}{r \partial \theta} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = \gamma \cos \theta$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_\theta}{r \partial \theta} + 2 \frac{\tau}{r} = \gamma \sin \theta$$

- $\sigma_r$ : Contrainte normale radiale
- $\sigma_\theta$  : Contrainte normale ortho radiale
- $\tau$  : Contrainte de cisaillement

$$\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + 3\tau = -\gamma \sin \theta$$
$$\frac{\partial \tau}{\partial \theta} + 2(\sigma_r - \sigma_\theta) = -\gamma r \cos \theta$$

Avec :  $\sigma_\theta = k\sigma_r$

Le système des deux équations différentielles a été intégré par Caquot et Kérisel, les calculs étant améliorés par ABSI pour donner des tables complètes de poussée et butée fournissant les coefficients  $K_a$  et  $K_p$ . Le problème est déterminé par les conditions aux frontières

- Surface libre : contraintes nulles
- Sur l'écran : obliquité imposée  $\delta$  de la contrainte.

Entre la surface libre et la première ligne de glissement on a un équilibre de Rankine et entre la première ligne de glissement et l'écran un équilibre de Boussinesq.

Le tracé des lignes de glissement montre que les lignes de glissement diffèrent peu de lignes droites dans le cas, d'équilibre de poussée, par contre elles s'en éloignent fortement dans le cas d'équilibre de butée. [3]

### 2.3.6 La méthode de Rowe ou des moments réduits

Supposent que le rideau de palplanches est simplement buté en pied, ce qui signifie que les palplanches sont faiblement fichées et qu'il n'y a pas d'encastrement. [18]

La méthode utilise dans un premier temps le calcul très classique du rideau ancré simplement buté en pied.

On détermine la fiche de la palplanche en écrivant l'équation d'équilibre des moments par rapport au point d'ancrage A des pressions des terres exercées sur le rideau. Le dimensionnement du module de la palplanche se fait en recherchant le point d'effort tranchant nul, correspondant au maximum du moment fléchissant.

ROWE propose de dimensionner la palplanche à partir d'un moment  $MR$  inférieur à  $M_{max}$ , ceci afin de tenir compte de la flexibilité du rideau.

Il se réfère à des essais sur modèle qui lui ont permis d'établir l'abaque Figure( 2.18) donnant le facteur de réduction en fonction de la flexibilité définie par le coefficient :

$$P = \frac{L^4}{EI}$$

On procède alors en essayant divers profils correspondant à des inerties  $I$  différentes. On adopte en général une contrainte admissible  $\sigma_{adm}$  égale au 2/3 de la limite élastique de l'acier utilisé. [4][18]

On obtient la relation entre le module  $m$  de la palplanche et le moment réduit  $MR$ :

$$W = \frac{I}{V} = \frac{MR}{\sigma_{adm}}$$

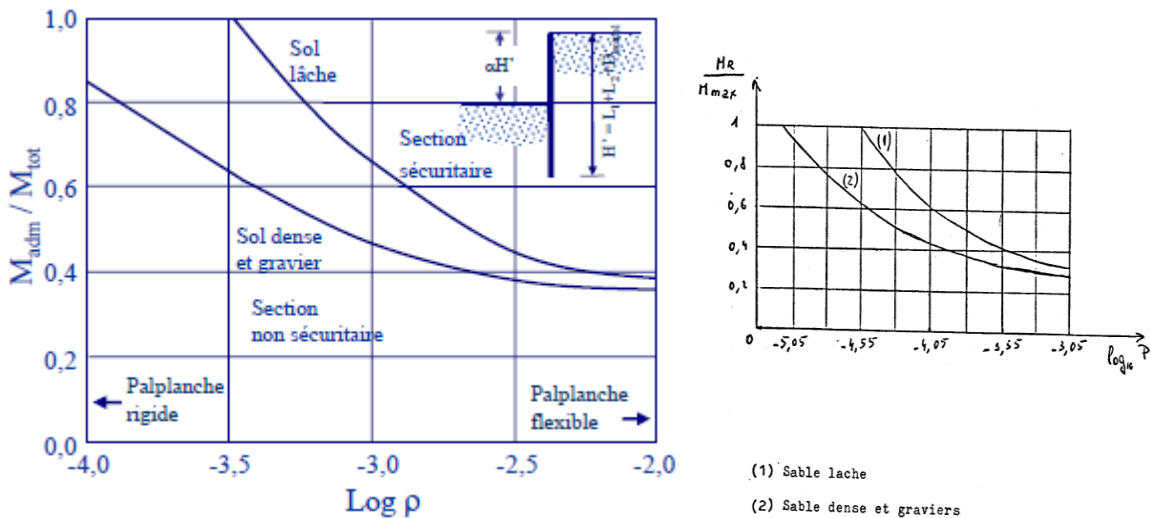


Figure 2. 16: Abaque de Rowe pour déterminer le moment réduit  $MR$

### 2.3.7 Méthode du coefficient de réaction

#### a. Contexte

La technique de Blum ne prend pas en compte la raideur du sol et considère l'état limite de poussée ou de butée dans tout le massif. De plus, la chronologie de la construction est ignorée. Or l'interaction sol structure s'est révélée être un paramètre déterminant pour la compréhension du fonctionnement des écrans de soutènement. La méthode du coefficient de réaction du sol a pu, parallèlement au développement de la puissance de calcul, corriger ces écueils.[2][16]

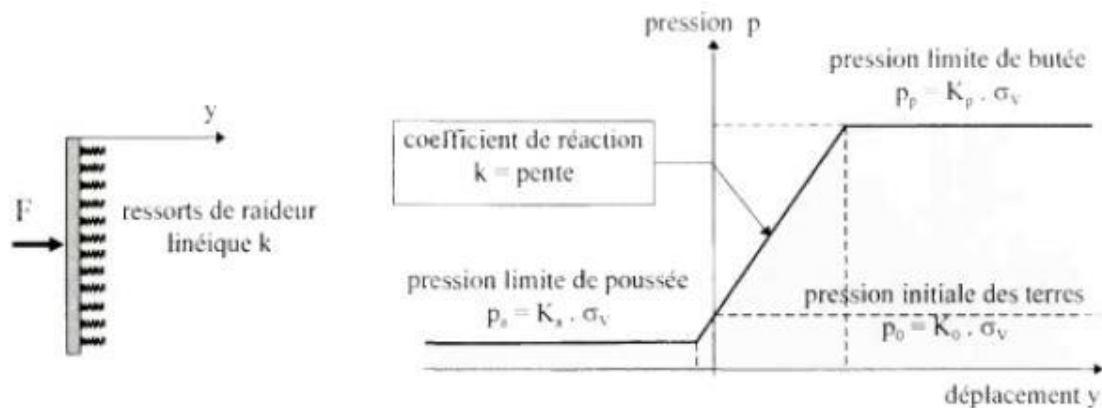


Figure 2.17: modélisation du comportement du sol  $p=ky$  [3]

#### b. Hypothèses

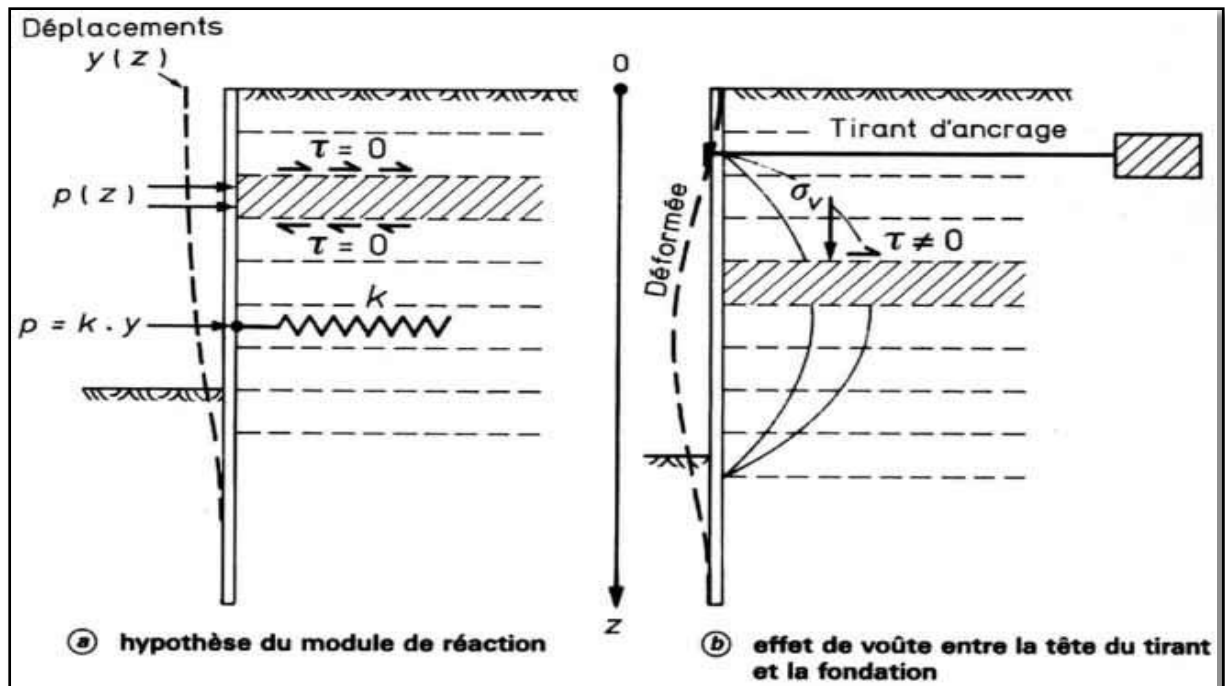
Afin de prendre en compte la rigidité du mur, celui-ci est assimilé à une poutre verticale plantée dans le sol, de module  $E$  et d'inertie  $I$ . Dans la phase élastique la relation entre la pression des terres  $\sigma_h$  et le déplacement latéral  $\Delta$  a pour expression:

$$\sigma_h = k_0 \gamma z + k \Delta$$

Avec:

- $K_0$ : Coefficient de pression latérale des terres au repos ( $\approx 1 - \sin \phi$  dans les sables).
- $K$ : Coefficient de réaction en  $(\text{kN/m}^3)$ .

Le massif de sol est considéré comme étant composé de minces couches glissant les unes sur les autres, c'est à dire qu'il ne reprend pas d'efforts de cisaillement. Cette hypothèse revient à considérer que les plans horizontaux sont des plans principaux, et que les directions principales des contraintes sont verticale et horizontale. Il est évident que ce n'est pas là qu'une approximation de la réalité, et d'autant plus inexacte que les déplacements de l'écran et du sol s'éloignent d'une translation horizontale.[2][16]



**Figure 2.18:** Incompatibilité entre l'hypothèse du module de réaction et le développement d'un effet de voûte.

La pression des terres  $\sigma_h$  qui s'applique sur l'écran est fonction du déplacement latéral de celui-ci. Le paramètre  $k$  peut être obtenu selon plusieurs formules différentes dont celle de Ménard Bourdon (1964), Terzaghi (1955), Gigan (1989) et Rowe (1957).

### 2.3.8 Méthodes des éléments finis

La méthode des éléments finis fait partie des outils de mathématiques largement appliquées. Il s'agit de mettre en place, à l'aide des principes hérités de la formulation variationnelle ou formulation faible, un algorithme discret mathématique permettant de rechercher une solution approchée d'une équation aux dérivées partielles (ou EDP).

*Les principes fondamentaux de la méthode la plus courante sont les suivants :*

- le milieu est considéré bidimensionnel
- le milieu contenu est divisé par des lignes imaginaires, qui constituent les frontières entre éléments finis
- ces éléments sont supposés être reliés entre eux par un nombre fini de points dit points nodaux situés sur leur frontières (ce sont généralement les sommets des éléments et parfois d'autres points sur les faces et les arêtes). Ces points nodaux transmettent les efforts d'un élément à un autre. Les inconnues de base du problème sont les déplacements de ces points nodaux.

- Une fonction de forme permet de définir d'une manière unique le champ des déplacements à l'intérieur de chaque élément fini en fonction des déplacements de ces points nodaux.
- Les fonctions de déplacements définissent donc sans ambiguïté l'état de déformation à l'intérieur d'un élément en fonction de déplacements nodaux, et par suite, compte tenu des propriétés rhéologiques du matériau, l'état de contrainte (état de contrainte de l'élément est défini en un ou plusieurs points de l'élément appelés des «points d'intégration »).[3]

A partir de ces fonction de déplacements et des lois rhéologiques adoptées, on détermine une relation de raideur qui à tout champ de déplacement sur le solide (défini par les composantes du vecteur déplacement  $\{U\}$  au niveau des nœuds de la structure ou solide) fait correspondre un champ de sollicitation défini par les composantes du vecteur force  $\{F\}$  au niveau des nœud. Cette relation s'écrit :

$$\{F\} = [K'] \{U\}$$

Où :

$[K']$  : matrice carrée de la rigidité qui, une fois déterminée permet de résoudre le système linéaire  $\{F\} = [K'] \{U\}$  où les inconnues sont les composantes de  $\{U\}$  des déplacements nodaux (si l'une des composantes est imposée par les conditions aux limites, elle sera remplacée par la réaction qui en résulte).

Tout chargement se traduit par des vecteurs de forces nodales  $\{F\}$  lorsqu'il s'agit d'incrément de charges, les déplacements sont des incréments qui s'ajoutant aux déplacements obtenus lors de l'incrément précédent, il en est de même pour les contraintes.[3][15]

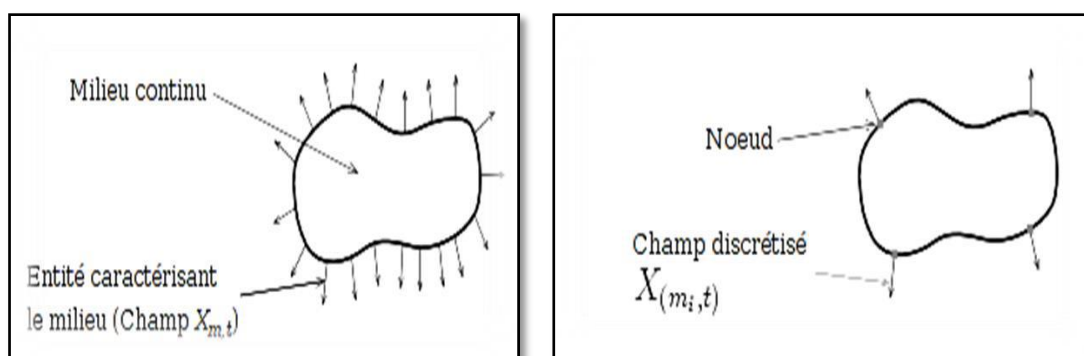


Figure 2.19: Le principe des éléments finis.

## **2.4 Conclusion**

Au terme de ce chapitre, il est conclu que l'utilisation des méthodes classiques repose sur différentes hypothèses, qui restent néanmoins insuffisantes pour simuler fidèlement un problème géotechnique. Chaque hypothèse peut avoir une influence significative sur les résultats, car les contraintes et les déformations du soutènement dépendent principalement du mode de construction adopté.

Parmi ces méthodes, celle des coefficients de réaction — aujourd'hui la plus utilisée — montre ses limites. Bien que des progrès aient été réalisés dans la détermination des paramètres, notamment du coefficient de réaction, ces avancées ne sauraient masquer le manque de fondement théorique de la méthode. Son utilisation se justifie surtout par le fait que les sollicitations issues du calcul sont généralement surévaluées, offrant ainsi un surplus de sécurité, à l'exception de certains ouvrages boutonnés. Un avantage notable de cette méthode est qu'elle permet une approche progressive, en effectuant un calcul à chaque étape de la construction.

En parallèle, la méthode des éléments finis apparaît comme la mieux adaptée à l'étude des problèmes de soutènement. Elle permet une modélisation détaillée de l'ensemble des éléments influençant le comportement de l'ouvrage (sol, écran, eau, surcharges, etc.) ainsi que des différents couplages entre ces éléments.

La méthode de Blum, quant à elle, suppose un encastrement rigide, entraînant l'utilisation de fiches plus longues. En pratique, elle conduit à des longueurs de fiches plus importantes que dans le cas d'un rideau simplement buté, mais elle génère des moments fléchissants maximaux moins élevés, ce qui permet d'utiliser des profils métalliques plus légers.

Ainsi, la diversité des méthodes de dimensionnement et la variabilité des résultats obtenus rappellent au concepteur qu'aucune de ces méthodes n'est une recette exacte dont l'application rigoureuse garantirait un résultat optimal

# *Chapitre 3*

## *Présentation de PLAXIS 2D*

### 3.1 Introduction

Le développement du logiciel PLAXIS a commencé en 1987 à l'université technique de Delft à l'initiative du département allemand des travaux publics et gestion des eaux.

L'objectif initial était réservé à développer un code d'éléments finis en 2D facile à manier permettant l'analyse des talus en sols mous implantés aux bords des rivières situées dans les Plaines Hollandaises. Quelques années plus tard, PLAXIS a été étendu pour couvrir d'autres Domaines de la géotechnique. Avec l'extension des différentes activités géotechniques, une Compagnie nommée PLAXIS b.v. a vu le jour en 1993. En 1998, la première version PLAXIS Pour Windows a été lancée. En même temps le module kernel pour le calcul en 3D a commencé de connaître son développement. Plusieurs années de développement, il y a eu le lancement en 2001 du programme tunnel PLAXIS 3D.

Le logiciel PLAXIS est un programme d'éléments finis conçu au départ pour les problèmes en deux dimensions (2D) puis étendu à ceux de trois dimensions (3D) spécialement conçu pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour plusieurs modes d'applications géotechniques.

Le modèle utilise une interface graphique pratique permettant aux utilisateurs de générer rapidement un modèle géométrique et un maillage d'éléments finis basés sur la coupe verticale de l'ouvrage à étudier. Les utilisateurs sont supposés être capables de travailler dans un environnement Windows. Pour se familiariser rapidement avec l'utilisation de cette interface et avec les caractéristiques principales du logiciel. [11]

### 3.2 Fonctionnalités de PLAXIS

L'interface d'utilisation de PLAXIS se compose de quatre sous-programmes (Input, Calculations, Output et Curves) (Figure 2.1) :

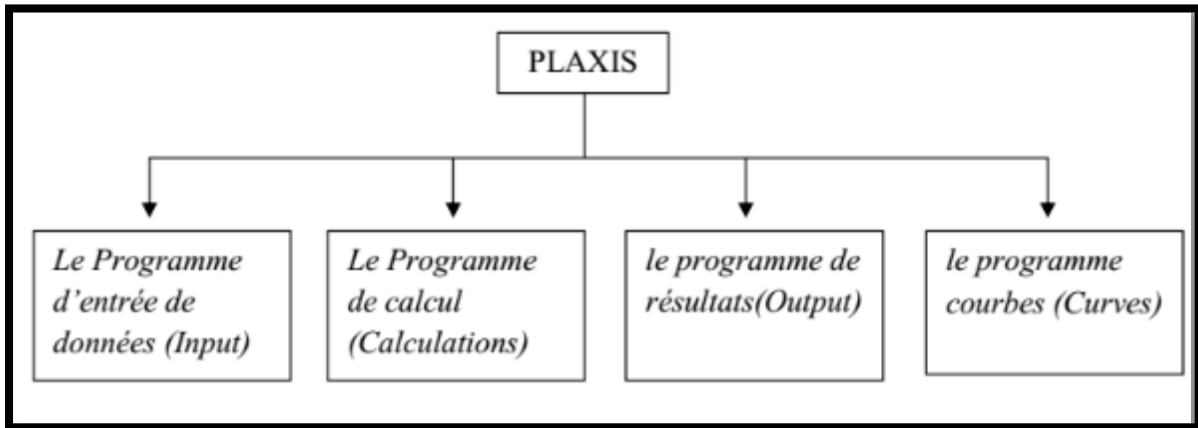


Figure 0.1: Différents programmes de calcul en PLAXIS 2D

#### 3.2.1 Programme d'entrée (Input)

Cette icône représente le programme d'entrée des données (Input). Ce programme contient tout ce qui est nécessaire pour créer et modifier un modèle géométrique.

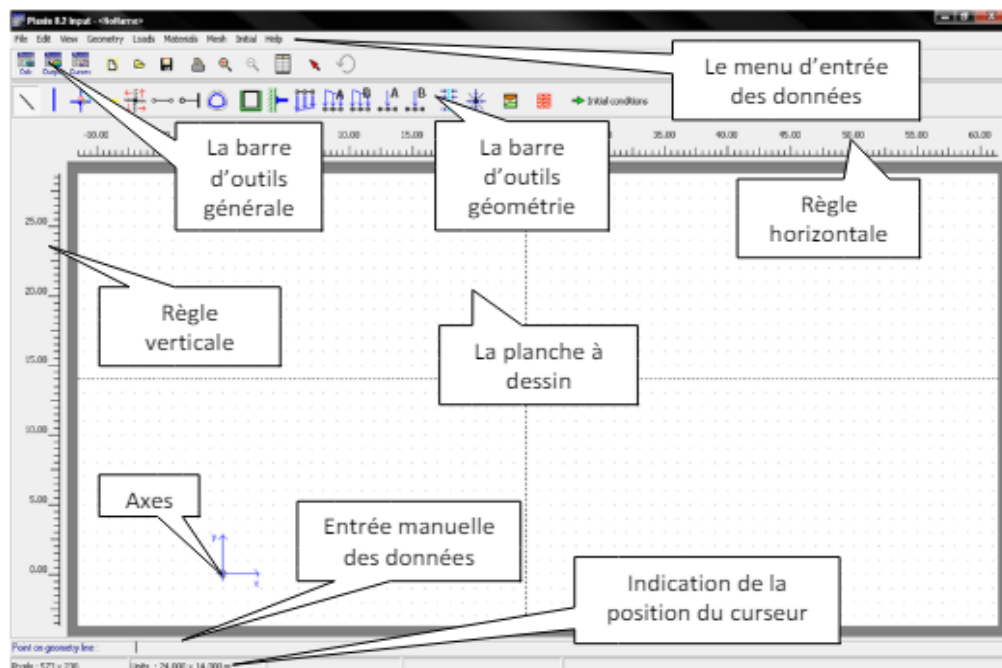


Figure3.2: Fenêtre principale du programme d'entrée des données (Input) (Mode de création géométrique).

- **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 plupart de ces éléments sont aussi accessibles par des boutons dans la barre d'outils. [8]

- **La barre d'outils générale (Tool bar (général)):**

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. Elle contient aussi les icônes qui servent à lancer les autres modules de PLAXIS (Calculation, Output et Curve). [8]

- **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'outil de la gauche vers la droite. [8]

- **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. Les règles peuvent être supprimées depuis le menu View. Un clic sur les règles permet d'activer la fenêtre General settings, et donc de modifier les dimensions du modèle. [8]

- **La planche à dessin (Draw area):**

La planche à dessin est la page sur laquelle le modèle géométrique va être créé et modifié. La création et la modification du modèle géométrique sont principalement effectuées à l'aide de la souris, mais pour certaines options, la saisie des données à l'aide du clavier est possible (voir ci-dessous, Entrée manuelle des données). La planche à dessin peut être utilisée de la même manière que les programmes de dessin classiques. Les nœuds de la grille peuvent servir de points d'ancrage. [8]

- **Axes :**

Si l'origine physique se trouve dans l'intervalle des dimensions définies par l'utilisateur, elle est représentée par un petit cercle dans lequel les axes x et y sont indiqués par des flèches. L'indication des axes peut être supprimée depuis le menu View. [8]

### • Entrée manuelle des données:

Si le dessin à la souris n'a pas l'exactitude souhaitée, la ligne d'entrée manuelle des données peut être utilisée. Les valeurs pour les coordonnées x et y peuvent être saisies en tapant les valeurs correspondantes avec un espace entre les deux (valeur de x (espace) valeur de y).

L'entrée manuelle des coordonnées peut être faite pour tous les éléments géométriques, exceptés les articulations de plaque (Hinges) et les blocages en rotation (Rotation fixities). [8]

### • Indication de la position du curseur

L'indicateur de la position du curseur donne la position actuelle du pointeur de la souris à la fois avec les coordonnées physiques (coordonnées x et y) et en pixels. [8]

### 3.2.2 Le programme calcul ( Calculation )

Les étapes peuvent être définies dans le même ordre que dans la réalité. Il existe pour l'utilisateur quatre types de calcul différents à choisir ; un calcul plastique, le calcul de la consolidation, un calcul dynamique Dynamic Calculation et le calcul  $\phi/C$  réduction où le dernier est utile pour calculer les facteurs de sécurité. Une fois que toutes les étapes ont été définies, le processus de calcul peut commencer en cliquant sur le bouton Calcul. Au cours du calcul, une petite fenêtre apparaît et donne des informations sur la progression de chaque phase de calcul. [7]

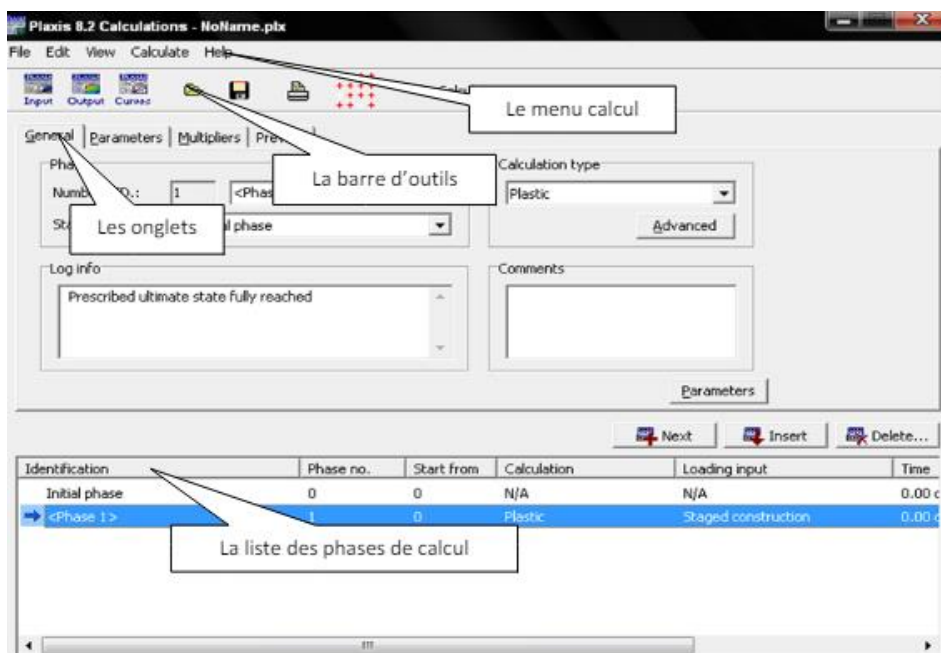
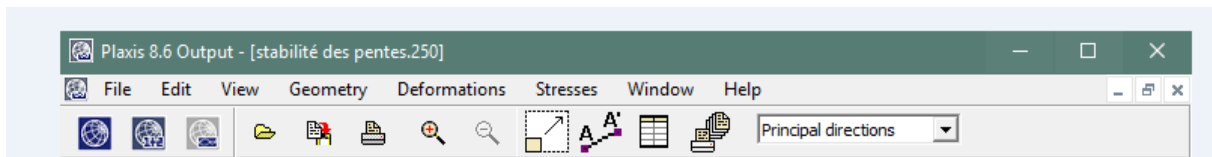


Figure3.3: Le programme de calcul.

### 3.2.3 Programme sortie Out put

Le premier programme utilisé pour l'analyse des résultats, est le programme output. Ce programme contient tous les éléments qui permettent de visualiser les résultats des calculs. Au lancement du programme de résultats, l'utilisateur doit choisir le modèle et la phase de calcul approprié ou le numéro du pas pour lequel les résultats seront affichés. La fenêtre principale du programme output contient le menu des résultats, les fenêtres de résultats, la barre d'outils et la barre d'état (figure 3.4).



**Figure3.4:** Barre d'outils de la fenêtre principale du programme output

D'une manière générale, ce programme fournit les options suivantes :

- **Déformations** : La visualisation des déformations peut se faire sous la forme de maillage déformé, de déplacements ou déformations totaux ou incrémentaux. Tous les graphiques de déplacements ou de déformations peuvent être présentés avec flèches, lignes iso valeurs ou domaines iso valeurs.
- **Contraintes** : La restitution des contraintes peut se faire en contraintes effectives, contraintes totales, pressions interstitielles et suppressions interstitielles. Ces contraintes peuvent être figurées en lignes iso valeurs comme en domaines iso valeurs.
- **Efforts et déplacements dans les éléments de structure** : Des graphiques et tableaux fournissent directement les déplacements, les efforts normaux, les efforts tranchants et les moments fléchissant de tous les éléments de structure.
- **Coupes** : Cette option très commode est offerte par PLAXIS pour créer des graphiques des sollicitations ou des déplacements selon des coupes sélectionnées dans le modèle.
- **Générateur de rapport** : Un générateur de rapport permet l'édition d'un rapport complet, des données saisies et des résultats obtenus pour un modèle.
- **Animations** : Il est possible de générer des animations vidéo pour toutes les sorties graphiques, notamment les déplacements et efforts dans les éléments de structure. [10]

### 3.2.4 Les programmes courbes (Curves)

Ce programme contient tout le nécessaire pour générer des courbes charges-déplacements, des chemins de contrainte et des courbes contraintes-déformations.[7]

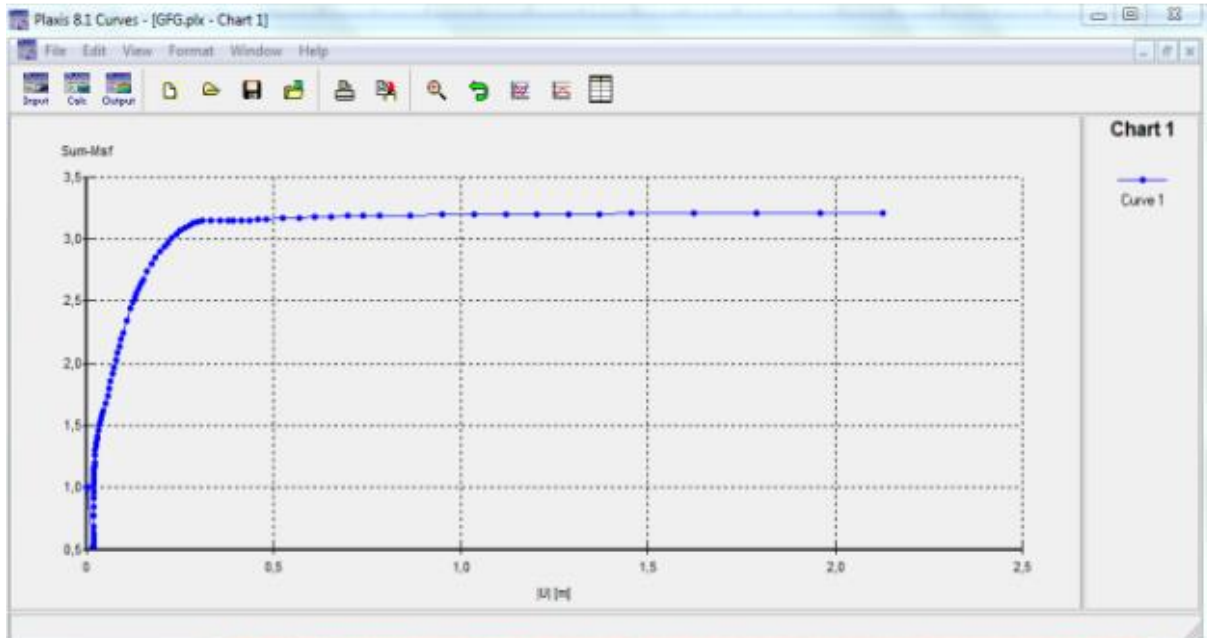


Figure3.5: Le programme courbe (Curves).

### 3.3 .Types de calcul dans PLAXIS

Il existe, comme mentionné précédemment, trois types de calcul à choisir entre PLAXIS ; Calcul en plastique, analyse de consolidation et la réduction ( $\phi$  et C).

#### 3.3.1 Calcul en plastique :

Un calcul en plastique peut être sélectionné lorsque l'utilisateur s'intéresse à une analyse de déformation élasto-plastique dans laquelle il n'est pas essentiel de prendre en compte l'ampleur des surpressions excédentaires avec le temps. Un calcul en plastique ne prend pas compte des effets de temps. Un calcul en plastique peut également être utilisé avec des sols doux, mais l'historique de chargement et la consolidation ne peuvent pas être suivis. [7]

#### 3.3.2 Analyse de consolidation

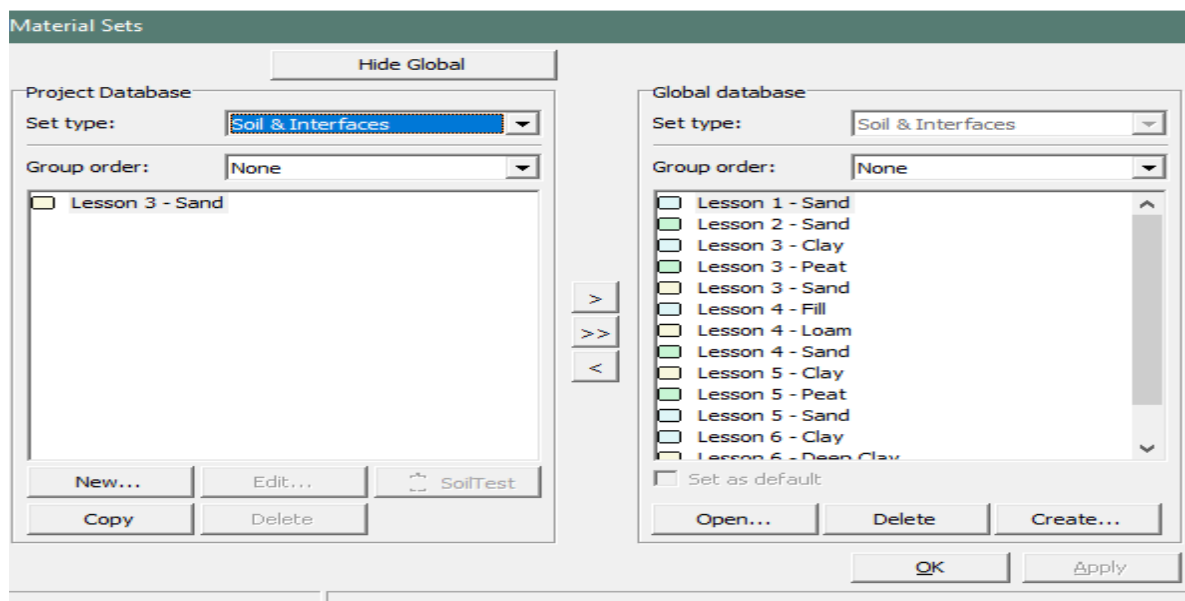
L'analyse de consolidation devrait être utilisée lorsqu'il est intéressant de suivre le développement de pression excessive des pores avec le temps dans les sols doux. [7]

### 3.3.3 Analyse de la réduction $\phi$ et C

La réduction,  $\phi$  et C, est une analyse de sécurité dans PLAXIS qui est souhaitée lorsque la situation dans le problème nécessite un calcul du facteur de sécurité. Une analyse de sécurité peut être effectuée après chaque phase de calcul individuelle, mais il est recommandé d'utiliser une analyse de sécurité à la fin, lorsque toutes les phases de calcul ont été définies. [7]

### 3.4 Propriétés des matériaux

• Base de données des matériaux: Dans PLAXIS 8.6, les propriétés du sol et les propriétés des matériaux des structures sont toutes stockées dans une base de données. Il y a quatre types différents de matériaux : sols et interfaces (Soil Interfaces), plaques (Plates), géo grilles (Geogrids) et ancrages (Anchors). A partir de la base de données, ces paramètres peuvent être assignés à des couches de sol, ou aux éléments de structure dans le modèle géométrique. Il convient de définir les différents matériaux selon son type (sol et interface, plaque, ancrage, géo grille, etc.)[6]



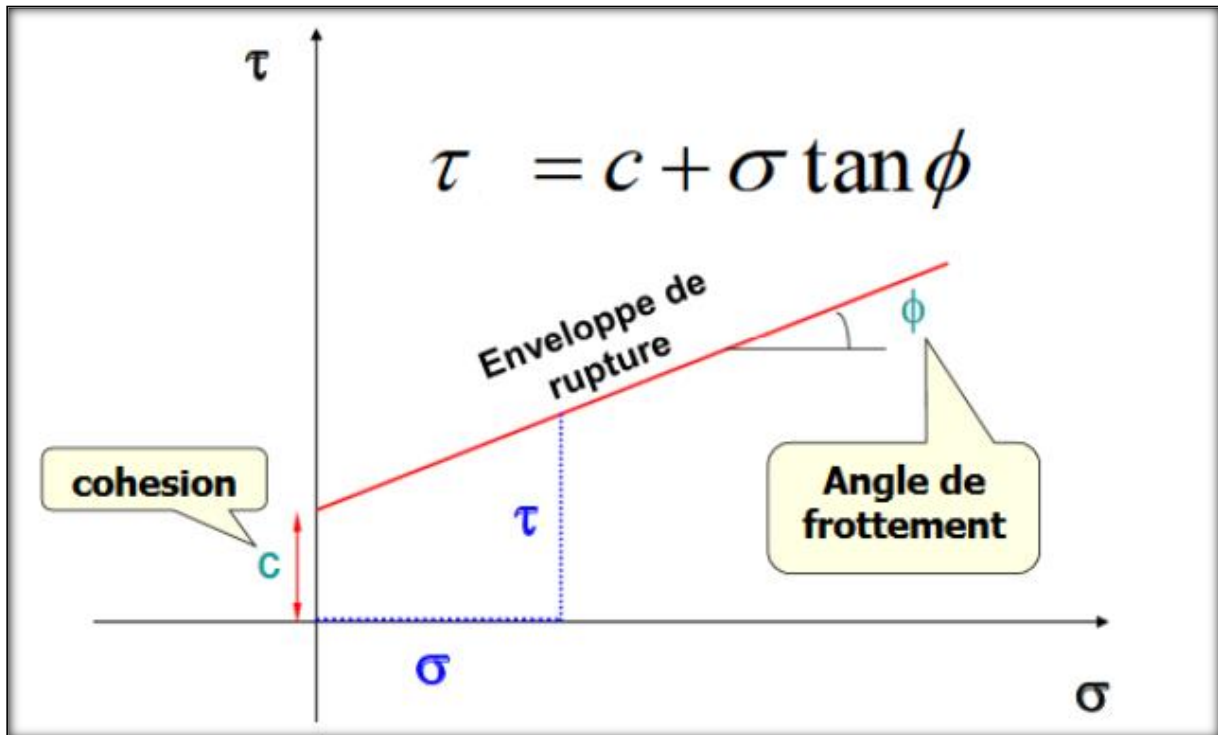
**Figure3.6:** Fenêtre des propriétés des matériaux (base de données du projet et base de données globale).

### 3.5 Le modèle de Mohr-Coulomb dans le code Plaxis

Le modèle de Mohr-Coulomb est un modèle élastique-parfaitement plastique (sans écrouissage). Dans le plan de Mohr, la droite intrinsèque est représentée par :

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (3.1)$$

Où  $\tau$  et  $\sigma$  sont respectivement les contraintes normales et de cisaillement, et C et  $\phi$  respectivement la cohésion et l'angle de frottement du matériau (figure 3.7).[5]



**Figure3.7:** Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb. [12]

Ce modèle bien connu est utilisé généralement comme une première approximation du comportement d'un sol. Ce modèle comporte cinq paramètres dont 2 paramètres élastiques :  $E$  et  $\nu$  3 paramètres de rupture ( $C$ ,  $\phi$  et  $\psi$ ) tels que : le module d'Young ( $E$ ), le coefficient de Poisson ( $\nu$ ), la cohésion ( $c$ ), l'angle de frottement ( $\phi$ ), et l'angle de dilataance ( $\psi$ ) [9]

### 3.5.1 Module de Young $E$ ref

Le choix d'un module de déformation est un des problèmes les plus difficiles en géotechnique. Le module de déformation varie en fonction de la déformation et en fonction de la contrainte moyenne. Dans le modèle de Mohr-Coulomb, le module est constant. [11]

### 3.5.2 Coefficient de Poisson $\nu$

Les valeurs du coefficient de Poisson se situent entre 0.2 et 0.4 pour la majorité des sols.[11]

### 3.5.3 Angle de frottement $\phi$ ref

L'angle de frottement est constant, indépendant de la contrainte moyenne. Plaxis ne prend pas en compte une variation d'angle de frottement avec la contrainte moyenne. L'angle de frottement à introduire est soit l'angle de frottement de pic soit l'angle de frottement de palier.[11]

### 3.5.4 Cohésion $C$ ref

La cohésion a la dimension d'une contrainte. PLAXIS peut manipuler des sables sans cohésion ( $c = 0$ ), mais certaines options ne fonctionneront pas bien. Pour éviter les complications, il est conseillé aux utilisateurs peu expérimentés d'entrer au moins une valeur faible (prendre  $c > 0.2$  kPa). PLAXIS propose une option spéciale pour les couches dans lesquelles la cohésion croît avec la profondeur. [9]

### 3.5.5 L'angle de dilatance $\psi$

L'angle de dilatance  $\psi$  règle le comportement non associé du sol. C'est le paramètre le moins courant. Il peut cependant être facilement évalué par la règle suivante :

- $\psi = \varphi - 30$  pour  $\varphi > 30$
- $\psi = 0$  pour  $\varphi < 30$ . [11][17]

Mohr-Coulomb - argile

General Parameters Interfaces

Stiffness

$E_{ref}$  : 0,000 kN/m<sup>2</sup>

$\nu$  (nu) : 0,000

Strength

$c_{ref}$  : 0,000 kN/m<sup>2</sup>

$\varphi$  (phi) : 0,000 °

$\psi$  (psi) : 0,000 °

Alternatives

$G_{ref}$  : 0,000 kN/m<sup>2</sup>

$E_{oed}$  : 0,000 kN/m<sup>2</sup>

Velocities

$V_s$  : 0,000 m/s

$V_p$  : 0,000 m/s

Advanced...

SoilTest Next OK Cancel

Figure3.8: Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb.

### 3.5.6 Le facteur de réduction de l'interaction (R inter)

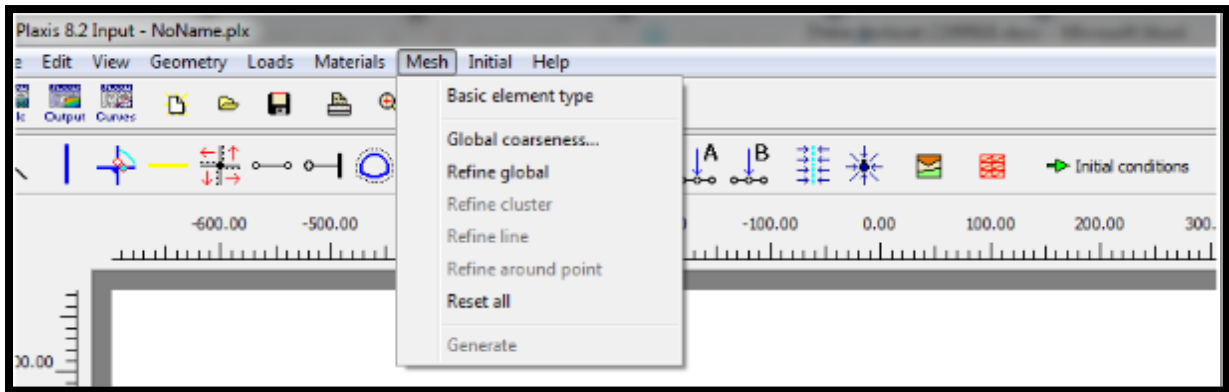
L'interaction entre sol et structure est dite rigide si le sol a les mêmes propriétés de la structure et il est non rigide pour le cas différent.

Les valeurs suggérées pour (R inter) selon le type de l'interaction sol/structure :

- Interaction sable / acier = R inter  $\approx 0.6 - 0.7$
- Interaction Argile / acier = R inter  $\approx 0.5$
- Interaction Sable/béton = R inter  $\approx 1.0 - 0.8$
- Interaction Argile / béton = R inter  $\approx 1.0 - 0.7$
- Interaction sol / Géorgie = R inter  $\approx 1.0$
- Interaction sol / géotextile = R inter  $\approx 0.9 - 0.5$  (foil, textile). [11][17]

### 3.6 Génération du maillage

• **Génération automatique du maillage** : PLAXIS 8.6 permet une génération automatique des maillages d'éléments finis. L'opérateur peut paramétrer la finesse du maillage entre différents options (très grossier, grossier, moyen, fin, très fin), l'opérateur peut également décider de mailler plus finement une certaine région du sol ou /et le voisinage d'un élément grâce aux options refine dans le mesh menu. La taille moyenne d'un élément et le nombre d'éléments générés dépendent de ce réglage de finesse globale [6]



**Figure3.9:** Fenêtre de génération de la densité élémentaire du maillage.

### 3.7 Les conditions initiales

Une fois le modèle géométrique créé et le maillage d'éléments finis généré, l'état de contraintes initiales et la configuration initiale doivent être spécifiés. Les conditions initiales sont constituées de deux modes différents, l'un pour générer les pressions interstitielles initiales (mode des conditions hydrauliques) et l'autre pour spécifier la configuration géométrique initiale et générer le champ des contraintes effectives initiales (mode de configuration géométrique).[11][17]

### ***4. Conclusion***

L'objectif avoué dans ce chapitre était d'introduire le lecteur à une méthode numérique Utilisée en géotechnique, la méthode des éléments finis Plaxis 2D, qui permet le passage d'un projet réel complexe au modèle numérique selon la nature du sol et le type d'ouvrage.

PLAXIS 2D est l'outil le plus fiable à destination des ingénieurs géotechniques du monde entier pour l'analyse des excavations, des digues, des mesures d'amélioration du sol, des fondations, des tunnels et d'autres structures stratégiques.

PLAXIS 2D permet la création rapide et efficace de modèles éléments finis. Évaluation réaliste des contraintes et des déplacements. Post-traitement puissant et polyvalent.

## *Chapitre 4*

*Modélisation d'une usine dans  
la zone industrielle d'Oran par  
le logiciel PLAXIS 2D*

#### **4.1 Présentation géométrique d'étude de la zone industrielle d'Oran**

Les figures (4-1), illustrent graphiquement la géométrie modélisée en déformation plane, avec des dimensions de 45 mètres dans la direction horizontale et de 20 mètres dans la direction verticale, caractérisée par deux pentes de 2/3 (vertical/horizontal). Elles détaillent cette configuration géométrique à travers la délimitation de 10 points distincts.



**Figure 4.1:** La zone industrielle d'Oran

**Tableau 4.1:** Coordonnée du modèle géométrique du talus

point	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<b>X (m)</b>	45.00	45.00	45.00	20.00	10.00	00.00	00.00	02.00	07.00	24.00	29.00
<b>Y (m)</b>	00.00	08.00	14.00	14.00	20.00	20.00	8.00	20.00	20.00	14.00	14.00

## **4.2 Analyse de Stabilité du Talus**

Le critère utilisé dans notre travail est celui de Mohr-Coulomb. ce critère demande d'introduire cinq paramètres tels que :  $E$ ,  $f$ ,  $\nu$ ,  $C$  et  $\varphi$  angle de dilatance  $\psi$ . ce sont des paramètres classiques de la géotechnique, certes souvent fournis par des essais de laboratoire, mais nécessaires à des calculs de déformation ou de stabilité.[12]

### **4.2.1 Propriétés des couches de sols et des interfaces**

Le critère de Mohr-Coulomb présente un comportement élasto-plastique parfaitement plastique sans écoulement. Il a une grande utilisation dans la géotechnique à cause de sa facilité d'utilisation. Le tableau (4-2). Récapitule les caractéristiques géotechniques de chaque matériau utilisé dans la modélisation du talus.[12]

**Tableau 4.2:** Les caractéristiques géotechniques de chaque matériau

<i>Paramètres</i>	<i>symbole</i>	<i>sable</i>	<i>argile</i>	<i>Unité</i>
<b>Modèle du matériau</b>	<i>Model</i>	<i>Mohr COULOMB</i>	<i>Mohr COULOMB</i>	-
<b>Type de comportement</b>	<i>Type</i>	<i>DRAINE</i>	<i>Non DRAINE</i>	-
<b>Poids volumique (non saturé)</b>	$\gamma_{unsat}$	17.00	16.00	[KN/m <sup>3</sup> ]
<b>Poids volumique (saturé)</b>	$\gamma_{sat}$	19.00	18.00	[KN/m <sup>3</sup> ]
<b>Module d'Young (constant)</b>	<i>E ref.</i>	3.5*10 <sup>4</sup>	3.0*10 <sup>4</sup>	[KN/m <sup>2</sup> ]
<b>Coefficient de Poisson</b>	$\nu$	0.35	0.30	-
<b>Cohésion</b>	<i>C ref</i>	1.0	10.00	[KN/m <sup>2</sup> ]
<b>Angle de frottement</b>	$\varphi$	34.00	33.00	[degré]
<b>Angle de dilatance</b>	$\psi$	4.00	3.00	[degré]
<b>Résistance d'interface</b>	<i>Rinter</i>	0.70	0.67	-
<b>perméabilité (xx)</b>	<i>Kx</i>	1.0 × 10 <sup>-3</sup>	1.0 × 10 <sup>-7</sup>	[m/s]
<b>perméabilité (yy)</b>	<i>Ky</i>	1.0 × 10 <sup>-3</sup>	1.0 × 10 <sup>-7</sup>	[m/s]

### 4.3 Les conditions aux limites

Les conditions aux limites sélectionnées par défaut sont les suivantes : les déplacements horizontaux sont bloqués le long des cotés du système, tandis que les déplacements verticaux restent libres. En revanche, le déplacement de la base est entièrement bloqué (voir figure précédente).

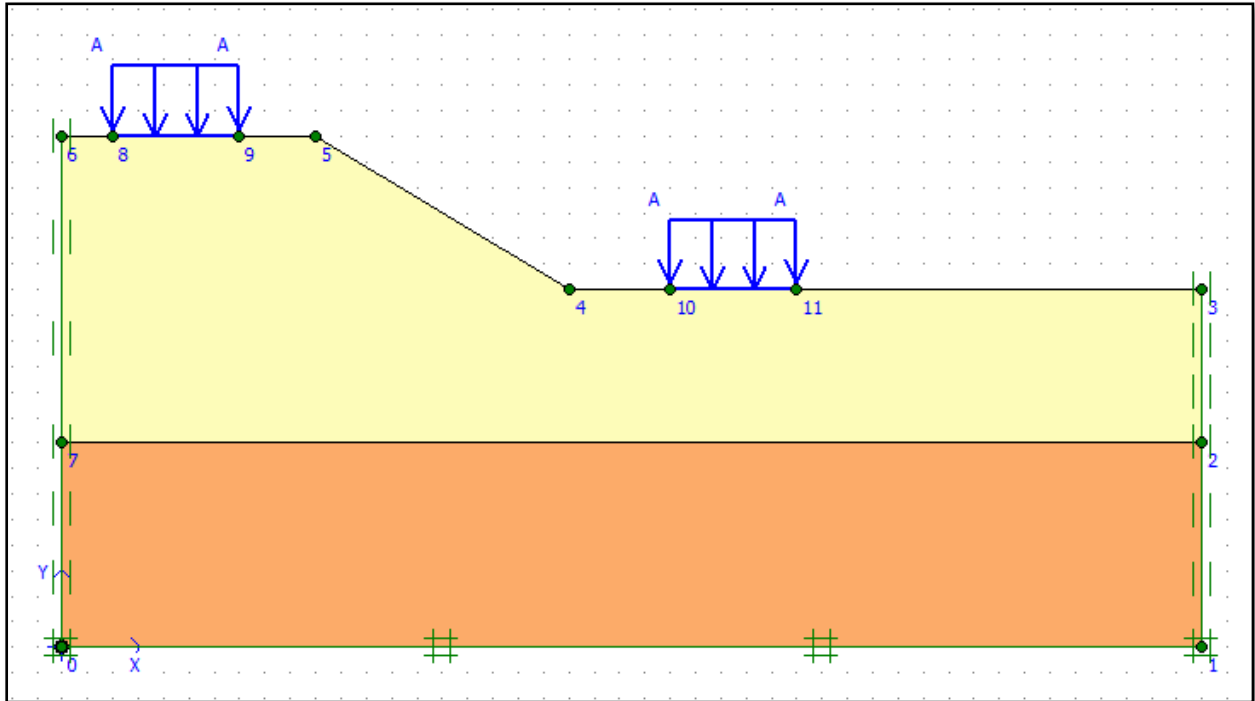


Figure 4.2: Géométrie du modèle.

### 4.4 Génération du Maillage

L'étape consiste à discrétiser la géométrie de la pente en élément fini. Le modèle d'éléments triangulaires de 15 nœuds. La finesse du maillage est réglée sur "moyen" avec 250 éléments, puis vous devez cliquer sur "Générer", [12]

Comme indiqué dans la figure ci-dessous:

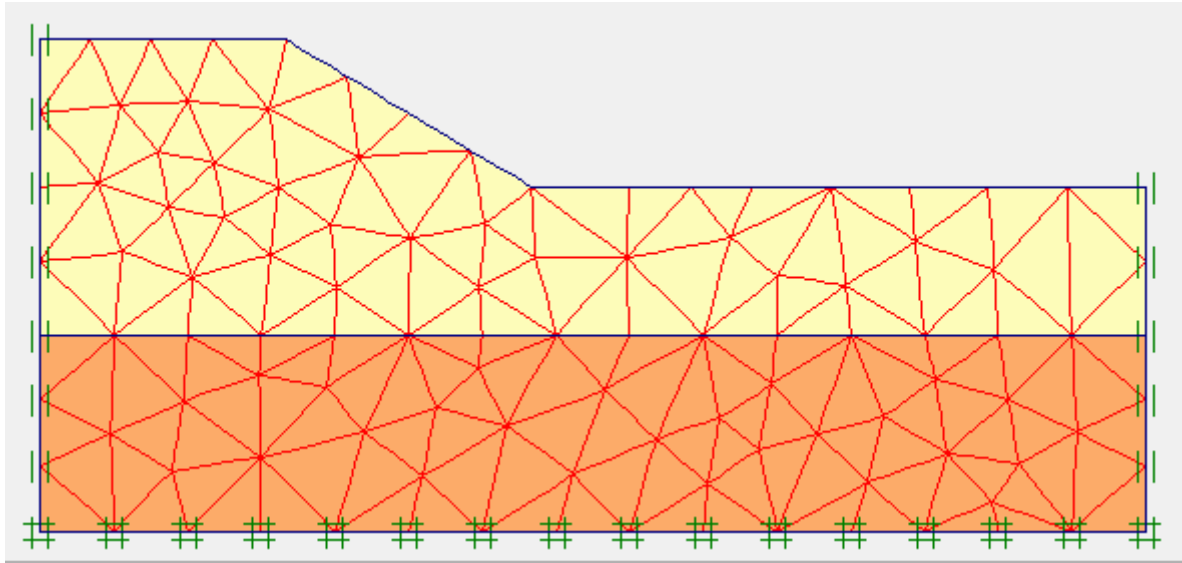


Figure 4. 3: Maillage du modèle.

#### 4.5 Condition initiale ( $u$ , $\sigma'$ )

##### 4.5.1 Calculs des Pressions Interstitielles au repos

Pour générer les pressions interstitielles des talus, nous avons mis en place un processus spécifique. Tout d'abord, la nappe phréatique est définie par trois points caractéristiques, tableau (4-3) Ensuite, en tenant compte de ces paramètres, nous avons utilisé des méthodes de calcul appropriées pour estimer et représenter les pressions interstitielles à travers le talus. Ce processus nous a permis d'obtenir des données précises sur les pressions interstitielles dans différentes zones du talus, ce qui est essentiel pour évaluer sa stabilité et prendre des mesures appropriées si nécessaire:

Tableau 4.3: Coordonnée de la nappe phréatique.

point	1	2	3	4
X (m)	0.00	19.00	34.00	45.00
Y (m)	14.00	12.00	11.00	11.00

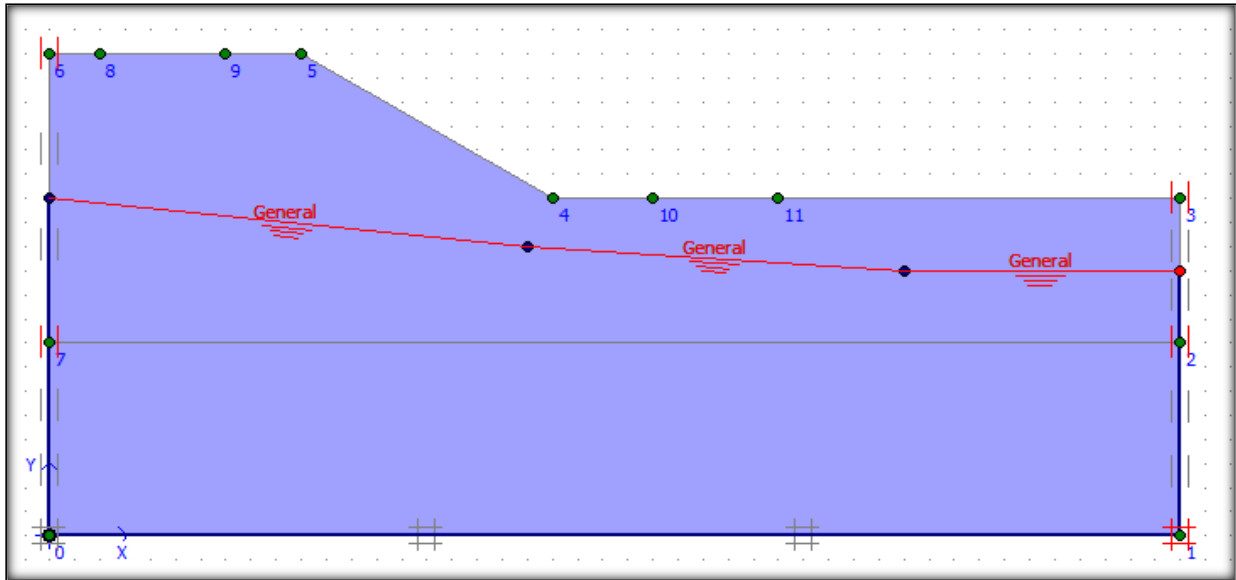


Figure 4.4: Position de La nappe phréatique.

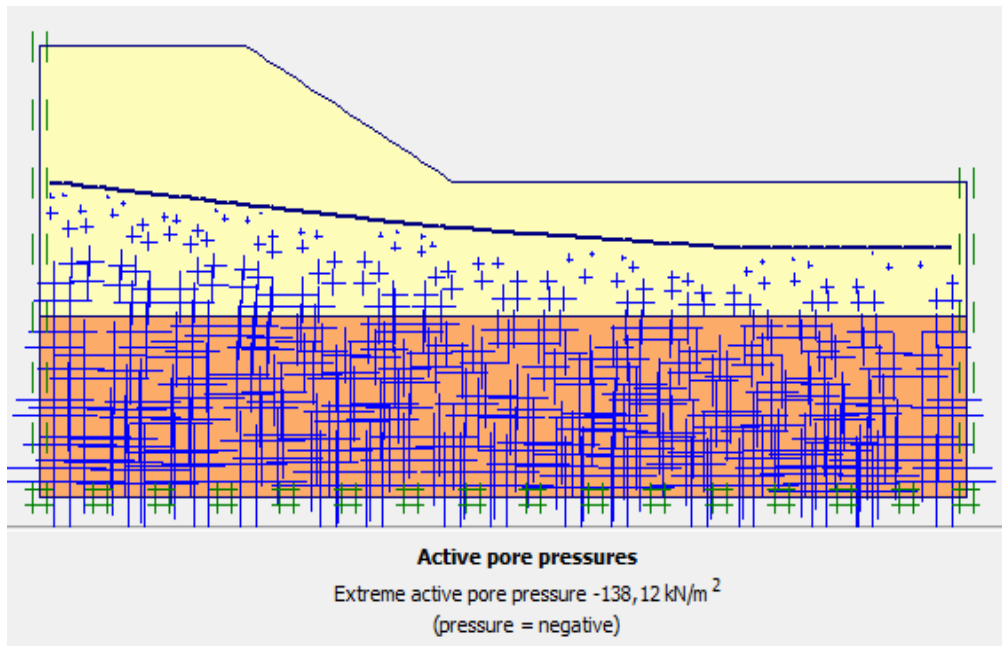
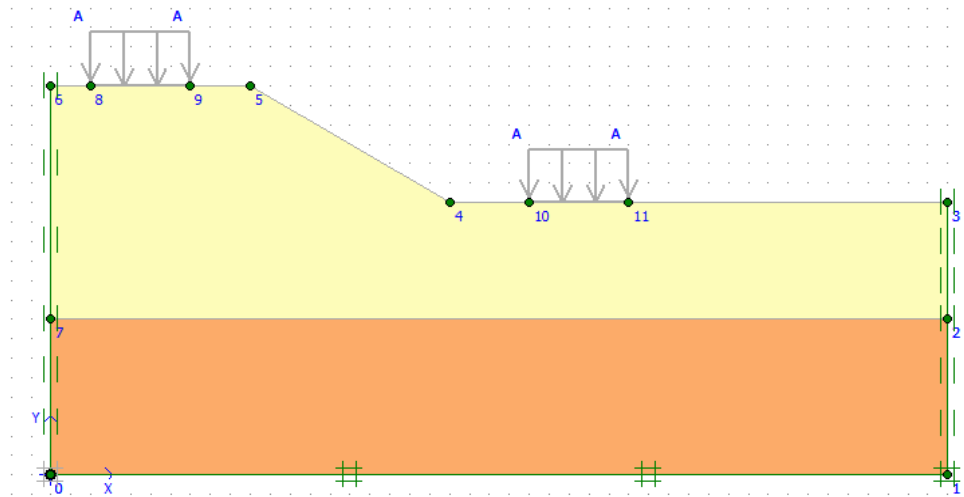


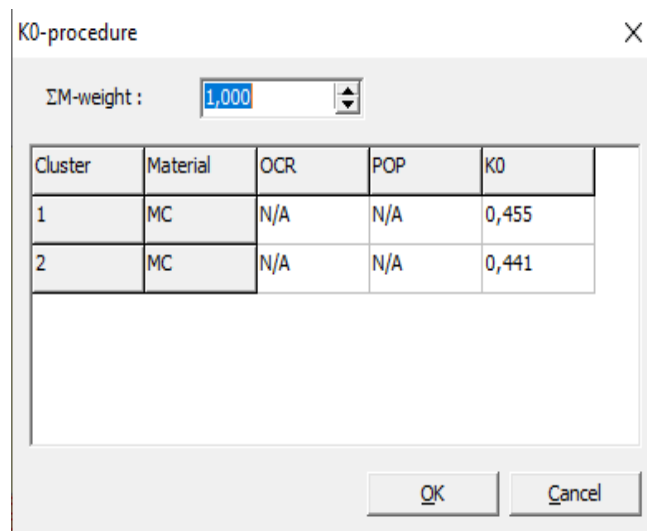
Figure 4.6: Réparation des pressions inertielles initiales.

#### 4.5.2 Génération des contraintes effectives initiales

Pour le calcul des contraintes initiales, il faut désactiver les éléments représentent les charges, la Valeur de  $K_0$  est proposée automatiquement d'après la formule de Jaky,  $K_0 = 1 - \sin \varphi$  et  $\varphi$  est l'angle de frottement.[12]



(a) désactiver les éléments représentent les charges



(b) Définition du multiplicateur pour la procédure K0.

Figure 4.7 : Nous avons généré des pressions effectives.

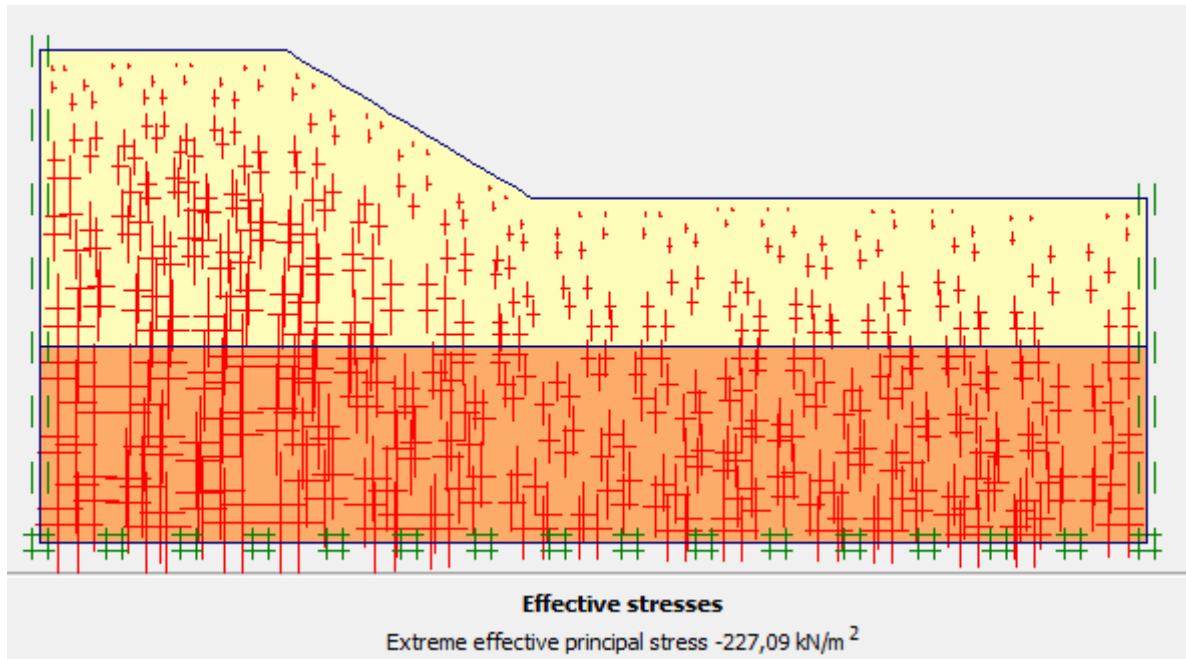


Figure 4.8: Génération des pressions effectives.

#### 4.6 Procédure de calcul

Le calcul du modèle de référence se fait en 3 phases, comme indiquée sur la figure au dessous:

- **Phase 0:** Initiation des contraintes (procédure K0) ;

On détermine les contraintes effectives initiales.

- **Phase 1:** on à activé les charges.

- Type de calcul : **analyse plastique**

- **Phase 2:** calcul du coefficient de sécurité.

- Type de calcul : **Phi/c réduction**

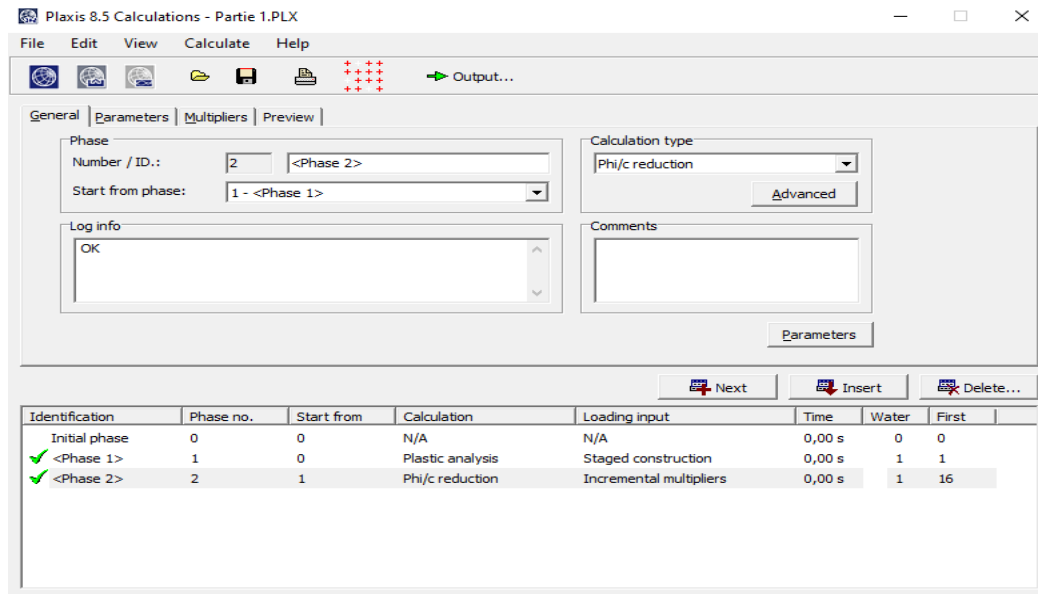


Figure 4. 9: Phases de calcul

#### 4.7 Les résultats de la modélisation

Les principaux résultats d'un calcul d'élément finis sont les déplacements et les contraintes aux points choisis précédemment, On obtient les résultats ci-dessous

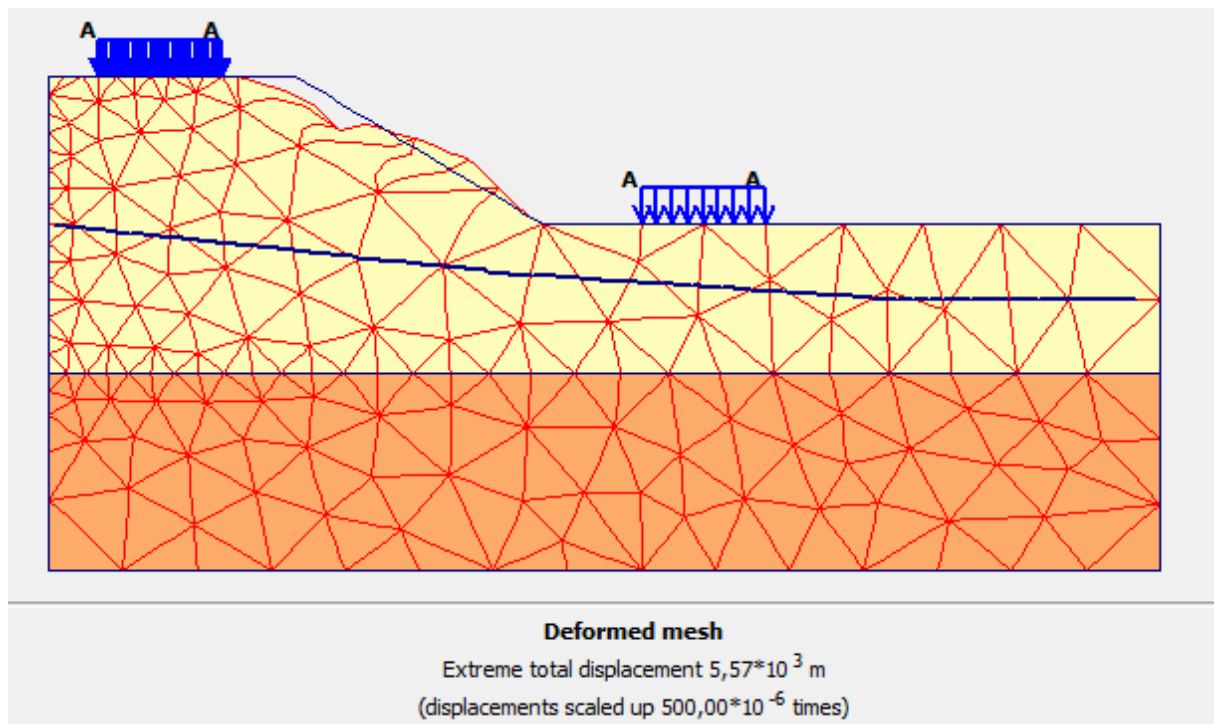


Figure 4.5: Déformation du maillage.

On peut conclure que le déplacement total ( $U_{tot} = 5.5 \text{ (cm)}$ )

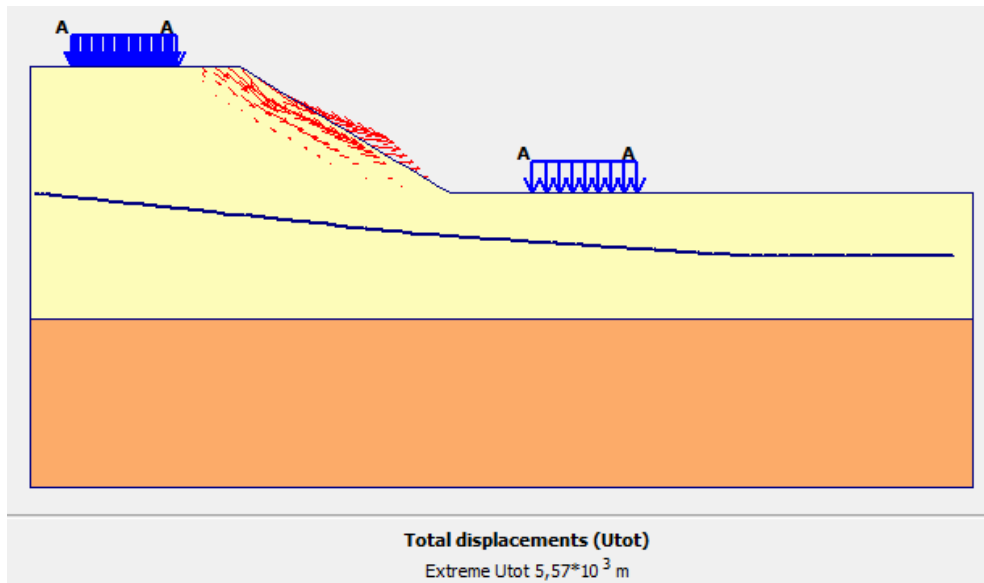
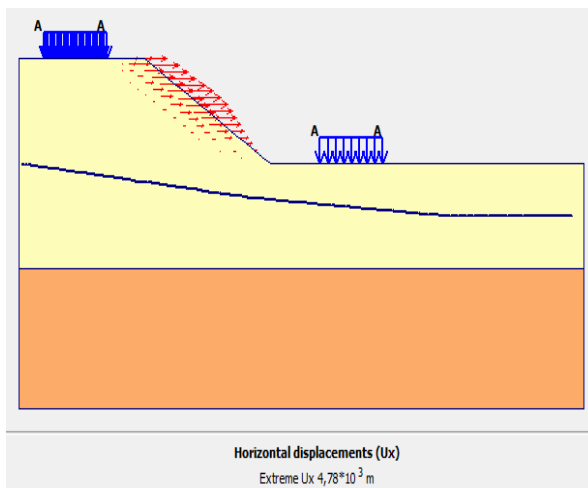
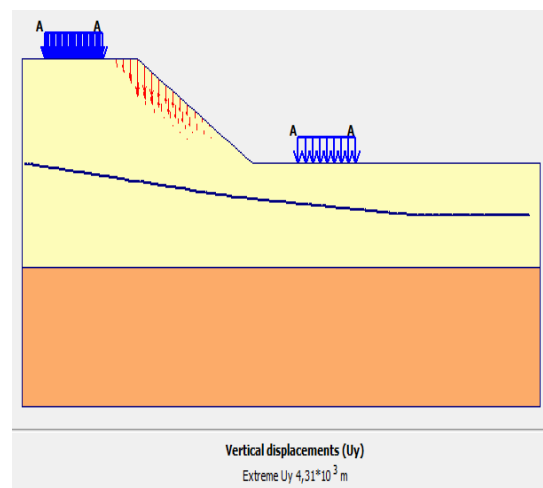


Figure 4.6: Déplacement total.

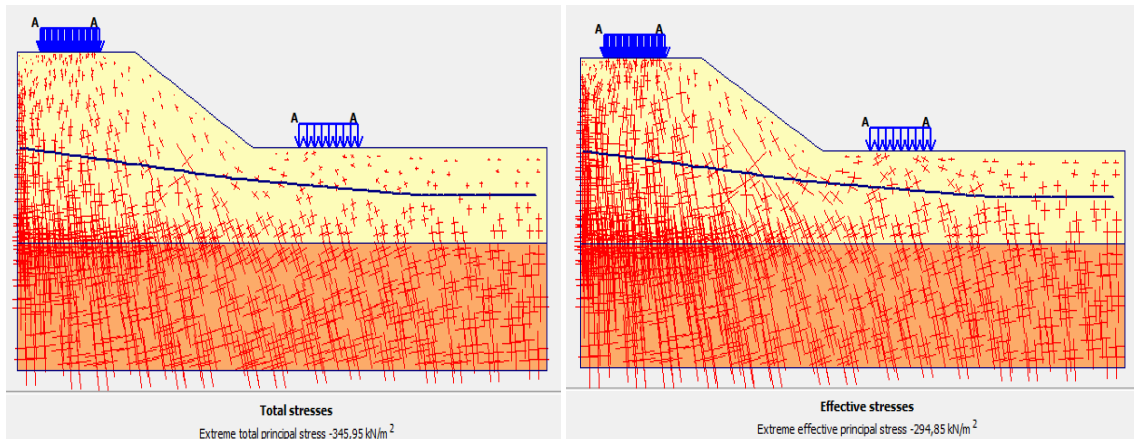
Nous avons observé le déplacement horizontal ( $U_x$ ) et vertical ( $U_y$ ) et contrainte effective et contrainte totale :



(a) Déplacement horizontal ( $U_x$ ).



(b) Déplacement vertical ( $U_y$ )



(c) Contrainte total.

(d) Contrainte effective.

Nous avons observé la ligne de déformation du talus et Les valeurs de coefficient de sécurités avec la charge

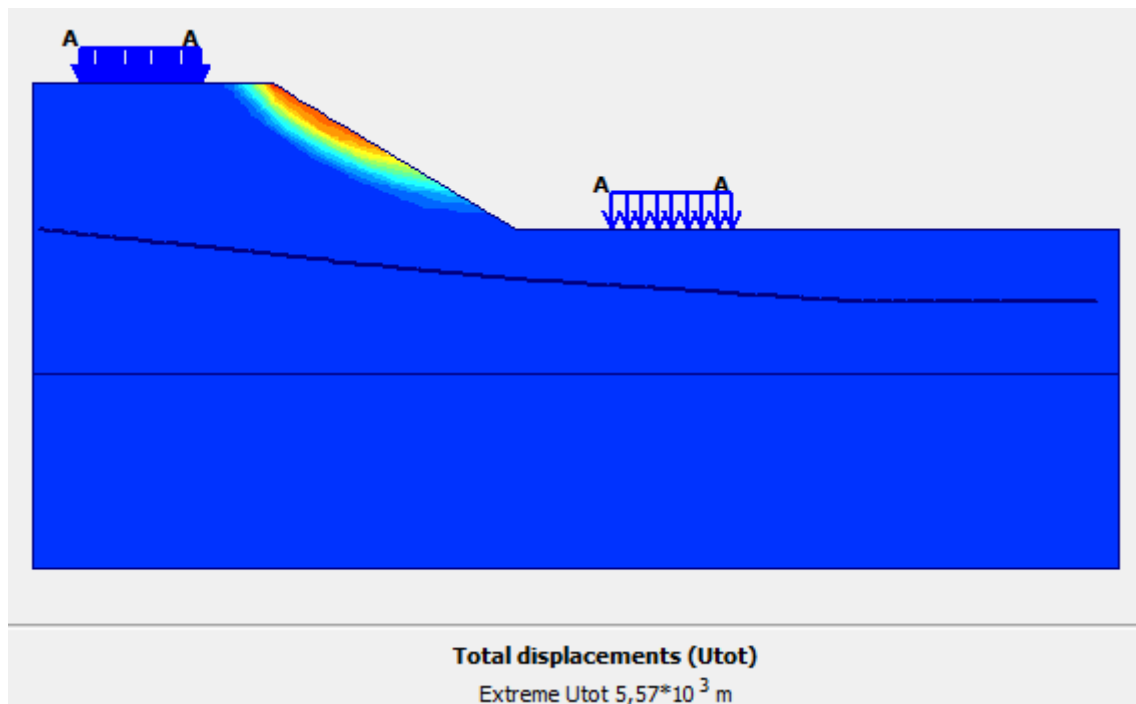
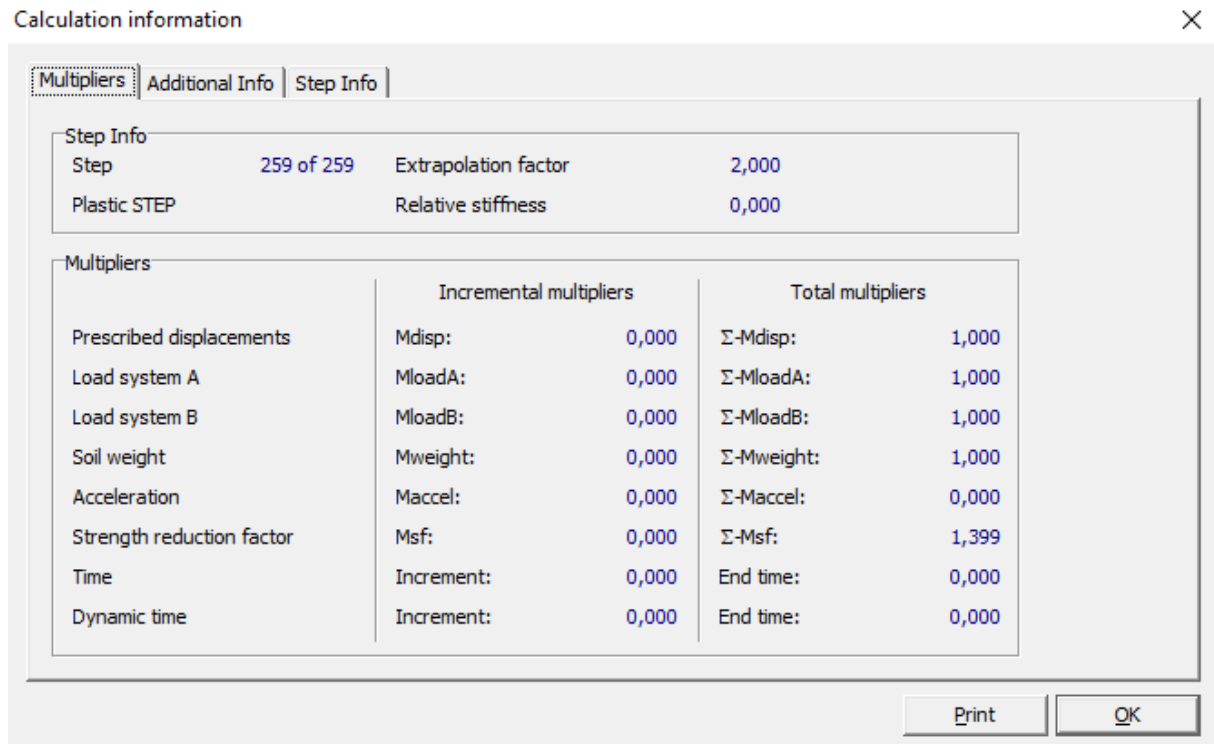


Figure 4.12: Forme et position de la surface de déformation plus les charges (Shadings).



**Figure 4.13:** Valeur de coefficient de sécurité avec les charges.

Tableau récapitulatif ci-dessous des résultats des calculs:

**Tableau 4.4:** Les valeurs de coefficients de sécurité.

<i>Déplacement horizontal (Ux)</i>	<i>Déplacement vertical (Uy)</i>	<i>Contrainte effective</i>	<i>Contrainte totale</i>	<i>La pression interstitielles initiales</i>	<i>Fs avec la charge</i>
<b>4.78 Cm</b>	<b>4.31 Cm</b>	<b>294.85 KN/m 2</b>	<b>345.95 KN/m 2</b>	<b>143.38 KN/m 2</b>	<b>1.399</b>

#### 4.8 Conclusion

Les résultats de notre première tentative de modélisation ont révélé que le coefficient de sécurité était inférieur à 1,5 (  $Fs = 1,399$  ), indiquant ainsi , une instabilité du terrain. Nous avons également constaté une déformation significative avec un déplacement total de **5.5 cm**. Ces observations soulignent la nécessité de mettre en œuvre des mesures de renforcement appropriées pour assurer la stabilité et la sécurité du site étudié.

#### **4.9 La stabilité des talus renforcés par palplanche**

Les palplanches ont été utilisées dans plusieurs cas afin de stabiliser les talus ou améliorer leurs stabilisations, et de nombreuses méthodes ont été développées pour l'analyse des talus avec palplanche.

**Tableau 4.5:** Propriétés des palplanches.

<i>Paramètre</i>	<i>Désignations</i>	<i>Palplanche</i>
<i>Type de comportement</i>	<i>type</i>	<i>Elastique</i>
<i>Rigidité normale (kN/m)</i>	<i>EA</i>	<i>1,2*10+7</i>
<i>Rigidité de flexion (kNm<sup>2</sup>/m)</i>	<i>EI</i>	<i>1,2*10+5</i>
<i>Diamètre (m)</i>	<i>d</i>	<i>0,346</i>
<i>Poids (kN/m/m)</i>	<i>w</i>	<i>8,300</i>
<i>Coefficient de Poisson</i>	<i>v</i>	<i>0,150</i>

On place la palplanche selon notre cercle de déformation:

#### 4.9.1 Cas 01 (Un rideau palplanche)

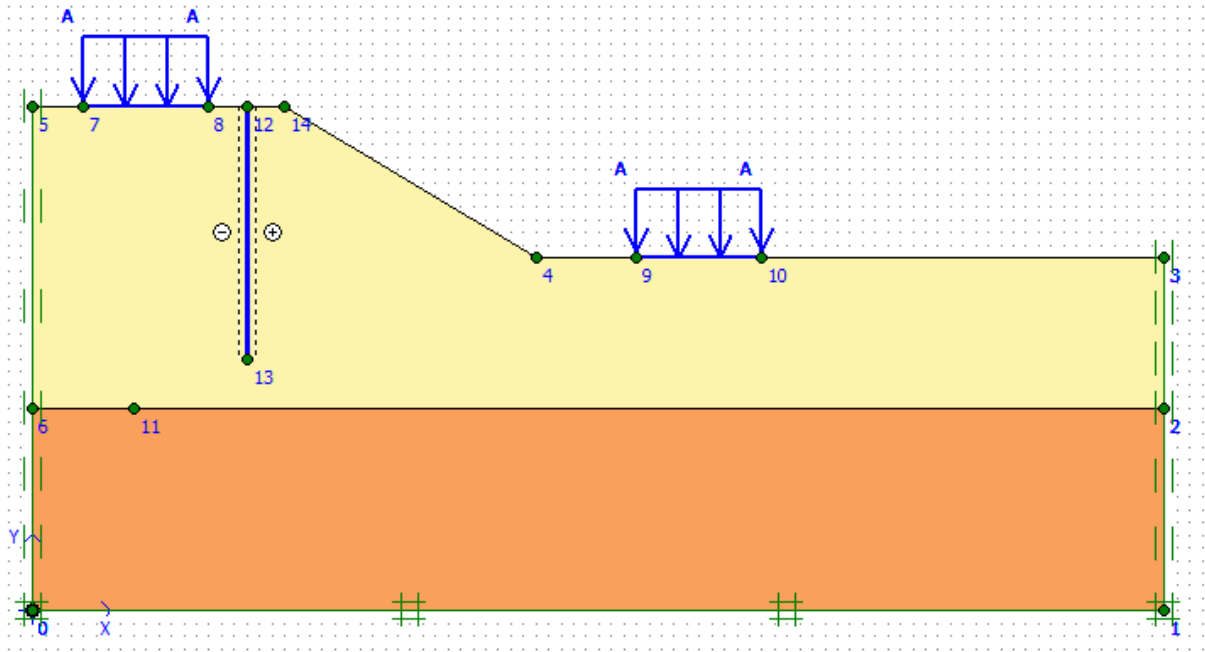
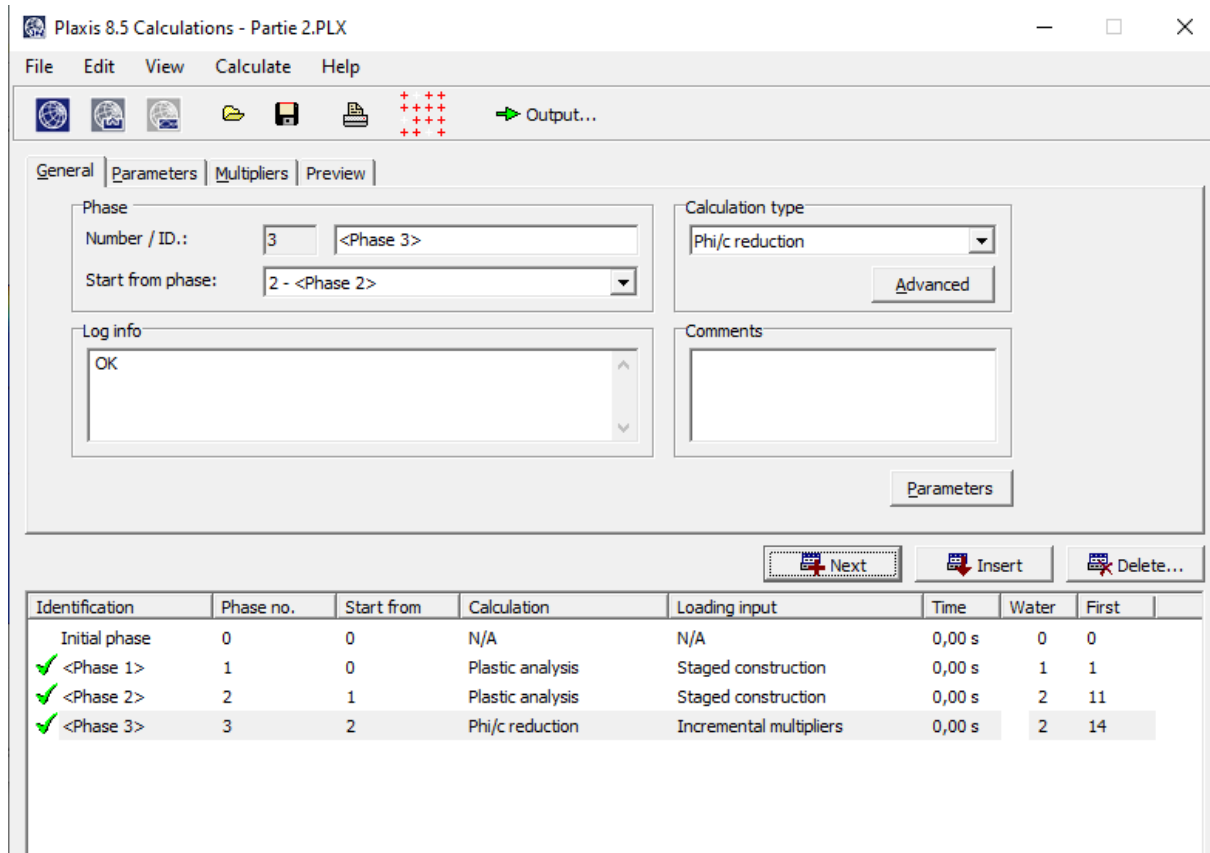


Figure 4.14: Modélisation de confortement de déformation cas 01.



**Figure 4.15:** L'aperçu de la fenêtre pour afficher les résultats et les calculs.

Le calcul du modèle de référence se fait en 3 phases, comme indiquée sur la figure au dessous :

- **Phase 0** : Initiation des contraintes (procédure K0) ; on détermine les contraintes effectives initiales.
- **Phase 1**: on a activé les charges
  - Type de calcul : analyse plastique
- **Phase 2**: on a activé la palplanche (1).
  - Type de calcul : analyse plastique
- **Phase 3**: Calcul du coefficient de sécurité.
  - Type de calcul : Phi/c réduction

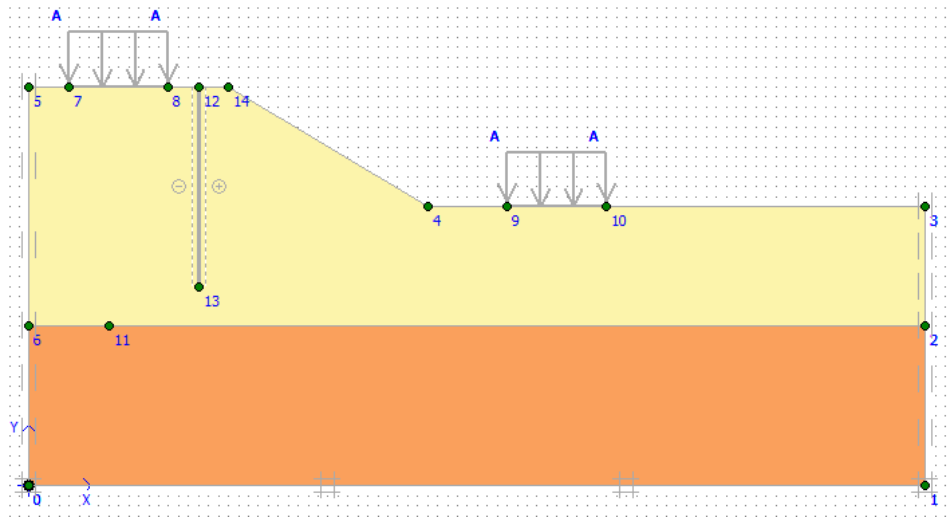


Figure 4.16: Les charges et les éléments de renforcement sont désactivés.

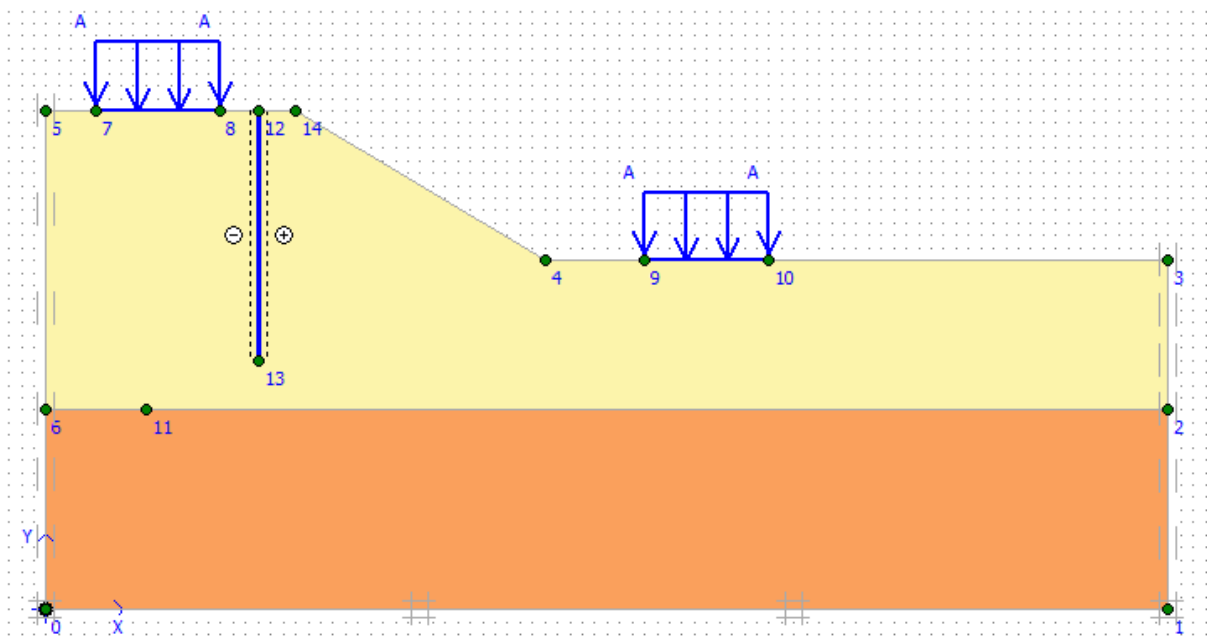


Figure 4.17: Activez les charges et les éléments de renforcement.

Après avoir lancé les calculs, les résultats peuvent être examinés pour chacune des phases avec le programme Output.

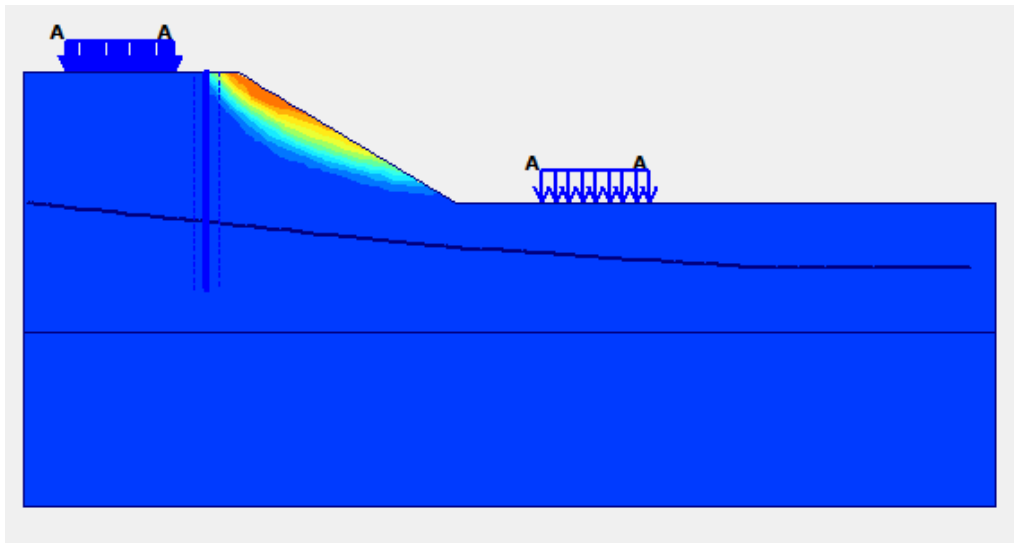


Figure 4.18: Position de la surface de déformation cas 01 (Shadings)

Calculation information

Multipliers | Additional Info | Step Info

Step Info			
Step	113 of 113	Extrapolation factor	0,500
Plastic STEP		Relative stiffness	0,000

	Incremental multipliers		Total multipliers	
Prescribed displacements	Mdisp:	0,000	$\Sigma$ -Mdisp:	1,000
Load system A	MloadA:	0,000	$\Sigma$ -MloadA:	1,000
Load system B	MloadB:	0,000	$\Sigma$ -MloadB:	1,000
Soil weight	Mweight:	0,000	$\Sigma$ -Mweight:	1,000
Acceleration	Maccel:	0,000	$\Sigma$ -Maccel:	0,000
Strength reduction factor	Msf:	0,000	$\Sigma$ -Msf:	1,426
Time	Increment:	0,000	End time:	0,000
Dynamic time	Increment:	0,000	End time:	0,000

Print OK

Figure 4.19: Valeur de coefficient de sécurité cas 01.

• Terrain instable ( $F_s=1,426$ )

• Remarque :

La stabilisation par un rideau palplanche, a donné un coefficient de sécurité égal à  $1,426$  ce qui représente une augmentation remarquable par rapport à un terrain instable.

4.9.2 Cas 02 (Un rideau palplanches avec Excavation)

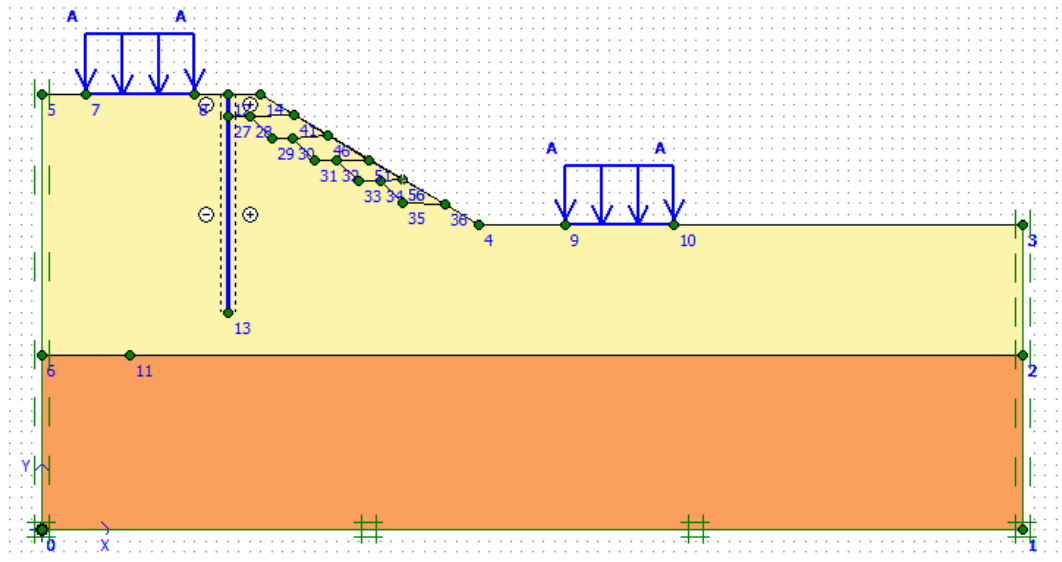


Figure 4.20: Modélisation de confortement de déformation cas 02.

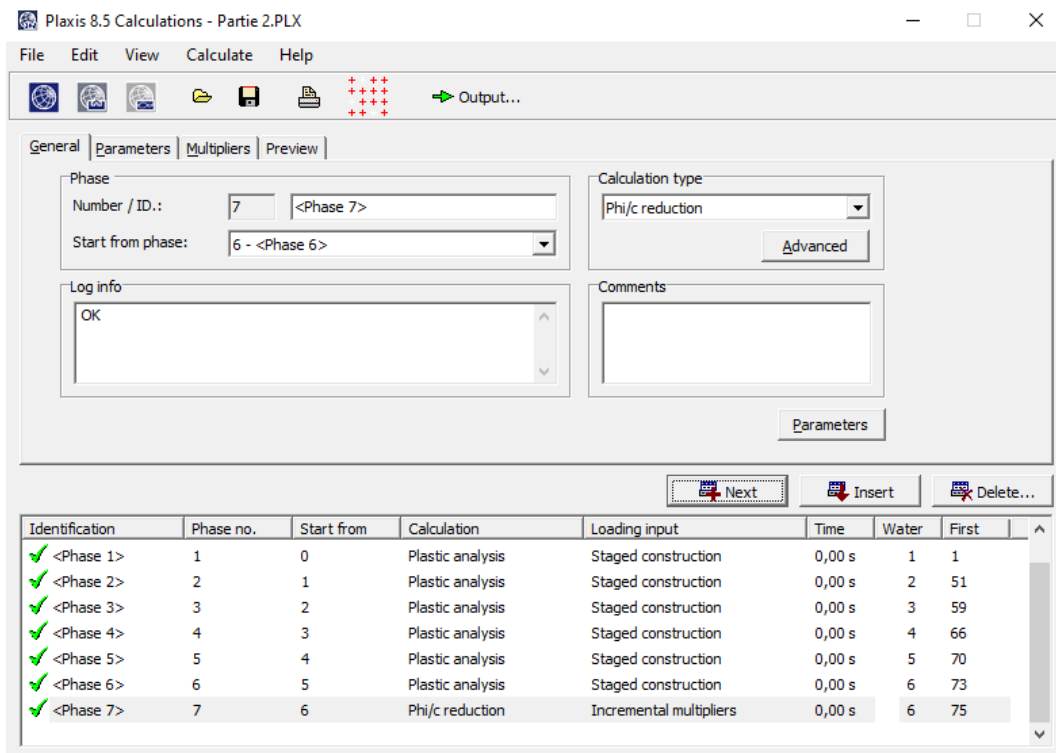
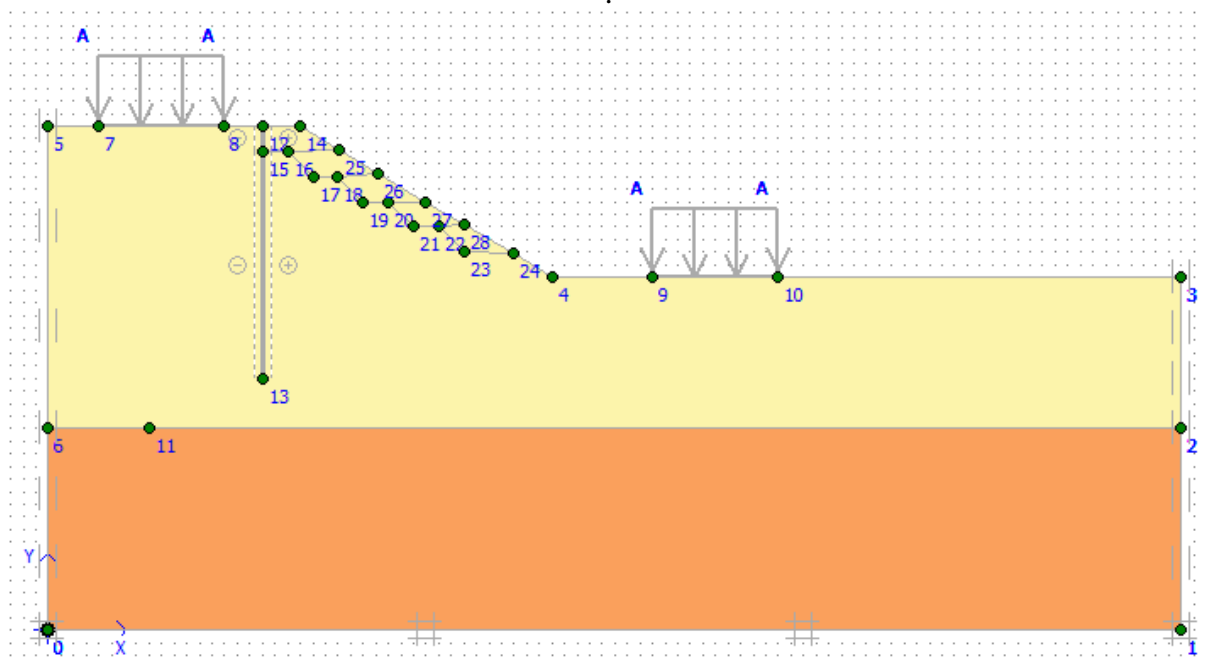


Figure 4.21: L'aperçu de la fenêtre pour afficher les résultats et de calculs.

Le calcul du modèle de référence se fait en 7 phases, comme indiquée sur la figure au dessous :

- **Phase 0:** Initiation des contraintes (procédure K0) ; on détermine les contraintes effectives initiales.
- **Phase 1:** on a activé les charges avec la palplanche - Type de calcul : analyse plastique
- **Phase 2:** on fait excavations sur la zone (1). - Type de calcul : analyse plastique.
- **Phase 3:** on fait excavations sur la zone (2). - Type de calcul : analyse plastique.
- **Phase 4:** on fait excavations sur la zone (3). - Type de calcul : analyse plastique.
- **Phase 5:** on fait excavations sur la zone (4). - Type de calcul : analyse plastique.
- **Phase 6:** on fait excavations sur la zone (5). - Type de calcul : analyse plastique.
- **Phase 7:** Calcul du coefficient de sécurité. - Type de calcul : Phi/c réduction



**Figure 4.22:** Les charges et les éléments de renforcement sont désactivés.

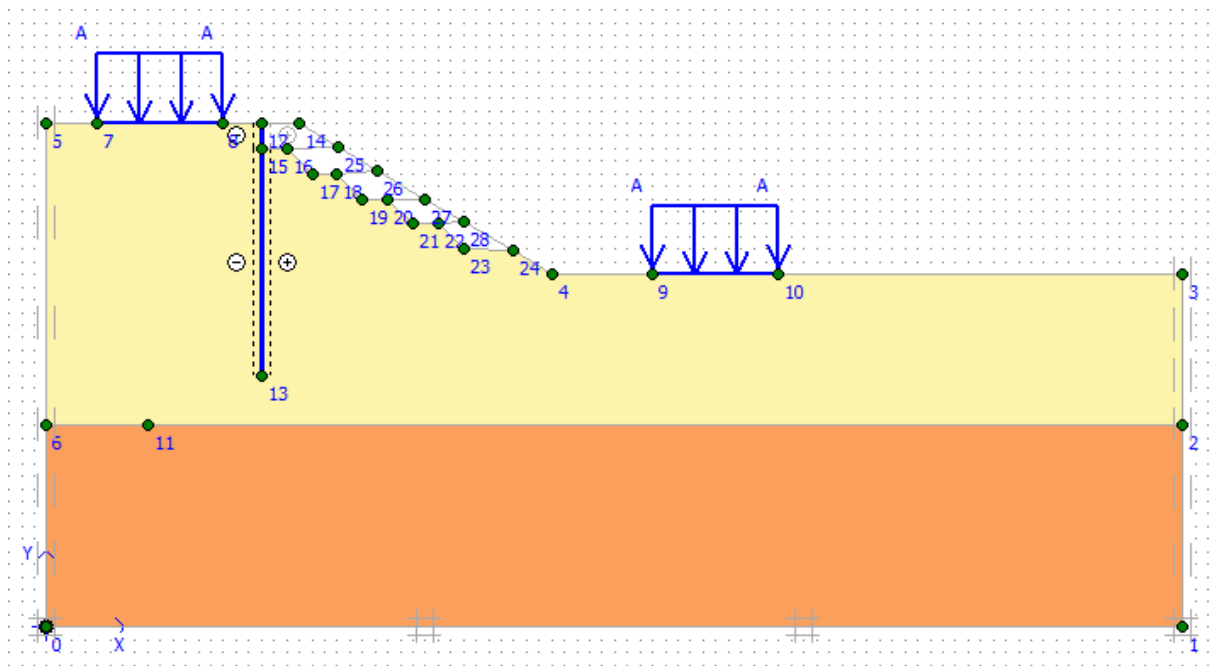


Figure 4.23: Activez les charges et les éléments de renforcement.

Après avoir lancé les calculs, les résultats peuvent être examinés pour chacune des phases avec le programme Output.

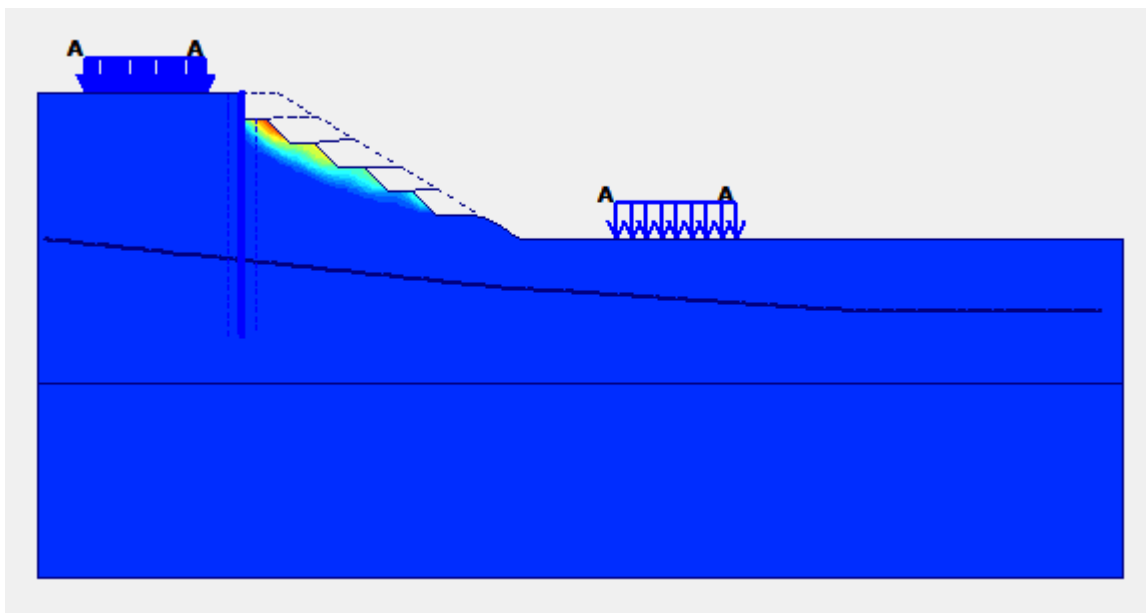


Figure 4.24: position de la surface de déformation cas 02 (Shadings)

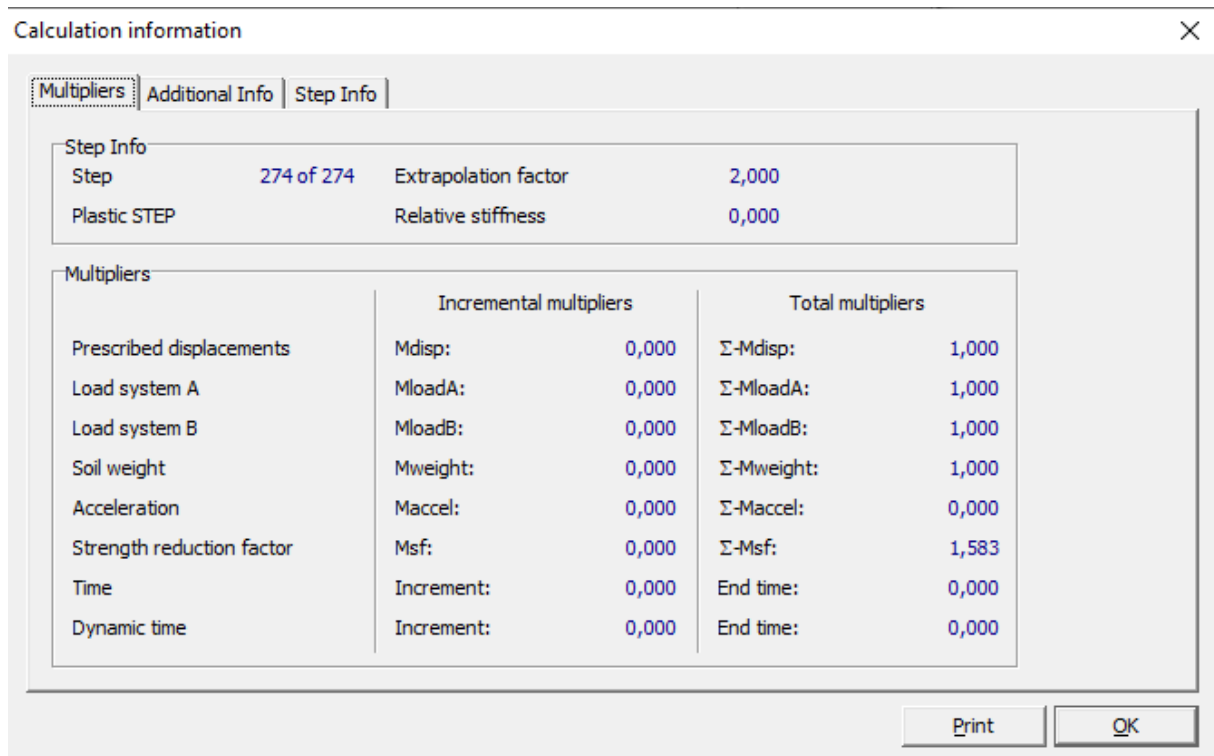


Figure 4.25: Valeur de coefficient de sécurité cas 02.

• Terrain Stable (  $F_s = 1.583 = 1.6$  ) > 1,5 la stabilité du déformation est vérifiée

• Remarque :

On suppose l'utilisation Un rideau palplanche, avec excavations les zone (1) et (2) et (3) et (4) et (5).

Cette configuration a permis d'obtenir un coefficient de sécurité égal à **1.6** (  $F_s$  vérifié / terrain stable )

## ***Conclusion générale***

En conclusion, notre étude approfondie a commencé par une analyse des mouvements et des aspects géotechniques du terrain. Nous avons ensuite exploré diverses méthodes de calcul et de renforcement pour évaluer la stabilité du sol. En utilisant la méthode des éléments finis, nous avons modélisé notre cas avec le logiciel PLAXIS 2D, ce qui nous a permis de déterminer les déplacements et le facteur de sécurité.

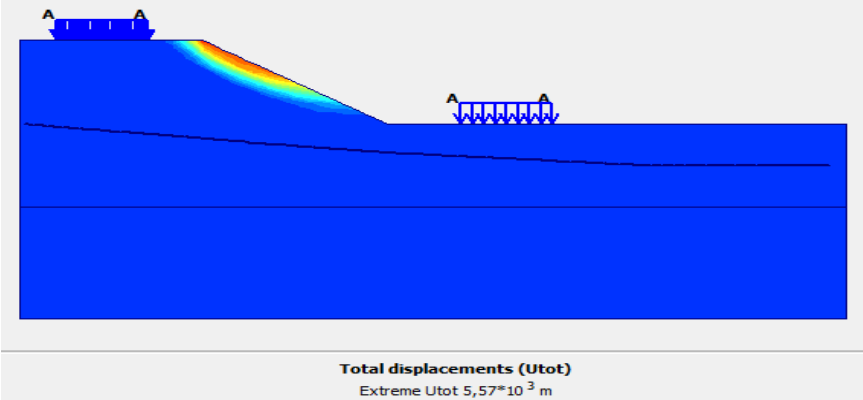
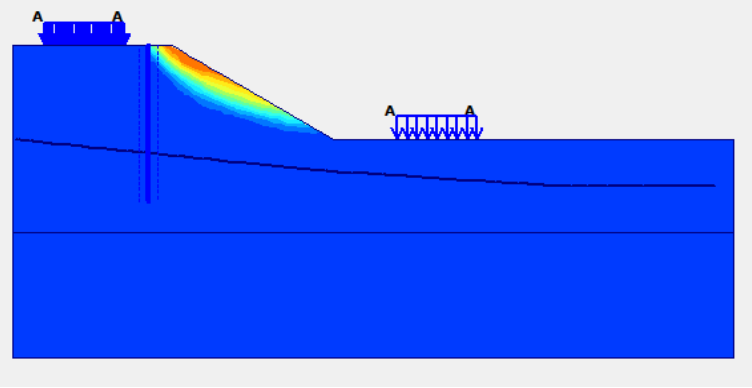
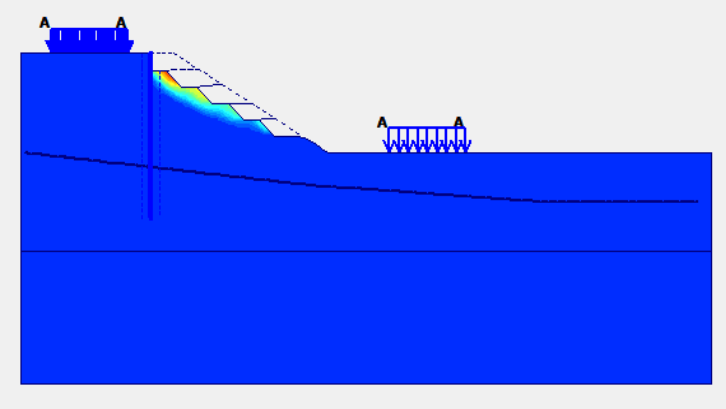
Les résultats de notre première tentative de modélisation ont révélé que le coefficient de sécurité était inférieur à 1,5 (  $Fs = 1,399$  ), indiquant ainsi une instabilité du terrain. Nous avons également constaté une déformation significative avec un déplacement total de **5,5 cm**. Ces observations soulignent la nécessité de mettre en œuvre des mesures de renforcement appropriées pour assurer la stabilité et la sécurité du site étudié.

Pour améliorer la stabilité du terrain, nous avons d'abord appliqué une méthode de stabilisation par un rideau palplanche. Cette solution a permis d'atteindre un coefficient de sécurité de **1,426**, représentant une augmentation remarquable par rapport à la condition initiale d'instabilité du terrain.

Enfin, en supposant l'utilisation de Un rideau palplanches avec excavation, nous avons pu obtenir un coefficient de sécurité de **1,583**, vérifiant ainsi la stabilité du terrain.

Ainsi, cette analyse met en lumière l'importance cruciale des méthodes de calcul avancées et de la modélisation numérique pour évaluer et résoudre les problèmes de stabilité des sols dans des projets de génie civil. Les résultats obtenus démontrent l'efficacité des techniques de renforcement proposées, offrant des solutions viables pour garantir la sécurité et la durabilité des structures sur des terrains complexes.

**Tableau 4.6 :** Tableau récapitulatif les résultats des calculs

les cas	Position de la surface de glissement	$F_s$
La surface de déformation avec les charges	 <p style="text-align: center;"><b>Total displacements (Utot)</b> Extreme Utot <math>5,57 \cdot 10^{-3}</math> m</p>	1.399 < 1.5
Un rideau palplanche		1.426 < 1.5
Un rideau palplanche avec l'excavation		1.583 > 1.5

# ***REFERENCES***

## *Références*

- [1] CHAREF KHODJA KARIM, Modélisation de l'interaction sol-structure pour le cas des palplanches (Cas d'un écran de palplanches à AZEFFOUN), Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi ouzou, 2010/2011
- [2] HADJ Abderrahmane Saida. ETUDE DE L'INTERACTION D'UN RIDEAU DE PALPLANCHES AVEC LE SOL DE FONDATION POUR LES OUVRAGES PORTUAIRES. MEMOIRE DE MAGISTER. UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU
- [3] LARIBI Achraf. CISSE Mohamed. Modélisation numérique d'un écran de soutènement. Mémoire de master, Université Iben Khaldoun TAIRET, 2017/2018
- [4] BEKAOUI IDRIS. Modélisation tridimensionnelle du sol retenu par un rideau de palplanches avec les scénarios de déformation sous l'effet de corrosion, Mémoire de Master, Université Ahmed Draia Adrar, 2019/2020
- [5] Samir Attallaoui. Analyse numérique du comportement des culées porteuses en sol renforcé. Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra, Biskra, Algérie, 2017.
- [6] Fatima Zohra Benamara. Analyse de la stabilité des écrans de soutènement ancrés. Thèse de doctorat, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2019.
- [7] Youssra Bouziane. étude numérique et analytique de la stabilité d'un mur de soutènement en terre armée. Mémoire de master, Université larbi tebessi, 2020.
- [8] R.B.J. Brinkgreve. Manual de référence - PLAXIS. Delft University of Technology & PLOUIS bv, Pays-Bas, 2003.
- [9] Hassiba Baghzimb. Etude numérique de la conception des barrages en terre. Mémoire de Magister 2015.
- [10] Samir Bedr. Modélisation et interaction renforcement sol pour les talus instables. Mémoire de master, Université Abou-Bekr Belkaid, Tlemcen, Tlemcen, Algérie, juin 2008.
- [11] CISSE Mohamed, LARIBI Achref. Modélisation numérique d'un écran de soutènement, mémoire de master, 2018
- [12] ALLAK ABDELHADI, Etude de la stabilité et du renforcement d'un glissement de terrain dans une zone à risque élevé. Mémoire de master, Université Ibn-Khaldoun de Tiaret, 2023/2022
- [13] [Schlosser et François, 2006-2007] Schlosser et François, cours de mécanique des sols II, notes de cours rideaux de palplanches, techniques de l'ingénieur traité construction, Paris, 2006-2007.
- [14] DELATTRE LUC. MARTEN S, Un siècle de méthodes de calcul d'écrans de soutènement. Les approches empiriques et semi-empiriques, Bulletin des laboratoires des ponts n°244-245, 2003.

[15] DELATTRE LUC, Un siècle de méthodes de calcul d'écrans de soutènement. La modélisation des écrans de soutènement par la méthode des éléments finis, Bulletin des laboratoires des ponts n°252-253, 2004, pp 95-117

[16] DELATTRE LUC. Un siècle de méthodes de calcul d'écrans de soutènement. L'approche par le calcul les méthodes classiques et la méthode au coefficient de réaction, Bulletin des laboratoires des ponts n°234, 2001, pp 35-55.

[17] ETIENNE FLAVIGNY Les modèles de comportement utilisés dans PLAXIS- Formation Plaxis 2D

[18] BENHACHICHE YACINE, ANALYSE DE L'INFLUENCE DE LA POSITION DES TIRANTS D'ANCRAGE SUR LE COMPORTEMENT DES PALPLANCHES DANS DES SOLS SABLEUX, Mémoire de Master, Université BADJI MOKHTAR-ANNABA année 2019

[19] Delattre,L.: Comparaison des méthodes classiques de dimensionnement des écrans de soutènement ancrés , Bulletin des laboratoires des ponts et Chaussées, 227, Paris.

[20] Briske, R (1980).: Erddruckumlagerung bei rückverankerten Bohlwänden, Die Bautechnik, 10, pp. 343-356

[21] SANGLERAT G, COSTET J, (1969. 1982) cours pratiques de mécanique des sols, calcul des ouvrages, Ed. 2emetrimestre

[22] Schlosser, F. (1990): Ouvrages de soutènement Poussée et butée , Technique de L'ingénieur. C242.