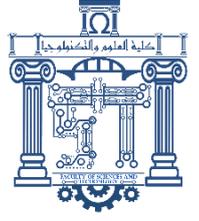




الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
Republique Algerienne Democratique Et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة

Université Ichahid Cheikh Larbi Tébessi – Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil

## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

**En : Génie Civil**

**Spécialité : Géotechnique**

**Par : DJABRI Roufaida  
ABDELLATIF Fatma Zahra**

**Sujet**

**Etude Numérique d'un remblai d'accès du pont  
routier sur RN 10 " Tébessa "**

Présenté et soutenu publiquement, le 25 /06 /2023, devant le jury composé de :

**M. HOUAM Abdelkader**

Pr.

Président

**M. FERNANE Ali**

MAA

Rapporteur

**M. LAOUAR Mouhamed Saleh**

Pr.

Examineur

**Promotion : 2022/2023**

# Dédicace

**Je dédie ce travail:**

*À mes très chers parents **Faycel** et **Ouarda** ; Pour leurs sacrifices pour leurs soutiens et leurs encouragements  
Durant toutes ces années d'études et toute ma vie.*

*À l'âme de ma grand-mère **Cherifa** ,*

*À mon cher mari **Nabil** qui m'a soutenu et encouragé,*

*À mon cher frère **Abd-el-aziz***

*Et mes sœurs **Fadoua** , **Firdaous** et **Misk**,*

*À ma petite **M**.*

**ET À TOUTE LA FAMILLE .**

*Djabri Roufaïda*

# Dédicace

**Je dédie ce travail:**

*À mes parents, qui ont œuvré pour ma réussite, par leur amour, leur soutien, tous les sacrifices consentis et leur précieux conseils pour toute leur assistance et leur présence dans ma vie,*

*À mon cher frère Et mes sœurs et isaki,*

*À Mes chères amies , Aux personnes qui m'ont toujours aidées et encouragées.*

*Abdellatif. Fatma Zahera.*



# Remerciements

*Tout d'abord nous remercions DIEU tout puissant, maître des cieux et de terre, qui nous a donné la force et nous a permis de mener à bien ce modeste travail.*

*Nous tenons à remercier notre encadreur ;*

*Nous exprimons notre gratitude à Monsieur Dr: FERNANE ALI, qui nous a dirigés tout au long du travail, et pour ses conseils avisés.*

*Nous remercions aussi Nabil .H et K pour leurs aides.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail, et qui nous feront l'honneur de présider et d'examiner ce modeste travail.*



*Roufaïda et Fatma Zahera*



## Liste des symboles

$\varphi$ :	Angle de frottement.
$E$ :	Module d'Young.
$c$ :	Cohésion.
$\gamma$ :	Poids volumique.
$\gamma_{unsat}$ :	poids volumique non saturé.
$\gamma_{sat}$ :	poids volumique saturé.
$\gamma_w$ :	Poids volumique de l'eau.
$B$ :	Largeur du remblai.
$H$ :	Hauteur du remblai.
$K_0$ :	Coefficient de poussée des terres au repos.
$K_x$ :	Perméabilité horizontale.
$K_y$ :	Perméabilité verticale.
$\Psi$ :	Angle de dilatance.
$\sigma'$ :	La contrainte effective.
$\sigma$ :	La contrainte totale.
$\tau$ :	Contrainte de cisaillement.
$WL$ :	Limite de liquidité.
$IP$ :	Indice de plasticité .
$U$ :	Pression interstitielle
$U_x$ :	Déplacements horizontaux.
$U_y$ :	Déplacement verticaux.
$G$ :	Module de cisaillement.
$EA$ :	Rigidité normale.
$EI$ :	La rigidité flexionnelle.
$MCM$ :	Modèle de Mohr Coulomb (Mohr Coulomb Model) .
$MEF$ :	Méthode élément finis.

# Liste des Tableaux

## Chapitre I

<b>Tableau 1.1</b>	Ordre de grandeur de la pente d'un remblai en fonction de sa hauteur	P18
--------------------	--	-----

## Chapitre III

<b>Tableau 3.1</b>	Unités disponibles avec leurs facteurs de conversion vers les unités	P49
--------------------	--	-----

## Chapitre IV

<b>Tableau 4.1</b>	Coupe lithologique du terrain	P71
<b>Tableau 4.2</b>	les caractéristiques mécaniques mesurées dans le forage	P72
<b>Tableau 4.3</b>	les caractéristiques physiques et chimiques du sol	P73
<b>Tableau 4.4</b>	Paramètres caractérisant de sol	P75
<b>Tableau 4.5</b>	Paramètres de calcul d'ancrage	P76
<b>Tableau 4.6</b>	Paramètres de calcul du culée et pieux	P77
<b>Tableau 4.7</b>	Définition du multiplicateur pour la procédure K0	P79
<b>Tableau 4.8</b>	les force dans la culée et les pieux dans les 4 cas de chargement	P90
<b>Tableau 4.9</b>	variation des contraintes effective et la déplacement en fonction de la variation des charges	P97

# Liste des Figures

**Figure I** Situation de la wilaya et le site du projet (Image satellitaire par ArcGIS) P03

**Figure II** Image satellitaire par Google Earth de la zone du projet P03

## Chapitre I

**Figure 1.1** Schéma Des Différentes Parties D'un Remblai P06

**Figure 1.2** Remblai contigu (zones poids et zone de poussée) P09

**Figure 1.3** Remblai routier P10

**Figure 1.4** Vue De Remblayage. P15

**Figure 1.5** Les étapes du remblayage P16

**Figure 1.6** Le compactage P17

**Figure 1.7** Rupture par poinçonnement P22

**Figure 1.8** Rupture de type circulaire ou glissement rotationnel P22

**Figure 1.9** Etat des contraintes le long de la courbe de rupture P24

## Chapitre II

**Figure 2.1** Échangeur (coupe architecturale du projet) P28

**Figure 2.2** Types des échangeurs P29

**Figure 2.3** Pont Routier P31

**Figure 2.4** Les viaducs ferroviaires en France P31

**Figure 2.5** Viaduc P32

**Figure 2.6** (a), (b) et (c) Passerelles P32

**Figure 2.7** Les éléments d'un pont P33

**Figure 2.8** Culée de pont P34

**Figure 2.9** Culée remblayée P35

**Figure 2.10** Fondation de l'atelier de construction des ailes de l'Airbus A320 P36

<b>Figure 2.11</b>	Pieux Préfabriqués Battus et Pieux coulés sur place.	P38
--------------------	--	-----

### **Chapitre III**

<b>Figure 3.1</b>	Elément Géométrique	P44
<b>Figure 3.2</b>	Système de coordonnées et définition des composantes de contrainte positives	P48
<b>Figure 3.3</b>	Fenêtre principale du programme d'entrée des données (Input) (mode de création géométrique)	P52
<b>Figure 3.4</b>	Fenêtre de réglages généraux (onglet Project)	P55
<b>Figure 3.5</b>	Fenêtre de saisie des données pour les déplacements imposés (Prescribed displacements)	P58
<b>Figure 3.6</b>	Fenêtre de saisie des données pour les charges réparties (Distributed loads).	P59
<b>Figure 3.7</b>	Fenêtre de saisie des données pour les charges ponctuelles (Point loads)	P60
<b>Figure 3.8</b>	Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb.	P61
<b>Figure 3.9</b>	Fenêtre des propriétés des sols et les interfaces (onglet Paramètres du modèle de Mohr-Coulomb)	P62
<b>Figure 3.10</b>	Définition de $E_0$ et de $E_{50}$	P62
<b>Figure 3.11</b>	Représentations de l'essai œdométrique	P65
<b>Figure 3.12</b>	Surfaces de charge elliptique	P66

### **Chapitre IV**

<b>Figure 4.1</b>	Modèle géométrique	P75
<b>Figure 4.2</b>	Paramètres caractérisant le sol	P76
<b>Figure 4.3</b>	Paramètres de caractérisant de remblai	P76
<b>Figure 4.4</b>	Maillage PLAXIS	P77
<b>Figure 4.5</b>	Information Générale Du Maillage	P78
<b>Figure 4.6</b>	Condition hydrauliques initiales	P79
<b>Figure 4.7</b>	Champ des phases du calcul	P81
<b>Figure 4.8</b>	Méthode de calcul et le modèle plastique	P81

<b>Figure 4.9</b>	Les point plastiques	P82
<b>Figure 4.10</b>	Contrainte effective sans charge	P82
<b>Figure 4.11</b>	Contrainte effective avec charge $F=30\text{KN/m}^2$	P83
<b>Figure 4.12</b>	Contrainte effective avec charge $F=50\text{KN/ m}^2$	P83
<b>Figure 4.13</b>	Contrainte effective avec charge $F=70\text{KN/ m}^2$	P84
<b>Figure 4.14</b>	Courbe de Contrainte effective à la hauteur du remblai dans les 4 cas	P84
<b>Figure 4.15</b>	Courbe de Contrainte effective a longueur du remblai dans les 4 cas	P85
<b>Figure 4.16</b>	Courbe d'effort axiale dans la culée dans le 1ér cas (sans chargement)	P85
<b>Figure 4.17</b>	Courbe d'effort tranchant dans la culée en 1ér cas (sans chargement)	P86
<b>Figure 4.18</b>	Courbe de moment de flexion dans la culée en 1ér cas (sans chargement)	P86
<b>Figure 4.19</b>	Courbe d'effort axiale dans le pieu en 1ér cas (sans chargement)	P86
<b>Figure 4.20</b>	Courbe d'efforts tranchant dans le pieu (Remblai n'est pas chargé)	P87
<b>Figure 4.21</b>	Courbe de moment de flexion dans le pieu (remblai n'est pas chargé)	P87
<b>Figure 4.22</b>	Courbes des efforts axiale et tranchant et moment de flexion dans la culée en 2éme cas ( $F=30\text{KN/m}^2$ )	P87
<b>Figure 4.23</b>	Courbes des efforts axiale et tranchant et moment de flexion dans les pieux en 2éme cas ( $F=30\text{KN/ m}^2$ )	P88
<b>Figure 4.24</b>	Courbes des efforts axiale et tranchant et moment de flexion dans la culée en 3éme cas ( $F=50\text{KN/ m}^2$ )	P88
<b>Figure 4.25</b>	Courbes des efforts axiale et tranchant et moment de flexion dans les pieux en 3éme cas ( $F=50\text{KN/ m}^2$ )	P89
<b>Figure 4.26</b>	Courbes des efforts axiale et tranchant et moment de flexion dans la culée en 4éme cas ( $F=70\text{KN/ m}^2$ )	P89
<b>Figure 4.27</b>	Courbes des efforts axiale et tranchant et moment de flexion dans les pieux en 4éme cas ( $F=70\text{KN/ m}^2$ )	P90
<b>Figure 4.28</b>	Forme de déformation dans le 1ére cas (sans chargement) (déplacements totals $U_{\text{tot}}$ )	P91
<b>Figure 4.29</b>	Courbe de déplacement horizontale $U_x$ suivant la hauteur du remblai	P91
<b>Figure 4.30</b>	Courbe de déplacement vertical a la base du remblai	P92

<b>Figure 4.31</b>	Forme de déformation dans le 2 <sup>ème</sup> cas ( $F=30\text{KN/m}^2$ ) (déplacements totals $U_{\text{tot}}$ )	P92
<b>Figure 4.32</b>	Courbe de déplacement horizontale $U_x$ suivant la hauteur du remblai	P93
<b>Figure 4.33</b>	Courbe de déplacement vertical a la base du remblai $U_y$	P93
<b>Figure 4.34</b>	Forme de déformation le 3 <sup>ème</sup> cas ( $F=50\text{KN/m}^2$ ) (déplacements totals $U_{\text{tot}}$ )	P93
<b>Figure 4.35</b>	Variation du déplacement horizontale $U_x$ suivant la hauteur la hauteur du remblai	P94
<b>Figure 4.36</b>	Variation du déplacement vertical à la base du remblai $U_y$	P94
<b>Figure 4.37</b>	Forme de déformation le 4 <sup>ème</sup> cas ( $F=70\text{KN/m}^2$ ) (déplacement total $U_{\text{tot}}$ )	P94
<b>Figure 4.38</b>	Variation du déplacement horizontale $U_x$ suivant la hauteur du remblai	P95
<b>Figure 4.39</b>	Variation du déplacement vertical à la base du remblai $U_y$	P95
<b>Figure 4.40</b>	La variation du déplacement horizontale en fonction de la hauteur du remblai et pour différents cas de chargement	P96
<b>Figure 4.41</b>	La variation de déplacement verticale à la base du remblai	P96
<b>Figure 4.42</b>	La variation des déplacements maximale en fonction de l'intensité de chargement	P97

## RÉSUMÉ

La stabilité du remblai d'accès d'un pont routier est essentielle pour assurer la sécurité des usagers de la route et la durabilité de la structure du pont ;

La construction des remblais implique des enjeux complexes liés à la stabilité, au tassement et aux déformations latérales des ouvrages en terre.

Une modélisation numérique est faite sur l'évitement de la wilaya de Tébessa, où un ouvrage d'art) un échangeur passage supérieur) sur la RN 10 au pk 17+000 a la côté droit du pont vers Constantine, qui construit avec un remblai d'accès.

Grâce aux résultats de l'étude géotechnique que nous avons obtenus d'après Laboratoire (L.T.P.E), Nous avons fait une analyse numérique de remblai d'accès d'un pont routier à l'aide du logiciel PLAXIS V8.2 l'étude vise à déterminer les contraintes et les déformations dans le remblai

Les résultats obtenus sont comparés avec ceux de l'analyse analytique.

**Mot clés :** Remblai d'accès, Pont, Pieux, déformation, Stabilité, Plaxis 2D.

## ABSTRACT

The stability of the access embankment of a road bridge is essential to ensure the safety of road users and the durability of the bridge structure; The construction of embankments involves complex issues related to the stability, settlement and lateral deformation of earthworks.

A digital model is made on the avoidance of the wilaya of Tébessa, where a work of art) an overpass interchange (on the RN 10 at pk 17+000 on the right side of the bridge to Constantine, which is built with an embankment of access.

Thanks to the results of the geotechnical study that we obtained from Laboratory (L.T.P.E), We made a digital analysis of the access embankment of a road bridge using the PLAXIS V8.2 software the study aims to determine the restraints and deformations in the embankment

The results obtained are compared with those of the analytical analysis.

**Keywords:** Access embankment, Bridge, Piles, deformation, Stability, Plaxis 2D.

## ملخص

يعد استقرار الردميات لجسر الطريق ضروريًا لضمان سلامة مستخدمي الطريق و متانة هيكل الجسر  
يطرح بناء الردميات على قضايا معقدة تتعلق بالاستقرار والضغط (نزول التربة) والتشوهات.  
تم انشاء نموذج عددي على الطريق الجانبي رقم 10 لولاية تبسة الذي به منشئ فني يتمثل في جسر  
طريق المكون من ردم على الجانب الايمن من الجسر (الى قسنطينة).  
بفضل نتائج الدراسة الجيوتقنية التي حصلنا عليها من المخبر (L.T.P.E) ، أجرينا تحليلًا عدديًا لردم  
جسر الطريق باستخدام برنامج البلاكسيس PLAXIS V8.2 حيث تهدف الدراسة إلى تحديد قيمة  
الاجهادات والتشوهات في الردم .  
النتائج المتحصل عليها يتم مقارنتها و تحليلها .

**الكلمات المفتاحية:** ردم, جسر, خوازيق , تشوهات , استقرار, بلاكسيس ثنائي الابعاد .

## TABLE DES MATIERES

	Page
Liste des symboles	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Résumé	
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	2
<b>Chapitre I : Généralités Sur Les Remblais</b>	
1.Introduction	6
2. Définition d'un remblai D'accès	6
3. Le corps de remblai	6
3.1. Les dispositifs d'assainissement et de drainage	8
4. La classification du remblai	8
5. Les Types de remblai	8
5.1. Remblais contigus aux ouvrages	8
5.2. Remblai routier	10
5.3. Les remblais courants	10
5.4. Les remblais dépôts	10
5.5. Les merlons phoniques	10
5.6. Les merlons	11
5.7. Les aménagements paysagers	11
5.8. Les digues	11
5.9.les remblais ferroviaires	11
5.10. Les remblais renforcés	11
5.11. Les remblais spéciaux et allégés	11
5.12. Les remblais de tranchée	12
5.13. Les remblais supports de fondations	12
6. Les types des matériaux de remblai et leur comportement	12
7. Caractéristiques des matériaux granulaires nécessaires au remblai	13
8. Matériaux à exclure	14
9. Remblayage	14
9.1. Les Étapes du Remblayage	15

9.2. Dimensionnement du remblai	17
9.2.1. Pente du remblai	17
9.2.2. L'épaisseur de la couche de remblai	18
9.2.3. Hauteur totale du remblai à construire	19
10. Contrôles de remblais contigus en matériaux granulaires	19
11. Les conditions d'utilisation en remblai	20
12. Les Remblais de grande hauteur	20
13. Contraintes et déformations dans un grand remblai	21
14. Les Problèmes Posés Par La Construction Des Remblais	22
14.1. Problème de stabilité	22
14.1.1. La rupture par poinçonnement	22
14.1.2. La rupture de type circulaire	22
14.2. Les Problèmes De Tassements	23
15. Méthodes D'analyse De La Stabilité Des Remblais	23
16. Études de la stabilité des pentes	24
16.1. Méthodes Analytiques	24
16.2. Les méthodes incluent	24
16.2.1. Hypothèses classiques de La Méthode De L'équilibre Limite	25
17. Conclusion	26
<b>Chapitre II : L'échangeur et Culée du Pont</b>	
1.Introduction	28
2.L'échangeur	28
2.1. Définition d'échangeur	28
2.2. Les différents types d'échangeurs	28
2.2.1. Echangeurs majeurs : raccordement autoroute- autoroute	28
2.2.2. Echangeurs mineurs : raccordement autoroute - route	29
2.3. Constituants des échangeurs	29
2.4. Rôle d'un échangeur	30
2.5. Avantage de l'échangeur	30
2.6. Inconvénients de l'échangeur	30
3. les ponts	30
3.1. Définitions des ponts	30

3.2. Quelques types du pont	31
3.3. Eléments constitutifs d'un pont	33
4. Les culées de pont	33
4.1. Les différents types de culées sont	34
4.2. Eléments constitutifs d'une culée	35
4.3. Fonction des culées	35
5. Les pieux	36
5.1. Différentes catégories des pieux	36
5.1.1. Les pieux battus	36
5.1.2. Les pieux forés	37
5.2. Classifications des Fondations sur Pieux	38
5.2.1. Selon fonction ou utilisation	38
5.2.1.1 Pieux muraux	38
5.2.1.2 Pieux porteurs	38
5.2.2. Selon matériel	39
5.3. Critères de Sélection du Type de Fondation sur Pieux Approprié	39
6. Conclusion	40
<b>Chapitre III : La Méthode des Éléments Finis et le Code Plaxis</b>	
1. Introduction	42
2. Description de la méthode des éléments finis	42
2.1. Signalisation d'un élément fini	43
2.2. Techniques de résolution	43
2.3. Eléments géométriques	43
2.4. Calculs par la MEF	44
3. Les principaux logiciels utilisés de MEF	45
4. Présentation De Plaxis	45
4.1. Le code éléments finis PLAXIS	45
4.2. Options par défaut et solutions approchées	46
4.3. Unités et conventions de signe	48
4.3.1. Conventions de signe	48
4.3.2. Unités	49
4.4. Procédure D'entrée Des Données	51

4.5. Aide	51
4.6. L'entrée Des Données De Prétraitement	51
4.7. Les modèles des matériaux	60
4.7.1. Modèle élastique linéaire	60
4.7.2. Modèle de Mohr-Coulomb	61
4.8. Conditions Initiales	67
5. Conclusion	67
<b>Chapitre IV : L'analyse numérique d'un remblai d'accès à un pont routier</b>	
1.Introduction	69
2.Caractéristiques des matériaux utilisés	69
2.1.Sondages	69
2.2.Sondage pressiométrique	69
2.3.Essais d'identification	69
2.4.Essais mécaniques	70
2.5. Interprétation des résultats	70
2.5.1. Sondages carottée	71
2.5.2 Sondage Pressiométriques	72
2.5.3. Résultats Essais au laboratoire	73
2.6. Recommandations	74
3. L'Analyse numérique	74
3.1. Définitions des Données	74
3.2. Maillages utilisés	75
3.3. Condition aux limites	78
3.4. Conditions hydrauliques	78
3.5. Contraintes initiales	79
4. Le calcul numérique	80
5. Résultats obtenus pour le modèle	81
6. Conclusion	98
<b>Conclusion générale</b>	100
<b>Références Bibliographiques</b>	102
<b>Annexe</b>	



# **INTRODUCTION GENERALE**



Les ponts routiers d'échangeur jouent un rôle crucial dans l'infrastructure des réseaux de transport, permettant une circulation fluide des véhicules entre différentes voies et niveaux de routes. La conception et la construction de ces ponts nécessitent une attention particulière pour assurer leur stabilité, leur durabilité et leur fonctionnalité. Parmi les éléments clés d'un pont routier, le remblai d'accès joue un rôle crucial en fournissant une transition en douceur entre la chaussée existante et le pont lui-même.

Le remblai d'accès d'un pont routier est un élément clé de la structure globale, qui doit être conçu pour assurer la sécurité des usagers de la route et la durabilité de la structure du pont. L'étude géotechnique du remblai d'accès permet d'évaluer sa performance géotechnique dans des conditions de service, en termes de stabilité, de tassement et de glissement. Cette étude comprend des investigations géotechniques, des essais de sol et de terrain, ainsi qu'une modélisation numérique utilisant la méthode des éléments finis.

L'analyse numérique de remblai d'accès d'un pont routier est une méthode pour évaluer la stabilité et la résistance du remblai d'accès en utilisant des outils de modélisation numérique (plaxis 2D v8.2). Cette méthode est utilisée pour simuler le comportement des sols sous différentes conditions de chargement.

### **Description du projet**

Evolution de la demande du transport générale par le développement et l'extension du tissu urbain dans la wilaya de Tébessa pour la construction d'un échangeur (passage supérieur sur la RN 10 au pk 17+000) au PK 5+600 au niveau du projet de réalisation de l'évitement de Tébessa sur 6 KM en 2X2 voies entre la RN82 et la RN10.

Le réseau routier de la wilaya comprend 565 km de routes nationales, 418 Km de chemins de wilaya et 1625 km de chemins communaux.

### **Situation**

La ville de Tébessa est située au nord-est du pays à :

L'Altitude moyenne : 757 m

Altitude minimum : -21 m

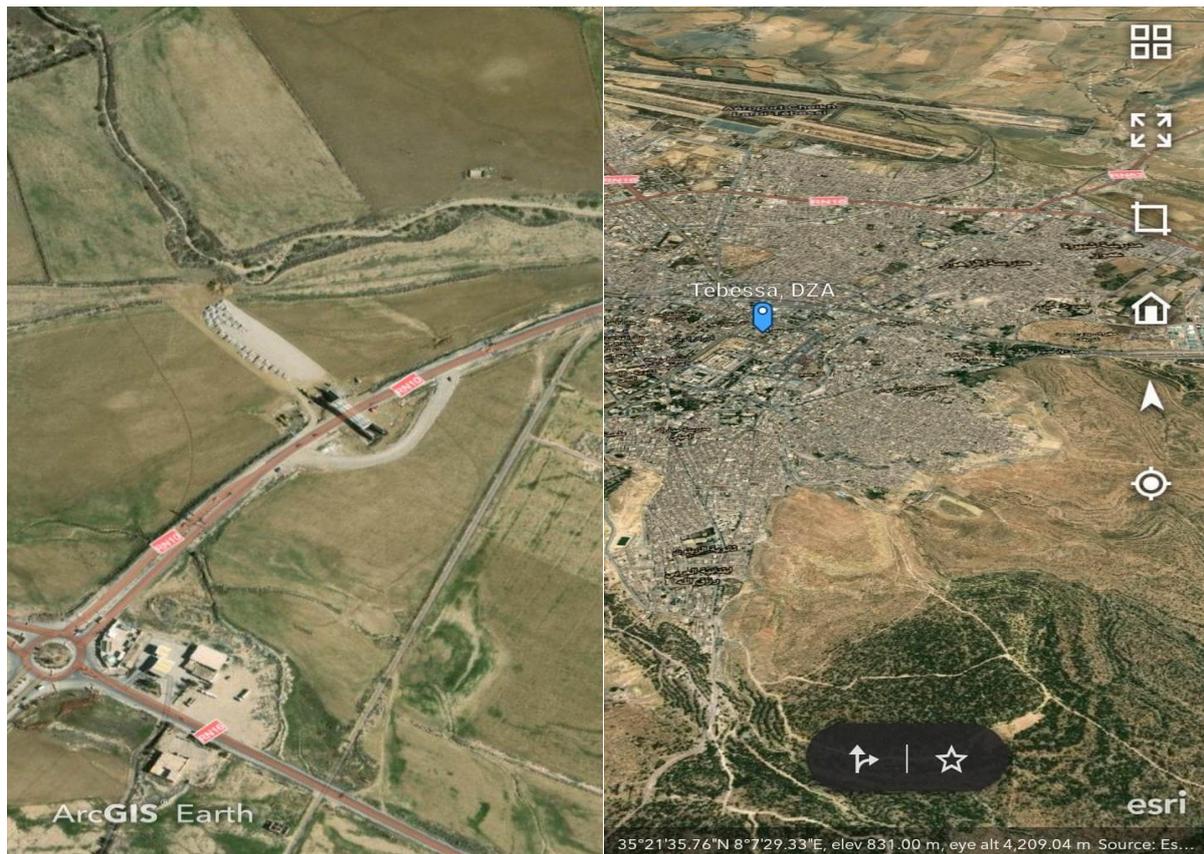
Altitude maximum: 2 130 m [28]

Les coordonnées UTM (universel transverse MERCATEOR) de Tébessa :

Zone UTM : 32S

X : 420473.0046254

Y : 3918217.6346655 [29]



**Figure I :** Situation de la wilaya et le site du projet (Image satellitaire par ArcGIS)



**Figure II:** Image satellitaire par Google Earth de la zone du projet

**Problématique**

La construction des remblais pose de nombreux problèmes tels que la stabilité, le tassement, et les déformations latérales des ouvrages en terre ce qui rend difficile d'assurer leur stabilité.

**L'objectif**

Ce mémoire a pour objectif de réaliser une **analyse numérique de remblai d'accès d'un pont routier** spécifique, en utilisant des outils de modélisation numérique Plaxis V8.2. Plus précisément, l'étude vise à déterminer la capacité de charge du remblai d'accès, à évaluer la stabilité du remblai d'accès face aux forces externes et à identifier les paramètres clés qui influent sur la stabilité et la résistance du remblai d'accès.

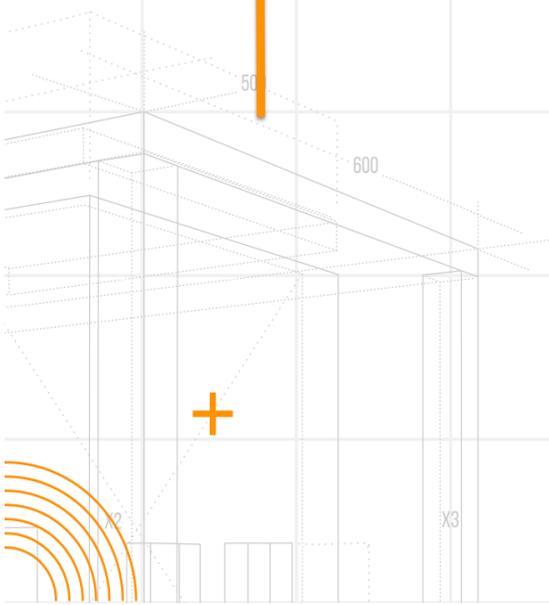
Le plan de travail de recherche est présenté en quatre chapitres :

- **Le premier chapitre** s'intéresse à une recherche bibliographique sur les remblais d'accès.
- **Le deuxième chapitre** se concentre sur une recherche bibliographique sur les différents modèles des échangeurs et culées de ponts et les pieux.
- **Le troisième chapitre** est consacré à une synthèse sur la méthode des éléments finis utilisée par le code PLAXIS 2D.
- **Le quatrième chapitre** présente les caractéristiques géotechniques du sol du site et l'analyse numérique du remblai d'accès un pont en utilisant le logiciel Plaxis.



# CHAPITER I

## GÉNÉRALITÉ SUR LES REMBLAIS



## 1.Introduction

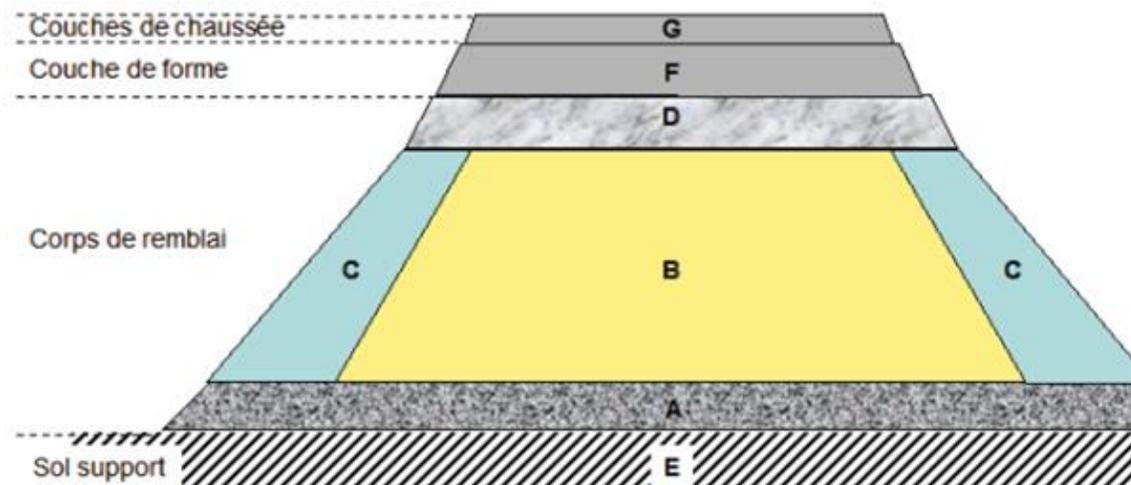
Le remblai d'accès d'un pont routier est un élément clé de la structure globale, qui doit être conçu pour assurer la sécurité des usagers de la route et la durabilité de la structure du pont.

## 2. Définition d'un remblai d'accès

Les remblais contigus, appelés aussi remblais techniques ou blocs techniques sont une partie intégrante des ouvrages. Ils contribuent à la stabilité de l'ouvrage et assurent la transition entre les structures rigides, souvent en béton, et le déblai ou le remblai courant. Leurs rôles sont souvent sous-estimés, voire méconnus, alors qu'ils sont parfois le cœur, donc la clé de la réussite de certains ouvrages. La maîtrise des conditions de mise en œuvre de ces remblais particuliers est nécessaire pour garantir la durabilité des ouvrages. Le non-respect de certaines règles peut entraîner de graves dysfonctionnements pouvant conduire à la ruine de la structure. [19]

## 3. Le corps de remblai

Le corps du remblai est lui-même constitué de plusieurs sous-parties selon la *Figure 1.1* :



*Figure 1.1 : schéma des différentes parties d'un remblai [20]*

**A : La base de remblai** elle correspond à la zone de transition entre le sol support (E) et le cœur remblai (B). Cette base assure deux fonctions :

- Stabiliser l'ouvrage en terre, surtout dans le cas des ouvrages de grande hauteur.
- Assurer la stabilité de l'ouvrage en cas de remontées d'eau libre ou d'eau capillaire provenant du sol support (zone humide, nappe sub-affleurante) ou d'arrivées d'eau latérales dans les zones inondables.

**B : Le noyau du remblai** il correspond à la zone située entre la base du remblai (A) et la partie supérieure des terrassements (D). Cette zone est peu sollicitée par les contraintes extérieures (trafic, météo, etc.).

**C : La zone latérale du remblai** elle correspond à la partie de remblai en talus, et selon les cas à l'encagement et/ ou l'épaulement ; cette zone doit assurer la stabilité de la pente de talus définie par le concepteur, le confinement de certains matériaux, et, s'il y a lieu, la protection du noyau du remblai vis-à-vis des conditions extérieures (cycles humidification/séchage, gel/dégel, fousseurs, météo, etc.).

**D : La partie supérieure des terrassements** cette zone d'environ 1 m d'épaisseur est située entre le cœur du remblai et la couche de forme (F). Elle entre dans le dimensionnement de l'infrastructure qui surmonte le remblai et assure une fonction mécanique dans le long terme. La base, le noyau, les zones latérales et la partie supérieure du remblai peuvent être constitués du même matériau. On parle alors de remblai homogène (*Figure 1.1*). La base, le noyau, les zones latérales et la partie supérieure du remblai peuvent être aussi réalisés avec des matériaux et ou des techniques de mises en œuvre différentes. On parle alors de remblai hétérogène.

**E : La zone d'influence** selon la norme NF P94-500, la zone d'influence est définie comme le volume de terre au sein duquel il y a interaction entre d'une part l'ouvrage ou l'aménagement de terrain et d'autre part l'environnement (sols, ouvrages, aménagements de terrains ou biens environnants). En pratique, la zone d'influence comprend le sol support (E) environnant. Elle s'étend conventionnellement de part et d'autre du remblai sur une distance égale à trois fois sa hauteur. Néanmoins, son extension peut être plus importante si les besoins du site le justifient (remblai sur pente par exemple).

**F** : La couche de forme.

**G** : Les couches de chaussée, les accotements, les terre-pleins et les équipements.

**F** et **G** sont les éléments surmontant le remblai. [20]

### 3.1. Les dispositifs d'assainissement et de drainage :

- a. Les ouvrages traversants.
- b. Les dispositifs de drainage sous remblai et les fossés de pied de remblai,
- c. L'assainissement et le drainage de la chaussée. [20]

## 4. La classification du remblai

On peut classer les remblais en 3 classes :

- ✓ **Homogène** : Ce remblai dont les constituants sont uniformes et présentent les mêmes caractéristiques
- ✓ **Hétérogène** : Ce remblai constitué d'un pourcentage variable de sols et de matières résiduelles. Caractérisation difficile, il faut suivre une certaine procédure selon le Guide.
- ✓ Généralement, ce type de remblai représente une préoccupation environnementale potentielle.
- ✓ **Sols naturels remaniés** ; Composés à 100 % de sols. [21]

## 5. Les Types des remblais et leurs fonctions

On peut classer les remblais selon leur fonction d'usage.

### 5.1. Remblais contigus aux ouvrages :

Le remblai contigu à l'ouvrage assure la transition entre le point dur représenté par l'ouvrage et le remblai courant (profil en long). Il supporte la dalle de transition. Il fait l'objet de prescriptions plus restrictives que le remblai courant en matière de choix de matériau car il participe au bon fonctionnement mécanique de l'ouvrage. Il englobe les zones où

- ✚ Ses caractéristiques mécaniques influent sur le dimensionnement et la pérennité de l'ouvrage, notamment son angle de frottement interne  $\phi'$  ;
- ✚ Sa mise en œuvre se fait dans un espace exigü et sensible ;
- ✚ Les matériaux ne doivent pas être agressifs pour l'ouvrage (agression chimique et électrochimique, agression mécanique) ;
- ✚ Les fonctions de drainage sont indispensables.

Le remblai contigu est donc défini par des critères prioritairement mécaniques à travers son influence sur les structures rigides qui le soutiennent telle que mur, culée d'ouvrage.

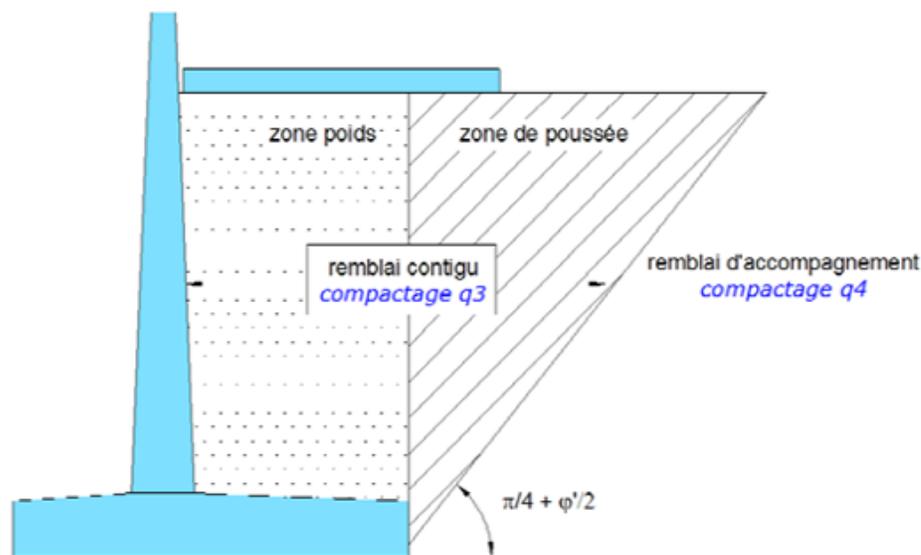
Les principales préconisations en matière de choix de matériaux, de réalisation, de contrôle sont rappelées dans une note d'information intitulée "Construire des remblais contigus aux murs et culées d'ouvrages d'art" Les remblais contigus, souvent appelés remblais techniques ou blocs techniques, sont une partie intégrante des ouvrages. Ils contribuent, parfois de façon prépondérante, à la stabilité et assurent la transition entre les structures rigides, souvent en béton, au terrain naturel ou aux remblais courants.

Leurs rôles sont souvent sous-estimés, voire méconnus, alors qu'ils sont parfois le cœur, donc la clé de la réussite de certains ouvrages.

La maîtrise des conditions de mise en œuvre de ces remblais particuliers est nécessaire pour garantir la pérennité et la durabilité des ouvrages. Le non-respect de certaines règles peut entraîner de graves dysfonctionnements. De nombreuses règles ont été proposées, certaines parfois anciennes, pour de nombreux types d'ouvrages.

Les remblais contigus aux ouvrages d'art courants et murs de soutènements, sont ceux mis en œuvre à l'arrière des ouvrages suivants :

- Piédroit de PICF (Passage Inférieur en Cadre Fermé), PIPO (Passage Inférieur en Portique Ouvert), POD (Portique Ouvert Double) ;
- Mur de front, mur en retour ou en aile de culées de ponts ;
- Mur de soutènement poids, mur de type béton armé sur semelle ou mur constitué d'éléments empilés. [15]



**Figure 1.2 : Définition du remblai contigu, zones poids et zone de poussée.[15]**

### 5.2. Remblai routier :

Un remblai routier est un ouvrage en terre construit pour modeler la topographie naturelle du terrain de manière à assurer la géométrie imposée à la plate-forme sur laquelle la chaussée sera construite.



*Figure 1.3 : Remblai routier*

### 5.3. Les remblais courants :

Les remblais courants ont pour fonction essentielle de garantir la géométrie des projets conformément aux exigences du projeteur routier et de supporter la structure de chaussée. A ce titre, leurs évolutions doivent être limitées afin de garantir un niveau de service correct sur la voirie. [20]

### 5.4. Les remblais dépôts :

Les remblais dépôts ont pour fonction de stocker des matériaux excédentaires ou impropres en l'état à une mise en remblai courant. [20]

### 5.5. Les merlons phoniques :

Les merlons phoniques ont pour fonction de constituer un atténuateur de bruit. Ils possèdent souvent une pente de talus assez importante et un compactage médiocre, pouvant être la cause de désordres. [20]

**5.6. Les merlons :**

Ces merlons ont pour fonction de créer un obstacle à toute chute de blocs dont la trajectoire pourrait atteindre ou croiser la chaussée. [20]

**5.7. Les aménagements paysagers :**

Les aménagements paysagers ont pour fonction :

1. de permettre le stockage de matériaux excédentaires ou impropres en l'état à une mise en remblai courant et/ou
2. de rendre à l'agriculture ou au paysage une part plus importante des terrains situés dans l'emprise des travaux. Les avantages en termes d'entretien futur et de stabilité générale doivent également être signalés. [20]

**5.8. Les digues :**

Les remblais digues ont pour fonction de maintenir en eau un ouvrage de type bassin, lac ou autre plan d'eau et/ou de prévenir le risque d'inondation (crues, etc.). Pour cela, les remblais doivent être capables de résister à un contact prolongé avec l'eau. Ils peuvent avoir une fonction de rappel routier dans certains cas. [20]

**5.9.les remblais ferroviaires :**

Les remblais ferroviaires ont pour fonction de supporter une voie ferrée. Ces remblais peuvent être construits à partir de règles de conception et de mise en œuvre proches de celles appliquées pour les remblais routiers, mais ils obéissent à des contraintes d'exploitation différentes ;

**5.10. Les remblais renforcés :**

Les remblais renforcés ont pour fonction :

- De réduire l'emprise au sol (cas courant en agglomération) et
- De renforcer la stabilité générale de l'ouvrage. Ces remblais sont traités par les normes NF P94-270 et NF EN 14475 pour leur conception et leur exécution et dans le guide technique Sétra/LCPC de 2003 pour leur pathologie. [20]

**5.11. Les remblais spéciaux et allégés (pneu sols, polystyrène expansé en remblai, etc.) :**

Les fonctions peuvent être diverses et répondent en général à des cas particuliers de chantier. Le polystyrène expansé en remblai est souvent utilisé pour alléger le remblai, limiter le tassement ou encore réduire les efforts de poussée sur les soutènements.

Les « pneu sols » peuvent être utilisés sur des zones compressibles en allégement, ou en protection de voûte d'ouvrage de franchissement hydraulique (effet Marston) et comme remblais

renforcés. Les mécanismes de dégradation des remblais spéciaux sont difficilement comparables à ceux des autres remblais. Par expérience, leurs pathologies sont rares. [20]

### **5.12. Les remblais de tranchée :**

Ces remblais de tranchée ont pour fonction de combler une fouille.

### **5.13. Les remblais supports de fondations :**

Ces remblais ont pour fonction de transmettre les charges apportées par les fondations au sol support, soit à la suite d'une purge, soit pour permettre une diffusion des contraintes, ou encore pour économiser du béton (culée perchée). [20]

## **6. Les types des matériaux de remblai et leur comportement**

Nous avons donc compris que les remblais désignent toute technique d'ajout de matière à un terrain. Par conséquent, il existe un grand nombre de matériaux de remblais différents.

En construction, on utilise de très nombreux matériaux de remblai :

- Sable de remblai,
- Gravier,
- Roche,
- Craie,
- Calcaire,
- Gravats,
- Déchets inertes, etc.

### **6.1. Craie :**

En sol humide, la craie se désagrège et forme une pâte qui peut générer des pressions, faisant bouger la structure finale. En sol très sec, la craie est idéalement solide.

### **6.2. Roches argileuses :**

Schistes, etc. : Ces roches peuvent se broyer et laisser des débris argileux qui gonflent le sol, ébranlant ainsi la future structure.

### **6.3. Roches siliceuses :**

Grès, etc. : Ces roches sont résistantes, bien que fragmentables.

### **6.4. Roches salines :**

Gypse, etc. : La teneur en sel de ces roches fait qu'elles sont trop solubles pour être employées dans le remblai.

### 6.5. Terre de remblai :

Seules certaines terres sont susceptibles d'être utilisées en terre de remblai. Les terres argileuses, sableuses ou trop humides seront évitées. [24]

### 6.6. Matériau de démolition :

Certains débris et matériaux laissés après une démolition peuvent être employés dans le remblai :

- ✓ Briques,
- ✓ Parpaings,
- ✓ Bloc de ciment, etc.

Ces éléments doivent cependant être débarrassés :

- ✓ Des éléments putrescibles comme le bois,
- ✓ Des plâtres et autres matières susceptibles de gonfler,
- ✓ Des ferrailles.

Il est fréquent d'utiliser différents matériaux pour un même remblaiement. Les matériaux sont alors répartis par couches successives, et chaque couche doit être compactée.

Les matériaux seuls ne suffisent pas à bien préparer le terrain. Il est indispensable de réaliser un compactage pour bien lier les matériaux et assurer la stabilité du remblai.

Le choix de remblais va alors dépendre :

- ✓ Du taux d'humidité du terrain,
- ✓ De la granularité du terrain,
- ✓ De la nature du sol,
- ✓ De la construction envisagée.

Il est bon de comprendre que les travaux de terrassement ne doivent jamais mettre en cause la stabilité du terrain. On doit donc sélectionner les matériaux de remblaiement en fonction de leur dimension, de leur sensibilité à l'eau, mais aussi de leurs caractéristiques physiques.

## 7. Caractéristiques des matériaux granulaires nécessaires au remblai

Le matériau choisi doit être non mouvant, non gonflant, insensible à l'eau, non érodable et présenter des paramètres physico-chimiques non agressifs vis à vis du béton et des armatures.

Le matériau granulaire doit être exempt d'éléments supérieurs à 50 mm ( $D_{max} < 50$  mm) et le passant à 80  $\mu$ m doit être inférieur à 12 %.

Lorsque le diamètre maximal des éléments est compris entre 31,5 et 50 mm ( $31,5 \text{ mm} < D_{max} < 50 \text{ mm}$ ), il est nécessaire de mettre un dispositif de protection du drainage, qu'il s'agisse d'un matériau roulé ou concassé.[19]

## 8. Matériaux à exclure

Conformément aux règles usuelles de calcul, la justification des ouvrages en terre est menée en considérant une cohésion de calcul prise égale à zéro ( $c' = 0 \text{ kPa}$ ).

De ce fait les argiles et limons sont à exclure sans traitement car :

- Ils conduisent à un dimensionnement non économique des soutènements.
- Ils sont sensibles à l'eau et peuvent mettre en péril la pérennité de l'ouvrage.
- Ils sont difficiles à mettre en œuvre.
- Ils pourraient être saturés d'eau.

Les roches tendres évolutives de type argilites, marnes, schistes, ou craie, non traitées, sont à exclure car elles créent des fines dans le temps, générant des vides et des affaissements.

Les Mâchefers d'Incinération d'Ordures Ménagères (MIOM) sont des matériaux alternatifs récents pour lesquels des soucis d'agressivité chimique pourraient conduire à la ruine de l'ouvrage par corrosion des armatures. Sans étude particulière, le recul n'est actuellement pas suffisant sur ce type de matériau pour conseiller son utilisation en remblai contigu. [19]

## 9. Remblayage

Le remblayage ou Le remblaiement est un processus de construction qui consiste à ajouter des matériaux tels que de la terre, du gravier ou des roches pour remplir une zone creuse ou pour augmenter la hauteur d'un terrain existant est souvent réalisé pour créer une plateforme de travail stable ou pour soutenir des structures, et nécessite des études géotechniques pour déterminer les propriétés des sols, la charge maximale pouvant être supportée et les matériaux de remblayage appropriés. Les méthodes de remblayage peuvent varier selon les conditions du site, les types de matériaux utilisés et les charges imposées à la structure finale. [23]



*Figure 1.4 : Vue De Remblayage*

### 9.1. Les Étapes du Remblayage :

Le remblaiement doit passer par des étapes qui sont :

Il faut savoir que la mise en place d'un remblai est une opération assez technique, comme l'ensemble des travaux de terrassement.

#### a) Demander un permis d'aménagement

En premier lieu, il est bon de comprendre que le remblai peut nécessiter certaines autorisations préalables.

Il est ainsi impératif de demander un permis d'aménager dans les cas suivants

- Un remblai de plus de 2 mètres de haut, et dont la superficie atteint 2 hectares ou plus sur un terrain non protégé.
- Un remblai de plus de 2 mètres de haut, et dont la superficie atteint 100 m<sup>2</sup> ou plus sur un site classé, dans une réserve naturelle ou dans un secteur sauvegardé.

En zone humide ou inondable, les remblais peuvent tout simplement être interdits. Le mieux est donc de consulter votre commune bien en amont des travaux, pour connaître vos droits et devoirs.

#### b) La réalisation d'une étude des sols

Si votre remblaiement est important, ou si vous réalisez le remblai d'un terrain dans le but d'une construction, il y a des chances pour que votre constructeur débute les travaux par une étude des sols.

L'un des objectifs sera alors de déterminer quels matériaux de remblai utiliser, et comment assurer la stabilité future du terrain.

Les résultats de cette étude peuvent être nécessaires pour déposer une déclaration préalable de travaux ou demander un permis d'aménagement.

- c) Le ponçage de la terre végétale.
- d) La réalisation des tranchées.
- e) L'installation des fosses et des regards.
- f) La réalisation du remblai.

Ces travaux nécessitent des outils de chantiers, que ce soit une mini pelle pour faire le déblai ou amener les matériaux de remblai, ou des outils pour le compactage (plaque vibrante, pilonneuse, etc.).

- g) Un remblai est généralement réalisé par couches successives, avec compactage de chaque couche. Cela permet de conférer au terrain la densité choisie.

Parallèlement au remblai, il peut être nécessaire de faire construire un mur de soutènement, de manière à mieux supporter le terrain. [23]



(A)



(B)



(C)



(D)

*Figure 1.5 : Les étapes du Remblayage*

**- Le compactage :**

Le compactage est une étape nécessaire qui suit l'apport du remblai. Il permet de tasser les matériaux mis en place pour réduire les vides et favoriser la cohésion de l'ensemble.

La technique du compactage peut être effectuée par différents outils ou machines :

- ✓ Le compacteur statique, qui tasse l'ensemble grâce à son poids ;
- ✓ Le compacteur à pneu ;
- ✓ Compacteur vibrant qui tasse l'ensemble grâce aux poids et aux vibrations :
  - À cylindre lisse ;
  - À pied dameur ;
  - La plaque vibrante. [24]



*Figure 1.6 : Le compactage*

**9.2. Dimensionnement du remblai :****9.2.1. Pente du remblai**

Pour obtenir un équilibre stable, nécessaire à la bonne tenue des terres en remblais et des tranchées, il convient de donner aux talus qui limitent ces terrassements une inclinaison convenable.

Cette pente se définir :

- Par la tangente de l'angle (pente) que fait ce talus avec l'horizontale Pente :  $\tan(i) = h / b$
- L'angle  $i$  doit toujours être inférieur à l'angle de frottement interne appelé  $\phi$ .

• D'une manière générale, les pentes de talus des remblais de hauteur moyenne à grande hauteur peuvent être fixées a priori en fonction de la hauteur du remblai et de la nature des matériaux conformément aux indications données dans le tableau ci-après : [15]

**Tableau 1.1** : *Ordre de grandeur de la pente d'un remblai en fonction de sa hauteur. [15]*

Nature du matériau	Hauteur du remblai		
	$h \leq 5m$	$5 \leq h \leq 10m$	$h \geq 5m$
Sols et matériaux cohérents sensibles à l'eau ou matériaux rocheux issus de roche altérée ou argileuse mais fragmentable	$\text{pente} \leq 2/3$	$\text{pente} \leq 1/2$	Pas de règle générale : la pente doit résulter d'une étude de stabilité
Matériaux granulaires insensibles à l'eau d'origine alluvionnaire ou matériaux rocheux issus de roche tendre non argileuse	$\text{pente} \leq 1/1$	$\text{pente} \leq 2/3$	Pas de règle générale : la pente doit résulter d'une étude de stabilité
Matériaux issus de roche dure non altérée	$\text{pente} \leq 1/1$	$\text{pente} \leq 1/1$	$\text{Pente} \leq 2/3$ Avec risberme

### 9.2.2. L'épaisseur de la couche de remblai :

On peut construire le remblai par étapes sur des hauteurs successives (en vérifiant la valeur de  $f_s = 1,5$ ) cas des déformations trop importantes. L'accroissement de la cohésion non drainée  $c_u$  qui résulte de la consolidation est :  $\Delta c_u = \gamma H_1 \times \tan \varphi \times c_u$

On déterminera la hauteur suivante  $H_2$  en utilisant :

$$H_2 = \frac{(\pi+2)}{\gamma F \times (c^{(0)} + \Delta \times c_u)}$$

Où  $C^{(0)}$  : est la cohésion initiale du sol avant la construction du remblai.

$H_1$  : Epaisseur maximale pour la résistance initiale du sol

$H_2$  : Épaisseur maximale pour la résistance du sol après consolidation

La résistance du sol augmente avec le niveau des contraintes effectives. La construction par étapes permet d'exploiter cette propriété pour des sols qui ne peuvent supporter dans leur état naturel la totalité de la charge prévue : le remblai est construit par couches ; l'épaisseur de la couche

suivante est déterminée par un calcul de stabilité en fonction de la résistance du sol acquise par consolidation à la fin de l'étape précédente. [15]

### 9.2.3. Hauteur totale du remblai à construire :

Le GTR limite les remblais à des hauteurs :

- Les remblais de faible hauteur sont limités à 5 m.
- Les remblais de hauteur moyenne sont limités à 10 m.
- Les remblais de grande hauteur dépassent 10 m.

Pour atteindre le niveau désiré pour le profil projeté, la hauteur totale du remblai à construire

est donnée par la formule suivante :  $R_t = \frac{H_r \times 100}{(100 - T)}$

Où :  $R_t$ : Hauteur totale du remblai à construire.

$H_r$  : Hauteur prévue au-dessus de la surface du terrain naturel pour atteindre le niveau fixé Pour la surcharge.

$T$  : pourcentage de tassement prévu. [15]

## 10. Contrôles de remblais contigus en matériaux granulaires

Le contrôle des remblais contigus comprend l'agrément des matériaux lors de la phase de préparation et le contrôle d'exécution lors de la mise en œuvre.

L'agrément du matériau s'attache à vérifier la compatibilité de ses caractéristiques géotechniques avec les hypothèses retenues dans les études d'exécution. Compte tenu de l'importance de ces remblais, un contrôle d'exécution est indispensable afin de garantir la durabilité de la totalité de l'ouvrage. Ils portent sur :

- Les critères de granulométrie et d'argilosité (teneurs en fines,  $D_{max}$ ) ;
- La densité de référence (Essai Proctor ou planche d'essai) ;
- Les paramètres physico-chimiques ;
- L'angle de frottement interne  $\phi'$  ;

Il convient de s'assurer de l'adéquation des procédures d'exécution des remblais contigus aux prescriptions requises. [19]

## 11. Les conditions d'utilisation en remblai

Le principal apport du document est la présentation des conditions d'utilisation des matériaux qui n'avaient pas été proposées en 1976, faute d'expérience, et qui étaient mentionnées comme étant "à l'étude" (cas des roches évolutives).

En outre quelques modifications ont également été apportées. Elles concernent l'abandon :  
De la technique d'extraction "avec lavage dans la nappe" préconisée pour éliminer une partie des fines contenues dans un matériau graveleux, mais jugée aujourd'hui insuffisamment fiable et peu acceptable dans le contexte de protection de l'environnement :

- ✓ De la technique des "couches sandwich". En effet cette technique ne constitue pas à proprement dit une modalité de réemploi des sols fins trop humides puisqu'elle ne propose pas de modification à leur apporter. En revanche cette pratique est envisageable au niveau de la conception et de la réalisation des remblais dans la mesure où l'on a bien évalué les conditions techniques, hydrauliques et organisationnelles qu'elle implique (choix des matériaux à réunir et quantités nécessaires au moment voulu).
- ✓ L'introduction d'une nouvelle rubrique G "Action sur la granularité" recensant les différentes actions pouvant être exigées pour modifier la granularité de certains matériaux. [25]

## 12. Les remblais de grande hauteur

Si la hauteur du remblai dépasse 15m, les remblais présentent des particularités techniques qui ne sont plus totalement couvertes par les règles techniques applicables aux terrassements routiers (GTR en France) : Les grands remblais sont plus qu'un empilement de couches bien compactés. Leurs déformations peuvent être importantes et évoluer au cours du temps. Ils sont souvent hétérogènes parfois constitués de matériaux évolutifs, et toujours soumis à des circulations d'eau. Le « Guide technique de réalisation des remblais et des couches de forme » propose des règles précises pour définir les sols acceptables en remblai ainsi que les méthodes de mise en œuvre (Essentiellement le compactage) à respecter pour s'assurer d'un niveau de qualité démontré Comme satisfaisant par l'expérience.

Toutefois les précautions du GTR conduisent implicitement à définir les paramètres jugés nécessaires et suffisants pour assurer la qualité du remblai au niveau élémentaire (en fait, au niveau d'une couche remblayée durant un poste), mais ne donne pas d'indications sur la conception globale

du remblai (interactions entre couches élémentaires, conditions aux limites vis-à-vis des actions de l'environnement, etc.) conduisant à définir les pentes de talus, les dispositifs de drainage les précautions à prendre dans le cas de sols hétérogènes.

Ces dernières indications sont généralement assez secondaires pour des remblais ne dépassant pas une hauteur moyenne, car les dimensionnements correspondant sont le plus souvent déduits de l'expérience locale des géotechniciens sans étude consistante. C'est pourquoi le GTR est considéré comme le document de référence pour des remblais n'excédant pas une quinzaine de mètres de hauteur environ. [18]

### 13. Contraintes et déformations dans un grand remblai

Dans un grand remblai, le tassement est plus important que l'énergie de compactage soit faible par rapport à la charge statique des couches sus-jacentes. Cette évidence est toutefois assez mal étayée et quantifiée dans la pratique. Le tassement différé, en particulier, peut aussi être dû à des variations de teneur en eau ou à des phénomènes de fluage (dévia torique ou non).

Le chargement provoque un tassement significatif si la « sur consolidation » créée par le compactage est inférieure à la charge appliquée. On admet généralement que l'énergie du Proctor normal apporte une sur consolidation équivalente à une hauteur de dix mètres de remblai, soit une contrainte équivalente de 200 KPa bien que l'évaluation de l'énergie par l'essai Proctor normal corresponde en fait à 300 KPa, d'après Alonso et al (1990).

Des mesures de tassement en place pendant la construction du remblai de la Jorle (sur l'autoroute A62, Toulouse) depuis 1980, confirment que le tassement immédiat devient relativement plus important à partir d'une charge excédante 150 à 200 Kpa ; ces tassements se corrélaient assez bien avec ceux prévisibles par l'essai œnométrique. Des mesures du tassement différé (non prévisible par les essais classiques) ont montré que celui-ci est du même ordre de grandeur que le tassement immédiat dans l'axe de la voie, mais s'étend sur quatre ans.

La stabilité d'un sol compacté en remblai peut s'évaluer d'après la géométrie de l'ouvrage en connaissant les caractéristiques de résistance au cisaillement du sol. Il s'avère que l'angle de frottement  $\phi$  obtenu en remblai peut être nettement plus faible celui qu'avait le même matériau avant extraction et la cohésion du sol dépend du degré de saturation. On en déduit donc que les caractéristiques mécaniques d'un sol argileux mis en remblai peuvent parfois être médiocres, surtout si les circulations d'eau sont mal contrôlées. [18]

## 14. Les problèmes posés par la construction des remblais

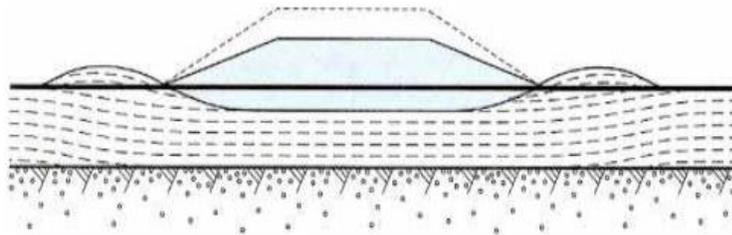
### 14.1. Problème de stabilité

#### 14.1.1. La rupture par poinçonnement

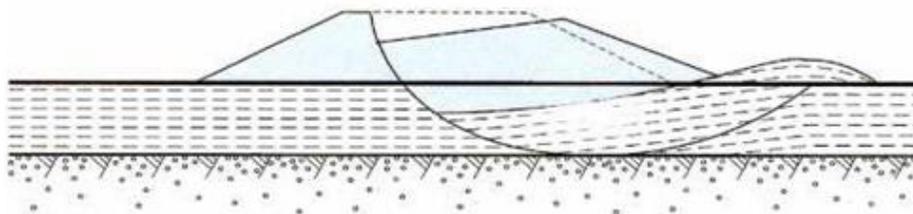
Elle se traduit par un affaissement généralisé du remblai (qui pénètre dans le sol support) et un soulèvement du Terrain Naturel. Ce soulèvement induit des bourrelets qui se forment de part et d'autre des talus. La hauteur d'un bourrelet est la moitié de la hauteur du déplacement vertical du remblai. [9]

#### 14.1.2. La rupture de type circulaire

En raison de la géométrie des remblais et des talus, c'est le plus fréquent des types de ruptures de ceux-ci. Cette rupture se manifeste par un enfoncement localisé du remblai. On enregistre la formation d'un bourrelet dans le sens du déplacement du remblai, due au soulèvement du Terrain Naturel. A la différence de celle de la rupture par poinçonnement, la hauteur de ce déplacement est identique à celle du bourrelet qui se forme. Mais celle-ci varie en fonction des propriétés mécaniques du sol. Pour des raisons simplificatrices, on assimile généralement la ligne de rupture à une courbe circulaire et le glissement est dit rotationnel. [9]



*Figure 1.7 : Rupture par poinçonnement [9]*



*Figure 1.8 : Rupture de type circulaire ou glissement rotationnel [9]*

## 14.2. Les problèmes de tassements

Contrairement à la rupture par défaut de stabilité, le tassement est une déformation lente du sol sous le poids du remblai qui se traduit :

- Par un enfoncement vertical au centre du remblai ;
- Par un enfoncement vertical combiné à un déplacement latéral du sol de fondation, sous l'emprise du remblai ;
- Par un déplacement latéral de sol de fondation, hors emprise du remblai.

Les déplacements verticaux ont couramment une amplitude de plusieurs dizaines de centimètres. Pour les couches très mouvantes ou de forte épaisseur, cette amplitude peut atteindre plusieurs mètres.

Notons que ces déplacements sont plus importants dans l'axe du remblai vers la crête du talus, ce qui provoque une déformation de la plate-forme. Les déplacements horizontaux sont généralement plus faibles que les déplacements verticaux. [9]

## 15. Méthodes d'analyse de la stabilité des remblais

Le glissement de terrain peut intervenir à propos des travaux qui peuvent modifier un équilibre préétabli : (talus naturels, remblai d'autoroute ou de canaux d'irrigation ...).

Le calcul de la stabilité des talus est destiné à prévenir ces incidents, c'est-à-dire à trouver la pente à donner à un talus pour qu'il présente un certain degré de sécurité vis-à-vis du glissement.

L'analyse de la stabilité des pentes contre les glissements s'effectue habituellement à la rupture à l'aide :

- ✓ Des méthodes d'équilibre limite.
- ✓ Des méthodes numériques telles que méthode des éléments finis ou différences finis.

Ces méthodes donnent par l'intermédiaire du coefficient de sécurité une idée de l'état d'équilibre de la pente étudiée par rapport à l'équilibre limite. L'expression du coefficient de sécurité est différente selon qu'il s'agit d'une rupture plane, circulaire ou quelconque.

Le coefficient de sécurité au glissement des massifs en pente  $F$  est défini par l'expression suivante :

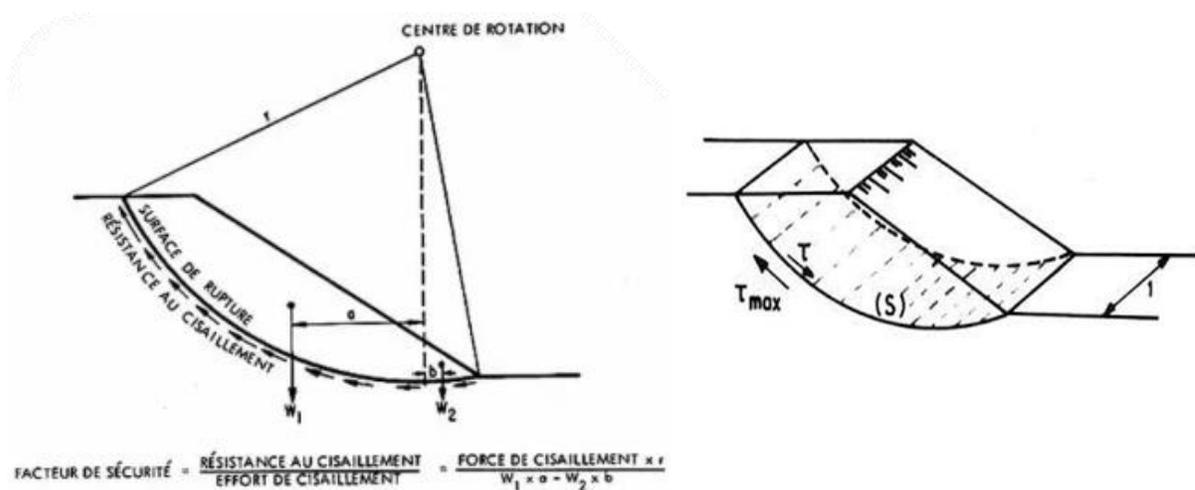
$$F = \frac{\tau_{max}}{\tau}$$

Si  $F > 1$ , il n'y a pas rupture

Si  $F < 1$ , il n'y a pas rupture

Si  $F = 1$ , il y a équilibre limite

L'analyse de stabilité consiste alors à rechercher la surface de rupture la plus défavorable, c'est-à-dire, dont le coefficient de sécurité est le plus faible : c'est elle qui conditionne la stabilité du talus. [22]



*Figure 1.9 : Etat des contraintes le long de la courbe de rupture [22]*

## 16. Études de la stabilité des pentes

### 16.1. Méthodes Analytiques :

L'analyse de la stabilité des talus est traitée comme un problème d'équilibre limite. Les calculs à la rupture supposent que le terrain se comporte comme un solide rigide-plastique (ou rigide rupture). Le critère de plasticité (ou rupture) est défini par une loi classique (Mohr-Coulomb en général). Ce critère atteint au niveau de limite du volume étudié (surface de rupture potentielle). [22]

### 16.2. Les méthodes incluent :

Des méthodes à l'équilibre limite.

Des méthodes d'analyse limite

- Méthodes d'équilibre limite : La méthode d'équilibre limite a été utilisée par (Ito et al., 1979) pour traiter le problème de la stabilité de la pente, le coefficient de sécurité de la pente renforcé par pieux a été défini comme le rapport du moment résistant au moment de renversement (moteur) agissant sur la masse du sol potentiellement instable.

- Méthode D'analyse Limite : qui incluent des méthodes de borne supérieure (encore appelées méthodes cinématiques) ou de borne inférieure.

L'approche cinématique de l'analyse limite était proposée par (Ausilio et al. 2001). Nous considérons cette approche pour le cas d'une pente n'est pas renforcée, une solution sera indiquée pour déterminer le coefficient de sécurité de la pente, qui sera défini comme coefficient de réduction pour les paramètres de résistance du sol, Le coefficient de sécurité est analytiquement

défini comme suit : 
$$F_s = \frac{C \tan \varphi}{C_m \tan \varphi_m}$$

Où :

$C_m$  et  $\varphi_m$  : la cohésion mobilisé et l'angle du frottement mobilisé.

L'intérêt de la méthode issue du calcul à la rupture tient à :

- Son caractère rigoureux qui fournit une appréciation de la sécurité d'un ouvrage sans autre hypothèse que le choix du critère de rupture attaché aux matériaux,
- Sa capacité à prendre en compte des situations où les méthodes traditionnelles sont généralement en défaut : Équilibres de butée, chargements inclinés par rapport à la verticale. [22]

### 16.2.1. Hypothèses classiques de La Méthode De L'équilibre Limite :

Les méthodes les plus employées, pour la résolution du calcul de la stabilité des pentes de géométrie quelconque avec des lignes de glissement de forme quelconque, dans des sols homogènes ou hétérogènes, sont des variantes de la méthode des tranches. Celle-ci permet de s'adapter à des conditions de géométrie complexes, tant en ce qui concerne les frontières, que le sol et les conditions hydrauliques. Il existe environ une douzaine de variantes de cette méthode qui diffèrent entre elles par :

- La manière d'utiliser les équations statiques pour définir le coefficient de sécurité,
  - Les hypothèses utilisées pour rendre le problème statiquement déterminé.
- **La méthode est basée sur les hypothèses suivantes (A. BENAÏSSA, 2003) :**
    - 1) Le problème est supposé bidimensionnel.
    - 2) Il existe une ligne de glissement.
    - 3) Le coefficient de sécurité F traduit l'écart entre l'état d'équilibre existant et l'état d'équilibre limite

- 4) Le sol est considéré comme ayant un comportement rigide plastique avec le critère de Coulomb. La rupture, si elle a lieu, se produit en tout point d'une ligne de glissement continue en même temps (pas de rupture)

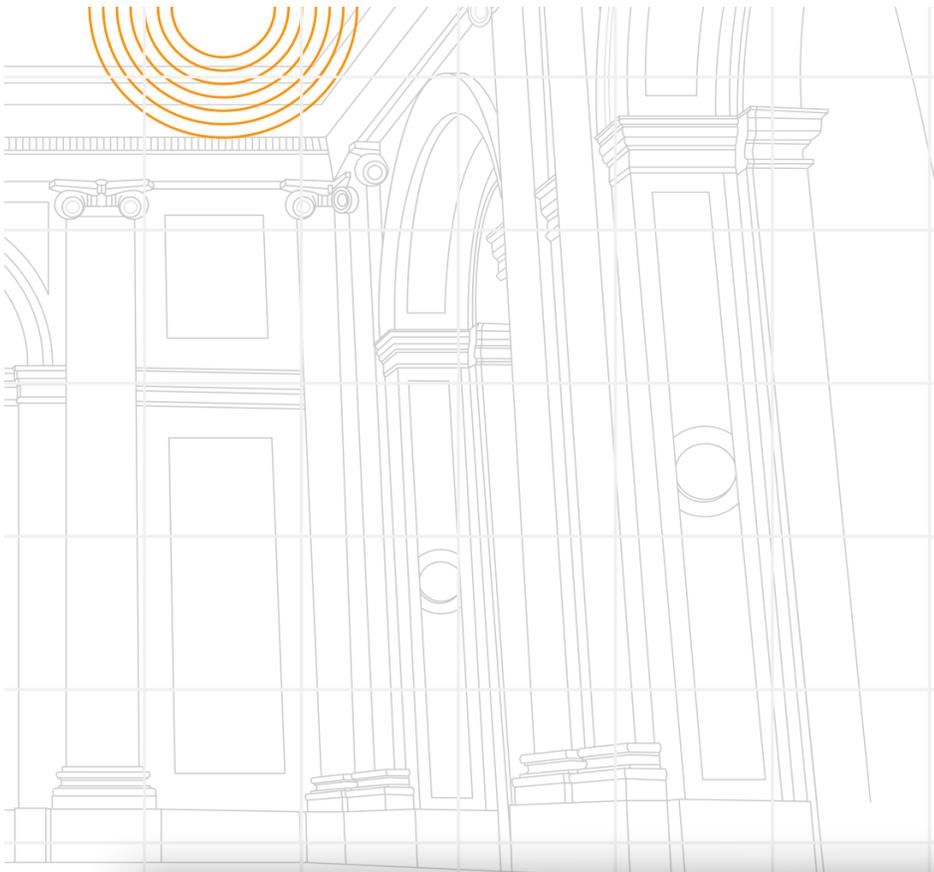
Parmi les méthodes les plus couramment utilisées nous pouvons citer ici, sans tenter d'en faire une description exhaustive :

- **Méthode ordinaire (ou conventionnelle) de (Fellenius, 1936) :** Qui est la plus utilisée dans la catégorie des méthodes des tranches. Dans sa forme originelle, elle se base sur l'hypothèse d'une ligne de glissement circulaire choisie arbitrairement.
- **Méthode simplifiée de (Bishop, 1955) :** Qui néglige les forces tangentielles entre tranches. Les forces normales aux bases des tranches sont obtenues par l'équation d'équilibre vertical.
- **Méthode de (Spencer, 1967) :** Qui suppose qu'il y a un rapport constant entre les composantes verticales et horizontales des forces inter tranches.
- **Méthode complète de (Janbu, 1968) :** Qui suppose que le point d'application de chaque force inter tranche peut être défini par sa position sur une ligne de poussée. [22]

## 17. Conclusion

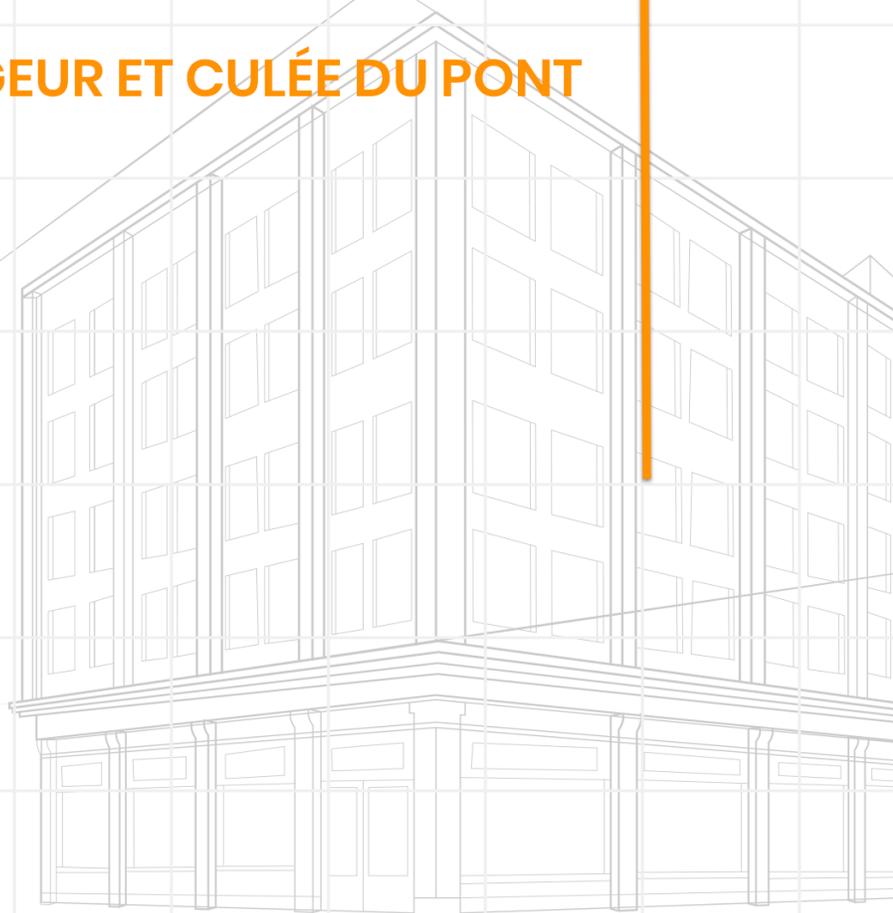
Le remblayage est une opération consistant à remplir une zone creuse ou à ajouter de la terre ou des matériaux pour augmenter la hauteur d'une zone existante. Cette opération est courante dans les projets de construction de génie civil tels que la construction de routes, de ponts, de digues et de barrages.

Dans ce chapitre nous avons parlé des remblais leurs types et fonction. Les problèmes posés pour un construction d'un remblai et la stabilité de pente et les méthodes du calcul.



# CHAPITRE II

## L'ECHANGEUR ET CULÉE DU PONT



## 1.Introduction

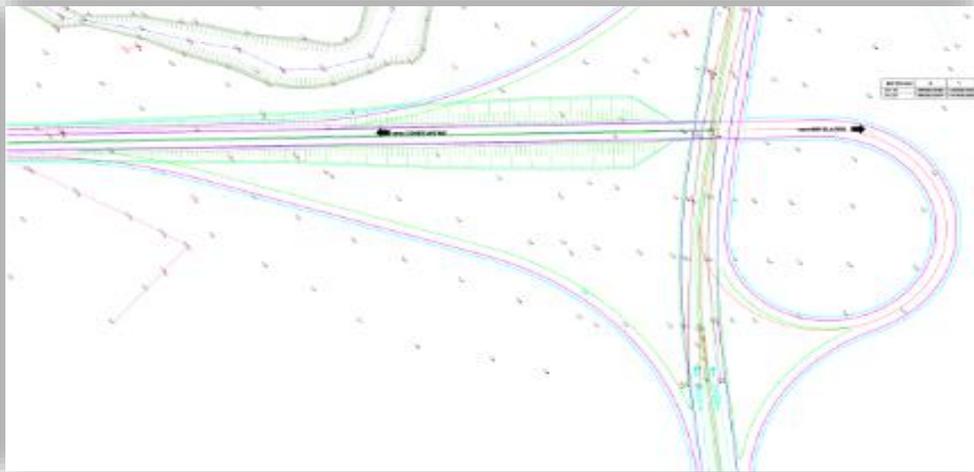
L'échangeur est un dispositif de raccordement entre plusieurs routes et autoroutes sans croisement à niveau. Il compte au minimum un pont permettant au réseau routier d'enjamber l'autre.

Un échangeur peut être complet (bidirectionnel) ou partiel (donnant accès à une seule direction de l'autoroute).

## 2.L'échangeur

### 2.1. Définition d'échangeur :

Est un aménagement routier qui permet aux conducteurs d'engager sur une voie rapide ou sur une autoroute pour prendre une autre ; ou un réseau routier ordinaire ; grâce à leur système de bretelles routiers. [1] [2]



*Figure 2.1 : Échangeur (coupe architecturale du projet).*

### 2.2. Les différents types d'échangeurs :

Il existe plusieurs formes d'échangeur. Cependant, les types de base ne sont pas nombreux chaque type peut varier de forme et de détendue, et On distingue deux classes :

#### 2.2.1. Echangeurs majeurs : raccordement autoroute- autoroute

Exemple :

- **Les échangeurs en trèfle**

(Type d'échangeurs autoroutiers à quatre voies) : ces échangeurs sont équipés de bretelles en boucle.

- **Les échangeurs en turbine**

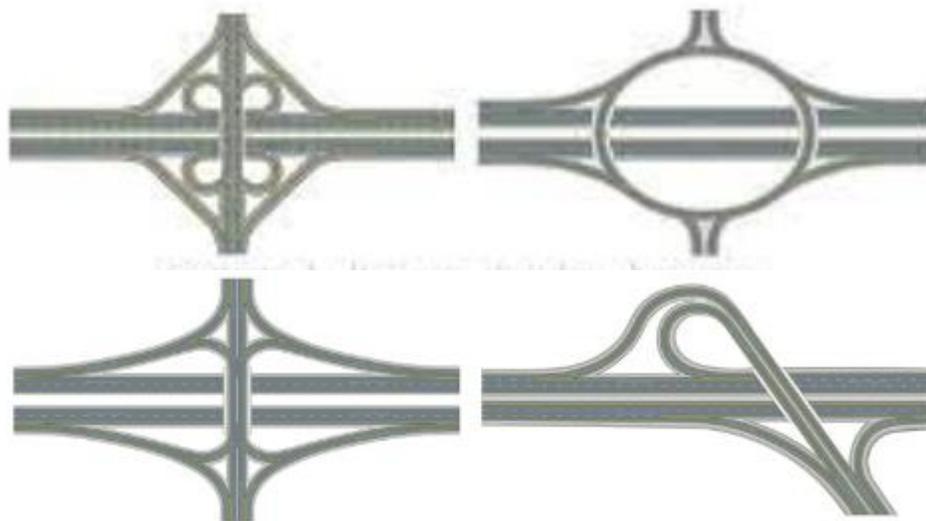
(Type d'échangeurs autoroutiers à quatre voies) : il s'agit de l'échangeur le plus rencontré en France, particulièrement pratique car il s'adapte parfaitement à tous les terrains.

### 2.2.2. Echangeurs mineurs : raccordement autoroute - route

Exemple :

- Les échangeurs Demi-Trèfle
- Les échangeurs en trompette

Appelés "échangeurs simples" ou "échangeurs en T") : ces infrastructures assurent la jonction entre une autoroute qui se termine, et une autre qui commence, il permet également d'accéder aux voies de sortie. [2]



*Figure 2.2 : Types des échangeurs.*

### 2.3. Constituants des échangeurs

Les échangeurs sont constitués des éléments suivants :

- Les bretelles est une voie qui permet le transfert du trafic d'une route à une autre. Au sens large, est une chaussée de transfert dans un échangeur de circulation entre voies à niveaux différents ou entre voies parallèles. Les bretelles se terminent à une de leurs extrémités par une voie de décélération et à l'autre par voie d'accélération.

- Le carrefour plan. On trouve les carrefours plans seulement sur les raccordements autoroute-route ordinaire, leur aménagement doit tenir compte des facteurs de sécurité et commodité.
- Le pont (passage supérieur ou inférieur). [3]

#### 2.4. Rôle d'un échangeur

L'échangeur a pour rôle d'assurer la continuité des réseaux autoroutiers et de desservir plusieurs directions en même temps en distribuant les flux dans les différentes directions selon l'ordre d'importance et dans des bonnes conditions de confort et de sécurité tout en évitant les points de conflits qui peuvent être la cause de graves accidents, et les points d'arrêt provoquent des pertes de temps. [3]

#### 2.5. Avantage de l'échangeur

Les avantages de l'échangeur sont :

- Facilité aux usagers un déplacement dans de bonne condition de confort et de sécurité
- Evite les points de conflits qui peuvent être la cause de graves accidents
- Evite les points d'arrêt qui provoque des pertes de temps considérable
- Evite les contraintes d'arrêt et de reprise
- Assurer la continuité du réseau autoroutier [9]

#### 2.6. Inconvénients de l'échangeur

L'inconvénient majeur, entraîne un investissement financier volumineux, c'est pour quoi sont utilisation comme solution aux problèmes d'un carrefour justifié.

### 3. les ponts

#### 3.1. Définitions des ponts :

D'une façon générale, un pont est un ouvrage en élévation, construit in situ, permettant à une voie de circulation (dite « voie portée ») de franchir un obstacle naturel ou artificiel : rivière, vallée, route, voie ferrée, canal, etc. La voie portée peut être une voie routière (pont routier), ...etc.



*Figure 2.3: Pont Routier*

### 3.2. Quelques types du pont :

On distingue les différents types d'ouvrages suivants :

- Ponceau ou dalot : pont de petites dimensions (quelques mètres).
- Viaduc : ouvrage de franchissement à grande hauteur (figure 2.5), généralement constitué de nombreuses travées, comme la plupart des ouvrages d'accès aux grands ponts.
- Passerelle : ouvrage destiné aux piétons (figure 2.6), exceptionnellement aux canalisations ou au gibier. [4]



*Figure 2.4: Les viaducs ferroviaires en France*



*Figure 2.5: viaduc*



(A)



(B)

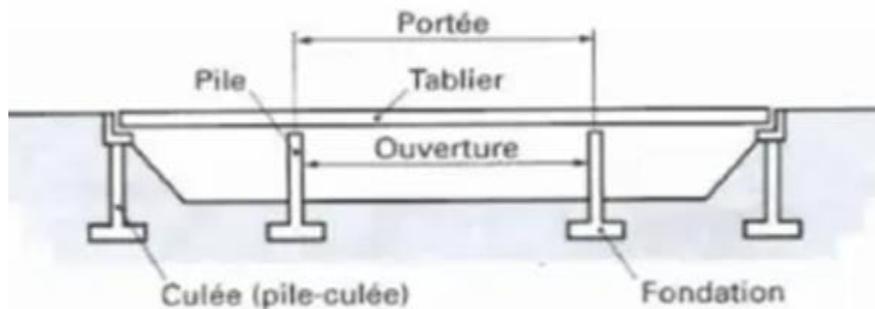


(C)

*Figure 2.6 : (a), (b) et (c) Passerelles*

### 3.3. Eléments constitutifs d'un pont

- ✚ **Fondations** : Transmettent les charges des appuis vers le sol.
- ✚ **Portée** : Longueur d'une travée.
- ✚ **Travée** : Partie du pont compris entre deux appuis adjacents.
- ✚ **Tablier** : Elément résistant supportant les voies de circulation.
- ✚ **Appuis** : Culées et Piles, assurent la liaison entre le tablier et les fondations.
- ✚ **Ouverture** : Distance libre entre parements de deux appuis adjacents. [5]



*Figure 2.7 : Les éléments d'un pont*

### 4. Les culées de pont

Le mot culé désigne le massif de maçonnerie qui équilibre une poussée sans le secours d'un contre poussée. En effet la culée sert d'appui d'extrémité au tablier. Elle transmet ses charges au sol par l'intermédiaire des fondations, et elle retient le remblai situé derrière (mur de soutènement) Assurant la liaison entre le pont et les remblais (ou les terrains naturel), les culées sont particulièrement sensibles à une mauvaise conception : en cas de comportement défectueux, les remèdes sont rares et coûteux. [6]

La configuration dans laquelle la superstructure du pont est supportée sur une semelle répartie au-dessus de la zone de sol renforcée peut être plus économique que les culées soutenues par des fondations profondes à travers la zone de sol renforcée, et doit être prise en compte lorsque le tassement projeté des fondations et du volume renforcé est rapide / petit ou essentiellement complet, avant l'érection des poutres du pont. [12]



*Figure 2.8 : Culée de pont*

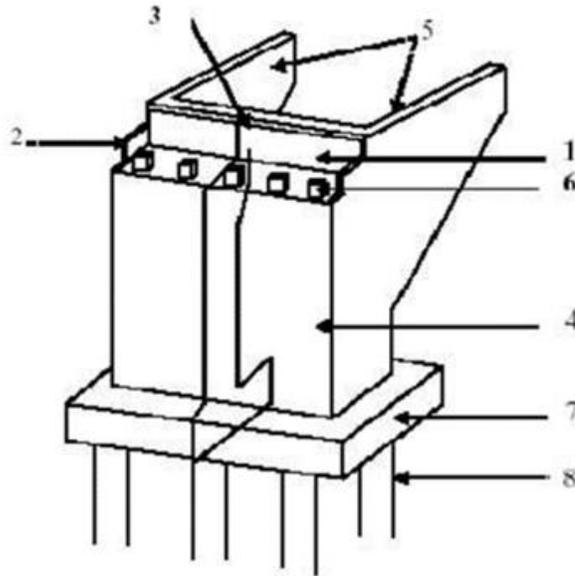
#### 4.1. Les différents types de culées sont :

- **Les culées enterrées :**

Les culées enterrées, dont la structure porteuse est noyée dans le remblai d'accès à l'ouvrage, sont les plus répandues. Elles assurent essentiellement une fonction porteuse puisqu'elles sont relativement peu sollicitées par des efforts horizontaux de poussée des terres.

- **Les culées remblayées ou Culée à mur front :**

Les culées remblayées jouent le double rôle de soutènement et de structure porteuse. Le tablier s'appuie sur un sommier solidaire d'un mur de front massif qui soutient les terres du remblai. Une telle culée est généralement fondée superficiellement, compte tenu des efforts horizontaux importants, ce qui limite son emploi au cas des très bons sols. [7]



*Figure 2.9 : Culée remblayée*

1. Mur garde grève.
2. Muret cache.
3. Corbeau arrière.
4. Mur de front ou frontal.
5. Mur en retour (mur en aile).
6. Des d'appui.
7. Semelle.
8. Pieu.

Et il existe encore les culées creuses, les culées en terre armée ; les culées contrepoids.

#### 4.2. Eléments constitutifs d'une culée :

- Tête de culée.
- Mur de front.
- Mur en retour ou en ails.
- Dalle de transition. [6]

#### 4.3. Fonction des culées

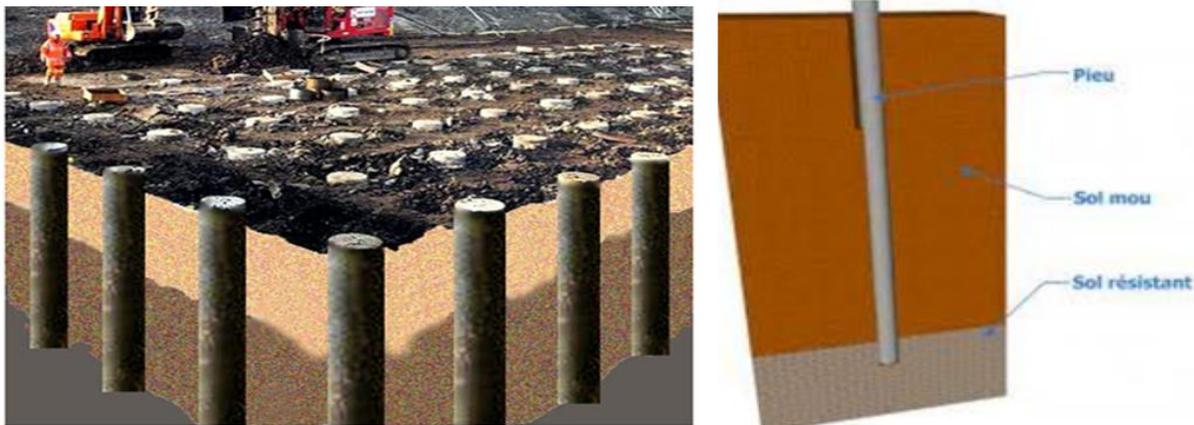
- La fonction technique de la culée est qu'elle permet l'accès à l'intérieur de l'ouvrage pour la visite d'inspection et l'hébergement de la chambre de tirage pour les conduites et les canalisations qui passent dans le tablier.

- La limitation des déplacements horizontaux en tête, de façon à ne pas entraver le fonctionnement des appareils d'appui.
- La limitation des déplacements verticaux (tassements).
- Une bonne transmission des efforts au sol de fondation. [7]

## 5. Les pieux

Les pieux sont l'une des formes les plus courantes de fondations profondes utilisées dans la construction.

Sont des éléments structuraux verticaux qui sont enfoncés dans le sol pour transférer les charges de la structure à une couche de sol plus profonde et plus résistante. Ils sont fabriqués à partir de différents matériaux, tels que le béton, l'acier, le bois ou les composites.



*Figure 2.10 : Fondation de l'atelier de construction des ailes de l'Airbus A320*

### 5.1. Différentes catégories des pieux :

Pour s'adapter aux différents besoins liés à la qualité du sol et à la nature des constructions, plusieurs techniques d'installations des pieux se sont développées :

#### 5.1.1. Les pieux battus :

Il s'agit de pieux façonnés à l'avance. Qu'ils soient en bois, en acier ou en béton, ils sont mis en place par battage ; l'enfoncement est obtenu par la chute d'une masse métallique (appelée mouton) sur la tête du pieu. Ce pieux ne nécessite pas d'excavation particulière.

### 5.1.2. Les pieux forés :

Il s'agit de pieux réalisés sur site après forage dans le sol. Contrairement aux pieux battus, les pieux forés impliquent donc une extraction du terrain en place.

On distingue plusieurs types de pieux forés :

#### 5.1.2.1. Les pieux tubés forés :

Le forage est ici fait au centre d'un tube déjà enfoncé dans le sol. On injecte du béton, avant d'extraire ce tubage qui a permis la protection des parois. Ce type de pieux est très utilisé lorsque la profondeur de forage s'étend en dessous du niveau de la nappe phréatique. Cette technologie performante trouve de nombreuses applications dans le génie civil.

#### 5.1.2.2. Les pieux forés simples :

Il s'agit de pieux de construction qui ne se placent qu'au-dessus du niveau de la nappe phréatique et pour lesquels aucune protection des parois n'est confectionnée.

#### 5.1.2.3. Les pieux à tarière creuse :

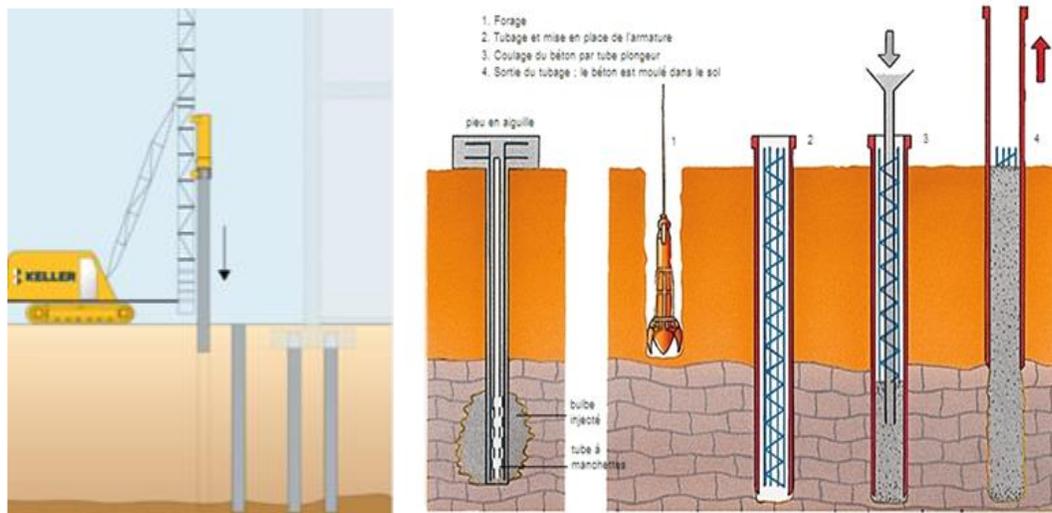
Il s'agit de pieux coulés au fur et à mesure du forage, par injection de béton dans la tarière (outil de forage). Ce procédé a été interdit par de nombreux Bureaux de Contrôle, car il fallait remonter l'outil de forage au fur et à mesure du bétonnage, et le moindre faux-mouvements pouvait entraîner la coupure du pieu par un éboulement de terrain.

#### 5.1.2.4. Les micropieux :

Également appelés pieux-aiguilles : Il s'agit de pieux de petit diamètre et à faible capacité portante. Ils sont principalement utilisés pour renforcer une construction existante, qui menace de glisser, ou pour maintenir une construction sur un sol relativement instable.

#### 5.1.2.5. Les pieux vissés :

Il s'agit de pieux installés par vissage direct dans le sol. La pointe du pieu est en forme d'hélice, qui permet de faire remonter la terre en dehors du trou. [10]



*Figure 2.11 : Pieux Préfabriqués Battus et Pieux coulés sur place.*

## 5.2. Classifications des Fondations sur Pieux :

Les fondations sur pieux sont classées selon la fonction, le matériau et le processus d'installation.

### 5.2.1. Selon fonction ou utilisation :

#### 5.2.1.1 Pieux muraux :

Dans cette application, de nombreux pieux individuels sont interconnectés pour former un mur qui contrebalance la pression latérale et les forces verticales minimales. Les pieux muraux ou les palplanches sont utilisés comme retenues pour le sol meuble et parfois l'eau dans de nombreuses applications temporaires et permanentes telles que la construction de batardeaux, de voies navigables, de protection des rives, de tranchées, etc.

**5.2.1.2 Pieux porteurs :** Ces types de pieux sont utilisés pour transférer les charges verticales de la superstructure à travers des strates à faible capacité portante vers une couche solide de sol ou de roche.

Les pieux porteurs ont deux types selon la manière dont ils transmettent la charge :

- ✚ **Pieux porteurs d'extrémité :** l'extrémité inférieure du pieu repose ou est ancrée à une couche solide de sol ou de roche. Il agit exactement comme une colonne.

- ✚ **Pieux de friction** : il développe la stabilité à partir du frottement créé entre toute la surface du pieu contre le sol environnant. Le pieu de friction est idéal pour les sols tels que l'argile raide.
- ✚ **Pieux d'amélioration du sol** : Empilés à des intervalles déterminés, ils augmentent la densité et la capacité portante du sol en comprimant ou en compactant tout en agissant également comme un groupe de pieux à friction.

### 5.2.2. Selon matériel :

- Pieux en béton armé.
- Pieux en acier.
- Pieux composites.

Et Selon le processus d'installation.

### 5.3. Critères de Sélection du Type de Fondation sur Pieux Approprié :

La sélection du type de pieu est une procédure compliquée qui implique la formulation, la validation du site et l'optimisation de la conception. Elle nécessite une étude méticuleuse et une étroite collaboration entre l'expertise en géotechnique et en ingénierie structurelle. De nombreux facteurs d'influence doivent être pris en compte dans ce processus, ils sont les suivants :

- **Aspects généraux**
  1. Budget
  2. Équipement disponible
  3. Environs ou environnement (c'est-à-dire ville non résidentielle, urbaine ou encombrée)
- **Aspects techniques**
  1. Propriétés du sol
  2. Type et ampleur des charges superposées
  3. Type d'exposition (c.-à-d. offshore, onshore, structure hydraulique)
  4. Profondeur du sol porteur
  5. Profondeur du niveau de l'eau et intensité de l'écoulement souterrain

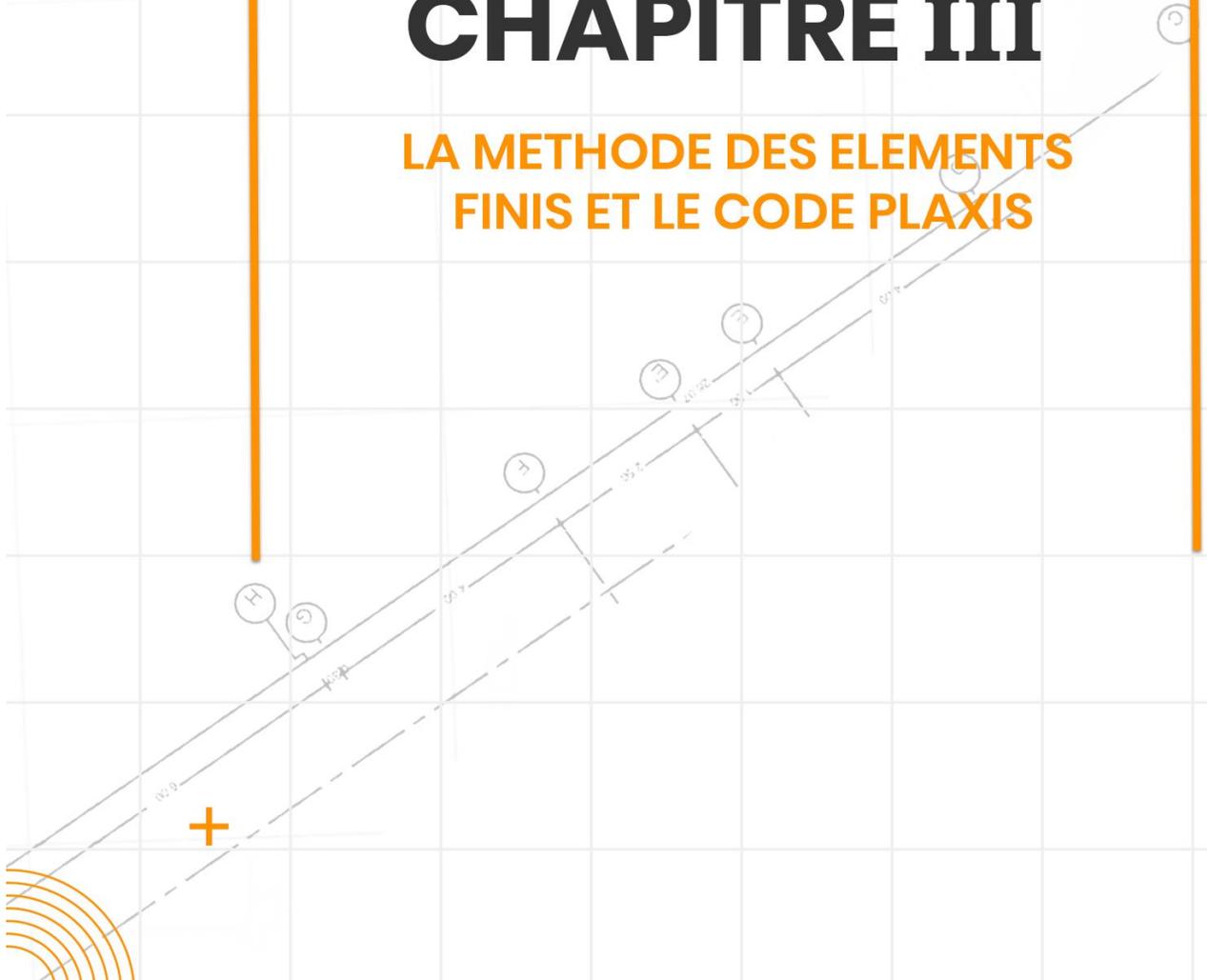
## 6. Conclusion

Nous avons envisagé dans ce chapitre les différentes formes et modèles des échangeurs et les différents types des ponts et nous pouvons dire que le pont est une composante essentielle dans un projet d'échangeur, aussi on a parlé de l'importance de culée pour construire un pont ainsi sur les différents systèmes de fondation appliqués pour les ponts.



# CHAPITRE III

## LA METHODE DES ELEMENTS FINIS ET LE CODE PLAXIS



## 1. Introduction

Les méthodes du calcul classiques peut être utilisées pour résoudre des problèmes dans les cas les plus simples (si le problème présente un comportement élastique linéaire). Mais le sol a un comportement élasto-plastique non linéaire et pour analyser et résoudre ces problèmes numériques avancés, il est souvent recommandé d'utiliser un programme informatique basé sur la méthode des éléments finis (MEF).

L'utilisation de la MEF dans les géotechniques remonte aux années soixante. Aujourd'hui, cette méthode est largement progressée ; cependant plusieurs difficultés ont été constatées telles que l'homogénéité, le comportement déplacements-contraintes non-linéaire, les conditions aux limites compliquées et autres considérations.

## 2. Description de la méthode des éléments finis

Sans s'approfondir dans son monde, on peut mentionner que la MEF est une technique pour trouver des solutions numériques approximatives pour les équations différentielles partielles ainsi que pour les équations intégrales. Cela peut se faire en éliminant complètement les équations différentielles ou en les rendant aux équations différentielles ordinaires qui peuvent être résolues par d'autres techniques (méthode d'Euler, etc.).

Le concept de base dans la méthode des éléments finis consiste à diviser un modèle compliqué en un nombre fini d'éléments pour lesquels les déformations et les contraintes peuvent être résolues numériquement. Ces éléments sont alors connectés par des nœuds, à chaque nœud, existe un ou plusieurs degrés de liberté où la quantité de fonctions est décrite. En résolvant les valeurs aux nœuds, on peut calculer les déplacements et les contraintes dans chaque élément [Ottosen et Peterson, 1992].

La méthode des éléments finis consiste à utiliser une approximation simple des variables inconnues pour transformer les équations aux dérivées partielles en équation algébrique. Elle fait appel aux trois domaines suivants :

- Sciences de l'ingénieur pour construire les équations aux dérivées partielles ;
- Méthodes numériques pour construire et résoudre les équations algébriques ;
- Programmation et informatique pour exécuter efficacement les calculs sur l'ordinateur.

## 2.1. Signalisation d'un élément fini

C'est une subdivision de la zone d'analyse en une forme géométrique simple (triangle, quadrilatère, tétraèdre, hexaèdre, etc.), afin de faciliter le calcul des propriétés mécaniques du sol dans cette zone. Chaque élément fini est délimité par des nœuds qui ne servent de points de référence pour définir les caractéristiques géométriques et mécaniques de l'élément fini.

Le signalement d'un élément fini comprend les points suivants :

**A) La géométrie :** un élément fini peut être 1D, 2D, 3D. Sa forme est simple (segment de droite ou de courbe, triangle ou quadrilatère, tétraèdre prisme hexaèdre).

**B) Le matériau :** le matériau de l'élément est défini par une loi de comportement (loi de hooke isotrope et ses propriétés mécaniques  $E$  et  $\nu$ ).

**C) Les nœuds :** ils définissent la géométrie et assurent la connections des éléments.

**D) les degrés de liberté :** pour tout élément fini, on doit faire le choix du champ de déplacement.

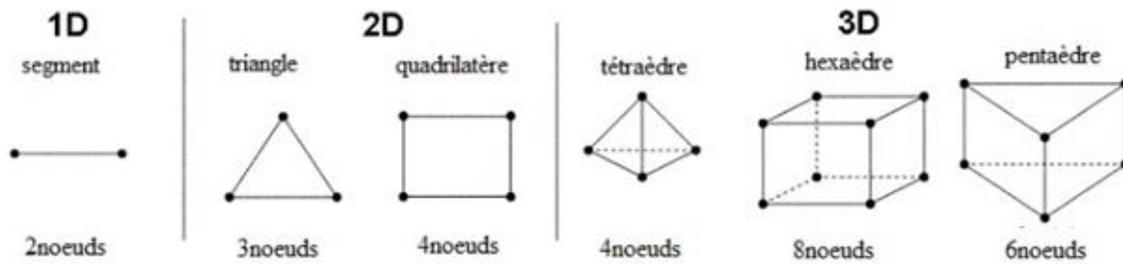
**E) les forces nodales :** à travers des nœuds transitant des forces associées aux degrés de liberté. Les unes sont des réactions internes, les autres sont des forces dues aux charges appliquées à l'élément. [13]

## 2.2. Techniques de résolution

On découpe une structure en élément de forme donnée : triangle, quadrilatère, tétraèdre ... Puis on cherche des solutions de fonctions données sur chaque élément et non plus sur la structure complète comme Ritz ou Gallerkine. La méthode par éléments finis correspond donc à une méthode de Ritz ou Gallerkine par morceau. L'ensemble de tous les éléments constitue le Maillage.

## 2.3. Eléments géométriques

L'ensemble des éléments ou maillage doit constituer un recouvrement du domaine de calcul. En 2D, les éléments utilisés sont des triangles et des quadrangles. En 3D, des tétraèdres, des prismes, des cubes et parfois des pyramides. Si d'autres polygones sont possibles leurs utilisations restent confidentielles.



*Figure 3.1 : Elément Géométrique. [14]*

Les différents éléments du maillage sont soumis à quelques contraintes puisqu'ils doivent constituer un recouvrement du domaine. Ainsi, deux éléments adjacents du maillage ont en commun un sommet ou une surface. [14]

#### 2.4. Calculs par la MEF

##### Elle permet

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

##### Elle nécessite

- La définition de la géométrie du problème, pour que les frontières du calcul n'influencent pas sur les résultats.
- Le choix d'une loi de comportement du sol, de type Mohr-Coulomb, Duncan, Cam-Clay, ...etc.
- Les caractéristiques des ouvrages et des éléments d'interface pour introduire l'interaction sol-structures et les conditions hydrauliques.
- Les caractéristiques des butons ou des tirants d'ancrage.
- L'état initial des contraintes et des pressions interstitielles. [15]

### 3. Les principaux logiciels utilisés de MEF

Il existe plusieurs logiciels aux éléments finis utilisés pour les calculs des ouvrages en interaction avec le sol. Chaque logiciel aux éléments finis a ses propres algorithmes, méthodes de résolution et paramètres de modélisation. Les paramètres géotechniques ne sont pas les mêmes pour chaque méthode de calcul.

Les principaux logiciels utilisés sont :

- **CESAR (LCPC)** : Logiciel 2D ou 3D, spécialement utilisé pour les tunnels ;
- **GROUP** : logiciel développé par Reese [Reese et al., 1996] ;
- **ABAQUS** : un programme en éléments finis offert par le groupe américain Hibbitt, Karlsson et Sorensen (HKS)
- **PLAXIS** : logiciel hollandais développé par l'équipe du Pr. Vermeer, logiciel 2D dédié à la géotechnique ; nous utilisons le plaxis 2d dans notre travail. [13]

### 4. Présentation de logiciel Plaxis

L'analyse de projets géotechniques est possible grâce à de nombreux codes éléments finis. L'ingénieur ayant de l'expérience en ce domaine sait que le poids des hypothèses permettent le passage de la réalité au modèle est difficile à évaluer. Il sait que le jargon éléments finis est parfois rebutant-il souhaiterait ne pas avoir à intervenir sur la numérotation des nœuds, des éléments, sur certains choix réservés au numéricien. Il voudrait disposer du code sur le PC gérant sa bureautique et sa technique quotidiennes, afin de faire une étude paramétrique des problèmes délicats. Il exige avant tout que ses journées ne soient pas encombrées par de laborieuses entrées de données et interprétations de fichiers. [16]

#### 4.1. Le code éléments finis PLAXIS

Conçu par des géotechniciens numériciens, le code éléments finis PLAXIS représente certainement un optimum actuel sur les plans scientifique et pratique en l'analyse pseudo-statique 2D. Scientifiquement, c'est un outil d'analyse non linéaire en élasto-plasticité non standard (5 paramètres), avec prise en compte des pressions interstitielles (et même consolidation linéaire), doté de méthodes de résolution et d'algorithmes robustes, éprouvés, ainsi que de procédures de choix automatique évitant des choix délicats à l'opérateur peu averti. Bien que très fiable sur le plan numérique, le code fait appel à des éléments de haute précision (triangles à 15 nœuds), ainsi qu'à des processus de pilotage de résolution récents (méthode de longueur d'arc). Du point de vue

pratique, le système de menus arborescents à l'écran rend l'utilisation souple et agréable, car l'opérateur ne s'encombre pas l'esprit outre mesure.

Le recours aux manuels devenant rare, ceux-ci sont de volumes réduits, faciles à consulter. L'ensemble des options par défaut (condition aux limites) rend la mise en données aisée et rapide. Enfin, les options simplifiées (initiation des contraintes, pressions interstitielles) permettent d'aller droit au but (prévoir le comportement d'un ouvrage), quitte à réaliser ultérieurement, avec le même code et les mêmes données, un calcul affiné. [16]

#### **4.2. Options par défaut et solutions approchées**

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

Ce système est inséparable du traitement à partir d'un menu arborescent. Chaque branche du menu est évidemment figée, car elle réalise une tâche précise, bien définie, mais la diversité des branches en fait globalement un outil extrêmement souple.

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

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

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

particulièrement intéressante (et réaliste) dans le cas d'un modèle hétérogène de surface libre presque horizontale (paroi moulée dans un sol mou par exemple).

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

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

Le coefficient de sécurité est une notation un peu magique en géotechnique, puisqu'il résume en une seule information une quantité considérable de données. L'approche classique évalue généralement ce nombre selon la théorie de l'équilibre limite, supposant une réduction proportionnelle généralisée de la résistance mécanique des matériaux impliqués, ce qui ne constitue manifestement pas un scénario réel de rupture. C'est la même approche, adaptée aux éléments finis élasto-plastiques, qui préside à l'évaluation du coefficient de sécurité dans PLAXIS.

Le critère de rupture est ici qualitatif, et laissé à l'appréciation de l'observateur ; en tout état de cause, il est fondé sur le niveau de déplacement d'un point de contrôle lié à l'ouvrage étudié. Le champ de déplacement obtenu est évidemment tout à fait fictif.

Un calcul par élément finis fournit une masse imposante de résultats : Des résultats directement utiles au projeteur : déplacements, contraintes, pressions interstitielles à un stade donné du chargement, et des résultats plus mathématiques concernant le déroulement du processus de calcul proprement dit.

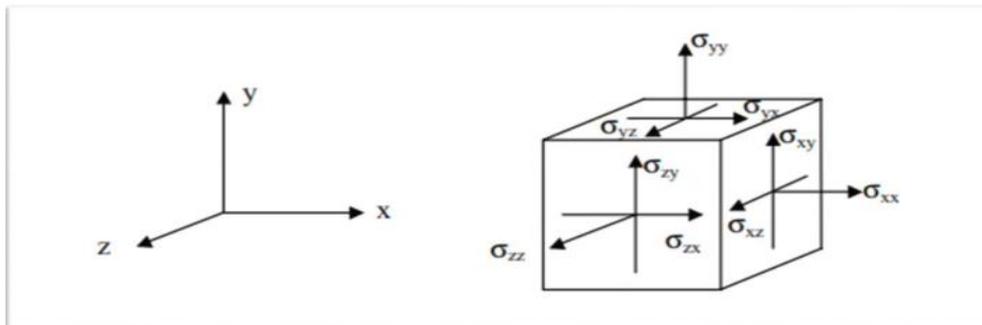
L'ensemble de ces résultats est accessible, selon que l'on est intéressé par l'un ou l'autre aspect, c'est également un système de menu arborescent qui permet de sélectionner les informations souhaitées. [16]

### 4.3. Unités et conventions de signe

#### 4.3.1. Conventions de signe

La génération d'un modèle d'éléments finis à deux dimensions avec PLAXIS est basée sur un modèle géométrique. Ce modèle géométrique est créé dans le plan (x, y) du système de coordonnées global (Figure 3.2), alors que la direction z est perpendiculaire à ce plan. Dans le système de coordonnées global, la direction z positive pointe vers l'utilisateur. Bien que PLAXIS version 8 soit un programme 2D, les contraintes sont basées sur un système de coordonnées cartésiennes 3D, indiqué sur la figure 3.2. Dans une analyse en déformations planes, correspond à la contrainte perpendiculaire au plan de la coupe.

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



*Figure 3.2 : Système de coordonnées et définition des composantes de contrainte positives [17]*

Dans tous les résultats, les contraintes et les forces de compression, incluant les pressions interstitielles, sont comptées négativement, alors que les contraintes et les efforts de traction sont comptés positivement. La Figure 3.2 indique les directions de contrainte positives. [17]

### 4.3.2. Unités

Dans toute analyse, il est important d'adopter un système d'unités cohérent. Au début de la définition de la géométrie, l'utilisateur doit choisir un jeu d'unités fondamentales convenable dans une liste d'unités standards. Les unités fondamentales comprennent des unités de longueur, de force et de temps. Elles sont définies dans la fenêtre General settings du programme Input. Le tableau 1 donne un aperçu de toutes les unités disponibles, dont celles [par défaut], et des facteurs de conversion avec les unités par défaut.

Toute saisie de donnée ultérieure devra être conforme au système d'unités choisi, et les résultats devront être interprétés par rapport au même système. A partir du jeu d'unités fondamentales, PLAXIS indique généralement l'unité appropriée pour un paramètre particulier après la case de saisie ou, dans le cas de tableaux, au-dessus de la colonne correspondante. Les risques d'erreur dus à des données saisies dans de mauvaises unités sont donc réduits. Dans tous les exemples présentés dans le manuel de PLAXIS, ce sont les unités par défaut qui sont utilisées. [17]

**Tableau 3.1** : Unités disponibles avec leurs facteurs de conversion vers les unités [17]

Longue conversion	Force conversion	Temps conversion
<b>mm =0.001m</b>	<b>N =0.001kN</b>	<b>s (sec) = 1/86400 jour</b>
<b>[m] =1m</b>	<b>[kN] =1kN</b>	<b>min = 1/1440 jour</b>
<b>In(pouce) =0.0254</b>	<b>MN =1000kN</b>	<b>hr = 1/24 jour</b>
<b>ft(pied)=0.3048</b>	<b>lb (livre) =0.0044482kN</b>	<b>[jour] = 1 jour</b>
	<b>klb (kilolivre)=4.4482kN</b>	

Par commodité, les unités des quantités couramment utilisées sont indiquées ci-dessous dans deux jeux d'unités différents :

		<b>Standard</b>	<b>autre</b>
<b>Unités de base :</b>	Longueur	mètre [m]	pied [ft]
	Force	kilonewt [kN]	kilo livre [klb]
	Temps	jour [jour]	seconde [sec]
	Géométrie	Coordonnées [m]	[ft]
	Déplacements	[m]	[ft]
<b>Propriétés des matériaux:</b>	Module d'Young	[kPa] [kN/m <sup>2</sup> ]	[kips] = [klb/sq ft]
	Cohésion	[kPa]	[kips]
	Angle de frottement	[deg.]	[deg.]
	Angle de dilatance	[deg.]	[deg.]
	Unité de poids	[kN/m <sup>3</sup> ]	[klb/cu ft]
	Perméabilité	[m/jour]	[ft/sec]
	<b>Forces &amp; contraintes :</b>	Charges ponctuelles	[kN]
Charges linéiques		[kN/m]	[klb/ft]
Charges surfaciques		[kPa]	[kips]
Contraintes		[kPa]	[kPa]

Les unités ne constituent généralement une référence que pour l'utilisateur mais, jusqu'à un certain point, le changement des unités de base dans les General settings entraînera une conversion automatique des données déjà saisies dans les nouvelles unités.

Ceci s'applique aux caractéristiques des matériaux dans le programme Input. Cela ne s'applique pas aux données liées à la géométrie, telles que les données géométriques, les surcharges, les déplacements imposés, les niveaux de nappe phréatique ou aux valeurs extérieures au programme Input. Si l'utilisateur veut changer de système d'unités dans un projet existant, il doit modifier toutes les données géométriques concernées manuellement et relancer tous les calculs. Dans une analyse en déformation plane, les forces calculées représentent des forces par unité de longueur dans la direction perpendiculaire au plan de l'étude.

Par contre, dans le cas d'une analyse axisymétrique, les forces calculées (Force-X et Force-Y) sont celles qui agissent sur le contour d'un cercle qui sous-tend un angle d'1 radian. Pour obtenir les forces correspondant au problème à traiter, les forces calculées doivent être multipliées par un facteur 2p.

Tous les autres résultats pour les problèmes axisymétriques sont donnés par unité de largeur et non par radian. [17]

#### 4.4. Procédure D'entrée Des Données

Dans PLAXIS, les données sont saisies par une alternance de clics et mouvements de souris, et grâce à l'utilisation du clavier.

De façon générale, on peut faire la distinction entre quatre types de données :

La définition des objets géométriques	(par ex. : dessiner une couche de sol)
La saisie de texte	(par ex. : entrer un nom de projet)
La saisie de valeurs	(par ex. : entrer une masse volumique)
Les sélections	(par ex. : choisir un modèle de sol)

La souris est généralement employée pour les dessins et les sélections, alors que le clavier sert à saisir texte et valeurs. Les procédures de définition de données sont décrites en détail dans la section 2.3 du Tutorial Manual. [17]

#### 4.5. Aide

Pour informer l'utilisateur des différentes options et caractéristiques du programme, l'interface du logiciel est munie d'une aide en ligne. L'aide générale peut être activée en sélectionnant les options du menu Help. L'aide contextuelle est activée en cliquant sur le bouton Help dans une fenêtre ou en appuyant sur la touche F1 du clavier. Un clic sur le bouton Help ouvre une fenêtre d'information générale sur une fenêtre ou caractéristique particulière, alors que la touche F1 fournit des informations spécifiques sur un paramètre particulier.

La plupart des fonctionnalités du programme sont accessibles par des icônes dans les différentes barres d'outils. Quand le pointeur de la souris est placé sur une icône pendant plus d'une seconde, une description succincte de la fonction apparaît dans un drapeau jaune. [17]

#### 4.6. L'entrée Des Données De Prétraitement

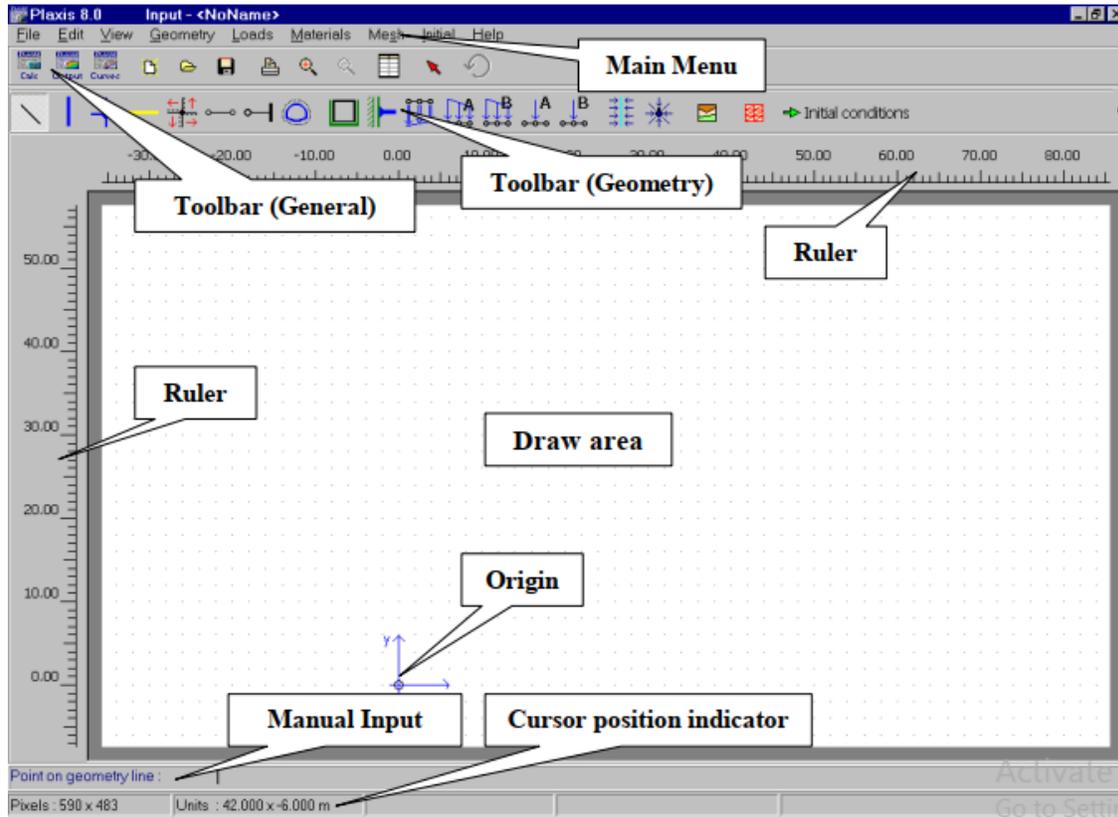
##### 4.6.1. Le Programme D'entrée Des Données (Input)



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, pour générer le maillage d'éléments finis correspondant et pour générer les conditions initiales.

La génération des conditions initiales est faite dans un menu spécifique du programme Input (mode conditions initiales). La description se concentre tout d'abord sur la création d'un modèle géométrique et d'un maillage d'éléments finis (mode de création géométrique). [17]



*Figure 3.3 : Fenêtre principale du programme d'entrée des données (Input) (mode de création géométrique). [17]*

Au début du programme Input, une boîte de dialogue apparaît ; on peut y choisir d'ouvrir un projet existant ou d'en créer un nouveau. Si "**nouveau projet**" (New project) est sélectionné, la fenêtre des réglages généraux (General settings) apparaît ; tous les paramètres de base du nouveau projet peuvent être saisis.

Si l'utilisateur choisit d'ouvrir un projet existant (Existing project) la boîte de dialogue permet une sélection rapide de l'un des quatre projets les plus récents. Si le projet voulu n'apparaît pas dans la liste, l'option <<<**More files**>>> peut être utilisée. Le gestionnaire de fichiers apparaît alors, ce qui permet à l'utilisateur d'avoir un aperçu de tous les répertoires accessibles et de sélectionner le fichier de projet PLAXIS souhaité (\*.plx).

Après le choix d'un projet existant, le modèle géométrique correspondant est présenté dans la fenêtre principale.

La fenêtre principale du programme Input contient les éléments suivants (voir *Figure 3.3*).

#### **Le menu d'entrée des données (Main menu) :**

Le menu Input contient tous les éléments sur les données et les opérations du programme Input. La plupart de ces éléments sont aussi accessibles par des boutons dans la barre d'outils. [17]

#### **La barre d'outils générale (Tool bar (general)) :**

La barre d'outils contient les icônes relatives aux actions générales comme les opérations sur le disque, l'impression, les zooms ou le choix d'objets. Elle contient aussi les icônes qui servent à lancer les autres modules de PLAXIS (Calculation, Output et Curve). [17]

#### **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. [17]

#### **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. [17]

#### **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. 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. [17]

**✚ 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. [17]

**✚ 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). [17]

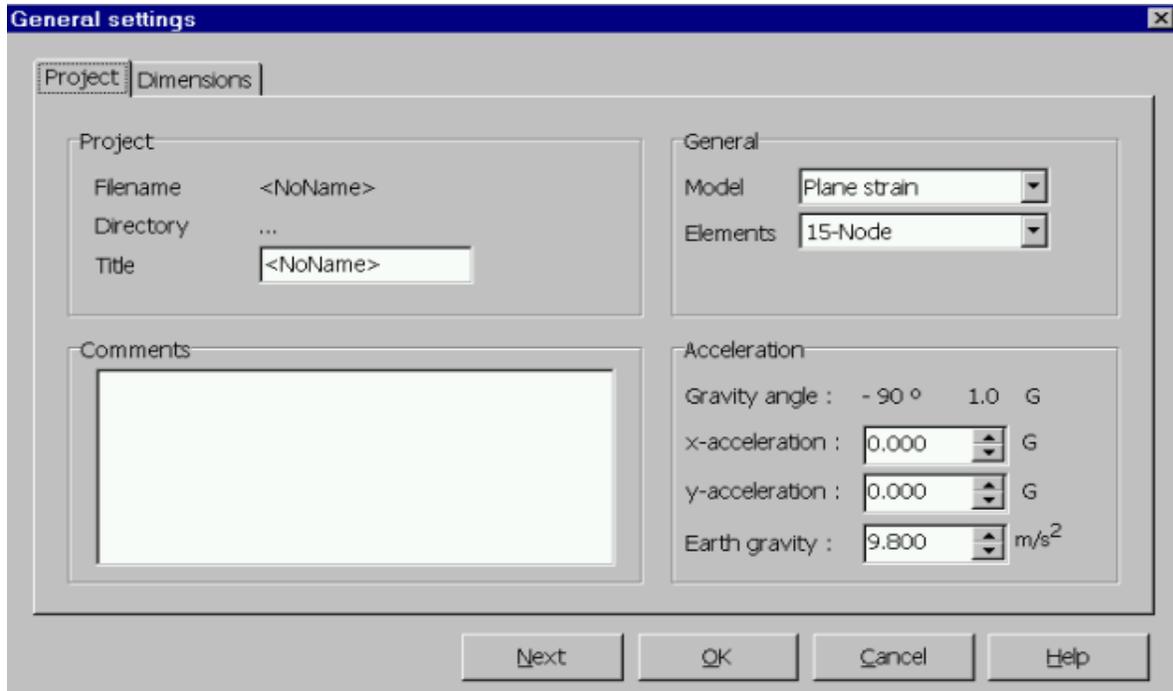
**✚ Indication de la position du curseur :**

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.

**4.6.2. Réglages Généraux**

La fenêtre des réglages généraux (General settings) apparaît lors de la création d'un nouveau projet et peut ensuite être ouverte depuis le menu File. Cette fenêtre contient les onglets de projet (Project) et de dimensions (Dimension). L'onglet Project contient le nom du projet, une description, le type de projet et les données d'accélération.

L'onglet Dimensions contient les unités fondamentales de longueur, de force et de temps et les dimensions de la table à dessin. [17]



*Figure 3.4 : Fenêtre de réglages généraux (onglet Project). [17]*

#### **✚ Les éléments :**

L'utilisateur doit sélectionner des éléments triangulaires à 6 ou 15 nœuds (**Figure 3.4**) pour modéliser les couches de sol et autres éléments de volume. L'élément par défaut est le triangle à 15 nœuds. Il fournit une interpolation du quatrième ordre pour les déplacements et l'intégration numérique se fait sur douze points de Gauss (points de contrainte).

Pour le triangle à 6 nœuds, l'interpolation est d'ordre deux et l'intégration numérique se fait sur trois points de Gauss. Le type d'éléments pour les éléments de structure est automatiquement compatible avec le type d'éléments de sol choisi. [17]

#### **✚ Gravité et accélération :**

Par défaut, l'accélération de la gravité terrestre,  $g$ , est fixée à  $9,8 \text{ m/s}^2$  et la direction de la gravité coïncide avec l'axe des  $y$  négatifs, c'est-à-dire une orientation de  $-90^\circ$  dans le plan  $(x, y)$ . La gravité est implicitement incluse dans les unités de poids spécifiées par l'utilisateur. De cette manière, la gravité est contrôlée par le coefficient de charge total relatif au poids des matériaux, SMweight.

En plus de la gravité normale, l'utilisateur peut prescrire une accélération indépendante pour modéliser des efforts dynamiques dans une analyse pseudo statique. Les valeurs saisies pour les composantes x et y de l'accélération additionnelle sont exprimées en fonction de l'accélération normale g et définies dans l'onglet Project de la fenêtre de réglages généraux (General settings). L'activation d'une accélération additionnelle dans les calculs est contrôlée par les coefficients de charge Maccel et SMaxcel.[17]

#### Les dimensions :

Au démarrage d'un nouveau projet, l'utilisateur doit spécifier les dimensions de la planche à dessin de manière à ce que le modèle géométrique à créer tienne dans ces dimensions. Celles-ci sont saisies dans l'onglet Dimensions de la fenêtre General settings.

Les dimensions de la planche à dessin n'influencent pas la géométrie elle-même. Elles doivent être modifiées si le projet est étendu, à condition que le projet existant tienne à l'intérieur des nouvelles dimensions. Le clic sur les règles en mode création de la géométrie est un raccourci pour accéder à la fenêtre de définition des dimensions de la géométrie dans la fenêtre General settings. [17]

#### 4.6.3. La Géométrie

La génération du modèle d'éléments finis commence par la création du modèle géométrique, qui est la représentation du problème réel à étudier. Un modèle géométrique consiste en des points, des lignes et des couches. Les points et les lignes sont définis par l'utilisateur, alors que les couches sont générées par le programme. En plus de ces composants de base, des éléments de structure et des conditions spéciales peuvent être ajoutés au modèle géométrique pour simuler le soutènement des tunnels, les écrans, les plaques, l'interaction sol-structure ou les chargements.

Il est recommandé de commencer la création du modèle géométrique par le dessin du contour. L'utilisateur peut, de plus, spécifier les limites de couches, les éléments de structure, les lignes séparant les étapes de construction, les charges et les conditions aux limites. Le modèle géométrique doit non seulement comporter la situation initiale, mais aussi les éventuelles étapes de construction à considérer dans les phases ultérieures.

Après la définition de la géométrie, l'utilisateur devra saisir les paramètres relatifs aux matériaux puis, assigner ces jeux de données aux éléments géométriques. Lorsque le modèle

géométrique est entièrement défini, et lorsque les propriétés de tous les éléments géométriques ont été affectées, le modèle géométrique est terminé et le maillage peut être généré. [17]

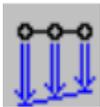
#### 4.6.3.1. Propriétés des éléments géométriques

La plupart des composants géométriques ont certaines propriétés qui peuvent être visualisées et modifiées depuis la fenêtre des propriétés des matériaux. Après avoir double-cliqué un élément géométrique, la fenêtre des propriétés correspondantes apparaît. Si plusieurs objets sont situés sous le point indiqué, une boîte de dialogue apparaît permettant de choisir l'élément dont on veut afficher les propriétés. [17]

#### 4.6.4. Chargements Et Conditions Limites

Le menu chargement (Loads) contient les options permettant d'introduire les surcharges, charges linéiques ou charges ponctuelles, ainsi que les déplacements imposés. Les chargements et les déplacements imposés peuvent être appliqués aux limites du modèle aussi bien qu'à l'intérieur de celui-ci.

##### 4.6.4.1. Déplacements Imposés



Les déplacements imposés (**Prescribed displacements**) sont des conditions spéciales qui peuvent être placées sur certaines lignes géométriques pour contrôler leurs déplacements. Les déplacements imposés peuvent être sélectionnés depuis le menu Loads ou en cliquant sur le bouton correspondant de la barre d'outils. La saisie des déplacements imposés est similaire à la création de lignes géométriques.

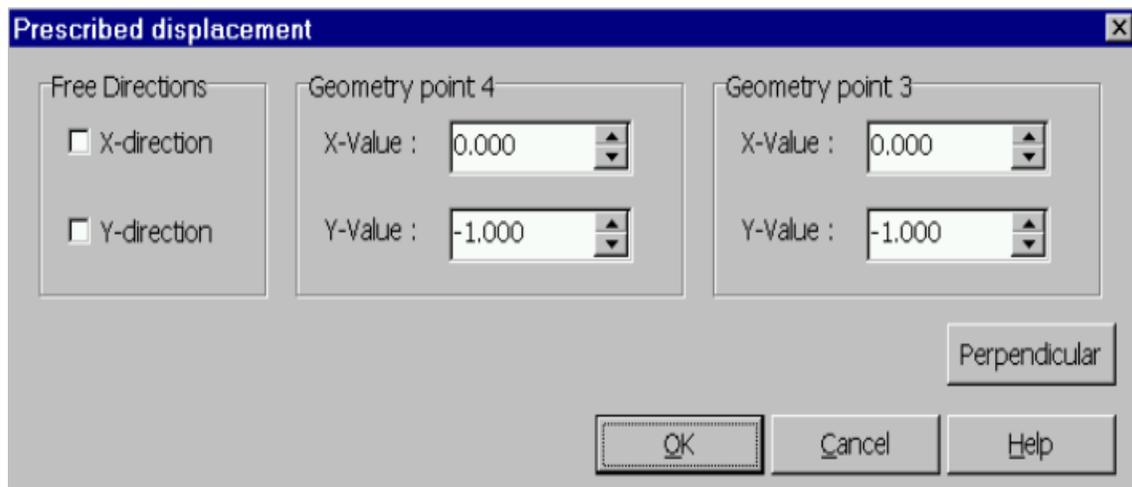
Par défaut, les valeurs des déplacements imposés sont fixées de manière à ce que la composante de déplacement verticale soit unitaire selon la direction des  $y$  négatifs ( $\mathbf{u}_y = -\mathbf{1}$ ), et que la composante horizontale soit libre.

Les valeurs des déplacements imposés peuvent être modifiées en double-cliquant sur la ligne géométrique correspondante et en choisissant '**Prescribed displacements**' dans la liste proposée. Apparaîtra alors une fenêtre de propriétés, dans laquelle les valeurs des déplacements imposés aux deux points extrêmes de la ligne géométrique pourront être changées. La distribution est toujours linéaire le long de la ligne.

Les valeurs saisies doivent être comprises entre -9999 et 9999.

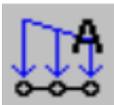
Dans le cas où l'une des directions de déplacement serait imposée alors que l'autre direction est libre, l'utilisateur pourra se servir des cases de contrôle dans le groupe Free directions. Le bouton perpendiculaire permet d'imposer un déplacement d'amplitude unité perpendiculairement à la ligne géométrique correspondante.

Pour des lignes géométriques internes, la direction de déplacement est la perpendiculaire en direction de la droite à la ligne géométrique (en considérant que la ligne va du premier point au deuxième). Pour les lignes géométriques en limite du modèle, la direction de déplacement est dirigée vers l'intérieur du modèle. [17]



*Figure 3.5 : Fenêtre de saisie des données pour les déplacements imposés (Prescribed displacements).[17]*

#### 4.6.4.2. Charges Réparties



La création de charges réparties dans un modèle géométrique est similaire à la création d'une ligne géométrique.

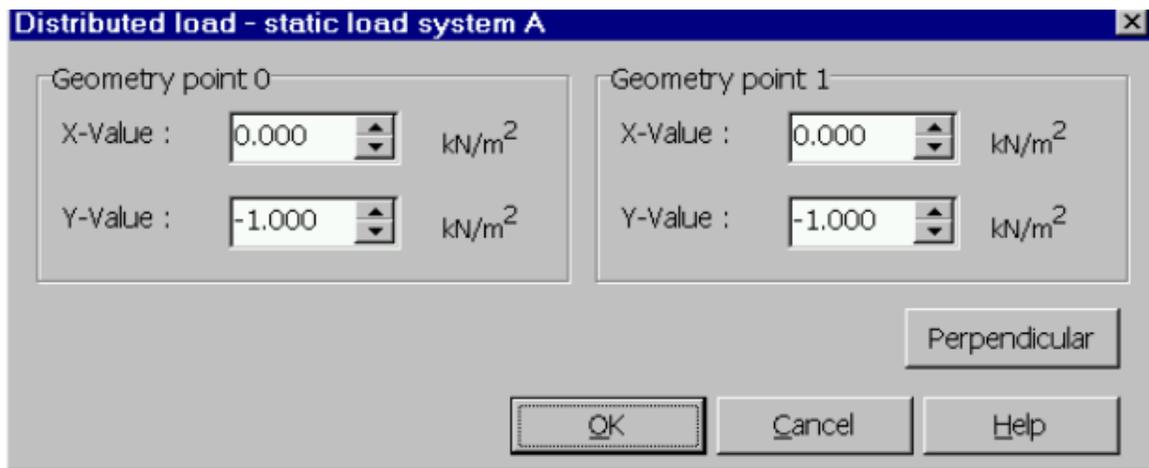
Deux systèmes de chargement (A et B) sont disponibles pour créer toute combinaison de charges réparties ou ponctuelles. Les systèmes de chargement A et B peuvent être activés indépendamment. Ils peuvent être sélectionnés à partir du menu Loads ou en cliquant sur le bouton correspondant de la barre d'outils.

Les valeurs des charges réparties sont spécifiées en force par surface (par exemple kN/m<sup>2</sup>). Les charges réparties peuvent avoir des composantes x et/ou y. Par défaut, en appliquant des

chargements sur les limites géométriques du modèle, le chargement sera égal à une unité de pression perpendiculaire à la ligne considérée.

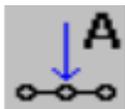
La valeur d'un chargement peut être modifiée en cliquant sur la ligne géométrique correspondante et en sélectionnant le système de chargement correspondant. La fenêtre de propriétés des charges réparties (**Distributed loads**) s'ouvre alors. Il est possible d'y spécifier les deux composantes du chargement pour chaque extrémité de la ligne du modèle géométrique.

La distribution est toujours linéaire le long de la ligne. [17]



*Figure 3.6 : Fenêtre de saisie des données pour les charges réparties (Distributed loads).[17]*

#### 4.6.4.3. Charges Ponctuelles

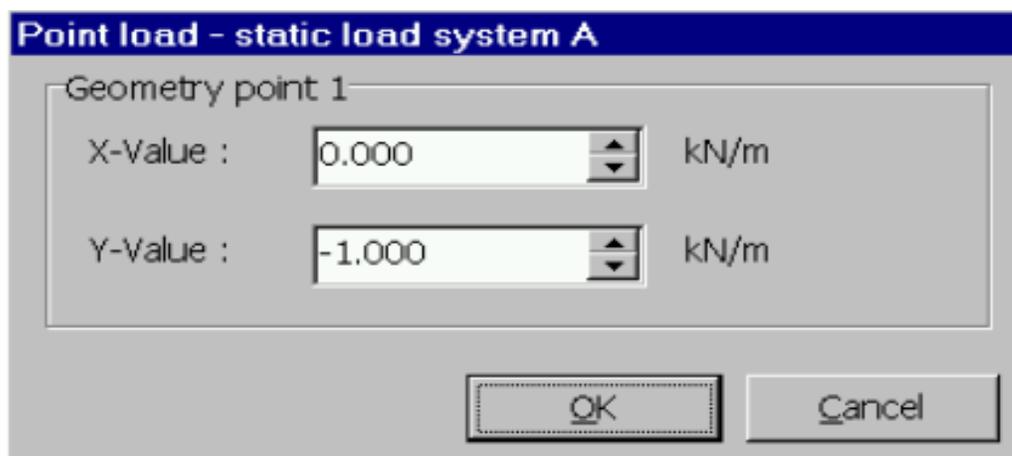


Cette option peut être utilisée pour créer des charges ponctuelles, qui sont en fait des chargements linéiques dans la direction perpendiculaire au plan.

Les valeurs des charges ponctuelles sont indiquées en force par unité de longueur (par exemple kN/m). Dans les modèles axisymétriques, ce sont en fait des chargements linéiques sur une portion de cercle de 1 radian. Dans ce cas, la donnée est également indiquée en force par unité de longueur, sauf si la charge ponctuelle est localisée en  $x = 0$ . Dans ce cas (axisymétrie, charge ponctuelle en  $x = 0$ ), la charge ponctuelle est réellement une charge ponctuelle et sa valeur est à saisir comme une force (par exemple en kN, même si la fenêtre indique encore comme unité des kN/m).

Notez que cette force n'agit que sur une portion de cercle de 1 radian. Pour dériver la donnée d'une situation réelle, la force ponctuelle réelle doit être divisée par  $2\pi$  pour obtenir la valeur de la force ponctuelle à appliquer au centre du modèle axisymétrique.

La création d'une charge ponctuelle ou linéique est similaire à celle d'un point géométrique. Deux systèmes de chargement (A et B) sont disponibles pour créer toute combinaison de charges réparties, linéiques ou ponctuelles. Les systèmes de chargement A et B peuvent être activés indépendamment. Ils peuvent être sélectionnés à partir du menu Loads ou en cliquant sur le bouton correspondant de la barre d'outils. [17]



**Figure 3.7 :** Fenêtre de saisie des données pour les charges ponctuelles

#### 4.7. Les modèles des matériaux

PLAXIS propose différents modèles qui permettent de simuler le comportement d'un sol. Les modèles et leurs différents paramètres sont décrits en détail dans le manuel **Material Models**.

Un commentaire rapide sur les modèles disponibles est donné ci-dessous : [17]

##### 4.7.1. Modèle élastique linéaire :

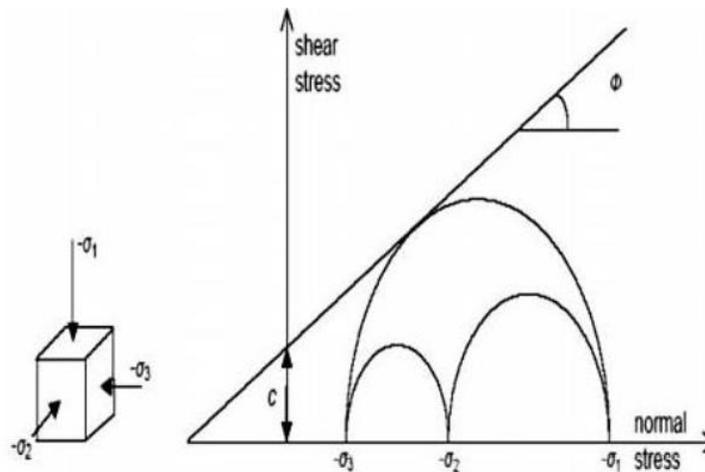
Ce modèle représente la loi de Hooke pour l'élasticité linéaire et isotrope. Le modèle comporte deux paramètres de rigidité élastique, le module d'Young,  $E$ , et le coefficient de Poisson,  $\nu$ . Le modèle linéaire élastique est très limité pour simuler le comportement d'un sol. Il est utilisé principalement pour des structures rigides massives placées dans le sol. [17]

#### 4.7.2. Modèle de Mohr-Coulomb :

Ce modèle bien connu est utilisé généralement comme une première approximation du comportement d'un sol. Ce modèle comporte cinq paramètres : le module d'Young,  $E$ , le coefficient de Poisson,  $\nu$ , la cohésion,  $c$ , l'angle de frottement  $\phi$ , et l'angle de dilatance  $\psi$ . [17]

Le modèle de Mohr-Coulomb demande la détermination de cinq paramètres. Les deux premiers sont  $E$  et  $\nu$  (paramètres d'élasticité).

Les deux autres sont  $c$  et  $\phi$ , respectivement, la cohésion et l'angle de frottement. Ce sont des paramètres classiques de la géotechnique, certes souvent fournis par des essais de laboratoire, et nécessaires à des calculs de déformation ou de stabilité. Enfin, ce modèle est non associé et  $\psi$  est l'angle de dilatance. [15]



**Figure 3.8 :** Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb. [15]

#### ✚ Le module d'Young ( $E$ ) :

PLAXIS utilise le module d'Young comme module de déformation de référence dans le modèle élastique et le modèle de Mohr-Coulomb, mais d'autres modules de déformation sont également considérés.

Un module de déformation a la dimension d'une contrainte (force par unité de surface). Les valeurs de raideur adoptées dans un calcul demandent une attention particulière parce que la plupart des géomatériaux présentent un comportement non linéaire dès le début du chargement. [17]

**Mohr-Coulomb - Lesson 1 - Sand**

General Parameters Interfaces

Stiffness

$E_{ref}$  : 1.300E+04 kN/m<sup>2</sup>

$\nu$  (nu) : 0.300

Strength

$c_{ref}$  : 1.000 kN/m<sup>2</sup>

$\varphi$  (phi) : 31.000 °

$\psi$  (psi) : 0.000 °

Alternatives

$G_{ref}$  : 5000.000 kN/m<sup>2</sup>

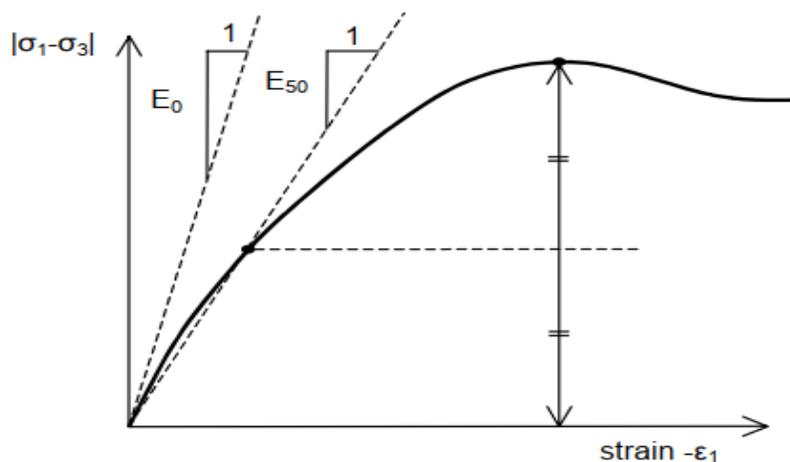
$E_{oed}$  : 1.750E+04 kN/m<sup>2</sup>

Advanced...

Next Ok Cancel Help

**Figure 3.9 :** Fenêtre des propriétés des sols et les interfaces (onglet Paramètres du modèle de Mohr-Coulomb) [17]

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



**Figure 3.10 :** Définition de  $E_0$  et de  $E_{50}$  [17]

### ✚ Le coefficient de Poisson ( $\nu$ ) :

Des essais triaxiaux standards drainés peuvent montrer une diminution significative de volume au tout début du chargement et révéler ainsi une faible valeur du coefficient de Poisson ( $\nu$ ).

Dans certains cas, comme des problèmes de déchargement particuliers, il peut être réaliste d'employer une valeur initiale aussi faible, mais en général, pour le modèle de Mohr-Coulomb, l'utilisation d'une valeur plus élevée est recommandée.[17]

### ✚ La cohésion ( $c$ ) :

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. [17]

### ✚ L'angle de frottement ( $\phi$ ) :

L'angle de frottement  $\phi$  (phi) est entré en degrés. Des angles de frottement élevés, obtenus parfois pour des sables denses, augmenteront de manière substantielle la difficulté numérique des calculs plastiques. Le temps de calcul varie exponentiellement avec de l'angle de frottement. Par conséquent, les angles de frottement élevés devraient être évités lors des calculs préliminaires pour un projet. Le temps de calcul deviendra important si des angles de frottement supérieurs à 35 degrés sont utilisés.[17]

### ✚ Coefficient de Poisson (Poisson's ratio) :

En plus des paramètres de rigidité, un coefficient de Poisson est nécessaire. Pour les structures relativement flexibles dans la direction perpendiculaire à la figure (comme les palplanches et d'autres types de structures métalliques), le coefficient de Poisson est généralement nul. Pour des structures plus massives, comme des murs en béton, il est plus réaliste d'entrer une vraie valeur pour le coefficient de Poisson de l'ordre de 0.15.

Puisque PLAXIS considère les plaques (bidimensionnelles) comme des poutres (Unidimensionnelles), la valeur du coefficient de Poisson va influencer la rigidité de flexion des poutres comme suit :

Valeur entrée pour la rigidité de flexion

**EI**

Valeur observée de la rigidité de flexion

$\frac{EI}{1-\nu^2}$

#### ✚ **Modèle pour sols "mous" (Soft Soil Model, SSM)**

L'idée de base de ce modèle est de prendre en compte l'effet d'écroutissement que provoque sur les argiles la pression moyenne. Sous l'effet d'une pression moyenne, la teneur en eau diminue et l'argile devient plus résistante.

Il s'agit d'un modèle élasto-plastique avec une surface de charge. Sous la surface De charge, le matériau reste élastique, tandis que si le point représentatif de l'état de Contrainte effective atteint la surface de charge, alors des déformations plastiques Apparaissent avec un comportement non réversible. Une surface de plasticité associée Limite l'espace entre les états admissibles et non admissibles. [15]

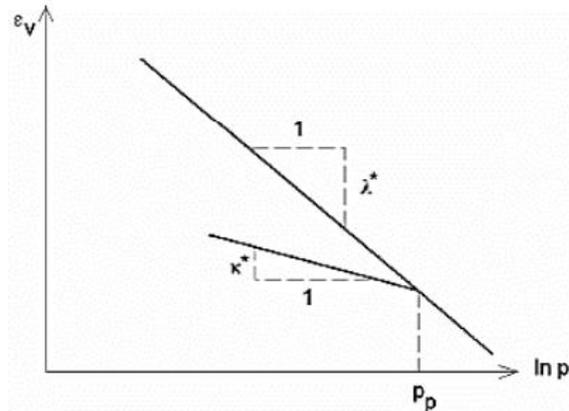
#### ✚ **Paramétré de compressibilité**

Les deux paramètres  $c_c$  et  $c_s$  décrivent le comportement œdométrique ou isotrope observé dans des essais de laboratoire : ce seront les deux paramètres de base

Réglant la position des lignes de consolidation vierge ou des lignes de gonflement. L'axe des contraintes est tracé en logarithme naturel, ce qui conduit à modifier la définition de  $c_c$  et  $c_s$  en  $\lambda$  et  $\kappa$ .

Dans ce cas, l'axe des ordonnées est l'indice des vides. Il peut être judicieux de remplacer l'indice des vides par la déformation volumique (identique à la déformation axiale dans l'essai œdométrique).

On utilise alors  $\lambda^*$  et  $\kappa^*$ , dans ce cas, l'indice des vides est variable. Il peut dans la majorité des cas être pris constant, et égal à la valeur initiale. La figure 3.11 résume les différentes définitions des paramètres. [15]



*Figure 3.11 : Représentation de l'essai œdométrique [15]*

En pratique, il suffit de tracer la déformation axiale en fonction du logarithme naturel de la contrainte axiale.

#### ▪ Cohésion

Une cohésion effective peut être introduite dans le SSM. Elle peut être nulle.[15]

#### ▪ Paramètre de frottement

On rentre directement les valeurs de cohésion et d'angle de frottement [15]

#### ▪ Paramètre de dilatance

Il est calculé automatiquement à partir de l'angle de dilatance : normalement, dans les sols mous celui-ci est faible. [15]

#### ▪ Paramètre de contrainte $K_0$

Avant de définir le paramètre  $K_0$ , il est nécessaire de déterminer le paramètre  $M$  qui représente la pente de ce qu'on appelle « critical state line ».[15]

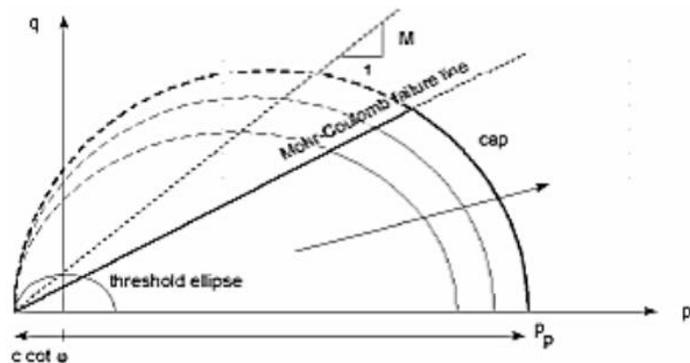
#### ▪ Coefficient de Poisson

Dans les modèles Cam-Clay et dérivés (dont le SSM), le coefficient de Poisson est un paramètre élastique important. Dans une charge-décharge œdométrique, c'est ce paramètre qui fait que les contraintes horizontales diminuent moins vite que les contraintes verticales.

Ce n'est donc pas le coefficient de Poisson qui pourrait être relié à une valeur de  $K_0$  (i.e.  $\nu/(1-\nu)$ ) mais une valeur plus faible, typiquement 0,1 ou 0,2. [15]

### ▪ Les surfaces de charges

La *Figure 3.12* fournit, dans le plan (p,q) une représentation des surfaces de charges et de la surface de plasticité. Les surfaces de charge sont des ellipses avec écoulement associé (incrément de déformation normal à l'ellipse) tandis que pour la rupture, l'écoulement est non associé (c'est pourquoi il est nécessaire d'entrer un angle de dilatance, éventuellement 0, ce qui correspond à l'écoulement plastique à volume constant). [15]



*Figure 3.12 : Surfaces de charge elliptique [15]*

### ▪ Prise en compte de la sur consolidation

Plaxis calcule la pression de pré consolidation  $p_c$  à partir des données. Si un matériau est sur consolidé, il est possible de prendre en compte le degré de sur consolidation (OCR) ou le poids des terres de pré consolidation.

En résumé :

Les paramètres nécessaires au SSM sont les suivants :

$\lambda^*$  : indice de compression

$K^*$  : indice de gonflement

$C$  : cohésion [kN/m<sup>2</sup>]

$\Phi$  : angle de frottement

$\Psi$  : angle de dilatance

Par défaut, les paramètres avancés sont :

$\nu_{ur}$  : coefficient de Poisson en charge-décharge

$NC K_0$  : coefficient des terres au repos pour un sol normalement consolidé

$M$  : pente de la courbe d'état critique dans le plan (p, q) [15]

#### 4.8. 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. Cela se fait dans la partie traitant des conditions initiales du programme d'entrée des données.

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). [17]

### 5. Conclusion

En conclusion, la méthode des éléments finis est une méthode de modélisation numérique puissante utilisée en géotechnique pour résoudre une grande variété de problèmes. Elle consiste à diviser l'espace de travail en éléments finis, à définir les propriétés mécaniques du sol et à résoudre les équations de base pour chaque élément fini.

Cette méthode permet une modélisation précise et détaillée du comportement du sol sous différentes conditions de charge et de contraintes. Plaxis V8 est un logiciel facile d'utilisation, il permet l'analyse des problèmes géotechniques En 2D, Il est caractérisé par la fonction « Standard construction » qui permet de simuler le phasage de construction; et grâce à la fonction « loading input », il est possible de changer la géométrie, le chargement, les couches de sol et les éléments de structure.

Vous aurez ce qu'il faut pour gérer des modèles constitutifs avancés pour la simulation du comportement non linéaire et dépendant du temps des sols.

Pour cela que nous avons choisis Plaxis pour la présente étude.



## 1.Introduction

Cette partie est dédiée à la présentation des différentes étapes du travail numérique effectué pour implanter le modèle géotechnique, dit de référence dans le code de calcul PLAXIS. Nous allons modéliser la section d'un pont, en utilisant le logiciel PLAXIS 2D,

L'analyse numérique permet d'étudier la déformation, la stabilité et l'effet de plusieurs paramètres en tout point du modèle en un temps raisonnable.

## 2.Caractéristiques des matériaux utilisés

Les caractéristiques des matériaux utilisés pour la modélisation numérique sont déterminées au laboratoire L.T.P.E de Tébessa par la réalisation des séries essais.

### 2.1. Sondages :

Le L.T.P.E, a réalisé un sondage de vingt (20) mètres de profondeur à l'aide d'une sondeuse hydraulique TEREDOO N°04, en vue d'établir la nature géologique de l'assiette et aussi de pouvoir disposer d'une quantité suffisante d'échantillons remaniés et paraffinés pour la réalisation des essais au laboratoire.

### 2.2. Sondage pressiométrique :

Le L.T.P.E, a procédé à l'exécution d'un (01) sondages pressiométriques effectués par le pressiomètre Ménard poursuivis jusqu'à (25) mètres de profondeur.

### 2.3. Essais d'identification

- Densité sèche et humide
- Teneur en eau
- Analyse granulométriques : C'est un essai qui a pour objet de déterminer la répartition des grains suivant leur dimension ou grosseur. Les résultats de l'analyse granulométrique sont donnés sous la forme d'une courbe dite courbe granulométrique, cette analyse se fait en générale par un tamisage. Ses résultats servent à la classification et l'identification des matériaux constituant le sol.et le remblai.

- Équivalente de sable : Il est utilisé pour des sols contenant peu d'éléments fins et faiblement plastique. Il s'effectue sur la fraction inférieure à 2 ou 5mm. Ses résultats servent à déterminer la propreté des matériaux.
- Limites d'ATTERBERG : Lorsqu'on fait croître progressivement la teneur en eau d'un sol préalablement séché et pulvérisé, il passe d'un état solide ou très consistant à rupture fragile à un état plastique (grandes déformations sans rupture) puis à l'état liquide
- Essai au bleu de méthylène : est un essai utilisé pour déterminer la propreté d'un sol, et les différents types d'argiles qu'il contient. Le bleu de méthylène est en effet absorbé préférentiellement par les argiles du type montmorillonites (argiles gonflantes) et les matières organiques.
- Essai Proctor (pour le remblai) : L'essai PROCTOR est un essai routier, il consiste à étudier le comportement d'un sol sous l'influence de compactage et une teneur en eau, il a donc pour but de déterminer une teneur en eau afin d'obtenir une densité sèche maximale lors d'un compactage d'un sol prévu pour l'étude, cette teneur en eau ainsi obtenue et appelée « optimum PROCTOR ».[9]

#### 2.4. Essais mécaniques:

- Essais à l'odomètre : Cet essai permet de suivre la consolidation au cours du temps, de déterminer les relations contrainte-déformation et de calculer des caractéristiques relatives à la compressibilité :  $E_{oed}$ ,  $C_c$  et  $\sigma'_p$ .
  - Essais de gonflement à l'odomètre
  - Essais compressibilité à l'odomètre
- Essai de cisaillement rectiligne : L'essai a pour objet de mesurer les caractéristiques de rupture d'un échantillon de sol fin saturé soumis à un cisaillement direct selon un plan imposé, à une vitesse constante.

#### 2.5. Interprétation des résultats :

L'objet de ce rapport est de présenter :

- 1- Les résultats de la reconnaissance géologique ;
- 2- Les valeurs des caractéristiques mécaniques des sols obtenues grâce aux essais géotechniques réalisés en laboratoire ;
- 3- Les calculs et interprétations basées sur l'application des théories généralement admises en mécanique des sols, de manière à faciliter le travail du demandeur.

### 2.5.1. Sondages carottés :

La lithologie du terrain est formée généralement par des Marnes Argileuse très plastiques et peu humides à cristaux de gypses compactes de couleurs brunâtres à verdâtre (Voir coupe du sondage ci-après).

**Tableau 4.1 : Coupe lithologique du terrain**

0.00		Argile marneuse très plastique et peu humide à cristaux de gypse compacte de couleur brunâtre à verdâtre	Forage non destructif Ø 116
8.00		Marne verdâtres à grisâtres à cristaux de gypse	
12.00		Argile marneuse peu limoneuse compacte brunâtre à verdâtre légèrement graveleuse	
15.00		Marne argileuse compacte très plastique et peu humide à cristaux de gypse compacte de couleur brunâtre à verdâtre	
20.00			

## 2.5.2 Sondage Pressiométriques

*Tableau 4.2 : les caractéristiques mécaniques mesurées dans le forage*

<i>Profondeur (m)</i>	<i>Module de déformation E(bar)</i>	<i>Pression limite PI (bar)</i>	<i>E/PI</i>	<i>Niveau d'eau</i>
2.00	62	7	8,86	-
4.00	75	13	5,77	
6.00	167	14	11,93	
8.00	135	18	7,50	
10.00	142	21	6,76	
12.00	264	26	10,15	
14.00	432	26	16,62	
16.00	431	32	13,47	
18.00	124	29	4,28	
20.00	420	35	12,00	
22.00	303	40	7,58	
24.00	188	40	4,70	

## 2.5.3. Résultats Essais au laboratoire :

Tableau 4.3 : les caractéristiques physiques et chimiques du sol

1. Sondage		SC (1)			
Profondeur m		0.40-8.00	8.00-12.00	12.00-13.60	15.00-20.00
TENEUR EN EAU W%		19	20.4	15.8	18.57
DENSITÉ SÈCHE $\gamma_d$ t/m <sup>3</sup>		1.98	1.88	1.70	1.65
DEGRÉ DE SATURATION SR %		82	75	73	79
DENSITÉ HUMIDE $\gamma_h$ t/m <sup>3</sup>		1.66	1.56	1.97	1.96
ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE	5 mm	100	100	81.67	90
	2 mm	98.67	99	65	78
	0.080 mm	96	95.67	44.33	49
Valeur au bleu de méthylène	VB	6.94	7.42	3.91	5.65
ESSAI DE CISAILLEMENT	C bars	1.592	1.17	/	1.495
	Ø degré	19	13	/	18
ESSAI ODOMÉTRIQUE	Pc Kg/Cm <sup>3</sup>	1.185	0.995	/	1.195
	Ct	0.231	0.257	/	0.193
	Cg	0.051	0.066	/	0.066
	Pg bars	2.75	2.15	/	1.12
LIMITES D'ATTERBERG	WL %	63	70	53	66
	IP %	34	36	25	33
ANALYSE CHIMIQUE	Insolubles	45.06	45.12	44.09	48.48
	CaCO <sub>3</sub>	20.5			
	Gypse	29.37	28.41	1.82	1.96
	Sulfate SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	163804	158453.6	10186.3	10906.55
	Agressivité	Très forte	Très forte	Modérée	Modérée

## 2.6. Recommandations :

Après l'étude géotechnique nous constatons que le terrain de ce projet, est de nature géologique représentée dans l'ensemble par Marnes Argileuse très plastiques et peu humides à cristaux de gypses compactes ; et on adopter un système de fondations profonde type pieu pour transférer les charges de la structure à une couche de sol plus profonde et plus résistante a de 25mètres.

## 3. L'Analyse numérique :

### 3.1. Définitions des Données

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

#### 3.1.1 La Géométrie du Modèle :

La génération du modèle d'éléments finis commence par la création du modèle géométrique, qui est la représentation du problème réel à étudier. Un modèle géométrique consiste en des points, des lignes et des couches. Les points et les lignes sont définis par l'utilisateur, alors que les couches sont générées par le programme. En plus de ces composants de base, des éléments de structure et des conditions spéciales peuvent être ajoutés au modèle géométrique pour simuler le soutènement des ponts, les écrans, l'interaction sol-structure ou les chargements. Il est recommandé de commencer la création du modèle géométrique par le dessin du contour.

L'utilisateur peut, de plus, spécifier les limites de couches, les éléments de structure, les lignes séparant les étapes de construction, les charges et les conditions aux limites. Le modèle géométrique doit non seulement comporter la situation initiale, mais aussi les éventuelles étapes de construction à considérer dans les phases ultérieures. [27]

La géométrie du modèle s'étend 70.00m horizontalement et 39.00m verticalement, ces limites étaient supposées suffisantes pour équilibrer le modèle.

Donc nous avons une couche de sol de 30m d'épaisseur et de 70.00 m de largeur.

Le remblai étudié est de largeur 40.00m à la hauteur  $h = 9.00$  m.

Une culée à hauteur de 9.00m et des pieux de 24.00m

La charge est définie comme la charge que l'un essieu d'un véhicule des transferts à la route.

La figure suivante montre le graphique final de la géométrie du modèle numérique et leur condition aux limites.

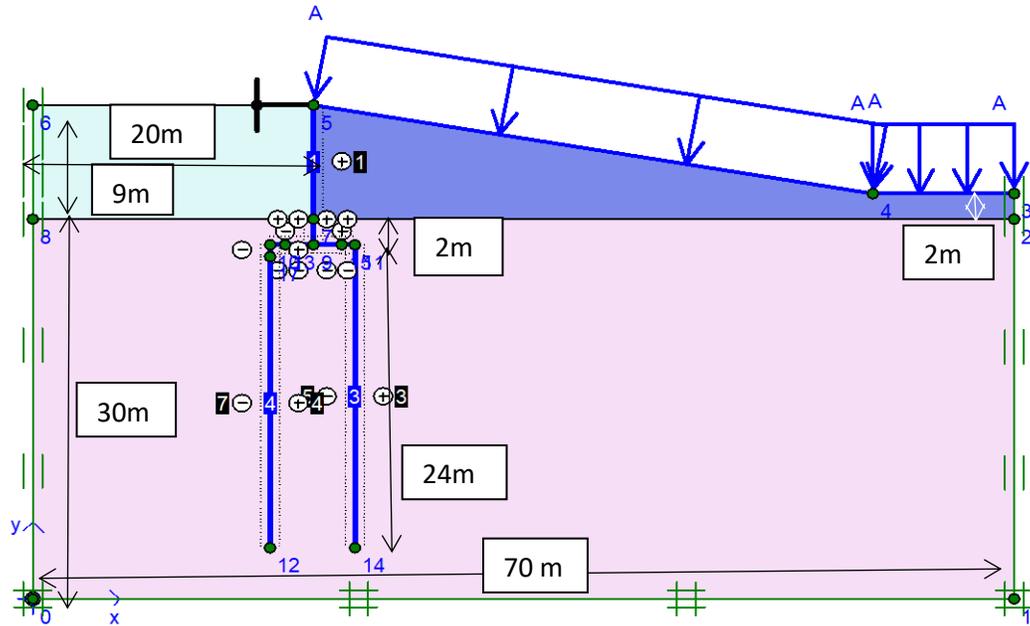


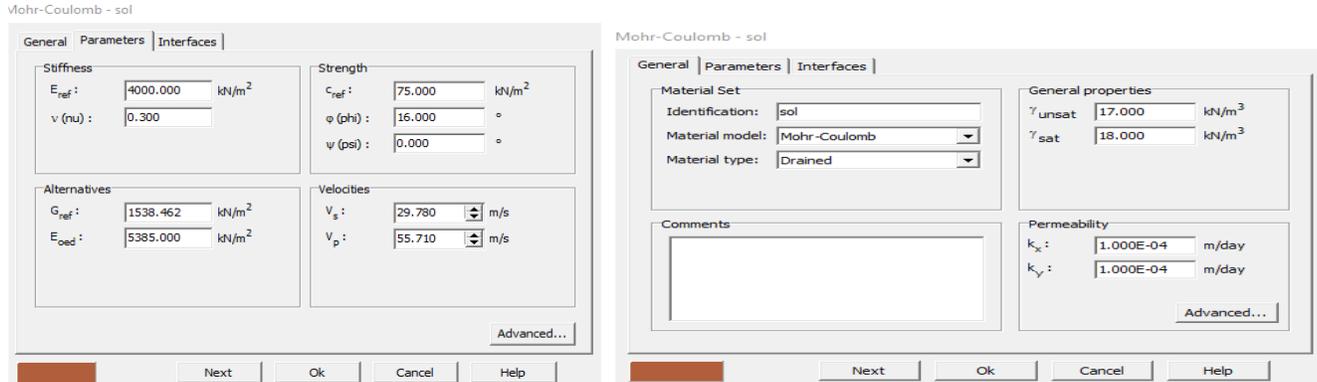
Figure 4.1: Modèle géométrique

3.2. Paramètres et caractéristiques des éléments du modèle :

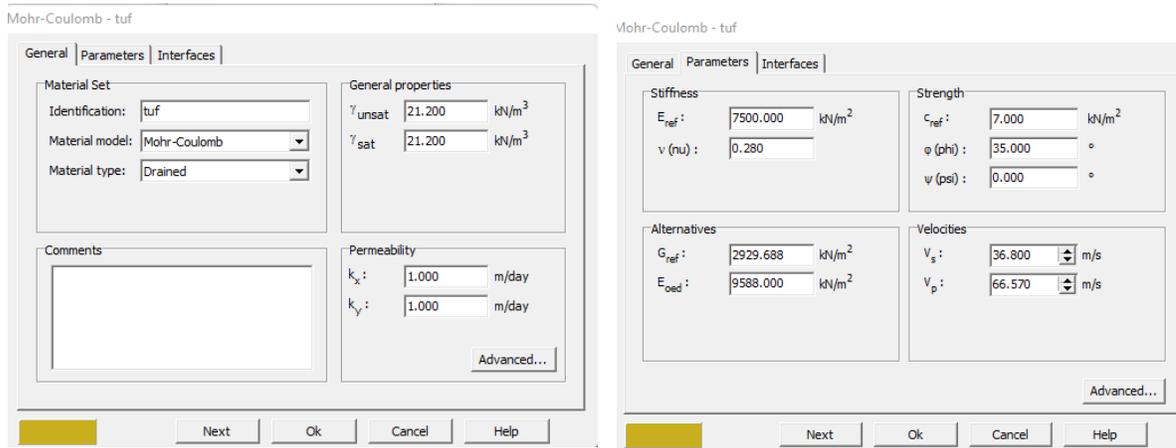
3.2.1 Paramètres du sol :

Tableau 4.4 : Paramètres caractérisant de sol.

Paramètre	Nom	Remblai	Sol	Air	Unité
Modèle de matériau	Modèle	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	Linear élastique	/
Type de comportement	Type	Drainé	Drainé	Drainé	/
Poids volumique saturé	$\gamma_{sat}$	21.2	18	0	KN/m <sup>3</sup>
Poids volumique insaturé	$\gamma_{unsat}$	21.2	17	0	KN/m <sup>3</sup>
Module de cisaillement	E	7500	4000	1	KN/m <sup>2</sup>
Coefficient de Poisson	$\nu$	0.28	0.3	0.01	/
Cohésion	c	7	75	/	KN/m <sup>2</sup>
Angle de frottement	$\phi$	35	16	/	/
Angle de dilatance	$\psi$	0	0	/	/
$R_{int}$	/	Rigide	Rigide	Rigide	/
$K_x$	/	1	$10^{-4}$	0	[m/jour]
$K_y$	/	1	$10^{-4}$	0	[m/jour]



*Figure 4.2: paramètres caractérisant le sol*



*Figure 4.3: Paramètres de caractérisant de remblai*

**3.2.2 Caractéristique de l’ancrage :**

*Tableau 4.5 : Paramètres de calcul d’ancrage*

Unité	EA [KN]	Espacement[m]	Type Du Comportement
Ancrage	$2 \times 10^5$	2	Elastique

3.2.3. Caractéristique du culée et pieux :

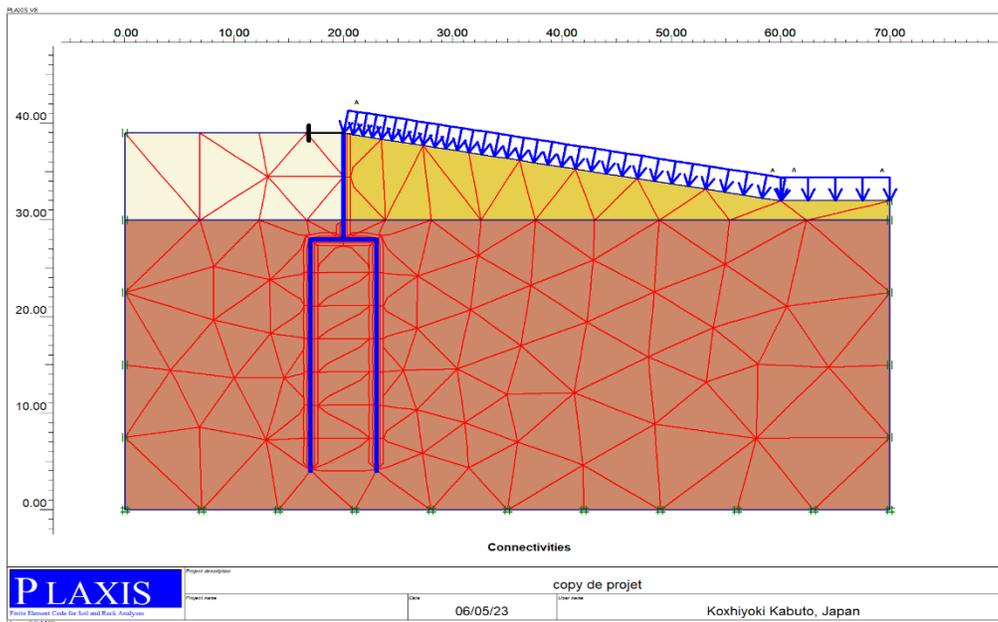
*Tableau 4.6 : Paramètres de calcul du culée et pieux*

Paramètre	culée	Pieux
Modèle de matériau	Elastic	Elastic
EA	8700000 KN/m	83000000 KN/m
EI	2000000 kN/m	1000000 KN/m
d	-	1.20m

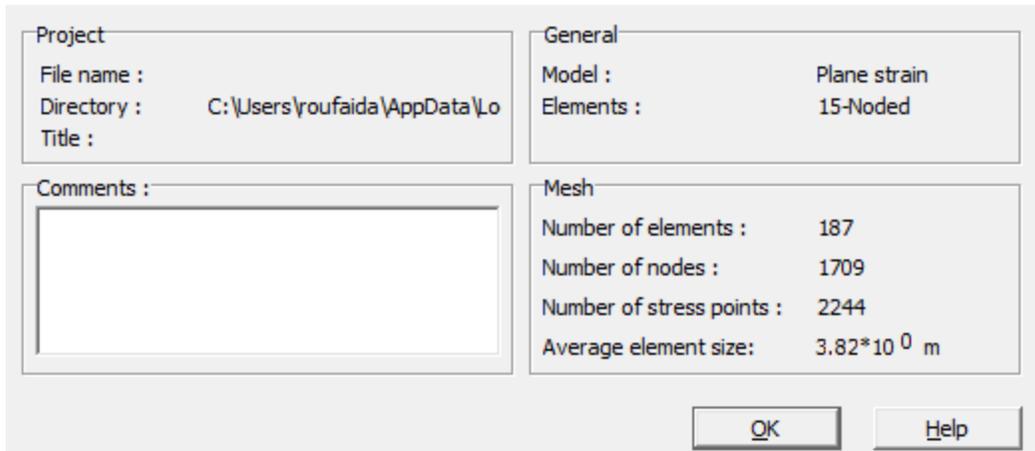
3.2. Maillages utilisés

Lorsqu'un modèle géométrique est entièrement défini et que les propriétés des matériaux sont assignées à toutes les couches et à tous les éléments de structure, la géométrie doit être divisée en éléments finis afin de réaliser le calcul par éléments finis. Une composition d'éléments finis s'appelle un maillage d'éléments finis.

Les éléments fondamentaux sont des éléments triangulaires à 15 nœuds ou des éléments triangulaires à 6 nœuds PLAXIS permet une génération automatique des maillages d'éléments finis. La densité des maillages est plus élevée autour de groupe de pieux et sous la fondation, et celle-ci décroît au fur et à mesure qu'on approche des limites du modèle.[30]



*Figure 4.4: Maillage PLAXIS*



*Figure 4.5: Information Générale Du Maillage*

### 3.3. Condition aux limites

Pour tenir compte de l'évolution des déplacements en fonction de la profondeur et minimiser l'influence des conditions aux limites, le fond du modèle numérique est bloqué dans les trois directions (X, Y et Z), en utilisant la fonction « standard Fixities ». [26]

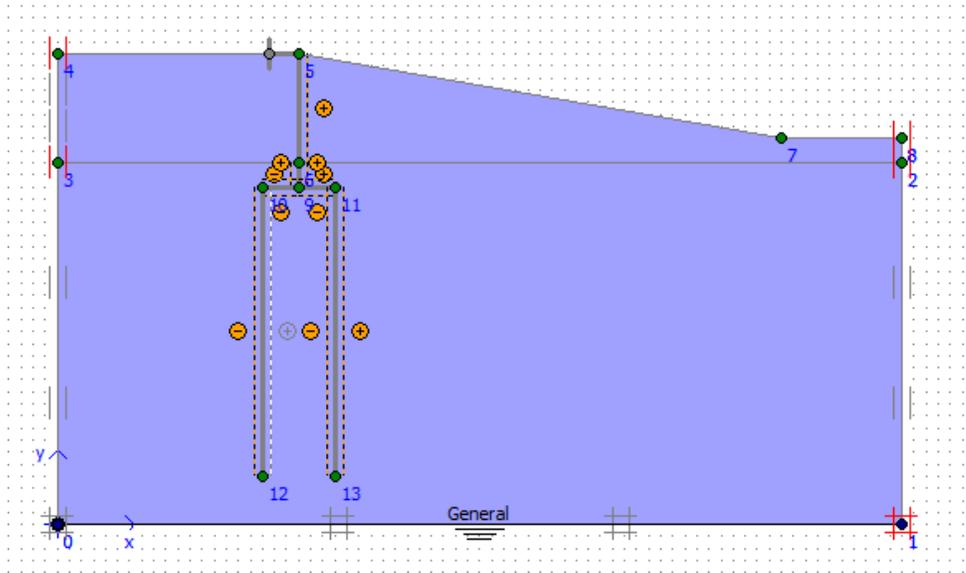
### 3.4. Conditions hydrauliques

PLAXIS est généralement utilisé pour des analyses en contraintes effectives dans lesquelles une distinction claire est faite entre les pressions interstitielles  $P$  active et les contraintes effectives  $\sigma'$ .

Les pressions interstitielles sont elles-mêmes décomposées en deux parties:

Les pressions interstitielles permanentes  $P$  steady et les surpressions interstitielles  $P$  excès :

$$P \text{ active} = P \text{ steady} + P \text{ excess} \quad [30]$$



*Figure 4.6: Condition hydrauliques initiales*

### 3.5. Contraintes initiales

Les contraintes initiales dans un sol sont influencées par le poids du matériau et par l'histoire de sa formation. Cet état de contraintes est caractérisé généralement par une contrainte effective verticale initiale  $\sigma'_{v, 0}$  la contrainte effective horizontale initiale  $\sigma'_{h, 0}$  est liée à la contrainte effective verticale initiale par le coefficient de pression des terres au repos  $K_0$ .

$$(\sigma'_{h, 0} = K_0 \sigma'_{v, 0}) \quad [30]$$

*Tableau 4.7 : Définition du multiplicateur pour la procédure  $K_0$*

K0-procedure ×

$\Sigma M$ -weight :

Cluster	Material	OCR	POP	K0
1	MC	N/A	N/A	0.724
2	Elastic	N/A	N/A	1.000
3	MC	N/A	N/A	0.426

## 4. Le calcul numérique

Après la définition d'un modèle aux éléments finis, les calculs proprement dits peuvent être effectués.

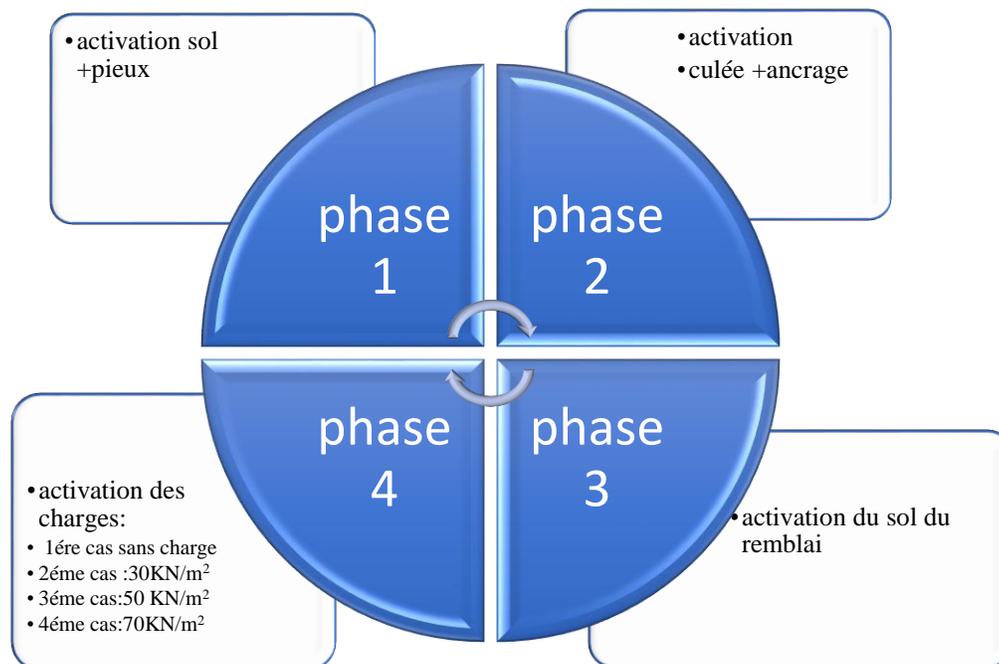
Il est toutefois nécessaire de définir au préalable le type des calculs à réaliser, ainsi que les cas de chargement ou les étapes de construction qui seront à appliquer.

On opère grâce au programme de calcul (Calculation), et les résultats peuvent être examinés pour Chacune des phases avec le programme (Output). [30]

### 4.1 Procédure de calcul :

Le calcul du modèle de référence se fait en quatre (4) phases :

- **Phase 0** : phase initiation des contraintes (procédure K0) ; on détermine les contraintes effectives initiales et la pression interstitielle
- **Phase 1** : mise en place des fondations sur pieux circulaires de diamètre  $D= 1.20\text{m}$  à une profondeur 24 m.
- **Phase 2** : mise en place de la culée du pont et l'ancrage au soumet
- **Phase 3** : mise en place de remblai sur toute la hauteur
- **Phase 4** : application des différentes charges sur le remblai



### 5. Résultats obtenus pour le modèle

Nous présentons les principaux résultats des modélisations Et on change chaque fois la charge dans la phase 4.

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Time	Wa
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0.00 ...	
✓ <Phase 1>	1	0	Plastic	Staged construction	0.00 ...	
✓ <Phase 2>	2	1	Plastic	Staged construction	0.00 ...	
✓ <Phase 3>	3	2	Plastic	Staged construction	0.00 ...	
✓ <Phase 4>	4	3	Plastic	Staged construction	0.00 ...	

*Figure 4.7: Champ des phases du calcul.*

Plaxis 8.2 Plastic Calculation - pont b - Plane Strain

Total multipliers at the end of previous loading step		Calculation progress	
Σ -Mdisp:	1.000	PMax	0.000
Σ -MloadA:	1.000	Σ -Marea:	0.833
Σ -MloadB:	1.000	Force-X:	0.000
Σ -Mweight:	1.000	Force-Y:	0.000
Σ -Maccel:	0.000	Stiffness:	0.587
Σ -Msf:	1.000	Time:	0.000
Σ -Mstage:	1.000	Dyn. time:	0.000

Iteration process of current step

Current step:	4	Max. steps:	250	Element	187
Iteration:	2	Max. iterations:	60	Decomposition:	100 %
Global error:	8.060E-04	Tolerance:	0.010	Calc. time:	1 s

Plastic points in current step

Plastic stress points:	43	Inaccurate:	3	Tolerated:	7
Plastic interface points:	7	Inaccurate:	3	Tolerated:	4
Tension points:	43	Cap/Hard points:	0	Apex points:	0

[U] Node A

*Figure 4.8: Méthode de calcul et le modèle plastique.*

5.1. Les point plastiques :

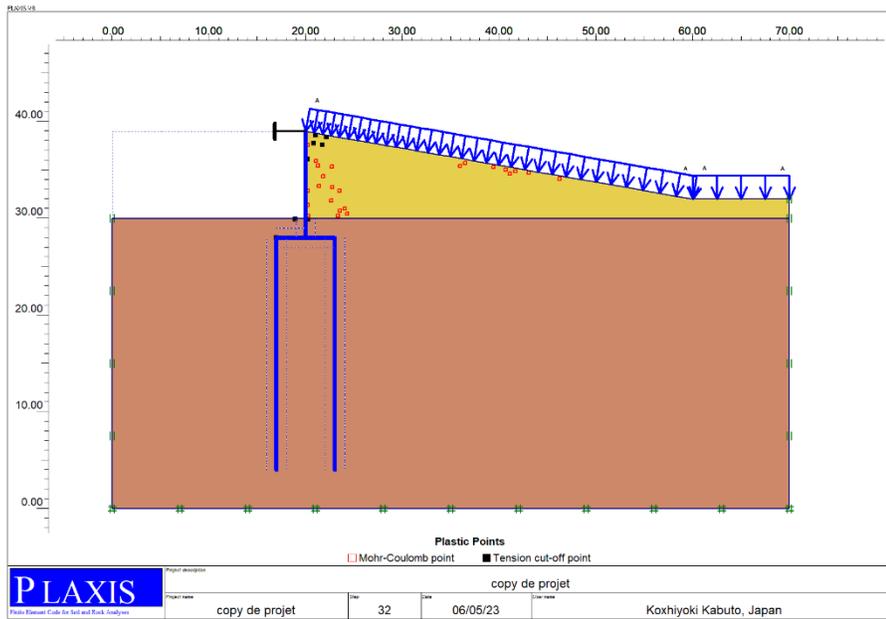


Figure 4.9: Les point plastiques.

5.2. Les Contrainte effective  $\sigma_{eff}$  :

- Sans chargement :

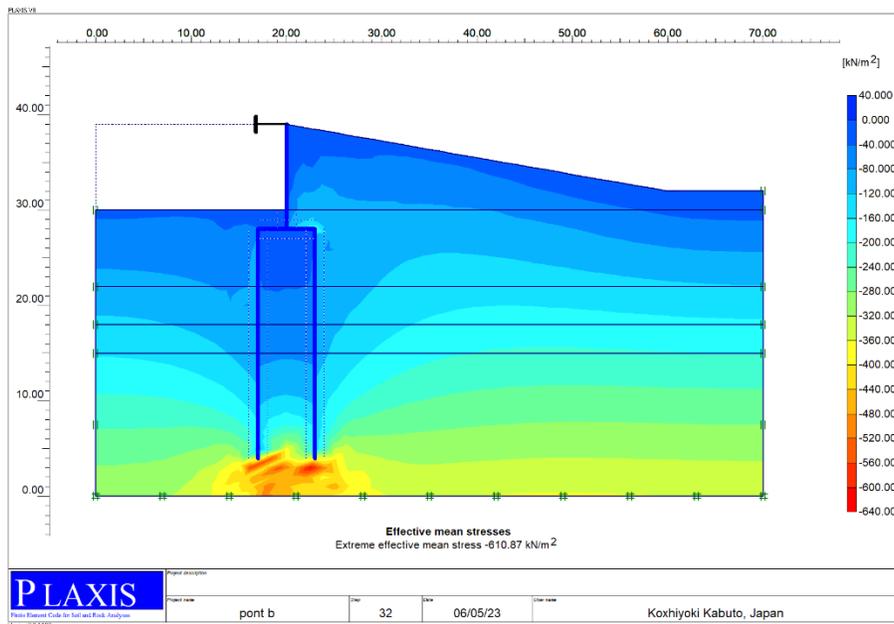
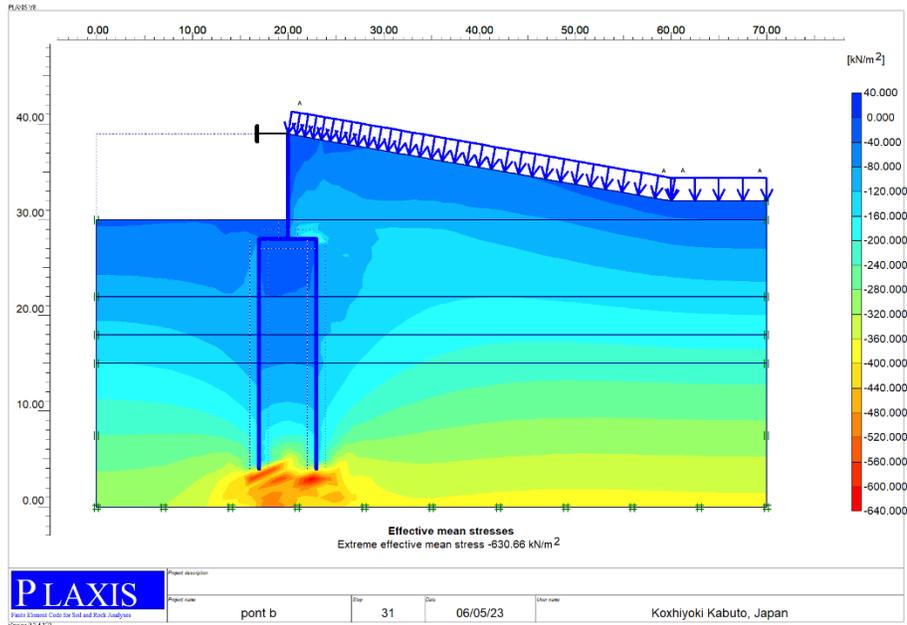


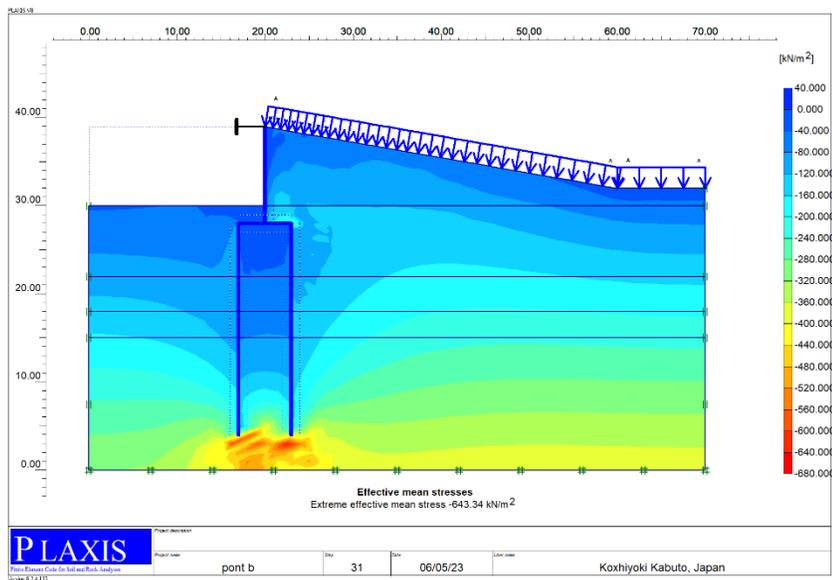
Figure 4.10: Contrainte effective sans charge  $\sigma_{eff} = -610, 87KN/m^2$ .

- Chargement  $F=30\text{KN/m}^2$  :



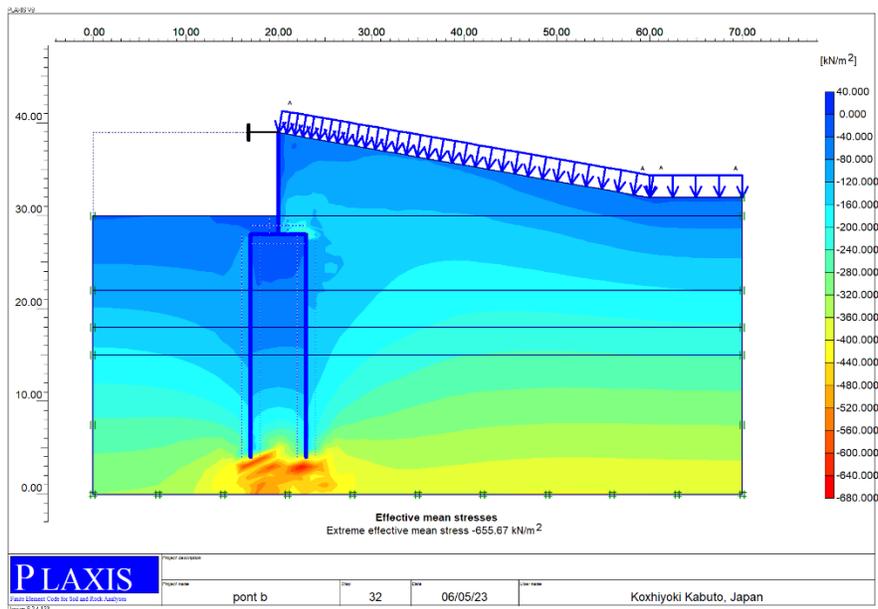
**Figure 4.11:** Contrainte effective avec charge  $F=30\text{KN/m}^2$  (Mean shading)  
 $\sigma_{eff} = -630, 66\text{KN/m}^2$

- Chargement  $F=50\text{KN/m}^2$



**Figure 4.12:** Contrainte effective avec charge  $F=50 \text{ KN/m}^2$  (mean shading)  
 $\sigma_{eff} = -643, 34\text{KN/m}^2$

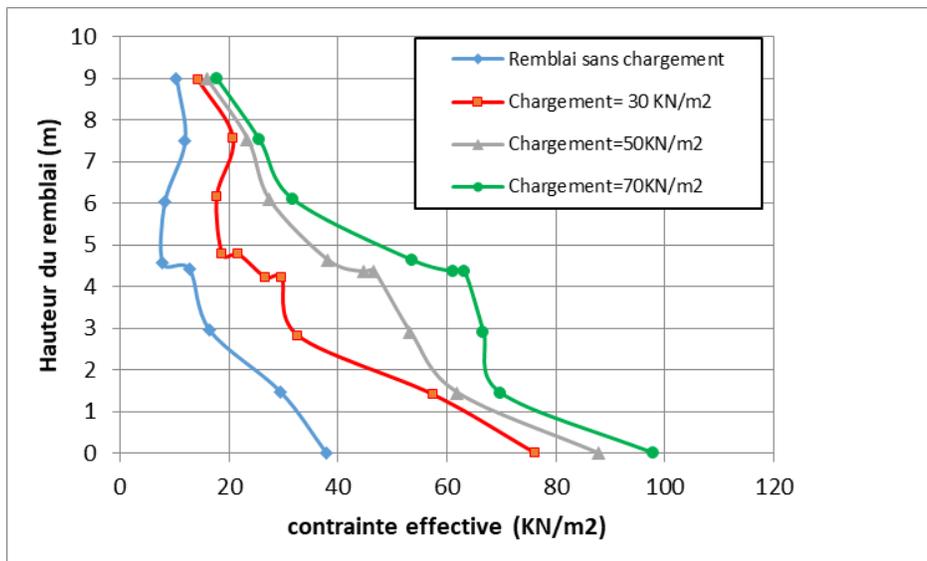
- Chargement  $F=70\text{KN/m}^2$



**Figure 4.13:** Contrainte effective avec charge  $F=70\text{ KN/m}^2$  (mean shading)  
 $\sigma_{eff} = -655,67\text{KN/m}^2$ .

✚ D'après une coupe verticale (A-A') a l'hauteur du remblai dans les 4 cas (sans chargement / charge  $F=30\text{ KN/m}^2$  / charge  $F=50\text{ KN/m}^2$  /charge  $F=70\text{ KN/m}^2$ )

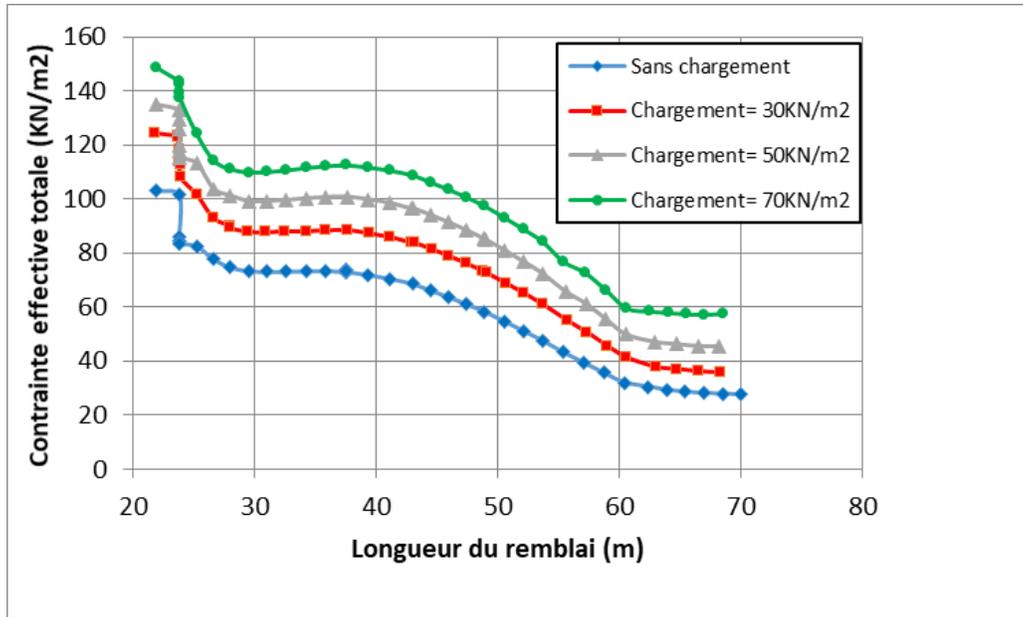
On obtient les résultats représentés dans la courbe suivante :



**Figure 4.14:** Courbe de Contrainte effective à la hauteur du remblai dans les 4 cas

✚ D’après Un coupe horizontal a la base (longueur) du remblai dans les 4 cas (sans chargement / charge  $F=30\text{ KN/m}^2$  / charge  $F=50\text{ KN/m}^2$  /charge  $F=70\text{ KN/m}^2$ ) ;

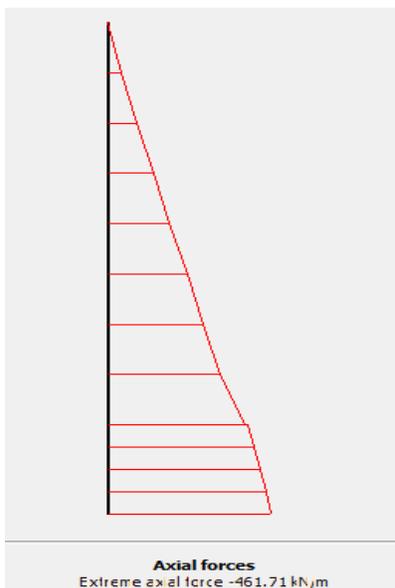
On obtient les résultats représentés dans la courbe suivante.



*Figure 4.15:* Courbe de Contrainte effective a longueur du remblai dans les 4 cas

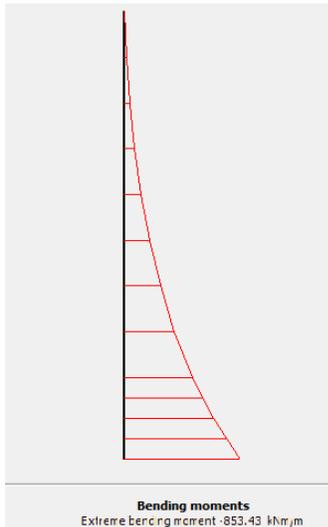
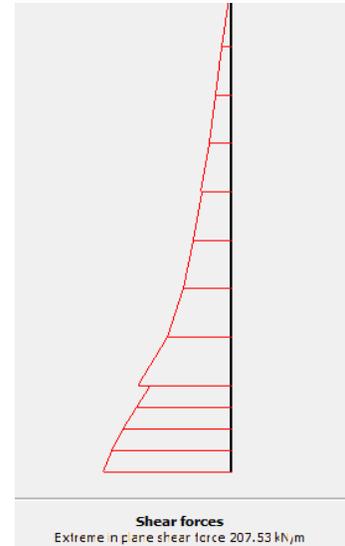
**5.3. Les forces dans la culée et les pieux :**

➤ Dans la culée



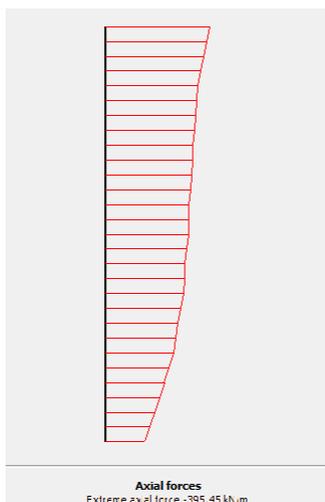
*Figure 4.16 :* Courbe d’effort axiale dans la culée dans le 1<sup>er</sup> cas (sans chargement).

**Figure 4.17 :** Courbe d'effort tranchant dans la culée en 1<sup>er</sup> cas (sans chargement).



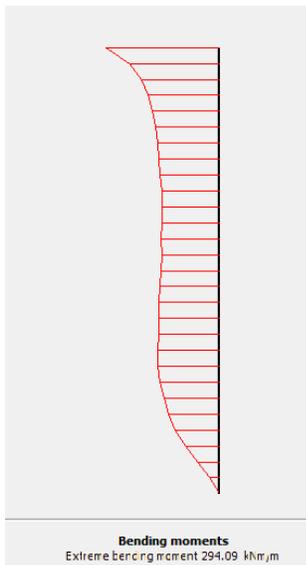
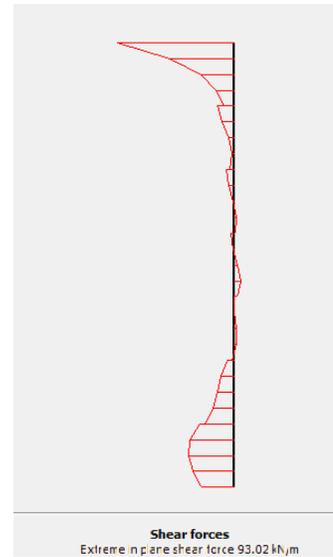
**Figure 4.18 :** Courbe de moment de flexion dans la culée en 1<sup>er</sup> cas (sans chargement).

➤ Dans les Pieux

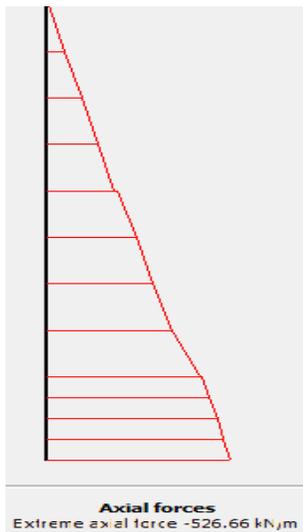


**Figure 4.19 :** Courbe d'effort axiale dans le pieu en 1<sup>er</sup> cas (sans chargement).

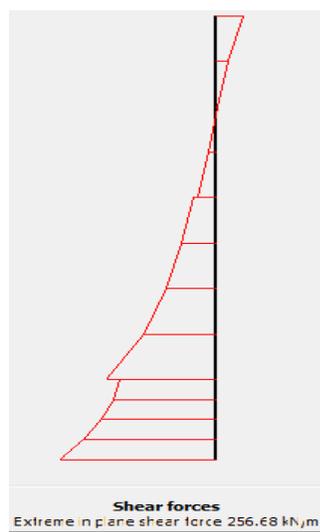
**Figure 4.20 :** Courbe d'efforts tranchant dans le pieu (Remblai n'est pas chargé).



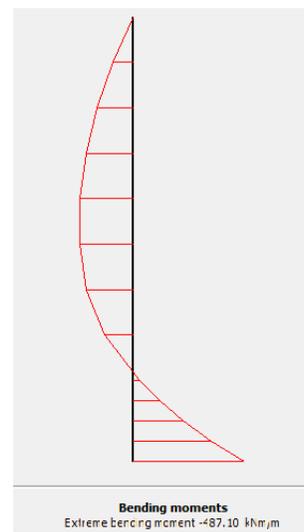
**Figure 4.21 :** Courbe de moment de flexion dans le pieu (remblai n'est pas chargé).



(a)

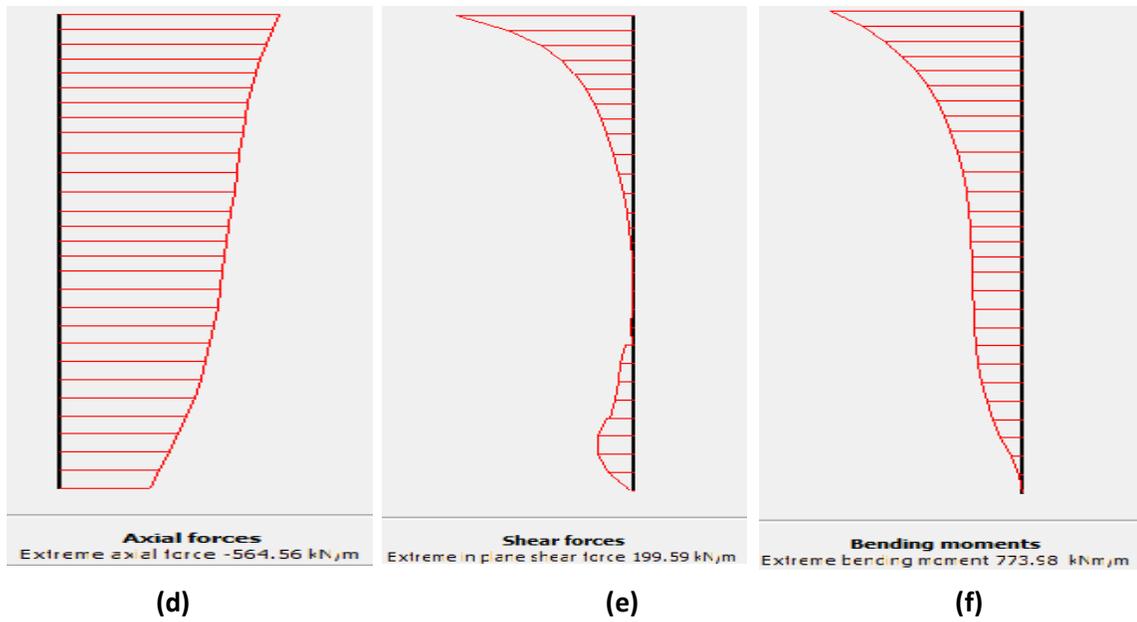


(b)

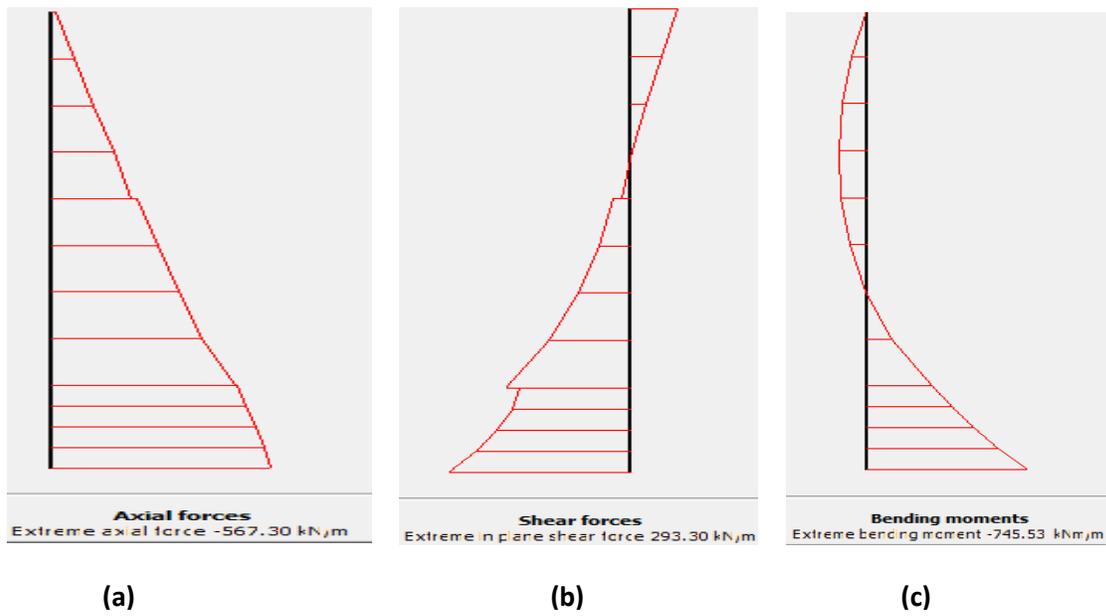


(c)

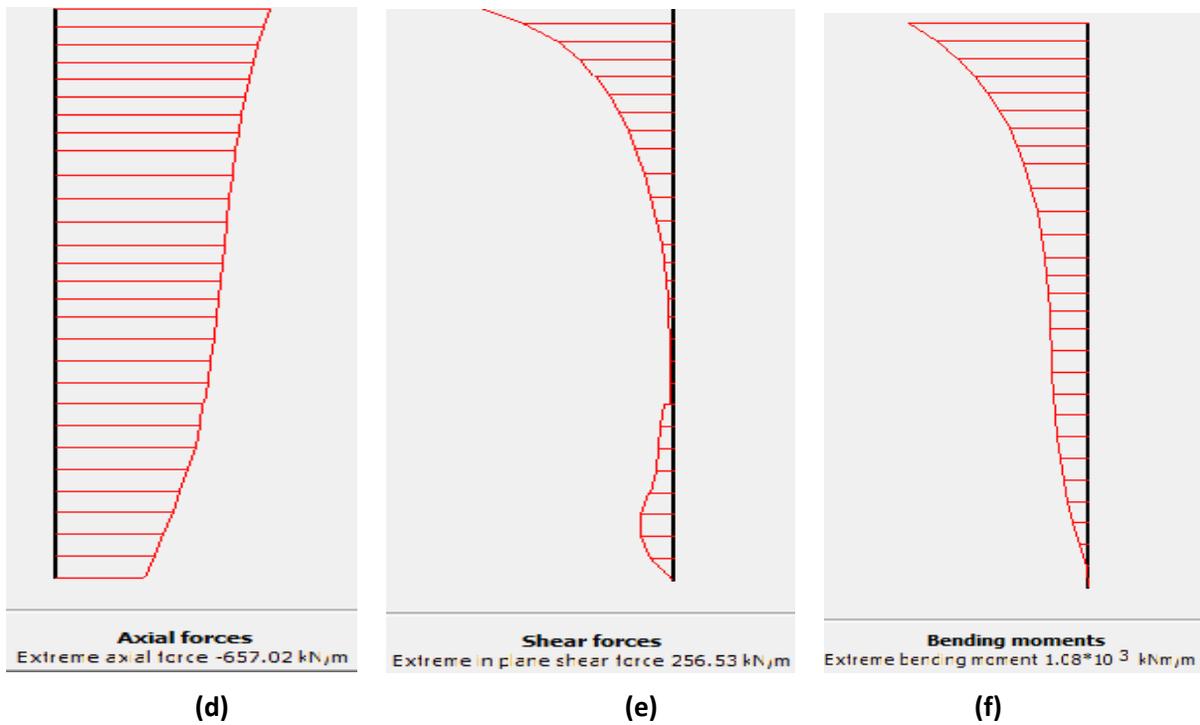
**Figure 4.22 :** Courbes des efforts axiale et tranchant et moment de flexion dans la culée en 2ème cas ( $F=30 \text{ KN/m}^2$ )



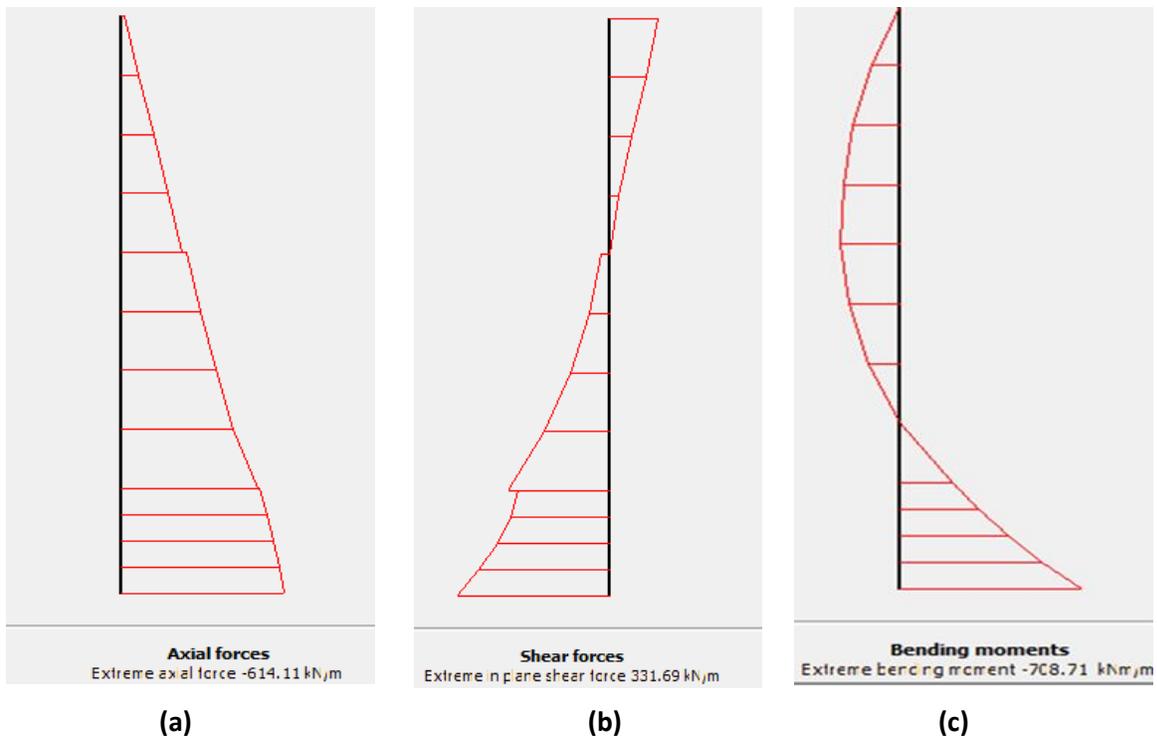
*Figure 4.23 : Courbes des efforts axiale et tranchant et moment de flexion dans les pieux en 2ème cas ( $F=30 \text{ KN/m}^2$ )*



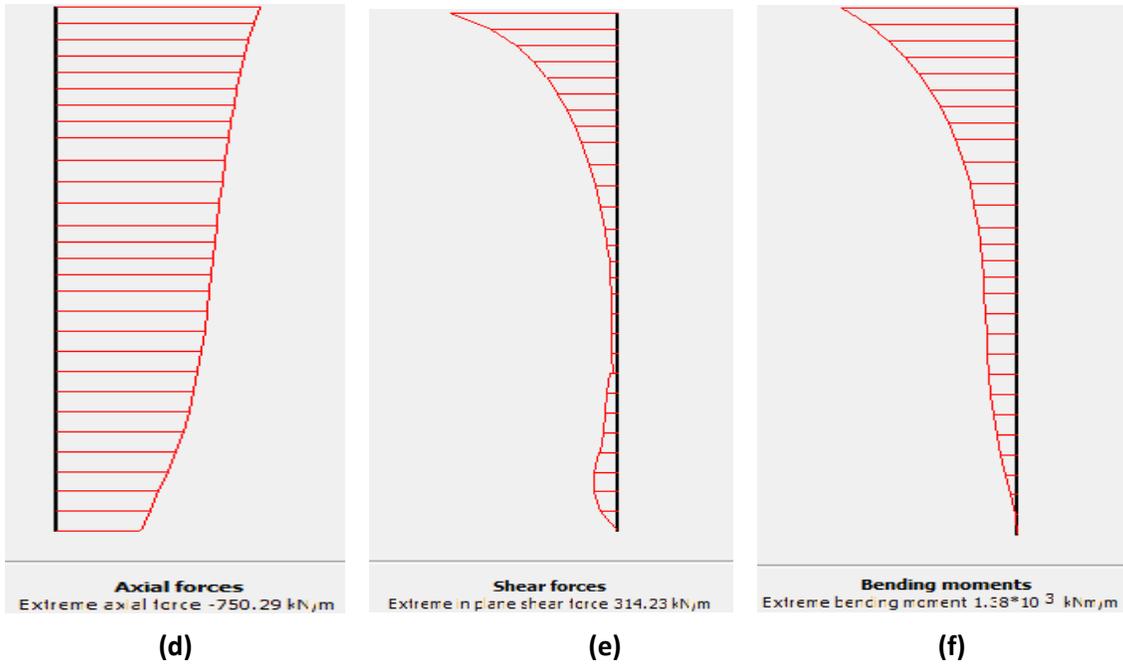
*Figure 4.24 : Courbes des efforts axiale et tranchant et moment de flexion dans la culée en 3ème cas ( $F=50 \text{ KN/m}^2$ )*



*Figure 4.25 : Courbes des efforts axiale et tranchant et moment de flexion dans les pieux en 3ème cas ( $F=50\text{KN/m}^2$ )*



*Figure 4.26 : Courbes des efforts axiale et tranchant et moment de flexion dans la culée en 4ème cas ( $F=70\text{KN/m}^2$ )*



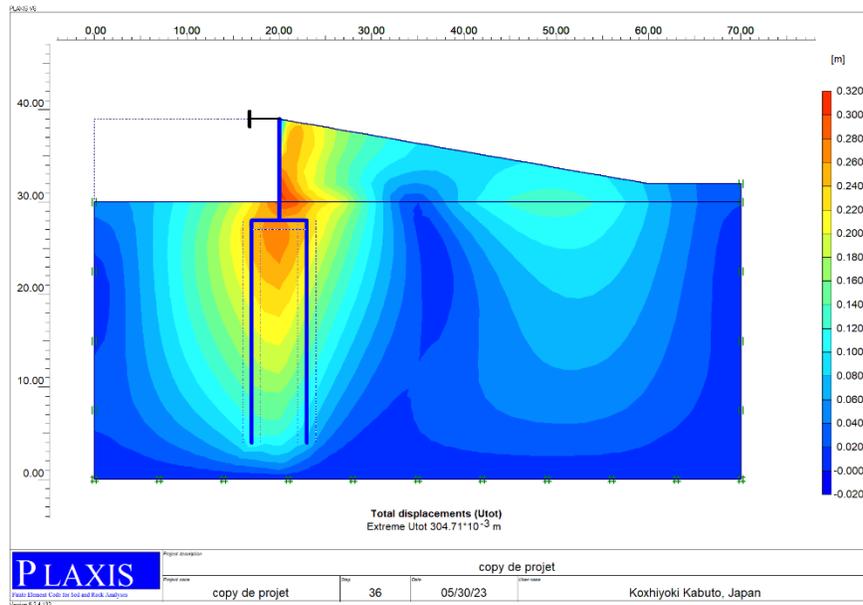
*Figure 4.27 : Courbes des efforts axiale et tranchant et moment de flexion dans les pieux en 4éme cas (F=70KN/m<sup>2</sup>)*

*Tableau 4.8: les force dans la culée et les pieux dans les 4 cas de chargement*

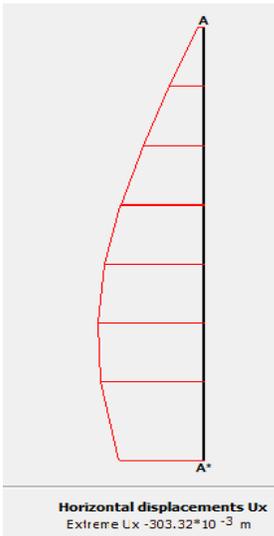
Elément	Nature de l'effort	Non chargé	F=30KN/m <sup>2</sup>	F=50KN/m <sup>2</sup>	F=70KN/m <sup>2</sup>
culée	Effort axial N (KN)	-461.71	-526.66	-567.30	-614.11
	Effort tranchant T (KN)	207.53	256.68	293.30	331.69
	Moment de flexion M(KN.m)	-853.43	-807.10	745.53	-708.71
pieux	Effort axial N (KN)	-395.45	-564.56	-657.02	-750.29
	Effort tranchant T (KN)	93.02	199.59	256.53	314.23
	Moment de flexion M (KN.m)	294.09	773.58	$1.08 \cdot 10^3$	$1.28 \cdot 10^3$

5.4. Le déplacement U

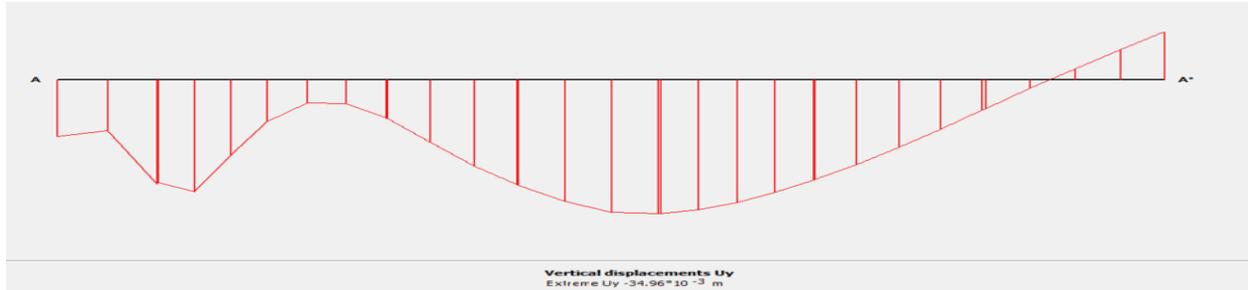
1ère cas remblai non chargé :



*Figure 4.28 : Forme de déformation dans le 1ère cas (sans chargement)  
(déplacements total  $U_{tot}$ ):  $304.71 \cdot 10^{-3} m$ .*

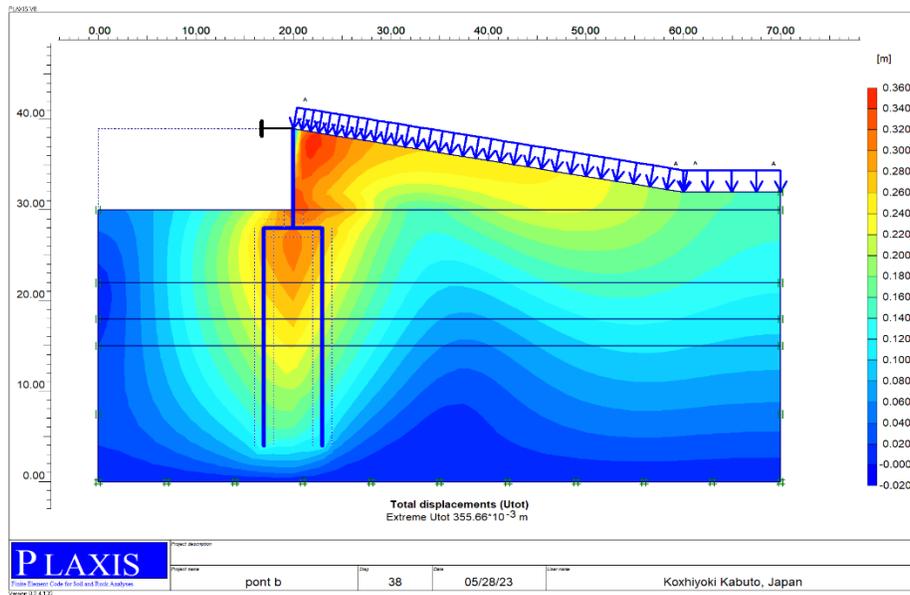


*Figure 4.29 : Courbe de déplacement horizontale  $U_x$  suivant la hauteur du remblai  $U_x=303.32 \cdot 10^{-3} m$*

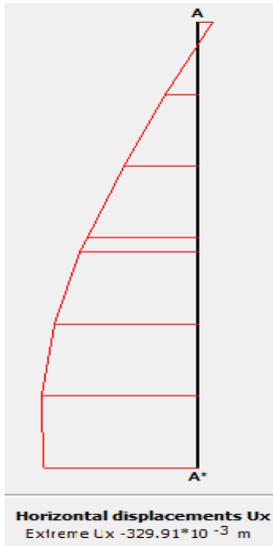


*Figure 4.30 : Courbe de déplacement vertical a la base du remblai  $U_y = -34.96 \cdot 10^{-3} m$ .*

2ème cas la charge  $F= 30KN/m^2$  :



*Figure 4.31 : Forme de déformation dans le 2ème cas ( $F=30KN/m^2$ ) (déplacements totals  $U_{tot}$ ):  $355.66 \cdot 10^{-3} m$ .*

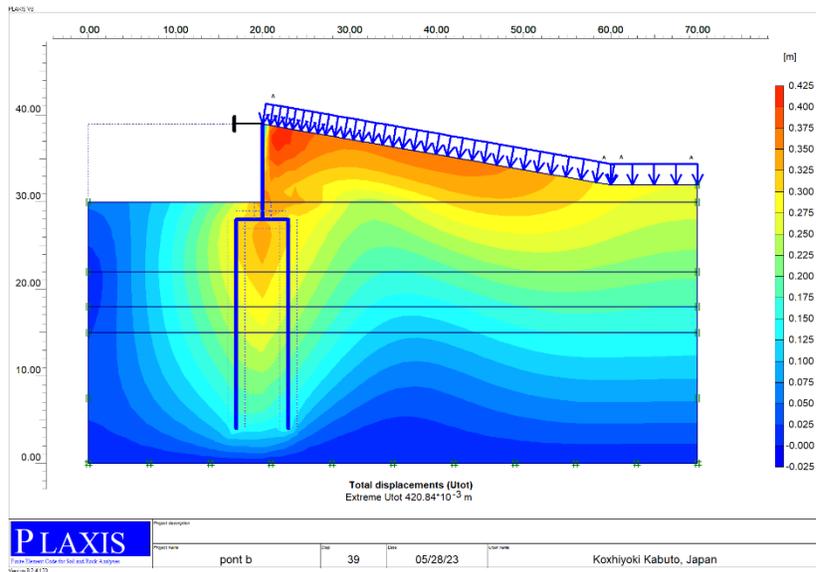


*Figure 4.32 : Courbe de déplacement horizontale  $U_x$  suivant la hauteur du remblai  $U_x=329.91*10^{-3}m$*

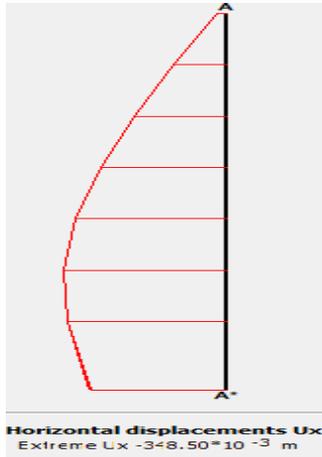


*Figure 4.33 : Courbe de déplacement verticale a la base du remblai  $U_y = -196.25*10^{-3}m$ .*

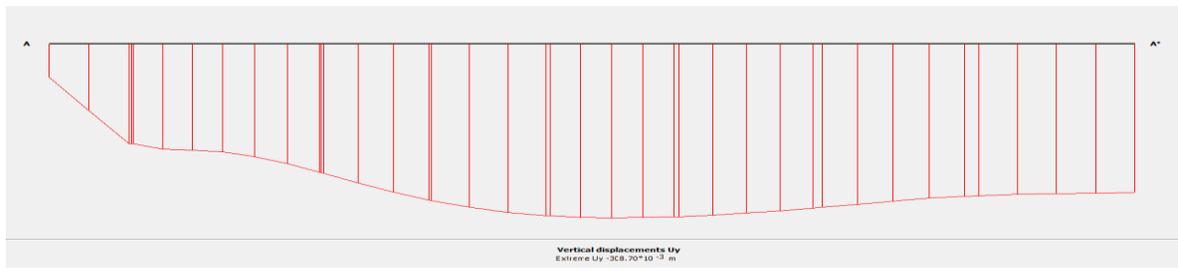
3ème cas la charge  $F= 50KN/m^2$  :



*Figure 4.34 : Forme de déformation le 3ème cas ( $F=50KN/m^2$ ) (déplacements totals  $U_{tot}$ ):  $420.84*10^{-3}m$*

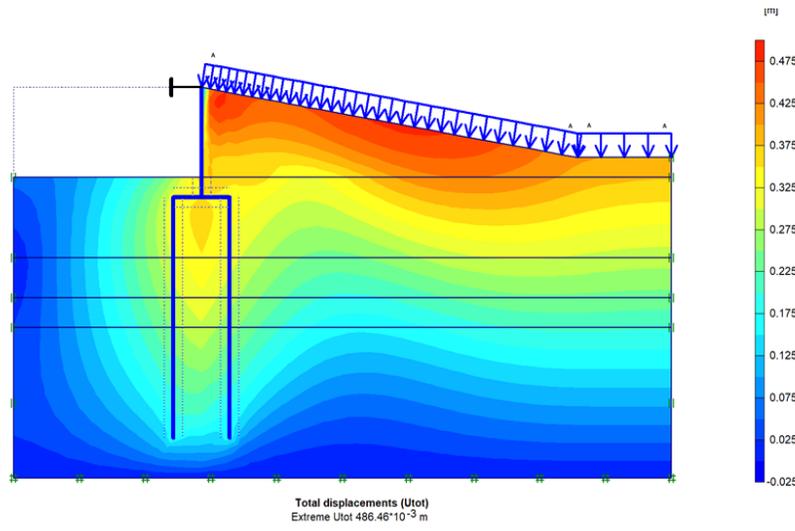


**Figure 4.35 :** Variation du déplacement horizontale  $U_x$  suivant la hauteur la hauteur du remblai  $U_x=348.50*10^{-3}m$

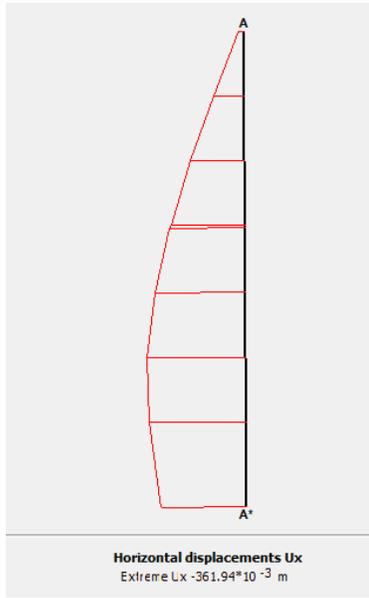


**Figure 4.36:** Variation du déplacement vertical à la base du remblai  $U_y = -308.24*10^{-3}m$ .

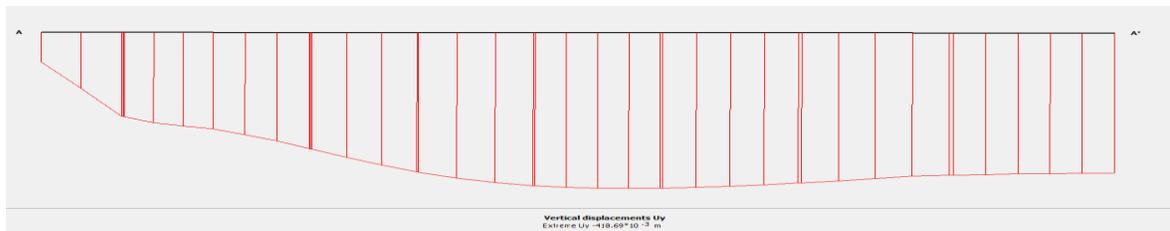
4ème cas la charge  $70KN/m^2$  :



**Figure 4.37:** Forme de déformation le 4<sup>ème</sup> cas ( $F=70KN/m^2$ ) (déplacement total  $U_{tot}$ ):  $486.46*10^{-3}m$ .

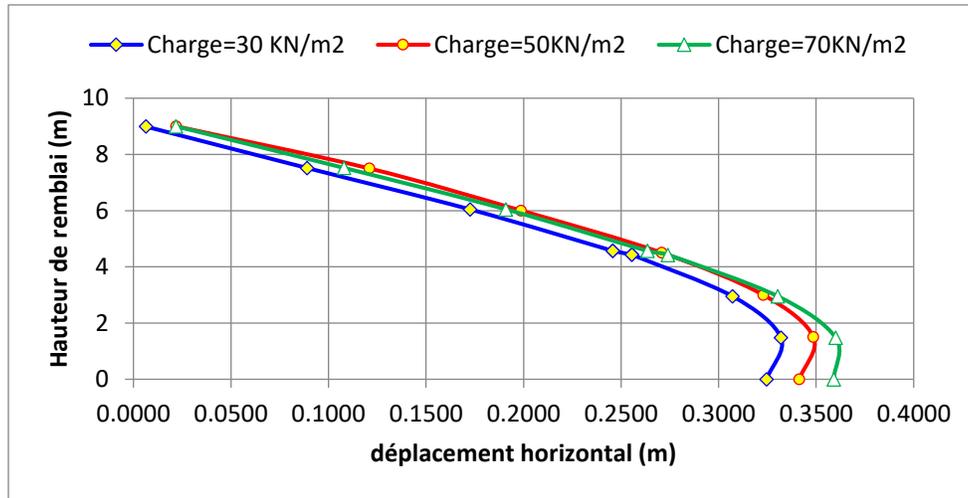


**Figure 4.38:** Déplacement horizontale  $U_x$  suivant la hauteur du remblai  $U_x = 361.94 \cdot 10^{-3} \text{ m}$



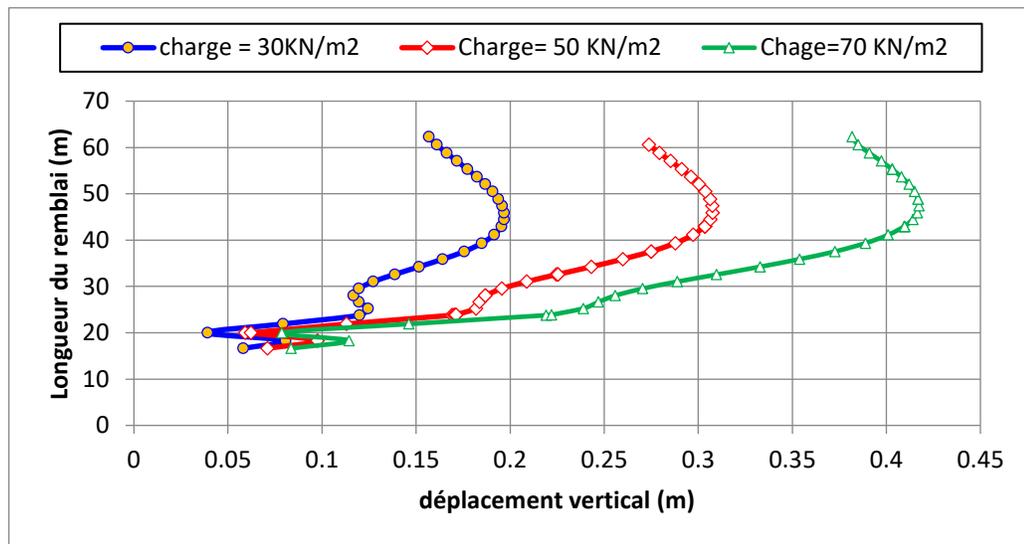
**Figure 4.39:** Variation du déplacement vertical à la base du remblai  $U_y = -418.69 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ .

- D'après une coupe verticale (A-A') à la hauteur du remblai dans 3 cas de chargement (charge  $F = 30 \text{ KN/m}^2$  / charge  $F = 50 \text{ KN/m}^2$  / charge  $F = 70 \text{ KN/m}^2$  ; On obtient les résultats représentés dans la courbe suivante :



**Figure 4.40:** la variation du déplacement horizontale en fonction de la hauteur du remblai et pour différents cas de chargement

- D’après un coupe horizontale a la base (longueur) du remblai dans les 3 cas de chargement (charge  $F=30\text{KN/m}^2$  / charge  $F=50\text{KN/m}^2$  /charge  $F=70\text{KN/m}^2$ ); On obtient les résultats représentés dans la courbe suivante.

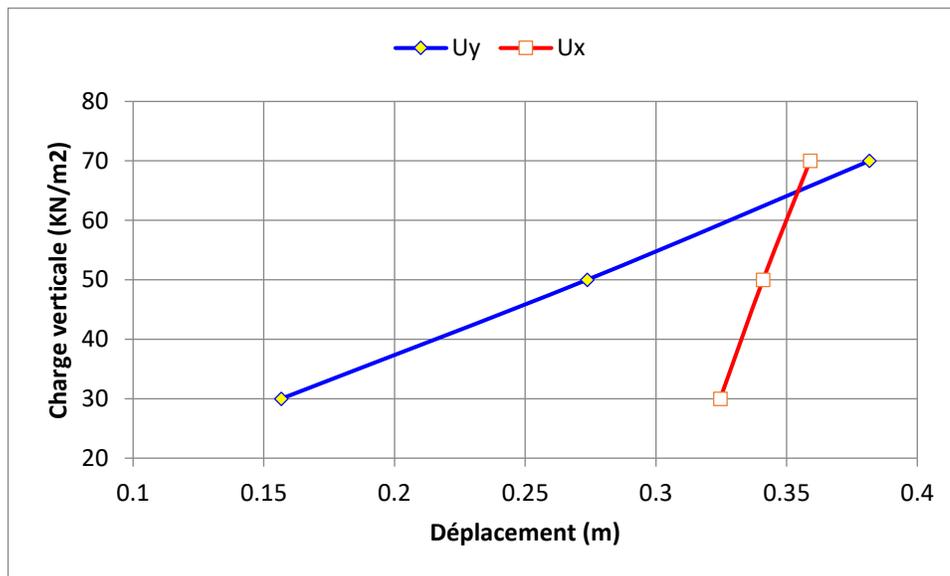


**Figure 4.41:** la variation de déplacement verticale à la base du remblai

les résultats obtenus montrent que le déplacement vertical maximal se situe a la base du remblai et il est proportionnel aux valeurs du chargement extérieurs.

**Tableau 4.9** : la variation des contraintes effective et le déplacement en fonction de la variation des charges.

	Non chargé	F=30KN/m <sup>2</sup>	F=50KN/m <sup>2</sup>	F=70KN/m <sup>2</sup>
Déplacement horizontal max U(x) max (m)	0.295	0.3246	0.341 m	0.359
Déplacement vertical max U(y)max(m)	0.0126	0.15667389	0.273	0.381
Contrainte effective (KN)	<b>Horizontale</b>	103.268	124.518	134.733
	<b>Verticale</b>	37.924	76.1353	87.721



**Figure 4.42** : la variation des déplacements maximale en fonction de l'intensité de chargement

La **Figure 4.42** montre la variation des déplacements horizontaux et verticaux en fonction de l'intensité de chargement, les résultats obtenus montrent que le déplacement horizontal varie progressivement et linéairement à partir du sommet jusqu'à la base du remblai par contre le déplacement vertical atteint sa valeur maximale au milieu de sa base.

On conclut que la diminution des charges donne une diminution de déplacement et de contrainte effective.

## 6. Conclusion

La conclusion qu'on peut tirer de cette étude numérique est:

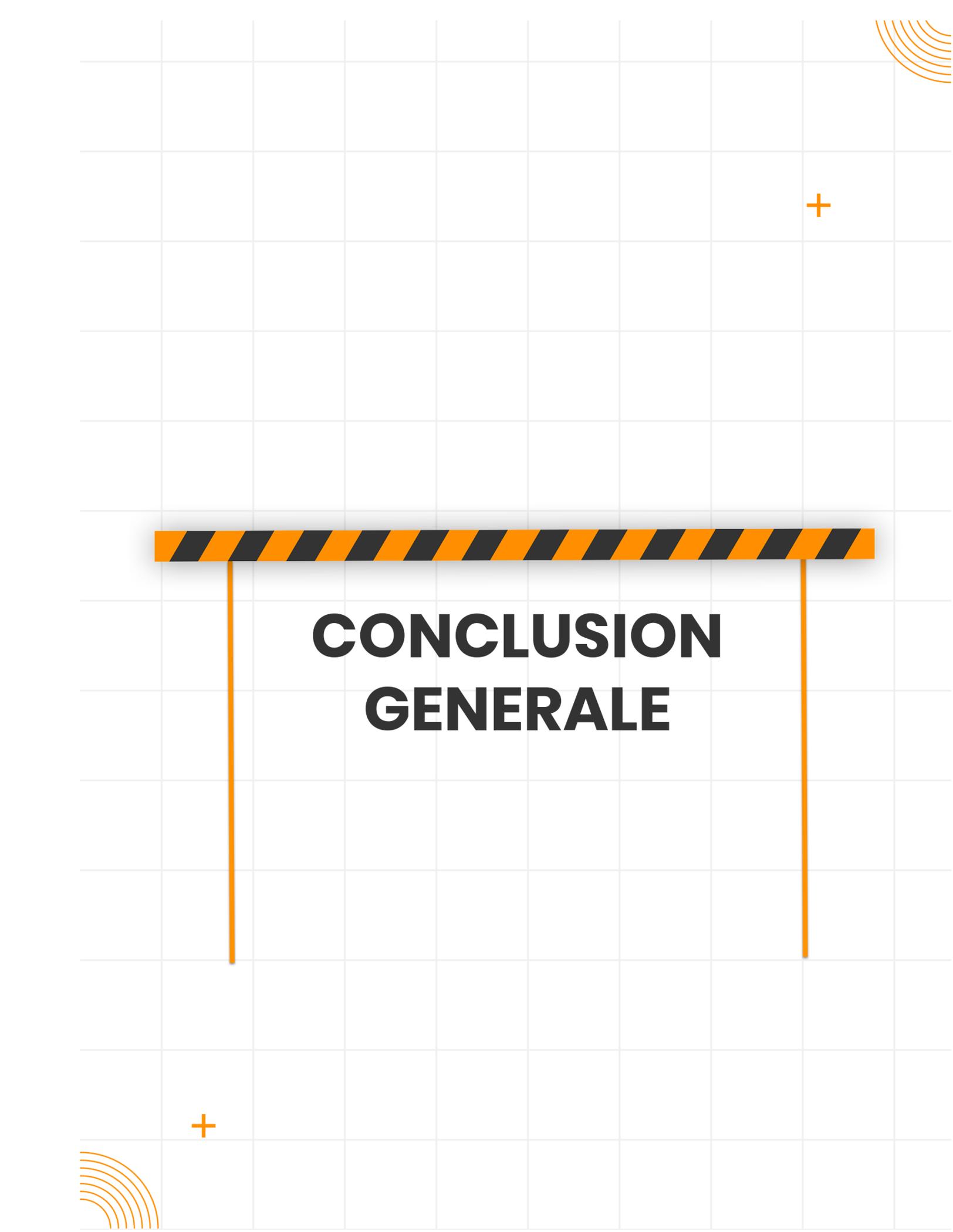
- L'augmentation de la contrainte dans le remblai avec la variation de la charge augmente.
- La variation de la charge provoque un déséquilibre dans la culée et les pieux et une augmentation des forces dans lesquels
- L'augmentation du déplacement avec la variation de la hauteur et la longueur du remblai augmente.
- L'augmentation du déplacement avec la variation des charges augmente.

### **Recommandation:**

Ce thème est inédit et cette étude n'a pas touché tous les aspects.

De ce fait, on peut élargir la recherche par une recommandation suivante:

- Renforcer le remblai pour limiter les tassements et diminuer les déplacements horizontaux et les déplacements verticaux du remblai.



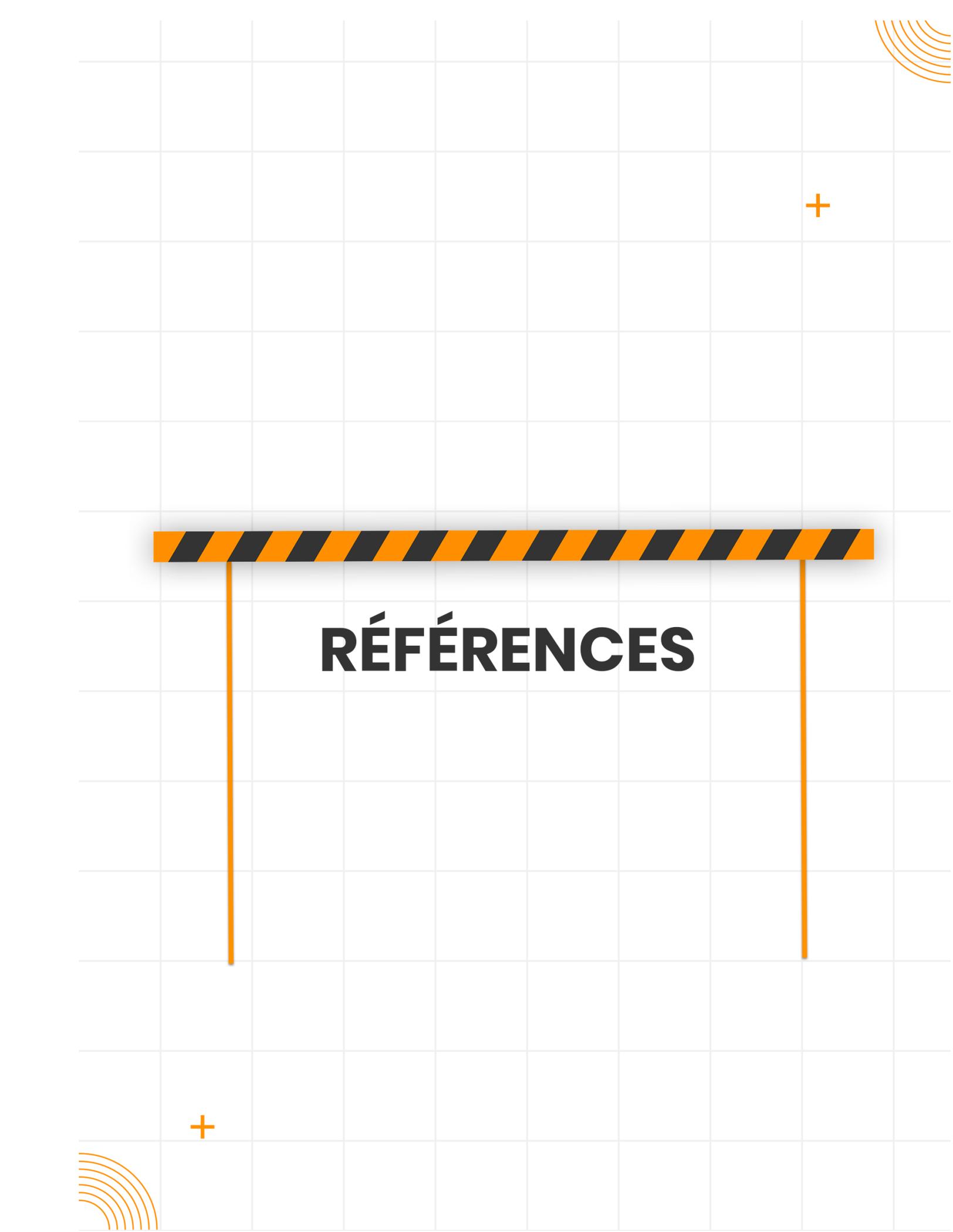
# **CONCLUSION GENERALE**

## Conclusion Général

Pour conclure ce travail de recherche vise une analyse des contraintes et déformations pour un remblai d'accès d'un pont situé dans la wilaya de Tébessa sur la RN 10.

- La nature du sol d'assise pour l'ouvrage caractérisé par des essais au laboratoire et une coupe géologique montre que le sol possède une faible résistance d'où la nécessité d'utilisation des fondations profondes
- Les résultats expérimentaux *in situ* et en laboratoire effectué par le laboratoire LTPE nous ont permis de les implanter dans un modèle numérique en utilisant le code plaxis
- Le modèle de comportement utilisé dans la modélisation numérique est le modèle de Mohr coulomb qui reste valable dans le domaine de chargement.
- Le chargement du remblai par le poids des trafics montre quelques points de plastification du sol du remblai
- L'analyse des résultats obtenus par la modélisation numérique montre la localisation des valeurs maximums des contraintes et des déplacements dans le corps du remblai
- Les variations des déplacements horizontaux et verticaux montrent les zones de déformations et du tassement du au chargement.

Pour donner suite à ces conclusions, il est possible d'améliorer la résistance du remblai par l'utilisation des géogrilles ou des inclusions rigides.



# RÉFÉRENCES

---

## Références

[1] : <https://www.ingenieurs.com/documents/exposes/procedes-generaux-de-construction-des-echangeurs-autoroutiers-379.php>

[2] : <https://www.permisecole.com/conduite/route/echangeurs>

[3] : **Mr ELKECHAI Fayçal Mr DAHMANI Akli** 2015 Université MOULOUD MAMMERRI de Tizi-Ouzou Etude d'un tronçon de la liaison Fréha – Azeffoun sur un linéaire de 5 km, avec conception d'échangeur.

[4] : **Jean-Armand CALGARO, Anne BERNARD-GELY** Date de publication : 10 août 2009 ARTICLE | Réf : C4496 v1 Définitions et catégories de ponts Conception des ponts - Démarche de conception.

[5] : <https://fr.scribd.com/document/499752950/Composants-des-ponts>

[6] : <http://elearning.univbiskra.dz/moodle2019/pluginfile.php>

Dr. Zakaria BOURAOUI Matière : DIMENSIONNEMENT DES PONTS II. Conception des culées.

[7] : **Ousmane MABIGNATH SALL** Promotion [2014/2015]. Etude Technique Du Pont De L'échangeur Leopold Sedar Senghor – Dimensionnement Des Eléments De Structure De L'ouvrage.

[8] : **BENIDIR Kamélia SMAIL Kamelia** Université MOULOUD MAMMERRI de Tizi-Ouzou Faculté de Génie de la Construction Département de Génie Civil Etude d'un tronçon routier de la voie express donia parc du PK 0+00 au PK 5+598 avec la conception d'un échangeur

[9] : **Miradjatou M.A.O. SANNI** 2015/2016. ÉTUDES GÉOTECHNIQUES DE LA CONSTRUCTION D'UN PONT A TOVÈGBAMÈ: FONDATIONS ET REMBLAIS D'ACCÈS SUR SOLS ARGILEUX 2015/2016 p 17-19

[10] : <https://www.bayo-s.com/fr/pieux-de-construction>

- [11] : Fondations profondes <https://www.techniques-ingenieur.fr/> Auteur(s) : Roger FRANK, Fahd CUIRA, Sébastien BURLON Date de publication : 10 déc. 2019
- [12] : **CHERIT Oussama et SELAMA Karim.** Analyse numérique de comportement des remblais d'accès de pont en sol renforcé par des géosynthétiques
- [13] : **DJABRI Mohamed.** Thèse doctorat Analyse numérique du comportement dynamique des remblais d'accès en sol renforcé\_ pdf p 110
- [14] : **Lamri I.** (2008), Etude du comportement d'un sol cohérent sous chargement monotonique et cyclique. Pdf p 25-31.
- [15] : **BISKRI Mohamed Larbi DERBAL Amira** Étude numérique paramétrique d'un remblai d'accès à un pont routier 2021/2022 .P 14- 16 p 51-52
- [16] : **AMIMEUR Koussila** ,Université Mohamed Boudiaf - M'sila, Comportement d'un remblai d'accès en sol renforcé sous chargement cycliques, 2015/2016. Page 66-68
- [17] : Brinkgreve R.B.J., 2003 plaxis manuel, Version 8 Manuel de référence pdf, p 2\_1-3\_60
- [18] : **DAHDOUH Manal** . ANALYSE DE LA STABILITE SISMIQUE D'UN REMBLAI DE GRANDE HAUTEUR . Université Mohamed Boudiaf - M'sila 2016/2017 p 3-5/ p10-12
- [19] : Sétra, Construire des remblais contigus aux ouvrages d'art Mur de soutènement et culées de pont, Janvier 2012, 20 pages.
- [20] : <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1245242.pdf> (Recommandations pour le diagnostic et le suivi des remblais routiers) p7et11
- [21] : **Manon Fortin, Serge Hébert, Audrey Laprade, Serge Rainville,** Évaluation du risque associé au remblai dans le cadre d'une évaluation environnementale de site - Phase I forum 2021
- [22] : **Abderrahim Salaheddine.Rehailia S. et Bouhadjar med s** FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL Calcule et modélisation numérique de la stabilité du Remblai sur zone inondable Année 2019.

---

[23] : <https://www.travauxavenue.com/exterieur-jardinpiscine/guidetravaux/terrassement/savoir-remlayer-terrain/>

[24] : <https://construction-maison.ooreka.fr/astuce/voir/745639/remblai>

[25] : [internet:http://www.setra.equipement.gouv.fr](http://www.setra.equipement.gouv.fr) (Guide technique FasciculeI Réalisation des remblais et des couches de forme)

[26] : **Abada S., Trad A.** (2021), étude numérique paramétrique du comportement d'un tunnel semiprofond avec une charge en surface du sol, page 72

[27] : **BOUGUESSA Med Islam et KAMEL Farouk.** Etude numérique d'un remblai sur sol compressible 2018. Page

[28] : <https://fr-fr.topographic-map.com/map->

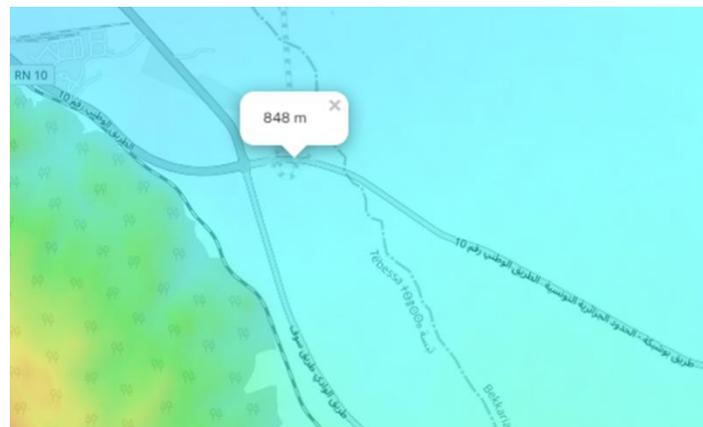
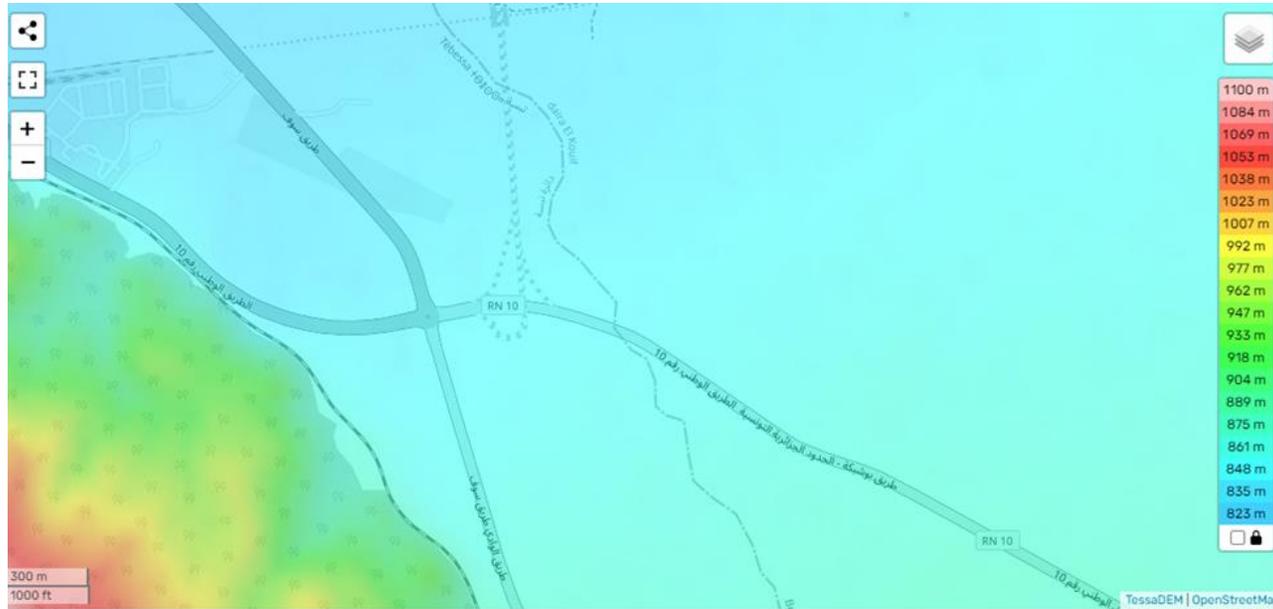
[29] : <https://dateandtime.info/fr/citycoordinates.php>

[30] : **TOUALBIA Billal, SAHI Youcef** (2020) Université Larbi tébessi Étude Comparative Des Renforcements Des Remblais Sur Sols Compressibles :-Inclusion Rigides - Geogrilles



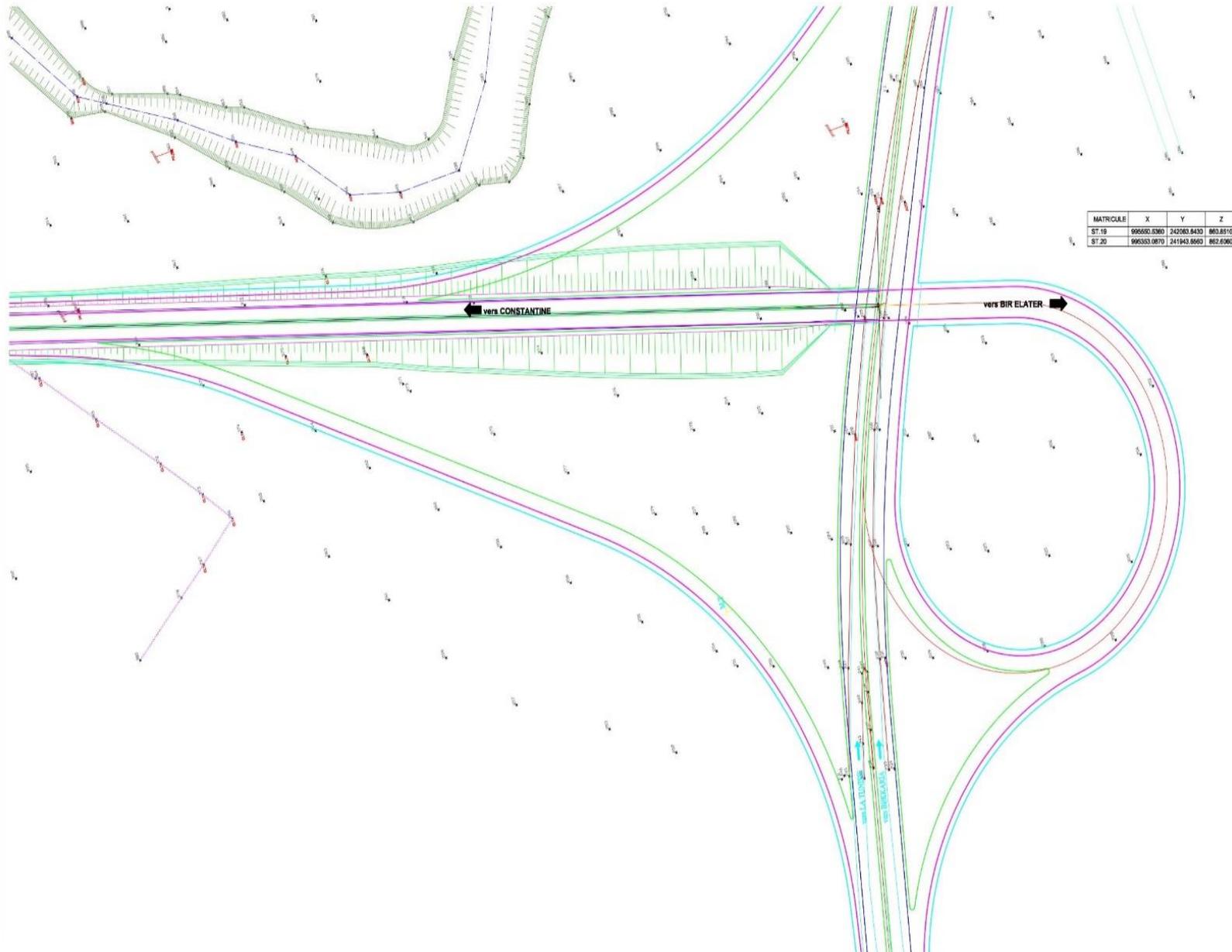
# ANNEXE





Carte topographique d'altitude de site du projet. [29]

20.01.2019 - 2007.dwg



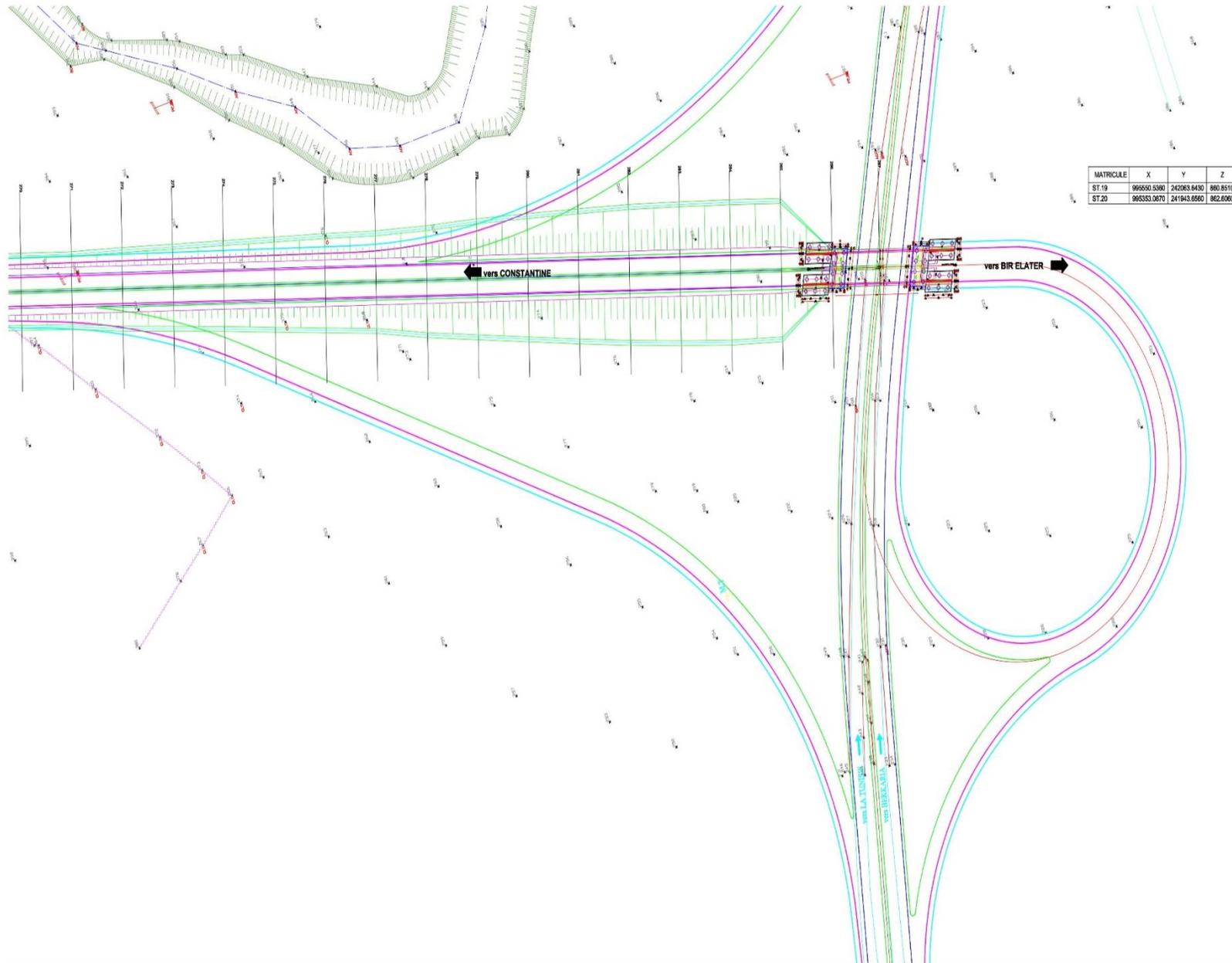

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
 Bureau d'Etude et Réalisation d'ouvrages d'Etat en Algérie  
 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 318, 319, 320, 321, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 330, 331, 332, 333, 334, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 341, 342, 343, 344, 345, 346, 347, 348, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 367, 368, 369, 370, 371, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 378, 379, 380, 381, 382, 383, 384, 385, 386, 387, 388, 389, 390, 391, 392, 393, 394, 395, 396, 397, 398, 399, 400, 401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415, 416, 417, 418, 419, 420, 421, 422, 423, 424, 425, 426, 427, 428, 429, 430, 431, 432, 433, 434, 435, 436, 437, 438, 439, 440, 441, 442, 443, 444, 445, 446, 447, 448, 449, 450, 451, 452, 453, 454, 455, 456, 457, 458, 459, 460, 461, 462, 463, 464, 465, 466, 467, 468, 469, 470, 471, 472, 473, 474, 475, 476, 477, 478, 479, 480, 481, 482, 483, 484, 485, 486, 487, 488, 489, 490, 491, 492, 493, 494, 495, 496, 497, 498, 499, 500, 501, 502, 503, 504, 505, 506, 507, 508, 509, 510, 511, 512, 513, 514, 515, 516, 517, 518, 519, 520, 521, 522, 523, 524, 525, 526, 527, 528, 529, 530, 531, 532, 533, 534, 535, 536, 537, 538, 539, 540, 541, 542, 543, 544, 545, 546, 547, 548, 549, 550, 551, 552, 553, 554, 555, 556, 557, 558, 559, 560, 561, 562, 563, 564, 565, 566, 567, 568, 569, 570, 571, 572, 573, 574, 575, 576, 577, 578, 579, 580, 581, 582, 583, 584, 585, 586, 587, 588, 589, 590, 591, 592, 593, 594, 595, 596, 597, 598, 599, 600, 601, 602, 603, 604, 605, 606, 607, 608, 609, 610, 611, 612, 613, 614, 615, 616, 617, 618, 619, 620, 621, 622, 623, 624, 625, 626, 627, 628, 629, 630, 631, 632, 633, 634, 635, 636, 637, 638, 639, 640, 641, 642, 643, 644, 645, 646, 647, 648, 649, 650, 651, 652, 653, 654, 655, 656, 657, 658, 659, 660, 661, 662, 663, 664, 665, 666, 667, 668, 669, 670, 671, 672, 673, 674, 675, 676, 677, 678, 679, 680, 681, 682, 683, 684, 685, 686, 687, 688, 689, 690, 691, 692, 693, 694, 695, 696, 697, 698, 699, 700, 701, 702, 703, 704, 705, 706, 707, 708, 709, 710, 711, 712, 713, 714, 715, 716, 717, 718, 719, 720, 721, 722, 723, 724, 725, 726, 727, 728, 729, 730, 731, 732, 733, 734, 735, 736, 737, 738, 739, 740, 741, 742, 743, 744, 745, 746, 747, 748, 749, 750, 751, 752, 753, 754, 755, 756, 757, 758, 759, 760, 761, 762, 763, 764, 765, 766, 767, 768, 769, 770, 771, 772, 773, 774, 775, 776, 777, 778, 779, 780, 781, 782, 783, 784, 785, 786, 787, 788, 789, 790, 791, 792, 793, 794, 795, 796, 797, 798, 799, 800, 801, 802, 803, 804, 805, 806, 807, 808, 809, 810, 811, 812, 813, 814, 815, 816, 817, 818, 819, 820, 821, 822, 823, 824, 825, 826, 827, 828, 829, 830, 831, 832, 833, 834, 835, 836, 837, 838, 839, 840, 841, 842, 843, 844, 845, 846, 847, 848, 849, 850, 851, 852, 853, 854, 855, 856, 857, 858, 859, 860, 861, 862, 863, 864, 865, 866, 867, 868, 869, 870, 871, 872, 873, 874, 875, 876, 877, 878, 879, 880, 881, 882, 883, 884, 885, 886, 887, 888, 889, 890, 891, 892, 893, 894, 895, 896, 897, 898, 899, 900, 901, 902, 903, 904, 905, 906, 907, 908, 909, 910, 911, 912, 913, 914, 915, 916, 917, 918, 919, 920, 921, 922, 923, 924, 925, 926, 927, 928, 929, 930, 931, 932, 933, 934, 935, 936, 937, 938, 939, 940, 941, 942, 943, 944, 945, 946, 947, 948, 949, 950, 951, 952, 953, 954, 955, 956, 957, 958, 959, 960, 961, 962, 963, 964, 965, 966, 967, 968, 969, 970, 971, 972, 973, 974, 975, 976, 977, 978, 979, 980, 981, 982, 983, 984, 985, 986, 987, 988, 989, 990, 991, 992, 993, 994, 995, 996, 997, 998, 999, 1000.

**MATRICULE DE COUVREUR: D.T.P TEBESSA**  
**PROJET:**  
 ETUDE ET REALISATION DE (05) OUVRAGES  
 D'ARTS Y COMPRIS LES DALOTES,  
 ETUDE ET REALISATION D'UN ECHANGEUR  
 AU PK 17+000.  
**INTITULE DU PLAN:** LEVE TOPOGRAPHIQUE  
**Ref:** EN -PR 2-02  
**Code:** 91-0118  
**N° Plan:** 1

DESIGNER: TOUM. S.	Titre:
PROJETEUR: ZINE A.	
INGENIEUR RESPONSABLE: MAMMERI H.	
Date: 10/2018	Echelle: 1/500
Intitulé:	Date:
	Signature/Ingenieur/Projeteur:

Ce plan est propriété exclusive de la S.E.R.O -EST et ne peut être reproduit sans autorisation

ossier Final PK 17+000 échangeur 20.01.2019 - 2007.dwg



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
 Société d'Etude et de Réalisation d'Ouvrages d'Art et de Travaux  
 S.E.R.O -EST  
 23 Kachia - Bataïa BP 340 R.P  
 Tél: 033.22.24.30 - 22.25.80 Fax: 033.22.24.17 Email: SEROEST1@YAHOO.FR

NOM DE L'OUVRAGE: D.T.P TEBESSA  
 PROJET: ETUDE ET REALISATION DE (03) OUVRAGES D'ARTS Y COMPRIS LES DALOTS, ETUDE ET REALISATION D'UN ECHANGEUR AU PK 17+000.  
 NITALE DU PLAN: TRACE EN PLAN  
 Echelle: 1/500  
 N° Plan: 2

INGENIEUR: TOUMI - S.	Vice:
DESIGNATEUR: ZINE - A.	
PROJETEUR: ZINE - A.	
INGENIEUR VERIFICATEUR: MAHMER - M.	
Date: 19/2019	Echelle: 1/500
Modifié par:	Date:
	Signature/Ingenieur/Coordinateur/Projeteur

Ce plan est propriété exclusive de la S.E.R.O -EST et ne peut être reproduit sans autorisation



**CLIENT: D.T.P TÉBESSA**

**Objet:** Essai Sur Matériau TUF « Gite Kaf Ereka »

**Chantier:** Lot N°04: Réalisation De L'évitement De La Ville De Tébéssa Sur 1.8 Kms Du Pk 04+200 Au Pk 06+000 Y Compris Les Bretelles De L'échangeur Sur La Rn 10.

Les analyses du matériau ont porté sur la réalisation des essais d'identifications suivants :

- ✓ Analyse granulométrique. NF-EN 933-1-A
- ✓ Mesure De L'ES. NF- EN 933-8
- ✓ Essai Proctor Modifier. NF P 94-093
- ✓ Limite D'atterberg. NF P 94-051

Les résultats obtenus sont insérés dans le tableau récapitulatif ci-après :

Désignation	G.R	ES	Proctor	Limite	O.B.S
TUF « Gite Kaf Ereka »	Voir Courbe	22	$y_d = 1.90$ $w\% = 12\%$	LL = 47 IP = 16 LP = 31	% des fines = 36.16 %

**CONCLUSION:** D'après les résultats obtenus, le matériau analysé présente des caractéristiques Géotechniques acceptables pour corps de remblai

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DE L'EST  
DIRECTION DE ANNABA  
ANTENNE DE TEBESSA  
ANALYSE GRANULOMETRIQUE

**CLIENT : D.T.P TEBESSA**

