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

UNIVERSITE d'ADRAR FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TECHNOLOGIE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DEL'OBTENTION DU DIPLOME MASTER II EN GÉNIE CIVIL

OPTION: GEOTECHNIQUE.

Thème:

Etude numérique d'u comportement d'un sol en cas des excavations profondes.

Présenté par :

Akrabou Fatima. Hantaoui Fouzia.

Soutenu le : 07/07/2019.

Devant le jury composé de :

Pr. MEKERTA. Univ.d'ADRAR Président

Mr.HAMOUDA. Univ.d'ADRAR Examinateur

Dr. BALEGH. Univ.d'ADRAR Encadreur

Année Universitaire: 2019/2020





Tous d'abord nous remercions avant tous, Dieu le tout puissant qui nous a donné le courage, et la volonté pour atteindre notre objectif, et tous les enseignants qui ont contribués à notre formation durant tous les cycles.

Nous remercions vivement, notre encadreur **Mr.Balegh Benamar** de nous avoir pris en charges, et pour sa disponibilité, son aide et ses précieux conseils.

Nous portons avec gratitude de reconnaissance pour l'ensemble des professeurs du département de Génie Civil qui ont contribué à notre formation d'ingénieur en Génie Civil.

Nous ne saurons pas oublier de remercier les honorables Membres du Jury qui nous ont fait l'immense honneur de présider et d'examiner ce mémoire.

A tous ceux ou celles qui nous apportés leur soutien, trouvent ici, l'expression de nos vive et sincère reconnaissance.





Au nom de Dieu le clément et le Miséricordieux et en termes d'amour et de Fidélité, je dédie ce modeste travail :

- ❖ A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes cotes et ma soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de ma voir devenir ce que je suis, merci mes parents.
- ❖ A mes très chérs sœurs : Wafa , Aicha, Chaima, Hadjar et Safa.
- ❖ A mes très chérs frères : Mohamed et Abdelaziz et Ismail.
- ❖ A toute ma famille : Akrabou et Bassouade.
- ❖ A celui qui a collaboré dans la réalisation de ce mémoire, à toi Fouzia.
- ❖ A tous la promotion de master 2 génie civil.
- ❖ Enfin, à tous ceux qui nous sont très chérs.





Au nom de Dieu le clément et le Miséricordieux et en termes d'amour et de Fidélité, je dédie ce modeste travail :

- ❖ A mes très chérs parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes cotes et ma soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de ma voir devenir ce que je suis, merci mes parents.
- ❖ A mes très chérs sœur : Fatima.
- ❖ A mes très chérs frères : Ali, Abdelkarim, Abdelaziz, Mohamed, Abdelslam.
- ❖ A toute ma famille.
- ❖ Et mon ami et collégue Abdelmalek Djeha.
- ❖ A celui qui a collaboré dans la réalisation de ce mémoire, à toi Fatima.
- ❖ A tous la promotion de master 2 génie civil.





يقدم هذا المشروع الدراسة الجيوتقنية لعملية الحفر على مستوى مواقع البناءات والإدارية وغيرها مع ذكر مبادئ وأهمية هذه العملية لتحقيق وضمان استقرارها مستقبلا و ذلك مرورا بتقنيات عديدة. كما نتطرق في مذكرتنا هذه إلى التجارب الجيوتقنية اللازمة بالنسبة للمصادر وقد تم استخدام برنامج « COMSOL Multiphysics » لأجل الدراسة الرقمية لتقديم نتائج والتي عبارة عن منحنيات نقوم بالتعليق عليها في الأخير.

الكلمات المفتاحية: أعمال الحفر, التربة, , النمذجة, التشوه, برنامج COMSOL Multiphysics.



Ce projet présente l'étude géotechnique des travaux de terrassement au niveau des sites de construction résidentiels, administratifs et autres, tout en mentionnant les principes et l'importance de ce processus pour atteindre et assurer sa stabilité future, ainsi que de nombreuses techniques. Dans notre mémoire, nous faisons référence aux expériences géotechniques nécessaires pour étudier le processus de forage des sources. Logiciel « COMSOL Multiphysics » ayant été utilisé pour l'étude mathématique pour présenter les résultats, qui sont des courbes que nous commentons dans ces dernières.

Mots clés: sol, terrassement, modélisation, déformation, logiciel COMSOL Multiphysics.



This project presents the geotechnical study of the drilling process at the level of residential, administrative and other buildings, with the principles and importance of this process to achieve and ensure its future stability through many techniques. In our memorandum, we also refer to the geotechnical experiments necessary to study the drilling of resources. "COMSOL Multiphysics" was used for the numerical study to present the results, which are the curves we comment on it on the later.

Key words: Soil, earthworks, modeling, deformation, COMSOL Multiphysics software.

Dédicace.

Remerciement.

Résumé.

Abstract.

الملخص

Introduction général.

Chapitre I : Généralités sur les travaux de terrassement.

I-Introduction	2
I.1- Définitions	2
I.2- Les travaux de terrassement	3
I.2.1- Domaines d'utilisations	4
I.2.2- Les étapes fondamentales dans les travaux de terrassement	4
I.2.3- Ouvrages	6
I.3- Etudes géotechniques de terrassement	9
I.3.1- Reconnaissance des sols	9
I.4- Travaux des fouilles	13
I.4.1- Le blindage des fouilles	14
I.5- Le terrassement en présence de l'eau et de la roche	15
I.6- Les engins de terrassement	. 17
I.7- Conclusion	23
Chapitre II : Stabilité des terrassements.	
II- Introduction :	21
II.1- Notion de terrassement :	21
II.1.1- Nature de terrassement :	21
II.1.2- Nature géométrique :	21
II.2- Talus de terrassements:	22

II.2.1- Pentes de talus :	22
II.3- Modes d'instabilités affectant les pentes de sol :	23
II.3.1- Le glissement :	23
II.3.2- Le rupture :	23
II.3.3- Les écroulements :	24
II.2.4- Eboulement:	24
II.3.5- Le renversement :	25
II.3.6- Mouvements de fluage :	25
II.3.7- Diffusion latérale :	26
II.4- Etude de la stabilité des pentes :	27
II.5- les méthodes de stabilisation :	28
II.6- Conclusion :	31
Chapitre III: Terrassement en excavations profondes.	
III- Introduction :	32
III.1-Les travaux d'excavation :	32
III.2- Exigences de sécurité :	33
III.3-Types de sol :	33
III.4- Canalisations souterraines :	34
III.5-Parois des excavations et des tranchées :	34
III.6- Causes d'effondrement :	34
III.7- Les essais géotechniques dans les travaux de terrassement :	43
III.7.1- Essais à la mise on œuvre :	43
III.7.2- Les essais au niveau de laboratoire :	44
III.8- Conclusion :	50
Chapitre IV : Les étapes de la modélisation de COMSOLMultiphy	sics.
IV-Introduction:	52
IV.1- Définition de logiciel COMSOLMultiphysic :	52
IV.2- Conception d'un modèle :	53
IV.3- Choix du matériau :	54
IV.4- Les étapes de modélisation :	54

Chapitre V : Résultats et discussions de logiciel COMSOLMultiphysics.

V. Introduction	62
V.1- Résultats et interprétations	62
V 2- Conclusion	67

Conclusion générale.

Liste des figures.

Chapitre I : Généralités sur les travaux de terrassement.

Figurel-1 : Plateforme au-dessus d'une arase de déblai	3
Figure I-2 : Plateforme au-dessus d'un arase de remblai	3
Figure I-3 : Chantier de travaux de terrassement.	4
Figure I-4: Définition de remblai / remblai	5
FigureI-5 : Déblai dans chantier	5
Figure I-6 : Remblai dans chantier	6
FigureI-7: Terrassemnt pour le fondations	7
Figure I-8 : Terrassement d'ouvrages annexes aux bâtiments	8
Figure I-9 : Terrassement pour d'ouvrages d'infrastructure des réseaux enterrés	8
FigureI-10 : Construction de blindage.	14
Figure I-11 : Blindage de fouille.	14
FigureI-12 :Pelle hydraulique équipée en rétro	19
FigureI-13:Pelle hydraulique équipée en buttée	19
FigureI-14 :Chargeur à roues.	19
FigureI-15:Chargeuse pelleteuse (tractopelle)	20
Figur I-16 :Scarificateur	20
Figure I-17:Bouteur (bulldozer).équipé en ripper	20
FigureI-18 :Décapeuse	21
FigureI-19:Tribenne	22
FigureI-20:Tombereau articulé	24
Figure I-21 :Tombereau rigide	22
FigureI-22 :Compacteur à pieds dameurs vibreur.	
FigureI-23 :Compacteur à pieds dameurs vibreur.	26
FigureI-24 :Compacteur mono-cylindre	26
FigureI-25 : Dimensionnement.	27
FigureI-26 : Terrassement de la fondation	28
Chapitre II :Stabilité des terrassements.	
FigureII-1 :Pentes (ou talus) en déblai et en remblai.	26
FigureII-2 :Déblai et remblai	27

FigureII-3: Exemple d'angle de stabilité (SETRA, 200.8).	27
Figure II- 4 : Glissement de terrain	29
Figure II-5 : Schéma descriptif d'un glissement plan	30
Figure II-6: Eléments descriptifs d'un glissement rotationnel.	30
FigureII-7: L'écroulement.	32
FigureII-8: Un Eboulement rocheux.	32
FigureII-9: Le renversement.	33
FigureII-10 : Mouvement de fluage.	34
Figure II-11: La propagation latérale/	34
Figure II-12 : Etude de stabilité pour le cas d'un glissement plan	37
Figure II-13:Rupture circulaire d'un talus en sol purement cohérent.	39
FigureII-14 :Talus en déblais dans un matériau pulvérulent.	40
Figure II-15 : Evolution du niveau piézométrique dans un talus de délai en sol fin	41
Figure II-16 : Ecoulement d'eau dans une pente en sol pulvérulent saturé	41
Figure II-19 : Méthodes de tranche	46
FigureII- 20: Machine de forage de pieux.	49
FigureII-21 : Forage de pieux.	48
Chapitre III: Terrassement en excavations profondes.	
FigureIII-1 : Chantier de travaux d'excavation	32
FigureIII-2 : Excavation profonde	33
FigureIII-3: Différence entre l'excavation et tranchée.	34
Figure III-4 : Soutènements des tranchés	36
FigureIII-5 : Canalisations souterrain.	38
Figure III-6 : Réalisation des parois	39
FigureIII-7 : Excavation d'une paroi.	40
Figure III-8: l'angle de repos.	40
Figure III-9: Plusieurs facteurs affectent la stabilité d'une tranchée	41
Figure III-10 : Etaiement hydraulique	41
FigureIII-11: Étaiement en bois	42
FigureIII-12: Étaiement à système de vérins.	42
Figure III-13: Palplanches	42
Figure III-14: Boîte de tranchée	42

Figure III- 15: Matériels utilisées.	44
Figure III-16: Matériels utilisées.	45
Figure III-17: Les tamisâtes.	46
Figure III-18: Appareil de Casagrande	47
Figure III-19: Déterminer la limite de plasticité.	48
Figure III-20: Etats de consistance d'un sol	49
Chapitre IV :Les étapes de la modélisation de COMSOLMultiphysi	cs.
FigureIV-1: Logiciel	52
FigureIV-2 : Vue en 3D sur le rideau de palplanche	53
Figure IV-3 : Condition Initiales et condition aux limé	54
Figure IV-4: Libre	54
Figur IV-5 : Symétrie.	55
Figure IV-6 : Limite fixé.	55
Figure IV-7 : Appui simple.	56
Figure IV-8 : Limite de déplacement.	56
Figure IV-9 : Surcharges.	57
Figure IV-10 : Les contraintes horizontales de poussées	57
FigureIV-11 : Choix de maillage	58
FigureIV-12 : Sol, couche supérieur	58
FigureIV-13 : Sol, couche inférieure	59
Figure IV-14 : Mur de soutènement.	59
Chapitre V : Résultats et discussions du logiciel COMSOL Multiphysics	
Figure V-1 : Déplacements totaux en (mm)	63
Figure V-2 : Régions et déformations plastiques	
Figure V-3 : Contraintes Horizontales.	
Figure V-4 : Variation de déplacements horizontaux en fonction de profondeur	

Liste des tableaux.

Chapitre I : Généralités sur les travaux de terrassement. Chapitre II : Stabilité des terrassements. **Chapitre III: Terrassement en excavations profondes.** Tableau III-1: Hauteur maximale admissible en m, pour coupes verticales, non soumis Chapitre IV: Les étapes de la modélisation de COMSOLMultiphysics.

Liste des notations.

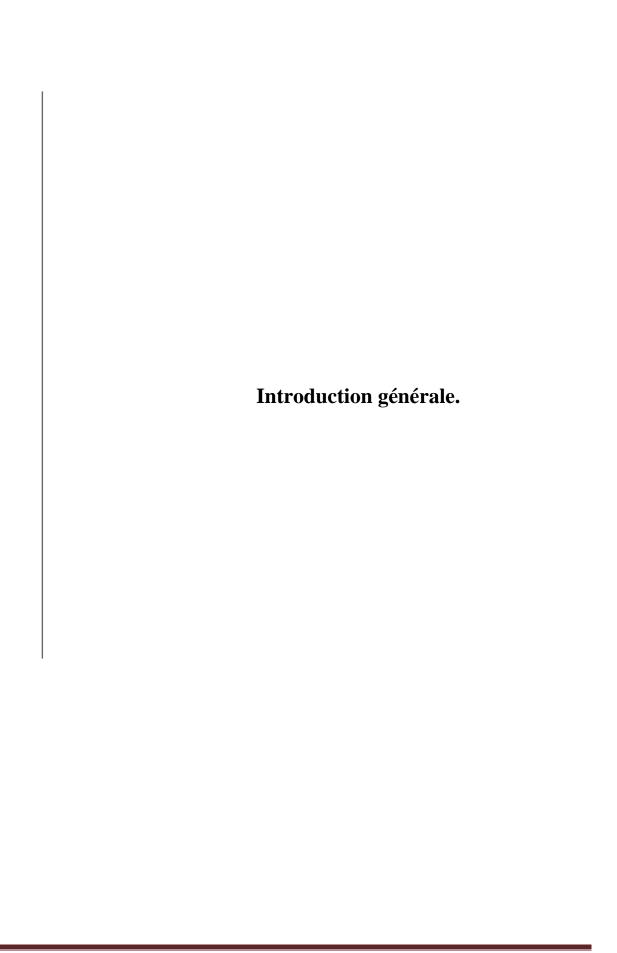
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	
$\begin{array}{lll} H & \text{Hauteur, \'epaisseur} \\ H_{max} & \text{Hauteur maximales} \\ P_{M}, & \text{R\'eaction lat\'erale} \\ P_{A} & \text{Poids} \\ W & \text{Poids tangential} \\ W_{T} & \text{Poids normal} \\ W_{N} & \text{R\'eaction} \\ R & \text{R\'eaction tangential} \\ \end{array}$	
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	
$\begin{array}{lll} P_M, & \text{R\'eaction lat\'erale} \\ P_A & \text{Poids} \\ W & \text{Poids tangential} \\ W_T & \text{Poids normal} \\ W_N & \text{R\'eaction} \\ R & \text{R\'eaction tangential} \end{array}$	
$\begin{array}{ccc} P_A & Poids \\ W & Poids tangential \\ W_T & Poids normal \\ W_N & Réaction \\ R & Réaction tangential \end{array}$	
W _N Réaction R Réaction tangential	
R Réaction tangential	
R _T Réaction normal	
R _N Dimension	
L Masse	
M Masse total	
M _T Indice de plasticité	
I _P Indice de liquidité	
I _L Indice de consistance	
I _C Tension, tension capillaire, tenseur de contrainte, facteur temps	
T Pression, force totale de contacte, force concentrée	
K Teneur en eau, poids propre	
W Limite de liquidité	
W _L Limite de plasticité	
W _P Module d'élasticité	
E Moment d inertie	
I	

	Notations en minuscules
c	Compacité, cohésion
d'	densité déjaugée

d_d	densité sèche
d_h	densité humide
d_s	densité de la phase solide
e	Indice des vides, vecteur unitaire
f	Fonction de charge, fonction
fv	Force de volume
h	Hauteur, charge hydraulique, épaisseur
k_0	Coefficient de poussée des terres au repos
1	Longueur d'un chemin, vecteur unitaire
m	Paramètres, vecteur unitaire
m_s	Masse de la phase solide
m_{t}	Masse totale
n	Porosité, paramètre, nombre de carreaux, vecteur unitaire normal
ni	Composante de vecteur unitaire normal
p_a	Poussée active
p_p	Poussée passive
p_s	Poids de la phase solide
p_{t}	Poids totale
$p_{\rm w}$	Poids de l'eau
q	Débit, charge répartie
r	Vecteur position, rayon d'un cercle
t	Temps, vecteur contrainte
u	Pression interstitielle, vecteur ou composante déplacement
v	Vitesse, vitesse de décharge, composante de déplacement
w	Masse, composante de déplacement

	Symboles minuscules
α	Angle, scalaire, inclinaison d'un écran par rapport à l'horizontale
α_0	inclinaison d'une surcharge
$\alpha_{\rm r}$	inclinaison du plan de rupture
β	Angle, inclinaison de la surface libre d'un massif
γ'	Poids volumique déjaugé
$\gamma_{ m d}$	Poids volumique sec

γ_{h}	Poids volumique humide
$\gamma_{\rm s}$	Poids volumique des grains solides
γ_{sat}	Poids volumique du sol saturé
$\gamma_{ m w}$	Poids volumique de l'eau
δ	Angle, angle de frottement massif-écran
δ_{ij}	Symbole de Kronecker
λ	Valeur propre, coefficient de Lamé, inclinaison d'un écran par rapport à
μ	la verticale
ν	Coefficient de Lamé
η	Coefficient de Poisson
θ	Coefficient de viscosité
ρ	Angle de position
ρ'	Masse volumique, distance radiale
$ ho_{ m d}$	Masse volumique déjaugée
ρ_{h}	Masse volumique sèche
$\rho_{\rm s}$	Masse volumique humide
$ ho_{ m w}$	Masse volumique des grains solides
σ	Masse volumique de l'eau
σ_1	Contrainte normale, contrainte normale totale, tenseur de contrainte
$\sigma_2\sigma_3$	Contrainte principales
σ'	Contrainte normale effective, contrainte dans un nouveau repère
τ	Résistance, contrainte tangentielle totale
$ au_{max}$	Contrainte maximale
τ'	Contrainte tangentielle effective
φ	Potentiel de vitesse, angle de frottement interne
φ'	Angle de frottement interne (analyse en contraintes effectives)



Introduction générale:

L'étude géotechnique des sols et matériaux est très important dans les projets de grand terrassement et divers types d'excavation dans les domaines de génie civil et travaux public, car il est une opération dont dépend en grande partie la qualité de l'ouvrage projeté. L'étude géotechnique sa rapport aux sols et eaux souterraines en tant qu'élément intervenant dans la stabilité et le bon comportement des constructions provisoires ou définitives.

La géotechnique est l'ensemble des activités liées aux applications de la Mécanique des Sols, de la Mécanique des Roches et de la Géologie de l'Ingénieur.

La Mécanique des Sols étudie plus particulièrement le comportement des sols sous leurs aspects résistance et déformabilité. C'est l'étude des propriétés physiques, hydrauliques et mécaniques des sols et des méthodes de calcul permettant de prévoir leur comportement sous l'action de l'eau et des charges.

L'étude géotechnique dans le domaine génie civil entraine d'importantes mouvements de terres matérialisés par des opérations de terrassement, compactages et d'excavations dont les risques les plus importants qui menace les structure ou l'ouvrage, et les solutions suggérées.

Le présent travail est une étude technique de terrassement avec une étude numérique d'excavation par logiciel COMSOL Multiphysics.

L'étude de ce projet sera menée selon les chapitres suivants :

- ❖ Le premier chapitre est consacré à généralités sur les travaux de terrassement, par la définition et les éléments principaux dans les travaux.
- ❖ Le deuxième chapitre est la détermination de la stabilité de terrassement, on présente les risques et les méthodes de vérification de la stabilisation.
- ❖ Le troisième chapitre est présenté le terrassement en excavation profonde et par les éléments d'excavation avec les essais géotechniques dans les travaux de terrassement selon les normes reconnus.
- Le quatrième chapitre est consacré les étapes de modélisation par le logiciel COMSOL Multiphysics.
- Le cinquième chapitre représente les résultats numériques et discussion de l'état du sol lors d'une excavation profonde des travaux des terrassements par le logiciel COMSOL Multiphysics.
- Nous terminerons ce travail par une conclusion générale, dans laquelle nous rappellerons le cadre de l'étude.

CHA	APITRE I :
	Généralités sur les travaux de terrassement.

I-Introduction:

La construction d'un ouvrage soit (tunnel, route, pont, bâtiment, barrage, ...), il est nécessaire de modifier le terrain naturel. Il faut profiler la surface du terrain de telle sorte qu'il soit apte à supporter le poids de l'ouvrage et à en intégrer la forme. L'ensemble de ces opérations s'appelle "le terrassement".

Les travaux de terrassement sont basés sur trois actions principales : l'extraction, le transport, la mise en œuvre. Il peut exister des travaux de grandes ampleurs (travaux routiers, aménagements de plateformes, travaux ferroviaires ou fluviaux, etc.) ou légers (tranchées de réseaux enterrés, aménagements de maisons individuelles, drains, etc.). Le métier est basé sur le retour d'expérience et l'empirisme car ce sont essentiellement des matériaux naturels qui sont remaniés.

I.1- Définitions :

- Le terrassement : tout mouvement de terres (remblai ou déblai) constitue un terrassement.

 Creuser une fouille, une rigole ou plus généralement modifier le relief du sol représente en soi des terrassements. Il n'existe pas un seul matériau à terrasser mais plusieurs sortes possibles :

 Rochers terre gravier et sable -limon argile. [1]
- La chaussée : est une structure multicouche mise en œuvre sur une plate3forme support de sol terrassé. Elle supporte plusieurs types de sollicitations : répartition de la contrainte des charges verticales (référence : essieu standard de 130KN), sollicitations tangentielles dues au passage des véhicules (mouvement entraînant des efforts horizontaux), sollicitations climatiques (eaux infiltrés, gel). [2]
- Partie supérieure des terrassements (PST): elle désigne conventionnellement le mètre supérieur des terrains rapportés (cas des remblais) ou en place (cas des déblais). La surface de la PST est dénommée « arase » (AR). [1]
- Couche de forme : positionnée sur l'arase, elle est constituée de matériaux granulaires ou traités, insensibles à l'eau et au gel, sur une épaisseur usuelle de 0,20 à 0,80 m. La surface de la couche de forme est dénommée « plateforme ». [1]

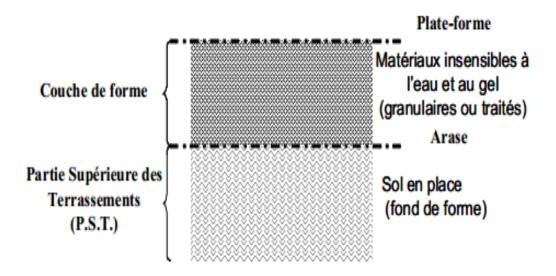


Figure I-1 : Plateforme au-dessus d'une arase de déblai.[1]

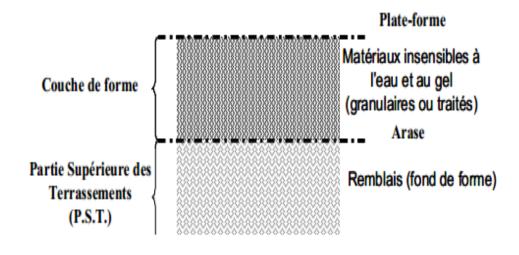


Figure I-2 : Plateforme au-dessus d'un arase de remblai.[1]

I.2- Les travaux de terrassement :

Les travaux de terrassement interviennent au début des chantiers avant toute construction. Ils sont basés sur trois actions principales : l'extraction, le transport, la mise en œuvre. Il peut exister des travaux de grandes ampleurs (travaux routiers, aménagements de plateformes, travaux ferroviaires ou fluviaux, etc.) ou légers (tranchées de réseaux enterrés, aménagements de maisons individuelles, drains, etc.). Le métier est basé sur le retour d'expérience et l'empirisme car ce sont essentiellement des matériaux naturels qui sont remaniés.



Figure I-3 : Chantier de travaux de terrassement. [1]

I.2.1- Domaines d'utilisations :

Les classes techniques générales pour travaux de terrassement concernent les travaux de déblaiement, de transport, de chargement, de remblaiement et de compactage de sols de toute nature. [1]

I.2.2- Les étapes fondamentales dans les travaux de terrassement :

Les travaux de terrassement se déroulent suivant un processus bien déterminé dont aucune des étapes successif ne doit être négligé. Il s'agit :[3]

- Le déblai : consiste à enlever des terres, il peut se faire manuellement (pelle, pioche,..) ou à l'aide d'engins mécanique en cas de terrain rocheux. Ainsi il existe deux types de déblai suivants :
 - Le déblai d'excavation : utilisé pour les travaux de terrassements sur plus de 25 cm d'épaisseur.
 - Le déblai en tranché : servant la réalisation des réseaux et fondations.

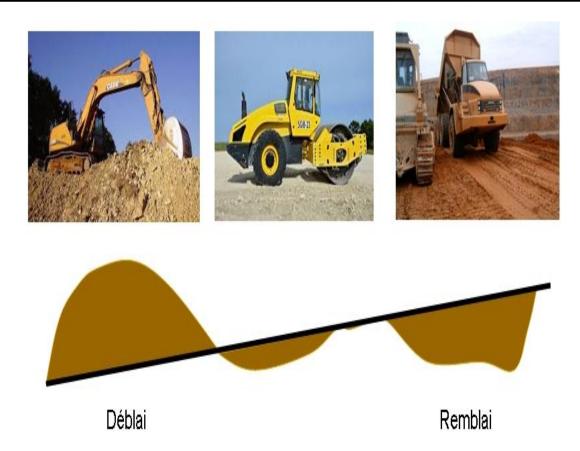


Figure I-4: Définition de remblai / remblai. [3]



Figure I-5 : Déblai dans chantier. [1]

Le remblai : consiste à rapporter des terres a fin de relever le de niveau, il sert à préparer les terres et pour entreprendre par la suite tous les travaux de terrassement. Il prend en considération le tassement et le coefficient de foisonnement des sols.



Figure I-6: Remblai dans chantier. [3]

Décapage : consiste à éliminer la couche supérieur du terrain entre autre la terre végétale. L'épaisseur de la couche à décaper varie de 20 à 30 cm. On quantifie souvent ce décapage en m².

I.2.3- Ouvrages:

Les opérations de terrassement visent également à l'excavation :[3]

- De la préparation des fondations superficielles (profondes).





Figure I-7: Terrassemnt pour le fondations.[3]

- D'ouvrages annexes aux bâtiments tels que tous les ouvrages de voierie (routes d'accès aires de stationnement et aires diverses....).

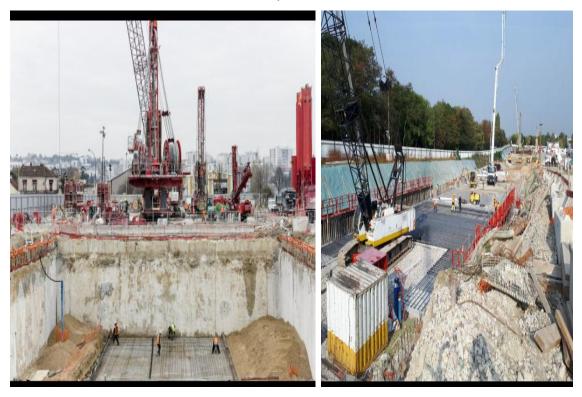


Figure I-8: Terrassement d'ouvrages annexes aux bâtiments.[3]

- D'ouvrages d'infrastructure des réseaux enterrés (canalisations diverses, galeries, regards etc).



Figure I-9: Terrassement pour d'ouvrages d'infrastructure des réseaux enterrés.[3]

I.3- Etudes géotechniques de terrassement :

L'objectif d'une étude géotechnique du sol dans projet de construction, est définie la contrainte ou portance admissible. Le résultat de l'étude de sol se traduit à l'aide d'un rapport de mission d'étude géotechnique et des terrassements de projet de construction. Le rapport indiquera clairement le toit d'assise (profondeur) des fondations d'ouvrage.

I.3.1- Reconnaissance des sols:

Réaliser une construction, quelle qu'elle soit, est toujours un moment important qui demande à la fois de l'attention et des connaissances. C'est le cas pour le calcul de la capacité portante de chaque sol. [3]

- La capacité portante du terrain : est le premier élément à prendre en compte lors de l'exécution de terrassement, et aussi l'importance de l'ouvrage à édifier qui décide de l'ampleur des moyens de reconnaissance à maitre en œuvre.
- Les sondages : c'est l'exécution de trous de sonde qui visent essentiellement à :
 - Reconnaitre les couches de terrain valable, les nappes d'eau éventuelles a traversé.
 - Rechercher la zone de terrain valable (bon sol) pour planter les fondations.

Ils s'exécutent:

- Soit à ciel ouvert : puits, tranchées en gradins.
- Soit par forage mécanique : réalisé a l'aide de matériels divers plus ou moins perfectionnés.
- Foisonnement des sols : est la capacité d'un sol ou de gravats à augmenter de volume lors de déplacement de matériau. Le calcule de facteur de foisonnement est nécessaire pour savoir le volume de la terre à transporter.

On distingue plusieurs coefficients suivants :

- Le coefficient ou indice de foisonnement notéF_i,
- Le coefficient de foisonnement final ou persistant notéF_n,
- Le coefficient de tassement des déblais noté T.

Nature terrain	Fi	Ер	Т
Terre végétale, sable	10 à 15 %	1 à 1.5 %	8 à 12 %
Gravier	15 à 20 %	1.5 à 2 %	12 à 15 %
Terre argileuse	25 à 30 %	4 à 6 %	17 à 19 %
Argiles, marnes	30 à 40 %	6 à 8 %	19 à 25 %
Argiles, marnes très compactes	40 à 65 %	8 à 15 %	23 à 3 %
Eboulis roche tendre	30 à 40 %	8 à 15 %	17 à 18 %
Roche compact	40 à 65 %	25 à 40 %	10 15 %

Tableau I-1 : Valeurs de coefficient de types de sols.[3]

Les problèmes du foisonnement :

- Lorsque l'on creuse en trou dans le sol, le volume apparent des déblais est supérieur au volume du trou.
- Si l'on remet les déblais en place et après compactage, l'on constate un excédent de Matériaux.
- <u>Le tassement</u>: affaissement sous un point ou une pression physique. Il est différent suivant la charge dont le sol est soumis. Il existe deux types de terrassement du sol:[3]
- Le tassement structural du sol : c'est un réarrangement les éléments structuraux entre eux. Il conduit à une diminution des vides entre les agrégats et donc une diminution de la porosité structurale.
- Le tassement textural : c'est réarrangement de la particule élémentaire à l'intérieur des agrégats qui conduit à une diminution de la porosité texturale.
- <u>Classifications des sols selon GTR et la norme NF P 11-300</u>: La classification géotechnique des matériaux identifie les sols en 6 classes : A, B, C, D, R et F. [5]

Tableau I-3: Classes principales du GTR. [4]

Classe	Définition	Caractéristique	Sous-classe
A	Sols fins	$D_{max} \le 50 \text{ mm}$ Passant à 80 μ m > 35%	A ₁ à A ₄ Selon VBS ou IP
В	Sols sableaux et graveleux avec fins	$D_{max} \le 50 \text{ mm}$ Passant à 80 $\mu\text{m} >$ 35%.	B_1 à B_2 Selon VBS ou IP et tamisat
С	Sols comportant des fines et des gros éléments	$D_{max} > 50 mm$ Passant à $80 \mu m >$ 12% Ou Passant à $80 \mu m \le$ 12% $+ VBS > 0,1$	30 sous-classe selon VBS Ou IP et tamisat à 50 mm
D	Sols insensibles à l'eau avec fins	VBS ≤ 0,1 Passant à 80 μm ≤ 12%	D_1 à D_3
R	Matériaux rocheux	Nature pétrographique (Norme NF P 11- 300)	
F	Sols organiques et sous- produits industriels	Teneur en éléments chimique (Norme NF P 11-)	

Les caractéristiques permettant la classification sont regroupées selon trois catégories : les paramètres de nature, les paramètres de comportement mécanique, et paramètres d'état.

- Paramètres de nature : ce sont des paramètres qui ne varient pas ou peu ni dans le temps, ni au cours des manipulations :
- <u>La granularité (norme NF P 94-056 et NF P 94-057)</u>: La granularité est un paramètre qui permet de distinguer les sols grâce à la dimension de leurs grains. Il s'agit des paramètres suintants : [5], [6]
- 1. D_{max}: Dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le sol. Il détermine l'atelier de terrassement (c'est3à3dire le matériel employé), l'épaisseur des couches et les conditions de malaxage. Le seuil retenu est 50mm, car cela permet de distinguer les sols fins, sableux ou graveleux du sol blocaille. C'est aussi la valeur limite courante pour le malaxage des sols avec un liant pour une CDF de qualité.
- 2. Tamisât 80<m: Pourcentage en fines du sol. Les fines sont sensibles à l'eau, selon leur proportion elles vont donc influencer le comportement du sol. Seuils retenus (par le GTR):
 - > 35%: comportement du sol totalement régi par la fraction fine.
 - < 12%: seuil conventionnel pour dire si un sol est pauvre ou riche en fines.
- 3. Tamisât 2mm: distinction entre sols sableux et sols graveleux, Seuil retenu (par le GTR):

> 70% : sol tendance sableuse

< 70 % : sol tendance graveleuse

- L'argilosité: Etats de consistance Limites d'Atterberg (norme NF P 94-051) Les limites d'Atterberg sont déterminées uniquement pour les éléments fins d'un sol (<400bm), car ce sont les seuls éléments sur lesquels l'eau agit en modifiant la consistance du sol. L'essai consiste donc à faire varier la teneur en eau de cette fraction de sol et à en observer la consistance. [7]</p>
- 1. L'indice de plasticité Ip : caractérise la largeur de la zone où le sol étudié a un comportement plastique. $I_P = W_L W_p$:

W_P→ teneur en eau à limite de plasticité du sol (%)

W_L→ teneur eau à limite de liquidité du sol (%)

Seuil retenus (par le GTR):

12 : Limite supérieure des sols faiblement argileux.

25 : Limite supérieure des sols moyennement argileux.

40 : Limite supérieure entre sols argileux et très argileux.

2. La valeur de bleu de méthylène : (norme NF P 94-068) : paramètre représentant l'absorption de la surface spécifique du sol. La VBS s'exprime en g de bleu absorbé pour 100 g de sol. La surface spécifique du sol est déterminée par la surface des particules de la fraction argileuse, une évaluation indirecte de la quantité et de la nature de l'argile contenue dans le sol Seuil retenus (par le GTR): [8]

0,1 : sol insensible à l'eau,

0,2 : apparition d'une légère sensibilité à l'eau (sols sableux),

1,5 : distinction sols sablo-limoneux et sols sable argileux,

2,5 : distinction sols limoneux peu plastique à plasticité moyenne,

6: distinction sols limoneux et sols argileux,

8 : distinction sols argileux et sols très argileux.

3. <u>L'équivalent de sable ES:</u> ancien paramètre de la RTR de 1976 conservé pour référence.

Cet essai caractérise la pollution d'un sable par de l'argile ou du limon en mesurant la quantité des particules colloïdales que l'on fait floculer. L'essai permet de déterminer dans un sol proportion relative de sol fin et de sol grenu. L'équivalent de sable s'exprime en pourcentage, cela correspond à la proportion du floculat de sol fin (h2) par rapport au dépôt solide (h1), les deux étant mesurés sur éprouvette contenant l'échantillon de sol et une solution normalisé pour disperser les particules de sol. Es = $[h1/(h1+h2)] \times 100$: [2]

ES =0 Argile pure.

ES = 20 Sol plastique.

ES = 40 Sol non plastique.

ES = 100 Sable pur et propre.

- Paramètres de comportement mécanique : considérés dans la classification des sols sont la valeur Los Angeles (LA) (NF P 18-573) et la valeur micro-Deval en présence d'eau (MDE) (NF P 18-572), ou la valeur de friabilité des sables (FS) pour les sols sableux (NF P 18-576). Seuils retenus :
 - 45 pour les valeurs LA et MDE'
 - 60 pour les valeurs FS
- Paramètres d'état : Il s'agit des paramètres qui ne sont pas propres au sol, mais fonction de l'environnement dans lequel il se trouve. Différents états hydriques considérés :[5]

- très humide (th),
- humide (h),
- moyen (m),
- sec (s),
- très sec (ts).
- Classification des sols selon le degré de consistance et de dureté : Dans la nature, nous pouvons trouver différents types de sols. Plus précisément, du point de vue de l'opération « terrassement » nous classons les sols selon le degré de consistance ou de dureté.[5]

I.4- Travaux des fouilles :

Une fouille est un creusement réalisé dans le sol, en générale après décapage de la terre végétale. Les fouilles sont destinées aux applications suivantes : [3]

- Réalisation des fondations.
- Dégagement des volumes des sous-sols.
- Pose des canalisations.

Selon la forme géométrique de la fouille, cette dernière sera classée soit en :

- Fouille en rigole lorsque la double condition suivante est réalisée : [3]

```
1 \le 2 \text{ m} h \le 1 \text{ m} \qquad \text{: avec l= longueur et h= profondeur.}
```

Fouille en tranchée ^[2] :

```
1^{er} Cas: i \le 2 m avec h > 1m.

2^{eme}Cas: 1 > 2 m avec h > 1/2.
```

Ces fouilles sont utilisées pour construire des fondations profondes : [3]

- Fouilles en puits ou (trous): on les appelle ainsi lorsque h> 1m et que la longueur L est du même ordre que la largeur l.
- Excavation superficielle, une fouille et dite excavation superficielle lorsque sa largeur l et sa profondeur h satisfont aux conditions :

$$1 \ge 2m$$
 et $h \le \frac{1}{2}$

I.4.1- Le blindage des fouilles :

Le blindage consiste à soutenir les parois pour éviter un écroulement de celle-ci. Plusieurs critères engendrent la nécessité de blinder une fouille : profondeur, nature du terrain, vibrations voisines, conditions hydrologiques, surcharges de toute nature avoisinante (construction dans le voisinage). [3]





Figure I-11: Construction de blindage.[3]

Figure I-12 : Blindage de fouille.[3]

Le but de blindage : pour la sécurité des ouvriers contre l'ensevelissement ou l'enfouissement.

I.5- Le terrassement en présence de l'eau et de la roche :

- En présence d'eau : il est modifié de manière non négligeable dans les sols, ses caractéristiques et les modes de terrassement pour cela il faut : [3]
 - Collecter les eaux de ruissellement.
 - Pomper les venues d'eau (faible) ou drainer.
 - Dans le cas de nappe phréatique avec présence d'eau permanente il faut procéder à un rabattement de nappe.
- En présence de la roche : il est impératif de passé par un terrassier professionnel. Pour creuser dans un sol d'un brise-roche à fin de pouvoir à la fois casser la roche et creuser dans le terrain en profondeur. [3]

I.6-Les engins de terrassement :

- Les engins de terrassement : peuvent être commandés en direct par un opérateur porté sur l'engin ou par un opérateur non porté, ou peuvent être commandés à distance au moyen d'un fil ou sans fil avec ou non une vue directe sur la zone de travail. [3]
- <u>Les engins d'excavation</u>: Ils permettent l'extraction des terres et leur chargement en vue du transport. Les principaux engins sont :





Figure I-17 : Pelle hydraulique équipée en rétro.[3]



Figure I-18: Pelle hydraulique équipée.[3]



Figure I-19 : Chargeur à roues.[3]



Figure I-20: Chargeuse pelleteuse (tractopelle).[3]



Figure I-21: Scarificateur.[3]

• <u>Les engins de nivellement</u>: Ils assurent la mise en forme des terres. Les principaux engins sont les suivants:





Figure I-22: Bouteur (bulldozer).équipé en ripper.[3]

Figure I-23 : Décapeuse.[3]

• Les engins de transport : Ils assurent le transport des terres foisonnées du lieu d'excavation ou de reprise vers le site de dépôt. Les principaux engins sont :



Figure I-24: Tribenne.[3]



Figure I-25: Tombereau articulé.[3]



Figure I-26: Tombereau rigide.[3]

• Les engins de compactage : Ils permettent le compactage des terres pour permettre la reconstitution du sol. Les principaux engins sont :



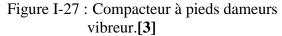




Figure I-28: Compacteur mono-cylindre.[3]

I.8- Fondation:

Les fondations sont une partie importante de la construction. Sans fondations la construction s'enfonce dans le sol. Les fondations reportent le poids de l'immeuble sur le bon sol.

Le terrassement consiste à effectuer, surtout à l'aide d'engins tels pelles mécaniques.[10]

- La conception et le dimensionnement des fondations (1^{er} étape):



Figure I-29: Dimensionnement.[10]

- <u>La préparation du terrain (2^{eme} étape)</u>: Le terrassement des fondations à proprement parler pourra commencer. en générale, ce sont des tranchées de 40 à 60 cm de large sur 60cm à plus d'un mètre de profondeur.



Figure I-30: Terrassement de la fondation.[10]

I.9- Conclusion:

- Les travaux de terrassement comprennent :
 - Le dégagement des terrains,
 - Les déblais et les remblais nécessaires pour établir l'assiette de l'ouvrage ;
 - Les terrassements nécessaires :
 - -pour la construction de fondations d'ouvrages d'art ;
 - -pour la pose de canalisations ;
 - -pour la construction de chambres de visite et de puisards ;
 - Le parachèvement des terrains.
- Les conditions pour réussir un bon terrassement sont :
 - Le temps des travaux de terrassement sont a faire en temps sec avec un sol sec ou gelé.
 - L'accessibilité du terrain par des engins plus ou moins imposant comme, la camion, la benne, la dameuse, la tractopelle etc..dans la même foulée, l'existence d'un endroit pour que ces engins puissent faire de la manouvre un autre pour stocker les terres enlevées.
 - La prévision d'un budget destiné au frais d'enlèvement des terres déplacés.

СН	APITRE II:				
	Sta	abilités de	terrasseme	ent.	

II- Introduction:

Le problème de la stabilité des terrassements en général constitue l'une des préoccupations majeures des géotechniciens d'ouvrages d'art et miniers.

L'étude d'un sol instable comporte, outre la reconnaissance du site et le choix des caractéristiques mécaniques des sols, un calcul de stabilité pour déterminer d'une part la courbe de rupture le long de laquelle le risque de glissement est le plus élevé, d'autre part la valeur correspondante du coefficient de sécurité. Comme on le sait, les mouvements de terrain sont très variés, par leur nature et par leur dimension. Leur répartition spatiale est guidée par la topographie et par la géologie. Les problèmes de stabilité des pentes rencontrent fréquemment dans les constructions des routes, des canaux, des digues, des barrages et pentes naturelles. Le glissement de terrain passe par plusieurs étapes chronologiques de l'activité. Il existe des principaux facteurs qui contrôlent le type et le taux de mouvements de masse qui pourrait se produire à la surface de du sol.

II.1- Notion de terrassement :

II.1.1- Nature géologique :

La reconnaissance de la nature géologique du sol, et les accidents affectant les formations géologiques (failles...), est primordiale pour le dimensionnement des pentes de talus et la définition des mesures de confortement convenables. En effet les travaux de reconnaissance ont pour objectif l'identification de la nature du sol, son comportement géotechnique. La cartographie des anomalies géotechniques permettra d'identifier la nature des dégradations et de les classées par formation géologique. [11]

II.1.2- Nature géométrique :

Les problèmes de géométrie liés aux désordres des pentes de talus ont pour origine : [11]

- L'inadaptation de la pente avec les caractéristiques géotechniques des formations en question.
- L'excavation des butées naturelles ou artificielles en pied.

On étudie la stabilité des pentes et talus lors de la construction d'ouvrages divers de génie civil. Tel que les routes (profils en remblai et en déblai), les barrages en terre et digues, les canaux, etc....Dans la plupart des situations il s'agit d'assurer. Sous l'action du poids propre et éventuellement de surcharges. La stabilité d'un massif de sol ayant la forme d'un profil donnée (β, H) . [12]

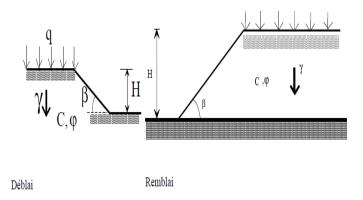


Figure II-1 : Pentes (ou talus) en déblai et en remblai.[12]

II.2- Talus de terrassements :

Le talus est un ouvrage qui doit être stable dans le temps. La stabilité de talus est définie par les études géotechniques. Le talus peut être en déblai ou en remblai, il peut être technique ou paysager. 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 peut se définir : [11]

- Soit par la tangente de l'angle (pente) que fait ce talus avec l'horizontale (talus à 4/5 ou à 0.80 m ou encore à 80%).
- Soit par la cotangente de l'angle (inclinaison) dont la valeur s'exprime généralement comme celle de la tangente par une fraction (5/1, 3/2, 1/1, 2/3, etc.).

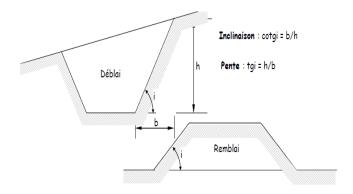


Figure II-2 : Déblai et remblai.

II.2.1- Pente de talus :

• Inclusion des talus : L'angle i doit toujours être inférieur à l'angle de frottement interne appelé φ, ce dernier étant caractérisé par ce que l'on appelle la pente naturelle des terres, c'est à dire, l'inclinaison que prend un talus soumis à l'action des seuls agents atmosphériques. Cet angle de frottement interne dépend essentiellement de la nature du degré de consistance et de la teneur en eau du terrain.

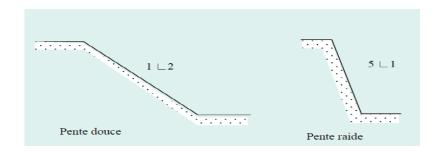


Figure II-3: Exemple d'angle de stabilité (SETRA, 2008). [13]

- Facteurs influençant la stabilité des talus : L'analyse des processus de déformation tenir compte de l'influence commune des facteurs naturels et techniques. On peut subdiviser les facteurs naturels en trois groupes : [11]
- 1. géographiques et climatiques : relief du site, régime des précipitations, régime des températures, conditions spécifiques du gel-dégel.
- 2. géologiques : lithologie du massif, conditions tectoniques, spécificités structurales et texturales des roches et du massif, propriétés mécaniques des roches, etc.
- 3. hydrogéologiques : eaux superficielles qui traversent le territoire de l'exploitation ou se situent à proximité, eaux souterraines dans le massif, présence d'eau dans les contacts entre les roches ou dans les discontinuités tectoniques etc.

II.3- Modes d'instabilités affectant les pentes de sol :

Mouvements de pente peuvent prendre très différentes configurations, de roches renverser à la coulée de boue, peut impliquer une variété de matériau de roche dure, à l'argile sensible et de lœss, et peut résulter d'une variété de phénomènes de fonte rapide des neiges ou de fortes précipitations aux tremblements de terre. [15]

Tableau II-1: Classification des mouvements de terrain.[15]

Classe	Description	Vitesse
7	Extrêmement rapide	5 m/sec
6	Très rapide	3 m/min
5	Rapide	1,8 m/heure
4	Modéré	13 m/mois
3	Lent	1,6 mm/an
2	Très lent	16 mm/an
1	Extrêmement lent	<16 mm/an

II.2.1-Le glissement :

Le glissement est un mouvement d'une pente descendante de sol ou le massif de roche qui se produit surtout à la surface de rupture ou sur des zones relativement minces de déformation en cisaillement intense. [15]



Figure II- 4 : Glissement de terrain.[15]

- <u>Causes des glissements de terrain</u>: Les principales causes d'instabilité des pentes sont liées à :
 - l'application de surcharges sur la pente ou le remblai (ex : fondations d'ouvrages),
 - des modifications du profil de la pente (ex : construction d'une route ; mise en place d'un mur de soutènement),

- des modifications des conditions hydrauliques (pluie, modification des conditions de drainage),
- des modifications des caractéristiques mécaniques du sol à long terme.

Les types de glissements :

1. Glissements transrationnels (plans) : En général, la ligne de rupture suit une couche mince ayant de mauvaises caractéristiques mécaniques, et sur laquelle s'exerce souvent l'action de l'eau. Une telle couche est appelée couche savon.

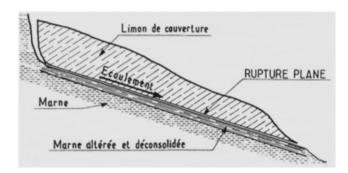


Figure II-5 : Schéma descriptif d'un glissement plan.[15]

2. Glissements rotationnels simples : C'est le type de glissement le plus fréquent. La surface de rupture a une forme simple et peut être assimilée à une portion de cylindre.

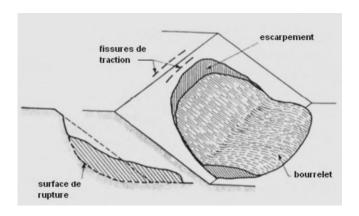


Figure II-6: Eléments descriptifs d'un glissement rotationnel.[15]

II.3.2- La rupture :

 Mécanismes de rupture : Les mécanismes de rupture par cisaillement des talus de remblais et d'excavations ou de pentes naturelles dépendent de la forme de la surface de rupture observée ou supposée (plan, droite, calotte sphérique, arc de cercle, arc de spirale logarithmique, etc.). [16]

- Causes de rupture :
- Changement des sollicitations :
 - 1. surcharge en tête de talus (construction)
 - 2. travaux en pied de talus (tranchée)
 - 3. séismes ou vibrations intenses (battage de palplanches).
- Modification des conditions hydrauliques :
 - 1. pluies intenses (mise en charge de la nappe)
 - 2. problèmes de drainage (colmatage)
 - 3. variation rapide des conditions aux limites (vidange rapide d'un barrage).
- Diminution des caractéristiques mécaniques.

II.3.3- Les écroulements :

Ce sont des chutes soudaines de masses rocheuses. Nous utilisons le terme chute de pierres pour le détachement de quelques unités de volume inférieur à 1 dm₂, ou chute de blocs pour un volume supérieur. [15]

Les écroulements sont un des mécanismes principaux de l'érosion dans les argiles fortement sur consolidés.

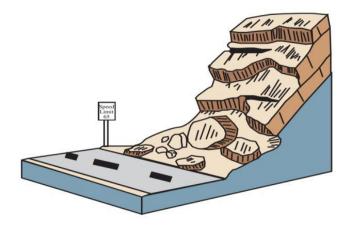


Figure II-7: L'écroulement.[15]

II3.4- Eboulement:

Lors d'un éboulement (au sens strict), un volume de roche important, se fragmentant plus ou moins intensément, se détache en bloc du massif rocheux et s'éboule. Le volume de matériaux concernés est en général compris entre 100 et 100000m3 par événement. [15]

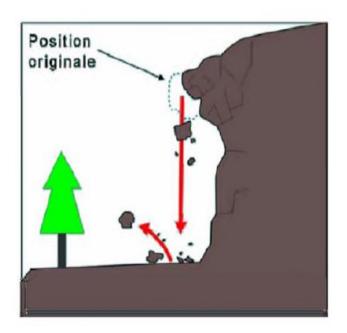


Figure II-8: Un Eboulement rocheux.[15]

II.3.5- Le renversement :

Le renversement est la rotation vers l'avant de la pente d'une masse de sol ou de roche sur un point ou un axe au-dessous du centre de gravité de la masse déplacées. La masse rocheuse peut rester en place dans cette position pendant une longue période où elle peut de tomber vers le bas de la pente en raison d'affaiblissement supplémentaire. Cela dépendra le type et la géométrie de la masse rocheuse. [15]

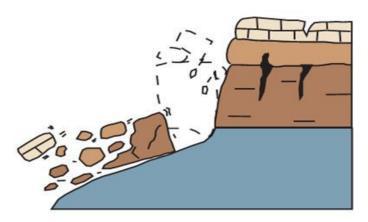


Figure II-9: Le renversement.[15]

II.3.6-Mouvements de fluage :

Par opposition aux mouvements précédents, localisés dans le temps et caractérisés par une zone de rupture nettement définie, les mouvements de fluage (figure 1.7) constituent la manifestation externe des déformations du sol dans sa masse. Ce sont des mouvements lents, de faible amplitude, qui se développent dans une zone dont les contours sont généralement difficiles à définir, tant en extension qu'en profondeur. [15]

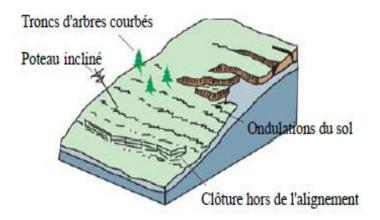


Figure II-10 : Mouvement de fluage.[15]

II.3.7-Diffusion latérale :

La diffusion latérale est définie comme une extension d'un sol cohérent ou masse de roche combinée à une subsidence générale de la masse fracturée du matériau cohérent dans les matériaux mous de sous-jacent. [15]

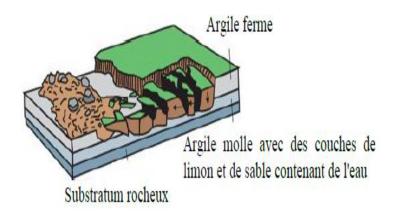


Figure II-11: La propagation latérale.[15]

II.4- Etude de la stabilité des pentes :

- Notions de base pour l'étude : Pour faire un calcul de stabilité nous devons connaître certains éléments dont : [16]
- La géométrie de la pente en 2 ou 3 dimensions.
- Les conditions hydrodynamiques (hauteurs d'eau et écoulements).
- Les projets et les risques (mine à ciel ouvert ou abords d'habitation).
 - Coefficient de sécurité: Théoriquement, la pente est dit stable si Fs > 1. L'état d'équilibre limite (rupture) est obtenu lorsque Fs = 1. Mais dans la pratique, le coefficient Fs est compris entre 1,15 et 1,30 en tenant compte des facteurs suivants :
- Les erreurs dues à l'exactitude des méthodes de calcul de la stabilité du bord.
- Les incertitudes expérimentales de la détermination des propriétés physico-mécaniques des roches, comme la valeur moyenne du poids volumique des roches composant le massif.
- Les incertitudes de la détermination de l'influence de la fissure.
- L'influence des charges dynamiques provoquées par le tir, par le mouvement des moyens de transport et par les séismes.

Tableau II-2 : Coefficient de sécurité.[16]

	Définition	Formule	Commentaires
1	Rapport de contraintes	$F = \tau_{max}/\tau$	Méthodes à la rupture
2	Rapport de forces	F=E _{résist} / E _{moteur}	Direction de déplacement
3	Rapport de moment	F=M ^t _{résist} / M ^t _{moteur}	Rotation

4	Paramètres réduits	p = p / F	cf Eurocodes
5	Probabilité à x %	Distribution de F	cf Monte carlo
6	Marge de sécurité	Par ex : H/H _{max}	Sur un grandeur

III.5- Méthodes pour vérifier la stabilisation:

- 1- Renforcement par pieux : L'utilisation des lignes de pieux verticaux pour stabiliser les glissements de terrain ou pour éviter les mouvements excessifs est une pratique d'ingénierie bien développé. Les pieux sont installés à travers la masse potentiellement coulissante à un espacement sensiblement plus grande que leur diamètre et noyées dans la couche stable. Les pieux verticaux sont utilisés pour stabiliser les pentes. Ils sont généralement soumis à une force latérale causée par les mouvements horizontaux du sol environnant et d'où ils sont considérés comme des pieux. Les types d'applications des pieux sont : [16]
- Pieux simples pour le transfert des charges individuelles.
- Groupes de pieux pour les charges de surface ou latéraux.
- Combinés pieux-radier comme un type spécial de pieux, avec un transfert supplémentaire de charge grâce à une pression de contact entre le radier et le sol entre les pieux.



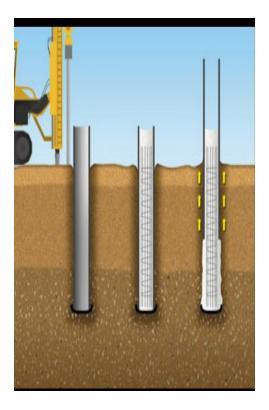


Figure II- 12: Machine de forage de pieux. [16]

Figure II-13 : Forage de pieux.[16]

II.7- Conclusion:

Le comportement des massifs de sol en pente (ouvrages en terre et pentes naturelles) a fait l'objet de nombreux développements depuis plusieurs décennies. Des méthodes d'analyse de stabilité et de stabilisation deviennent de plus en plus pratique courante, allant de la reconnaissance préliminaire du terrain aux mesures de contrôle, en passant par les essais en place et en laboratoire, les calculs de stabilité et le choix de la technique de confortement des pentes instables.

La reconnaissance géologique et géotechnique permet de localiser la surface de rupture de la pente étudiée, d'en connaître la forme et d'en donner une explication sur les mécanismes de rupture et les causes d'instabilité probables, ainsi que de déterminer les paramètres de résistance au cisaillement de la masse du sol glissée et de son comportement avant la rupture.

Si la stabilité de la pente n'est pas assurée, le renforcement de celui-ci s'impose afin de parer à tout glissement éventuel ou limiter son évolution dans le temps. Parmi les nombreuses techniques de renforcement disponibles, on retiendra le dispositif de confortement techniquement et économiquement possible.

Chapitre III :	Terrassement en excavations profondes
	CHAPITRE III:
	Terrassement en excavations profondes.

III- Introduction:

Les travaux d'excavations qui consistent généralement à extraire une quantité de terre pour abaisser le niveau du sol. Ils sont nécessaires pour la construction de piscines, de fondations de sous-sols ou tranchées. Le développement en zones urbaines conduit généralement à la réalisation de nouvelles constructions comportant plusieurs sous sols. Ainsi, leur réalisation nécessite des excavations profondes. Pour des raisons d'encombrement ces excavations se trouvent à proximité des ouvrages et structures en service en surface. L'intégrité et la stabilité de ces ouvrages est un enjeu primordial pendant les différentes phases des travaux de nouvelles constructions (excavation, construction...).

Il s'agit d'un problème complexe de géotechnique urbaine avec une forte interaction solstructure. Toute étude de ce problème doit intégrer correctement plusieurs aspects tels que le comportement non linéaire des géomatériaux, la présence de sols médiocres dans les couches superficielles de terrain, de nombreuses interactions (soutènements, sols, structures), les séquences des travaux, les conditions de contact sol-structure, l'aspect tridimensionnel......

III.1-Les travaux d'excavation:



Figure III-1 : Chantier de travaux d'excavation.[17]

- <u>L'excavation</u>: Action de creuser le sol, les travaux d'excavations fait à ciel ouvert, elle se fait à l'aide d'une chargeuse ou le bulldozer. Par exemple :
- cavité, plus ou moins profonde, réalisée dans le sol lors de travaux de terrassement.
- Partie de terrain creusée à une profondeur d'au moins 12 m et dont la largeur de la base est supérieure à la profondeur. [17]
- Principes de l'excavation: Le principe de l'excavation est de décaisser (extraire de la terre afin d'abaisser le niveau du sol) afin soit de ménager une assise plus basse que le niveau alentour (creusement de fondations de construction, de dalle de piscine...) ainsi que d'atteindre une couche de sol plus ferme, soit d'extraire de la terre que l'on souhaite utiliser in situ (remblai) ou que l'on désire évacuer. Si l'excavation de dimensions réduites (largeur, longueur, profondeur) d'une petite tranchée peut encore se faire manuellement (pioche, bêche, pelle), dès lors que le volume de terre va devenir important, il faudra mécaniser l'opération grâce à des engins d'excavation (pelle mécanique, excavatrice...) et de transport (brouette à chenilles, transporteur, camion...). [17]



Figure III-2: Excavation profonde.[17]

Tranchée et Puits: Nous définirons la tranchée comme une excavation longue et étroite, et le puits comme une excavation verticale ou inclinée dont la dimension profondeur prévaut sur les deux autres; les tranchées et les puits sont creusés sur le terrain à l'aide de moyens manuels ou mécaniques et doivent avoir les caractéristiques suivantes: Largeur/Diamètre ≤ 2 m, Profondeur ≤ 7 m, niveau phréatique inférieur à la profondeur ou abaissé; ne sont pas inclus dans cette catégorie les terrains rocheux, meubles ou expansifs. [17]

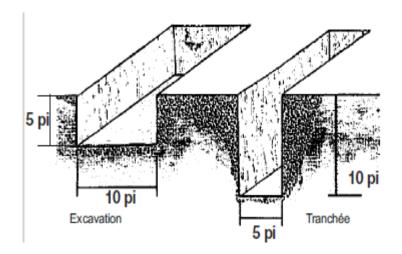


Figure III-3: Différence entre l'excavation et tranchée.[17]

Mesures de base dans le contexte d'une excavation :

- Bien connaître en amont les contraintes physiques et mécaniques du terrain (stratification, fissures, etc.).
- Suivre scrupuleusement les indications et les instructions de la Direction du Chantier.
- En cas de besoin, disposer d'une étude Géologique et/ou Géotechnique préalable pour déterminer la méthode appropriée de protection intérieure des excavations.

Mesures de prévention dans les tranchées:

- Considérer comme dangereuse d'une manière générale- toute excavation qui, dans des terrains courants, atteint une profondeur de 0, 80 m, et de 1,30 m dans des terrains consistants.
- Largeur ou diamètre minimum de la tranchée ou du puits. à chaque niveau de profondeur et à chaque phase d'exécution requérant qu'un opérateur descende dans la tranchée ou dans le puits, ce dernier disposera, pour ses mouvements, entre le soutènement ou l'ouvrage exécuté, d'une circonférence ≥ 0,80 m de diamètre.
- Dans des terrains cohérents n'étant pas sollicités par la voierie ou par des fondations, pour H < 1,30 m, des coupes verticales pourront être réalisées sans étayage. Pour des profondeurs supérieures, étayer ou aménager un remblai adéquat.

- Dans des terrains moins compacts qui n'atteignent pas ces profondeurs ou encore dans des terrains cohérents mais sollicités par des voieries voisines et des fondations, aménager un soutènement ou un talus adéquat aux parois de la tranchée.
- L'on pourra avoir recours à des remblais faits à base de bermes échelonnées, avec des plateaux non inférieurs à 0.65 m et des contre-plateaux jamais supérieurs à 1,30 m pour des talutages du terrain à 600 et 900, la hauteur admissible dépendant du poids spécifique apparent du terrain et de la résistance simple de ce dernier.

Tableau III-1 : Hauteur maximale admissible en m, pour coupes verticales, non soumis à sollicitation, pour différents poids spécifiques de terrain.[17]

Résistance à compressions	I	Poids spécifi	que apparen	t et en g/cm	3
simple Ru en Kg/cm3	2,20	2,10	2,00	1,90	1,80
0,250	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25
0,300	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50
0,400	1,70	1,80	1,90	2,00	2,10
0,500	2,10	2,20	2,30	2,45	2,60
0,600	2,00	2,70	2,80	2,95	3,10
0,700	3,00	3,15	3,30	3,50	3,70
0,800	3,40	3,60	3,80	4,00	4,20
0,900	3,90	4,05	4,20	4,45	4,70
1,000	4,30	4,50	4,70	4,95	5,20
1,100	4,70	4,95	5,20	5,20	-
> 1,200	5,20	5,20	-	-	-
	Haut	eur Maxima	le admissibl	e (H max.)	en m.

Soutènement des tranchées:

- Les soutènements doivent être dimensionnés en fonction des charges maximales prévisibles dans les conditions les plus défavorables.
- Ils doivent être inspectés au début de la journée de travail; redoubler de précautions après une interruption des travaux de plus d'une journée ou après des altérations atmosphériques comme des pluies ou des gelées.
- Ils dépasseront de 20 cm. le bord supérieur de la tranchée, pour servir de plinthe et éviter la chute d'objets et de matériels dans la tranchée.

- En général, les soutènements ou une partie de ceux-ci ne sont retirés que lorsqu'ils ne sont plus nécessaires et par bandes horizontales, en commençant par la partie inférieure de la tranchée.
- "Il est interdit aux travailleurs de se servir du lattage ou des soutènements pour descendre et monter dans la tranchée".







Figure III-4 : Soutènements des tranchés.[17]

Les étapes d'une excavation :

Définir les cotes : Alors que pour extraire de la terre afin de créer un remblai ou de l'amener en centre de traitement des sols pollués on nécessite peu de précision quant aux dimensions de l'espace à excaver, en construction de maison et en aménagement extérieur (tranchées, VRD, piscine) la première étape consiste à définir les cotes et à

réaliser le piquetage. On se base alors sur le plan d'implantation de la construction afin de marquer au sol les limites de la zone à excaver et de définir la profondeur d'excavation à pratiquer. Il est nécessaire alors d'employer les outils de géomètre voire de faire appel à un professionnel pour « implanter » les fouilles (théodolite, repères GPS...) puis si nécessaire assurer la profondeur et la planéité (nivelle, niveau laser...). [17]

- Excaver la terre : Selon le type d'excavation (tranchée ou fouille pour fondations ou extraction), il est nécessaire d'employer des engins d'excavation adaptée au chantier. Une tranchée peut être réalisée à la micro-pelle hydraulique (< 1t) ou à la mini pelle hydraulique (< 6t) alors que pour une excavation importante une grosse pelle mécanique hydraulique devra être employée.
- <u>Transporter la terre excavée</u>: S'il est ensuite nécessaire de transporter la terre que ce soit à distance de l'excavation maison situ ou au-dehors de la zone, il faut employer un chargeur sur roues ou sur chenilles, une brouette motorisée, un camion, etc.

III.2-Types de sol:

Le type de sol détermine la résistance et la stabilité de parois de la tranchée. L'identification des types de sol exige des connaissances, de la compétence et de l'expérience. Même le sol dur peut contenir des failles en veines ou en couches qui le rendent instable lors de l'excavation. Le contremaître ou le superviseur doit être informé au sujet des types de sol présents sur le chantier et planifier la protection en conséquence. Ces connaissances doivent comprendre la conscience que le type et l'état du sol peuvent varier sur de très courtes distances. Il n'est pas anormal que le sol change complètement sur une distance de 50 mètres ou que le sol devienne complètement saturé d'eau sur une distance encore plus courte. [18]

Le Règlement concernant les chantiers de construction définit quatre types de sol.

III.3- Canalisations souterraines:

De nos jours, partout ou sont effectués des travaux de creusement, il risque d'y avoir présence de canalisations souterraines, que ce soit pour les égouts, les aqueducs, le gaz, l'électricité, le téléphone, la câblodistribution, etc. le contact accidentel avec ces canalisations, pendant le creusage, peut occasionner d'importants dommages matériels et des interruptions de service.

Les canalisations souterraines sont souvent recouvertes d'une couche d'un matériau différent de celui du sol (ex: sable-argile). Cette situation devient alors un avantage au point de vue de la sécurité étant donné que l'endroit ou l'on observe un changement de matériau dans le sol constitue le meilleur point de repère pour indiquer la proximité des canalisations. [18]



Figure III-5: Canalisations souterrain.[18]

III.4-Parois des excavations et des tranchées :

Un des principaux risques associés aux travaux effectués dans les tranchées et les excavations et l'ensevelissement de travailleurs par suite de l'effondrement des parois de celles- ci. Accidents entrainent, la plupart du temps, des blessures graves, voire des décès. [17]



Figure III-6: Excavation d'une paroi.[17]

Résistance du sol et angle de repos : Ce qui fait qu'un sol a plus ou moins tendance à s'effondrer c'est sa résistance. Plus celle-ci est élevée plus le sol peut résister aux forces qui lui sont appliquées (poids des terres et des édifices circulation, vibrations, etc.). Il y'a risque d'effondrement des parois d'une tranchées quand la résistance du sol n'est pas assez grande pour s'opposer à toutes les forces qui s'exercent sur lui pour donner une idée de ce que cela représente. On peut simplifier les choses en associant "résistance" et "angle de repos". L'angle de repos (α) d'un sol est l'angle, par rapport à l'horizontale, selon lequel les matériaux des parois d'une tranchée ou d'une excavation sont sables et ne s'effondrent pas .on l'appelle aussi "angle de talus naturel". Le tableau suivant donne un aperçu des angles de repos pour différents types de sols.

Tableau III-2: angles de repos pour les types de sols.[17]

	Angle de repos α (degrés)	
Nature du sol	Sol sec	Sol mouillé
Roc solide	90	
Roc tendre	55	55
Terre végétale	45	40

Argile-sable	45	30
Argile	45	20
Gravier	35	30
Sable	30	20
Silt	25	10
Tourbière	20	10

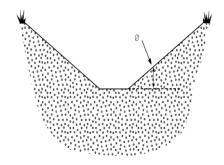


Figure III-7: l'angle de repos.

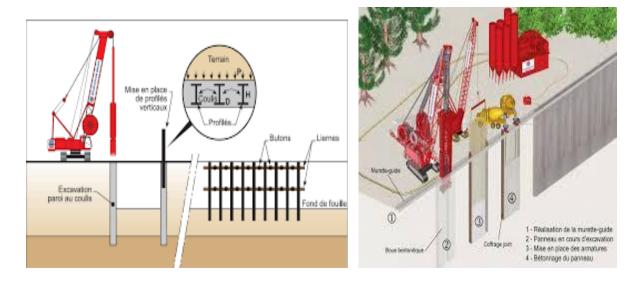


Figure III-8 : Parois armées.[17]

III.5-Causes d'effondrement :

Souvent, les propriétés du sol varient considérablement du haut au fond de la tranchée et aussi le long de celle-ci. Plusieurs facteurs tels que des fissures, l'eau, les vibrations, la météo et des excavations antérieures peuvent affecter la stabilité de la tranchée (figure III-2). Le temps est un facteur critique. Certaines tranchées peuvent demeurer ouvertes pendant de longues périodes, puis s'effondrer soudainement sans raison apparente. [18]

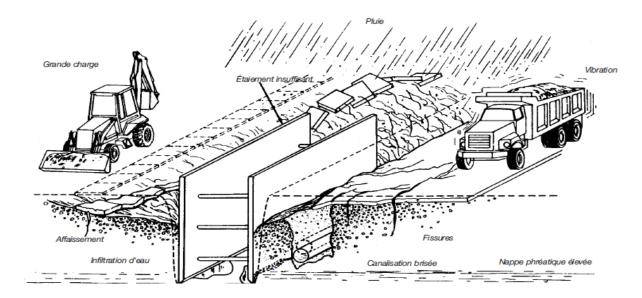


Figure III-9: Plusieurs facteurs affectent la stabilité d'une tranchée.[18]

Les principaux facteurs affectant la stabilité d'une tranchée sont le type de sol, l'humidité, les vibrations, la surcharge, l'excavation antérieure, des fondations existantes et la météo.

- Etançonnement : L'étaiement est un système qui étaie ou supporte les parois de la tranchée afin de prévenir le mouvement du sol, des services publics enfouis, de la chaussée et des fondations. Il ne faut pas confondre l'étaiement et les caissons de tranchée. Un caisson de tranchée protège les travailleurs, mais ne supporte pas ou seulement peu les parois de la tranchée ou les structures telles que des fondations ou des trous d'homme.
- 1. Etaiement hydraulique : L'étaiement « hydraulique » fait référence aux systèmes de contrefiches et/ou raidisseurs préfabriqués en aluminium ou en acier. Strictement parlant, ceux-ci peuvent ne pas fonctionner par hydraulique. Certains fonctionnent à l'air comprimé ou avec un système de cric manuel. Les dessins de conception et les spécifications des systèmes d'étaiement doivent être conservés sur place. Un important

avantage de l'étaiement hydraulique sur le boisage est la sécurité lors de l'installation. Les travailleurs n'ont pas besoin d'entrer dans la tranchée pour l'installer. L'installation peut se faire de l'extérieur de la tranchée.[18]

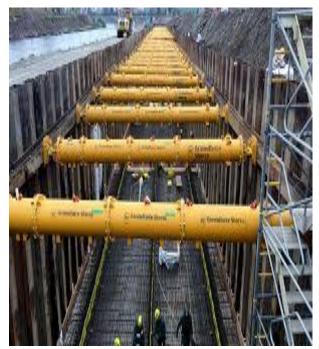




Figure III-10: Etaiement hydraulique.[18]

a- En utilisant l'une des quatre méthodes suivantes :



Figure III-11: Étaiement en bois.[18]



Figure III-12: Étaiement à système de vérins. [18]





Figure III-13: Palplanches.[18]

Figure III-14: Boîte de tranchée.[18]

Tout l'étaiement doit être posé du haut vers le bas et déposé du bas vers le haut.

III.6- Les essais géotechniques dans les travaux de terrassement :

III.6.1- Essais à la mise on œuvre :

1- Essai de la compacité (selon la norme NF EN 932-2 et NF EN 1097-6) :[29],[30]

- Définition de l'essai: L'essai consiste à placer un échantillon de granulats dans un moule sous la contrainte d'un piston, et à appliquer à l'ensemble des secousses mécaniques provoquant un réarrangement des grains, et donc un compactage de l'échantillon. La mesure réalisée est alors celle de la masse volumique apparente de l'échantillon, qui permet d'en calculer la compacité.
- <u>But de l'essai</u>: L'essai a pour but de mesurer la compacité d'une fraction granulaire de masse déterminée lorsqu'elle est soumise, dans un cylindre, à une sollicitation mécanique définie conventionnellement. Cette caractéristique est notamment utilisée comme paramètre d'entrée de modèles de formulation des mélanges granulaires.
- Domaine d'application: Le présent mode opératoire s'applique aux granulats d'origine naturelle ou artificielle utilisés dans le domaine du bâtiment et du génie civil. Toutefois, il ne s'applique ni aux granulats tendres (LA > 50) ni aux granulats grossiers (Dmax > 31,5 mm).



Figure III- 15: Matériels utilisées.

2- Essai de plaque (selon la norme NF P 94-117-1):[31]

Domaine d'application: Le présent document décrit le principe, l'appareillage, le processus d'exécution et le mode d'expression des résultats de l'essai de chargement statique sous une plaque rigide. Cet essai a pour objet la détermination du module dit «Module sous chargement statique à la plaque» d'une plate-forme. L'essai s'applique aux plates-formes d'ouvrages de terrassement et d'assainissement destinées à la construction d'infrastructures routières, ferroviaires, aéroportuaires et réalisées avec les matériaux définis dans la classification de la norme NF P 11-300 à l'exception de ceux comportant des éléments dont le D max excède 200 mm. La valeur maximale du module pouvant être mesurée par cet essai est de 250 MPa. Le «Module sous chargement statique à la plaque» ne caractérise pas l'état de compacité des sols situés sous la plate-forme auscultée.





Figure III-16: Matériels utilisées.[31]

III.6.2- Les essais au niveau de laboratoire :

- 1- L'objectif du compactage d'un sol: Avant de parler des essais de laboratoire utilisés lors de travaux de terrassement, il convient d'abord d'expliquer ce qu'est un compactage et son objectif. Le compactage d'un sol a pour but de diminuer son volume d'air. Par exemple : [23]
 - pour les infrastructures linéaires (routes, voies ferrées), on cherche à limiter les tassements différés et à avoir une portance suffisante au niveau de la plateforme pour supporter le trafic routier ou ferroviaire,
 - Pour les noyaux de barrages en terre, une perméabilité homogène est essentielle alors que les tassements différés ne sont pas un problème majeur.

2- Rôle des différents essais de laboratoire testés dans le cas des sols fins :

- 2.1. Dans le domaine des infrastructures : En France, dans le domaine des infrastructures, les terrassiers s'appuient sur le GTR qui prescrit des recommandations sur le compactage en fonction du type de sol rencontré. Il est pour cela important de bien identifier un sol du point de vue du GTR (granulométrie, valeur au bleu, indice de plasticité) et d'accompagner son étude par des essais de laboratoire de terrassement. [23]
 - 1. <u>Analyse granulométrique (selon la norme NF P 94-117-1)</u>:On appelle granulat un ensemble de grains minéraux, de dimensions comprises entre 0 et 125 mm, de provenance naturelle ou artificielle, destinés à la confection :[28]

- des mortiers, des bétons,
- des couches de fondation, des couches de base et de roulement des chaussées,
- et des assises et des ballasts de voies ferrées.
- <u>But</u>: l'analyse granulométrique consiste à déterminer la dimensionnelle des grains, constituant un granulat dont les dimensions sont comprises entre 0.063 et 125 mm.
 - REFUS sur un tamis : la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis.
 - TAMISAT (ou passant) : la quantité de matériau qui passe à travers le tamis.



Figure III-17: Les tamisâtes.

- 2- <u>Limite d'Atterberg (selon la norme NF P 94-051)</u>: [7]
- Domaine d'application: C'est essai s'applique généralement sur les sols comportant un pourcentage de fines (80μm) supérieur à 35%. La détermination de l'argilosité d'un sol par les limites d'Atterberg plutôt que par l'essai VBS est à privilégier dès que le sol est argileux à très argileux.
- But :
- Déterminer l'état de consistance d'un sol;
- Déterminer la limite de liquidité et la limite de plasticité.

- Limite de liquidité : La limite de liquidité W_L est la teneur en eau qui correspond a la fermeture de 1cm pour un nombre de chocs N égale a 25.
 - But: Déterminer la limite de liquidité a la coupelle, par l'appareil de Casagrande.





Figure III-18: Appareil de Casagrande.

- <u>Limite de plasticité W_P</u>: est la teneure en eau du roulon qui se fissile sol est mélangé à une quantité d'eau.
 - But: Déterminer la limite de plasticité au rouleau; L'indice de plasticité et l'indice de consistance.





Figure III-19: Déterminer la limite de plasticité.

- L'indice de plasticité $I_P = W_L - W_P$.

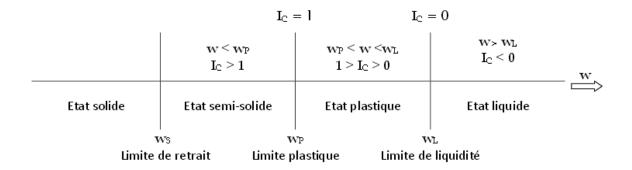


Figure III-20: Etats de consistance d'un sol.

3- Essai de valeur au bleu de méthylène (selon la norme NF P 94-068) : [8]

■ <u>Domaine d'application</u>: Le présent document a pour objet de préciser la méthode de détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux au moyen de l'essai au bleu de méthylène «à la tache». La valeur de bleu de méthylène d'un sol (VBS) mesure la capacité d'adsorption d'un sol ou d'un matériau rocheux. Elle constitue un des paramètres d'identification de la classification des sols décrite dans la norme NF P 11-300.

2.2.Dans le domaine des ouvrages hydrauliques :

Le GTR n'a pas été conçu pour les ouvrages hydrauliques mais le Proctor et l'essai CBR restent les essais de référence. Contrairement à la pratique dans le domaine des infrastructures, l'essai de compression simple Rc est d'un usage courant pour évaluer l'évolution de la cohésion non drainée en fonction de la teneur en eau, les barrages nécessitant souvent, compte tenu de leur hauteur, une analyse de la stabilité à court et long terme. Pour la phase étude, ces essais sont bien évidemment complétés par des essais de mécanique des sols (triaxiaux drainés et non drainés, oedomètres avec mesure de pressions interstitielles pour estimer Ru, etc.). [23]

Lien avec la succion: Dans des sols compactés, il est usuel de faire la relation entre Rc, IPI ou le CBR en fonction de la teneur en eau de préparation de l'éprouvette. En réalité, pour un matériau donné, c'est la succion, dont la valeur est liée à la teneur en eau et à l'indice des vides, qui gouverne le comportement. C'est ce que nous allons montrer dans

la suite de cette communication pour éclairer la compréhension du comportement des sols compactés. [23]

1- Proctor (selon la norme NF P 94-093) : [24]

Domaine d'application: Le présent document concerne l'essai permettant de déterminer les caractéristiques de compactage d'un matériau. Ces caractéristiques sont la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale. Selon l'énergie de compactage appliquée à l'éprouvette, on distingue l'essai Proctor normal et l'essai Proctor modifié qui conduisent à des couples de valeurs différents.

2- L'indice CBR (selon la norme NF P 94-078) : [25]

■ <u>But</u>: L'essai CBR est un essai de portance (aptitude des matériaux à supporter les charges) des remblais et des couches de formes compactées des ouvrages routiers. Il s'agit de déterminer expérimentalement des indices portants (IPI, CBR) qui permettent : d'établir une classification des sols (GTR); d'évaluer la traficabilité des engins de terrassement (IPI), déterminer l'épaisseur des chaussées (CBR augmente → épaisseur diminue).

1. Détermination de l'indice portant immédiat (IPI) :

- Placer l'ensemble « plaque de base, moule CBR, éprouvette » sur la presse, en position centrée par rapport au piston.
- Faire une mesure de la teneur en eau au voisinage de la zone poinçonnée et immédiatement après l'essai (au moins 2 prélèvements à gauche et à droite).

Tableau III-3 : L'indice portant immédiat minimal à obtenir à la mise en œuvre –GTR.[25]

Classe de matériaux	IPI minimal
A3-C1A3	10
A2-C1A2-B6-C1B6	15
A1-B5-C1A1-C1B5	20
Autres classes	A fixe d'après expérience ou étude spécifique.

3- Essai triaxiaux (solen la norme NF P 94-070): [26]

- Domaine d'application : Le présent document s'applique aux de cisaillement réalisés à vitesse de déformation imposée, à l'appareil triaxial de révolution, sur tous types de sols naturels.
- But : pour mesurer les caractéristiques mécaniques des matériaux granulaires.

Types d'essais :

- Essai UU : essai non consolidé non drainé effectué sur sol saturé ou non.
- Essai de compression simple.
- Essai CU+u : essai consolidé non drainé sur sol saturé avec mesure de la pression interstitielle.
- Essai CU : essai consolidé non drainé (sur sol saturé ou non).
- Essai CD : essai consolidé drainé (sur sol saturé ou sable sec).

4- Essai oedomètre (selon la norme NF P 94-090-1): [27]

- <u>Domaine d'application</u>: Le présent document s'applique à l'essaide compressibilité à l'oedomètre sur sol fins et matériaux fins cohérents, avec chargement par paliers.
- Oedomètre : Appareil permettant de charger axialement une éprouvette de forme cylindrique placé dans un cylindre rigide et de mesurer sa variation ΔH de hauteur H.
- <u>But</u>: Déterminer caractéristique du sol, à savoir :
 - La pression de consolidation.
 - Le coefficient de compression Cc.
 - Le module oedométrique E'.
 - Le coefficient de gonflement Cg.

III.9- Conclusion:

Les problémes géotechniques induisent une gestion de risques importante dans le réalisation des grand projets d'infrastructure. Problèmes spécifiques pour chaque projet liés au contexte géologique de chaque zone et au types d'ouvrage.

Implication de l'ingénieur géotechnique dans la conception du projet. Le recherche de solutions optimisées implique une concertation entre les différents partenaires (maitre de l'ouvrage, Entrepreneur, Surveillant).

Chapitre IV :	Les étapes de la modélisation par le logiciel de COMSOL Multiphysics
	CHAPITRE IV : Les étapes de modélisation de logiciel COMSOL Multiphysics.

IV.1- Introduction:

Pour modéliser numériquement un ouvrage géotechnique, il est évidemment nécessaire d'utiliser un modèle qui rend compte de l'interaction mécanique entre le sol et le mur, mais plusieurs approches sont possibles concernant la modélisation de ce modèle et de l'interaction de celles-ci avec le sol. Dans ce chapitre, on présente les différentes étapes de modélisation après qu'on effectue l'étude e pour calculer les forces de poussée et de butée. Dans tous les cas, la démarche consiste à savoir les procédures de modélisation numérique de mur avec sol à l'aide de logiciel COMSOL Multiphasics en prenant compte les charges, le comportement de matériaux, l'environnement de contacte et la méthode élaborée.

IV.2- Définition de logiciel COMSOL Multiphysics :

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation par éléments finis (FEM) permettant de résoudre tout type de problème pouvant être décrit par des équations aux dérivées partielles. Dans ce logiciel, les équations différentielles sont exprimées dans des petits volumes permettant leur expression sous forme de différences simples et transformant le problème continu en un problème comportant un nombre fini d'équations et d'inconnues pouvant se résoudre avec des techniques d'algèbre linéaire.



Figure IV.1: Logiciel.

IV.3- Conception d'un modèle :

Afin d'étudier ce mur qui est en porte-à-faux, les caractéristiques des sols et la proximité du mur avec les structures existantes. Alors que le mur utilisé est habituellement pour t = 19.00mm d'épaisseur, hauteur de H = 10m et encastrer dans D = 5m dans le sol (voir la figure IV-2). Ainsi les propriétés de mur utilisées pour le modèle qui sont données dans Tableaux.

Propriétés Valeurs Descriptions 19 kN/m^3 Poids volumique γ 35° Angle de frottement φ C 0 kPa Cohésion Ψ 0 L'angle de dilatation Е Module de Young 20000 kPa Coefficient de Y 0.3 poisson R_{in} 0,67 Coefficient d'interface

Tableau IV-1 : Propriétés du sol.

Tableau IV-2 : Propriétés du mur de soutènement.

Propriétés	Valeurs	Descriptions
Е	3000000 kPa	Module de Young
Y	0.15	Coefficient de poisson
γ	24 kN/m ³	Densité

IV.4- Choix du matériau :

Le Matériaux utilisés dans cette étude est l'acier dont les caractéristiques données dans le tableau IV-1.

 Mur : Le Comportement des matériaux de rideau de palplanche est élastique linéaire.

Tableau IV-3 : Les comportements et les propriétés issues du matériau.

Propriété	Matériau	Groupe de
		propriétés
Module de Young	Sol	Basique
Coefficient de Poisson	Sol	Basiqe
Masse volumique	Sol	Basique
Module de Young	Mur de soutènement	Basique
Coefficient de Poisson	Mur de soutènement	Basique
Masse volumique	Mur de soutènement	Basique

Plasticité du sol :

Tableau IV-4 : Le Critère de rupture du sol est de Mohr – Coulomb.

Propriété	Matériau	Groupe de
		propriétés
Cohésion	Sol	Mohr-Coulomb
Angle interne de	Sol	Mohr-Coulomb
frottement		

IV.5- Les étapes de modélisation :

Géométrie :

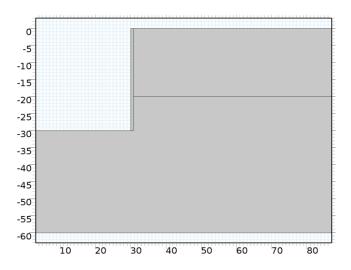


Figure IV-2 : Conception d'un modèle de mur de soutènement étudié.

Matériaux :

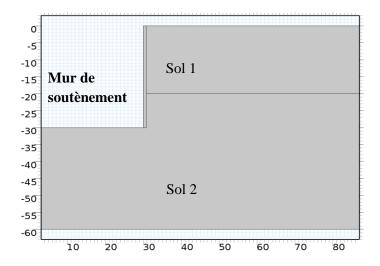


Figure IV-3 : Matériaux constituants le modèle (sol retenu par un mur de soutènement)

• Sol, couche supérieure:

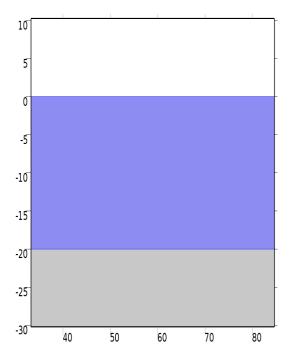


Figure IV-4 : Sol, couche supérieur.

Sol, couche inférieure:

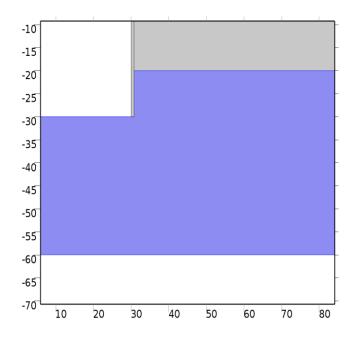


Figure IV-5: Sol, couche inférieure.

• Mur de soutènement:

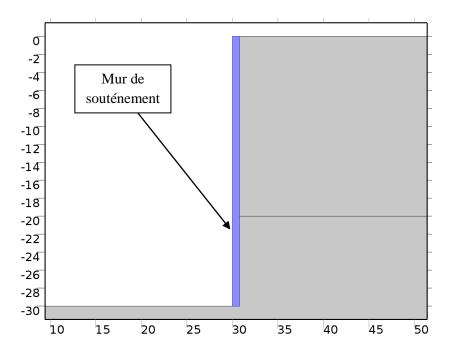


Figure IV-6 : Mur de soutènement.

Condition Initiales :

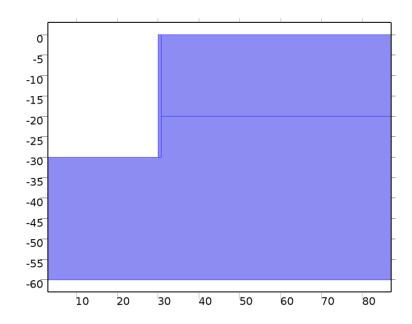


Figure IV-6 : Condition Initiales

Libre:

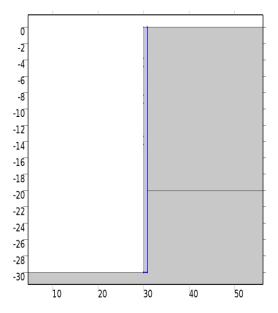


Figure IV-7: Libre.

Symétrie :

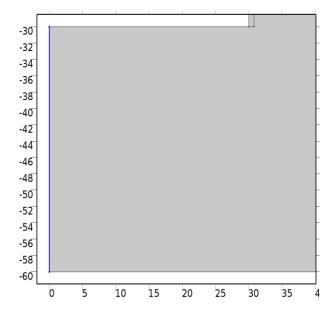


Figure IV-8 : Symétrie.

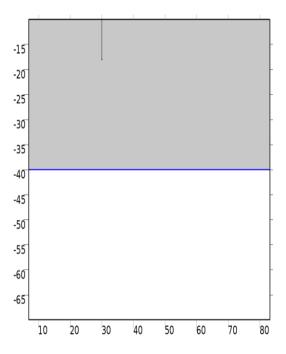


Figure IV-9 : Limite fixé.

■ Appui simple :

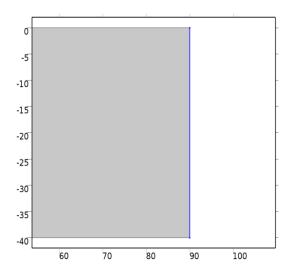


Figure IV-10 : Appui simple.

Limite de déplacement :

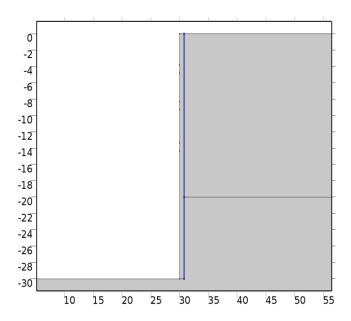


Figure IV-11 : Limite de déplacement.

 Chargement : Les surcharges sont appliquées verticalement et directement sur le sol dans les parties de poussés et butée comme elles sont indiquées dans la figure (IV-12) :

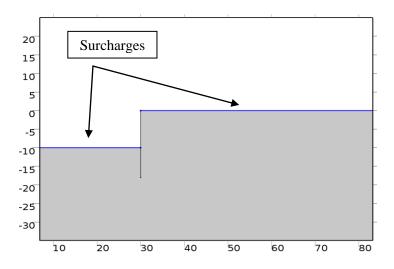


Figure IV-12: Surcharges.

 Les contraintes horizontales de poussées sont appliquées perpendiculaires au mur de soutènement comme elles sont illustrées dans la figure (IV-13) :

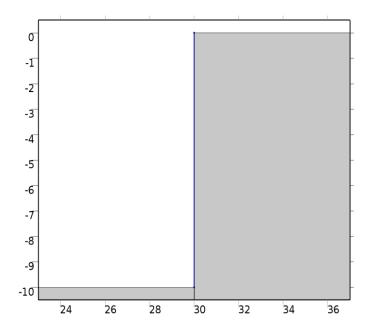
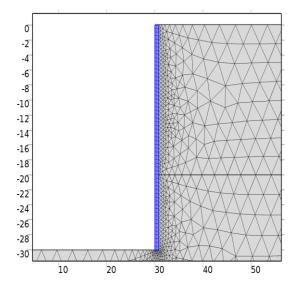


Figure IV-13 : Les contraintes horizontales de poussées.

- Maillage : Dans notre etude, on a opté pour deux types de maillage :
 - Le maillage rectangulaire (mapped) : utilisé comme maillage de mur,
 - Le maillage triangulaire (triangulat) : utilisé comme maillage du sol,



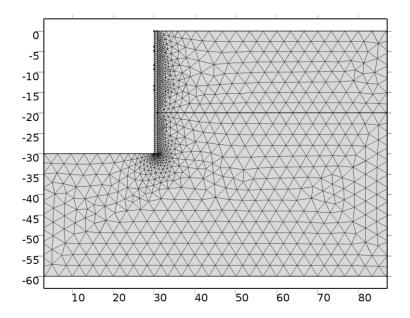


Figure IV-14 : Choix de maillage.

• Choix de discipline :

On appliquer de ce modèle (dans notre étude de modélisation, on a appliqué la mécanique des solides).

• Choix le type d'analyse :

On obtient la méthode approprié pour l'analyse de ce modèle (dans notre étude de modélisation, on a appliqué la méthode stationnaire).

Chapitre V :	Résultats et discussions du logiciel COMSOL Multiphysics.
	CHAPITRE V : Résultats et discussions du logiciel COMSOL
	Multiphysics.

V.1- Introduction:

Ce modèle montre comment modéliser une excavation profonde. Le domaine d'application principal de ce type de modèle est le domaine génie civil. Dans ce cas, le sol excavé est modélisé avec des charges aux limites que nous éliminons étape par étape pour simuler l'excavation du sol. Le sol assume la plasticité Drucker-Prager.

- Le comportement des sols pulvérulent (C = 0) : Il s'agit de sols sableux graveleux pour lesquels, en principe, il n'existe pas de cohésion si le sol est sec ou parfaitement saturé. Le comportement du sol sera lié à la compacité relative.
- Le comportement des sols cohérent (C ≠ 0) : Ce comportement est assez complexe, il est fonction en particulier de l'état de consolidation du sol mais également de son degré de saturation.

V.2- Les résultats et interprétations :

Concernant le sol, sous l'effet de la charge repartie le sol déplace horizontal et vertical. Sachant que le déplacement est plus important.

La figure V-1(a et b) illustre les déplacements totaux en (m) du modèle dans le sens horizontal et vertical. Commente la figure (V-1 a et V-1b) de déplacement dans une dépanadant fortement de l'hypothèse fuites sur la cohérent, le calcul dans les sols celant dans de déplacement mis important est tète par rapport ou sol pulvérisent donc le calcul donnée dans le sol cohérent est beaucoup plus limité, on remarque ca par le valeur de déplacement donné dans le sol cohérent 31,1 mm par continue 31,4 mm dans le sol pulvérisent.

L'allure des déplacements au mus est presque le même sur le plan de forme mis défirent en matières des valeurs. Aussi les déplacements verticaux engendrent des tassements en surface puisque détape ce puis signifie que le mur est plus rigide est maintient la stabilité du sol retenus.

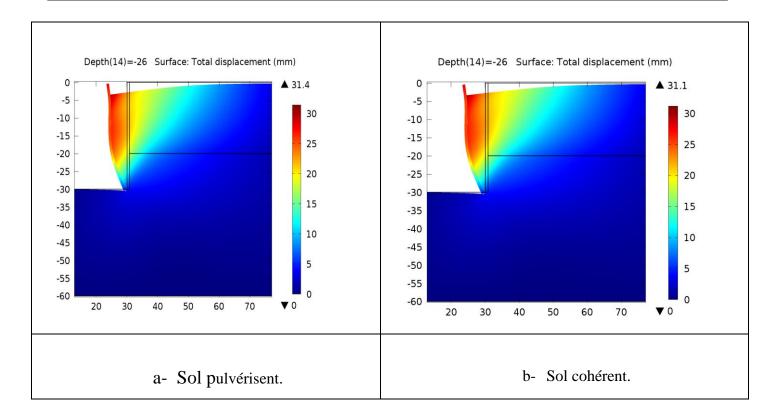


Figure V-1 : Déplacements totaux en (mm).

On a un dans la figure (V-2a) et (V-2b) puis il y'a une différence entre les deux type du sol cohérent au pulvérisent. Dans le cas du sol cohérent les déformations se continue dans une bonde de largeur alors 12 mm et profondeur est 30mm.

Le cas continue de sol pulvérisent les déformations continue aussi dans bonde de 10m et profondeur de 30mm. Les deux figures (V-2a et V-2b) représente le mode de mur et la région déformation plastique dans la largeur de cette tare et presque la majorité de profondeur on compare la figure (V-2a et V-2b) donc la figure on contraint une déformation dans le mode de mur de la région et déformation plastique notamment dans le sol pulvérisent on cette zone est plus grand pour celle du sol cohérent.

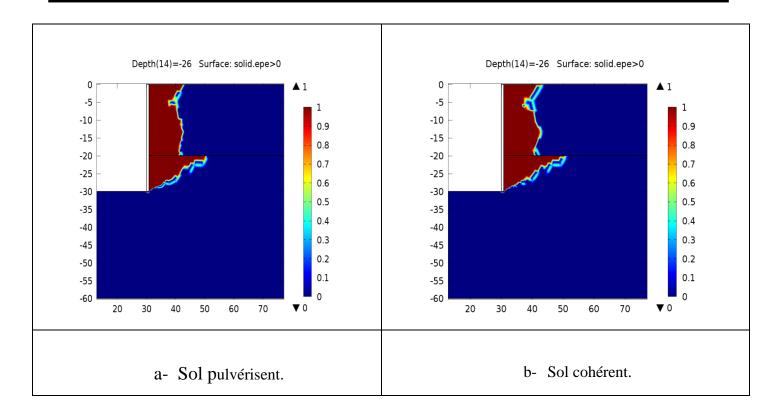


Figure V-2 : Régions et déformations plastiques.

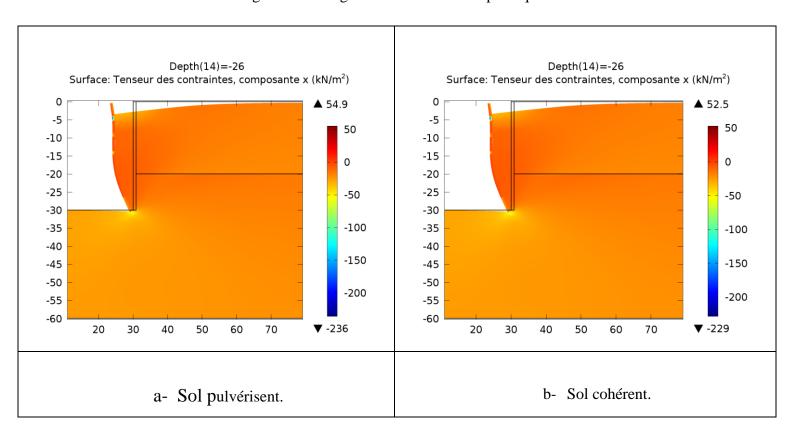


Figure V-3: Contraintes Horizontales.

D'après la figure (V-3a et V-3b) les contraintes distribuées sur les deux modèle soit sol pulvérisent et sol cohérent donne des valeurs important notamment dans les sols pulvérisent $\sigma_{XX}=236~\text{KN/m}^2$ par rapport le sol cohérent $\sigma_{XX}=299~\text{KN/m}^2$. Ces contraintes apparaissant dans la partie active.

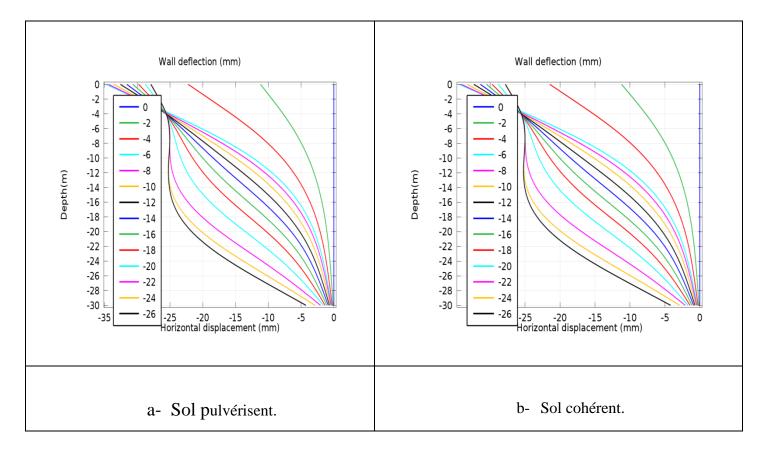


Figure V-4: Variation de déplacements horizontaux en fonction de profondeur.

On remarque de la figure (V-4a et V-4b) la variation de déplacements horizontaux en fonction de profondeur et le niveau de terrassement, dont chaque niveau de terrassement à une forme de déplacement.

On commence par le sol pulvérisent représente dans la figure (V-4a) on remarque que : le niveau 0 (pied de mur) par de déplacement, le niveau -2 dans une valeur maximal de -10.8 mm, le niveau -4 dans un valeur maximale de-16 mm, le niveau -6 on a une valeur maximal de-26 mm, le niveau -8 on a un valeur maximale de -30 mm, le niveau -10 on a une valeur maximale de-31mm, le niveau -12 on a une valeur maximale de -32mm, le niveau -14 on a une valeur maximale de -33, le niveau -16 on a une valeur maximale de -28 mm, le niveau -18 on a une valeur maximale de -29 mm, le niveau -20 on a une valeur maximale de 27 mm, le niveau -22 on a une valeur maximale de 35 mm, le niveau -24

on a une valeur maximale de 27.5 mm, le niveau -26 on a une valeur maximale de 26.8 mm.

Dans la figure (V-4b) on a un sol cohérent en remarque que : le niveau 0 (pied de mur) par de déplacement, le niveau -2m dans une valeur maximal de -12 mm, le niveau -4m on a un valeur maximale de-15 mm, le niveau -6m on a une valeur maximal de-28 mm, le niveau -8m on a un valeur maximale de -31 mm, le niveau -10m on a une valeur maximale de-32mm, le niveau -12m on a une valeur maximale de -31.5mm, le niveau -14m on a une valeur maximale de -33, le niveau -16 on a une valeur maximale de -29 mm, le niveau -18m on a une valeur maximale de -28 mm, le niveau -20m on a une valeur maximale de 26 mm, le niveau -22m on a une valeur maximale de 35 mm, le niveau -24m on a une valeur maximale de 28 mm, le niveau -26m on a une valeur maximale de 27 mm.

La figure suivent (V-5a et V-5b) représente la variation des déplacements verticaux sur la surface par mm.

La 1^{er} partie dans la figure concerne le sol pulvérisent : le niveau 0 (pied de mur) par de déplacement, le niveau -2 on a une valeur maximal de -5.8 mm, le niveau -4 on a un valeur maximale de-14 mm, le niveau -6 on a une valeur maximal de-13.1 mm.

Le niveau -8 on a un valeur maximale de -14 mm, le niveau -10 on a une valeur maximale de-14.6 mm, le niveau -12 on a une valeur maximale de -15 mm, le niveau -14 on a une valeur maximale de -15, le niveau -16 on a une valeur maximale de -13 mm, le niveau -18 on a une valeur maximale de -14 mm, le niveau -20 on a une valeur maximale de 13.2 mm, le niveau -22 on a une valeur maximale de 10.9 mm, le niveau -24 on a une valeur maximale de 15.1 mm, le niveau -26 on a une valeur maximale de 14.3 mm.

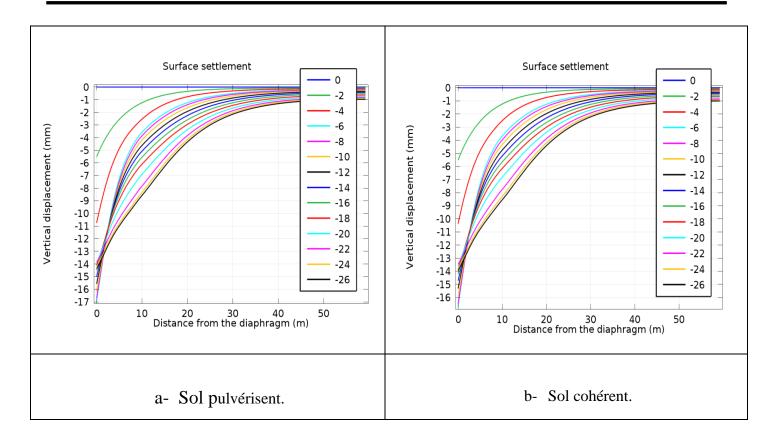


Figure V-5 : Variation de déplacements verticaux sur la surface.

Le 2^{eme} partie dans la figure (b) a concerne le sol cohérent : le niveau 0 (pied de mur) par de déplacement, le niveau -2 on a une valeur maximal de -5.9 mm, le niveau -4 on a une valeur maximale de-10.5 mm, le niveau -6 on a une valeur maximal de -15 mm. le niveau -8 on a une valeur maximale de -16 mm, le niveau -10 on a une valeur maximale de-14 mm, le niveau -12 on a une valeur maximale de -14.5 mm, le niveau -13 on a une valeur maximale de -14.9, le niveau -16 on a une valeur maximale de -13 mm, le niveau -18 on a une valeur maximale de -12.9 mm, le niveau -20 on a une valeur maximale de 13.5mm, le niveau -22 on a une valeur maximale de 13.7mm, le niveau -26 on a une valeur maximale de 14 mm.

V.3- Conclusion:

Dans ce chapitre, on a représenté les différents résultats et interprétations obtenu de la modélisation numérique d'un sol terrassé soutenu par un mur de soutènement en cas du sol pulvérulent et cohérent de sous l'effet de chargement, déplacement et déformation plastique.

	Conclusion générale	•

Conclusion générale.

Conclusion générale:

Ce projet de fin d'étude, nous permis l'étude numérique de terrassement profonds au niveau des sites de construction d'un ouvrage, tout en mentionnant les principes et l'importance de ce processus pour atteindre et assurer sa stabilité future, ainsi que de nombreuses techniques.

Les travaux de terrassement sont pour préparer le terrain et utile pour préparer un bonne structure, pour assurer le terrassement complet du sol et pour éviter tout les problèmes de futurs glissement de terrain. Les travaux de terrassement de base se sont réalisés avant la construction, utilisés pour la réalisation des réseaux et de la fondation.

L'allure des déplacements au mus est presque le même sur le plan de forme mis défirent en matières des valeurs. Aussi les déplacements verticaux engendrent des tassements en surface puisque détape ce puis signifie que le mur est plus rigide est maintient la stabilité du sol retenus.

Les contraintes distribuées sur les deux modèle soit sol pulvérisent et sol cohérent donne des valeurs important notamment dans les sols pulvérisent par rapport le sol cohérent. Ces contraintes apparaissant dans la partie active.

La variation de déplacements horizontaux en fonction de profondeur et le niveau de terrassement, dont chaque niveau de terrassement à une forme de déplacement.

Cette étude numérique montre que, dans le sol pulvérisent : le niveau de terrassement a un déplacement qui augmente graduellement en fonction de profondeur du haut vers bas, ces déplacements sont grands que le sol cohéré

Egalement dans le sol pulvérisent, la région plastique ou déformation plastique en longueur et en profondeur plus grande que celui du sol cohéré.

Logiciel COMSOLMultiphysics ayant été utilisé pour l'étude numérique,Porte sur l'étude la voir de la modélisation numérique, du comportement d'un mur de soutènement soumis à des effets de déformations plastique, déplacement et des contraintes dues au sol.

Enfin, Le principal but de la création de COMSOLMultiphysics est d'avoir un logiciel où les scientifiques et les ingénieurs peuvent formuler notamment dans les problèmes géotechniques, à l'aide de l'interface utilisateur, et pour faire une simulation numérique.

Références bibliographiques.
Références bibliographiques.

- [1] Syndicat professionnel des terrassements de France, « Guide pour réalisation des terrassements des plateforme de bâtiments et d'aires industrielles dans le cas de sols sensibles à l'eau, Décembre 2009.
- [2] Francis Guillemard, Denis FABRA, « Le traitement des sols pour la couche de forme, plateforme de chausse », mémoire, Paris 2012.
- [3] Mr. TALAH, « Les terrassement », mini projet, 2017.
- [4] GTR: Guide des Terrassements Routiers.
- [5] NF P 94-056 : Sols : reconnaissance et essais- Déterminer de la granulométrie des sols par tamisage.
- [6] NF P 94-057 : Sols : reconnaissance et essais-Détermination de la granulométrie des sols fins par sédimentation.
- [7] NF P 94-051 : Sols : reconnaissance et essais- Détermination des limites d'Atterberg-Limite de liquidité à la coupelle-Limite de plasticité au rouleau.
- [8] NF P 94-068 : Sols : reconnaissance et essais-Valeur au bleu de méthylène d'un sol-Méthode à la tache.
- [9] http://WWW.dspace.univ-djelfa.dz.
- [10] http:// WWW.asp.construction.org
- [11] FELLAHI WASSIM, « Caractérisation et résilience des risques géotechniques dans un projet routier », mémoire de master 2^{eme} année GC, 2012.
- [12] Direction régionale de l'Industrie, de la recherche et l'Environnement d'Alsace, « Géotechnique appliquée à la sécurité des exploitations à ciel ouvert en terrains alluvionnaires », 1993.
- [13] SETRA: Service d'Etudes sur les Terrassements, les Transports, les Routes et leurs Aménagements.
- [14] Cours construction 2^{eme} année EPAU, « chapitre2 : Les terrassements », Mr. LEMDANI.
- [15] Mr. Ilyes OU ZAID, « Stabilisation des pentes par inclusion rigides », mémoire de master 2^{eme} année, 2014. P 6-21

- [16] Mohamed KHEMISSA, « Méthodes d'analyse de la stabilité et techniques de stabilisation des pentes », journées nationales de géotechnique et géologie de l'Ingénieur (JNGG), Lyon France, 2006.
- [17] Mr. KHLIL Nassim, Mr. SENAD Bilal, "Etude de stabilité, modélisation et confortement du glissement de terrain de la cite des 50 logements MEZGHITANE (JIJEL) », mémoire de fin d'étude, 2014. P 28-32.
- [18] http://WWW.ihca.ca.com
- [19] LCPC: Laboratoire Central des Ponts et des Chaussées.
- [20] NF P 18-572: 1990 Granulats- Essai d'usure micro-Deval.
- [23] Journées nationales de géotechnique et géologie de l'Ingénieur, « Essais géotechniques de terrassement et succion : quelques enseignements pratiques », Nacy 2016.
- [24] NF P 94-093 : Sols : reconnaissance et essais-Détermination des caractéristiques de compactage d'un sol par l'essai Proctor normal et Proctor modifié.
- [25] NF P 94-078 : Sols : reconnaissance et essais-Indice CBR après immersion Indice CBR immédiat Indice portant immédiat Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR.
- [26] NF P 94-070 : Sols : reconnaissance et essais- Essai à l'appareil triaxial de révolution.
- [27] NF P 94-090-1 : Sols : reconnaissance et essais- Essai Œnométrique.
- [28] NF P 94-117-1: Sols: reconnaissance et essais -Portance des plates-formes.
- [29] NF EN 932-2 : Propriétés générales des granulats- partie 2 : méthodes de réduction d'un échantillon de laboratoire.
- [30] NF EN 1097-6 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats- partie6 : détermination de la masse volumique réelle et coefficient d'absorption d'eau.
- [31] http:// WWW.aspsam.com

Références bibliographiques.