

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département de Génie Civil

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Génie Civil

Spécialité : Structures

Par

- LETIFI SALAH EDDINE
- DJEDDOU HOUSSAM EDDINE

Intitulé

Comportement mécanique des murs de soutènement en béton armé

Soutenu le :

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M.</i>		<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. LOGZIT Nacer</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. KHENNOUF Abdelaziz</i>	<i>MCB</i>	<i>Co-Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M.</i>		<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2021/2022

سَلَامٌ عَلَيْكُمْ

Remerciements

Remerciements

Nous devons tout d'abord remercions Dieu le tout puissant et miséricordieux, pour nous avoir donnée la force et la patience d'accomplir ce travail.

C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que nous remercions à mes encadreurs **Dr. Logzit Nacer** et **Dr. Khennouf Abdelaziz** pour son soutien, son conseil judicieux et ses grandes bienveillances durant l'élaboration de ce projet.

Nous remercions également les membres du jury de nous avoir fait l'honneur de lire notre travail et de nous faire part de leurs appréciations instructives.

Nous remercions chaleureusement **Mr.Letifi Salah eddine** et **Mr. Djeddou Houssam eddine** de m'avoir aidés, orientés, dirigés et conseillés. Qu'il trouve ici l'expression de mes profondes gratitude.

Nous réservons aussi une pensée chaleureuse à toute mes familles surtout mes parents chères, mes grand-parents, mes frères, mes sœurs et mes oncles, qui n'ont cessé de m'encourager et de me pousser vers l'avant et qui être toujours de mes côtés.

Nous remercions pareillement mes amis pour leurs orientations, leurs nombreux conseils et aides.

Enfin nous n'oublions pas de remercier aussi l'ensemble mes enseignement et les collègues de département de **Génie Civil** de l'université de **Mohamed El Bachir El Ibrahimi –Bordj Bou Arreridj**, et toute personne ayant un lien de près ou de loin à accomplir ce travail.

ملخص :

تستخدم الهياكل الاستنادية بشكل متزايد في مجال الهندسة المدنية. من أجل ضمان استقرارها، يجب تحديد أبعادها بشكل صحيح وتحديد قوى الدفع والدعامة للجدار الاستنادي.

الهدف من هذا العمل هو النمذجة الرقمية للجدار الاستنادي الخرساني الصلب، وتتم هذه النمذجة باستخدام برنامج روبات اكسبار وهو برنامج يستخدم على نطاق واسع في الميدان. سمحت دراسة حالة على الجدار الاستنادي بالحصول على تنوع الإزاحة وفقاً لقوة القص في القاعدة من خلال برنامج تطوير والإزاحة في الجزء العلوي من الجدار بواسطة الروبوت والتي تعد معلمة أساسية لمبررات السلامة.

الكلمات المفتاحية : جدار استنادي، السلوك الميكانيكي، خرسانة مسلحة، نمذجة.

Résumé :

Les ouvrages de soutènement sont de plus en plus utilisés dans le domaine du génie civil. Afin d'assurer leur stabilité, il faut les prés dimensionnés correctement et déterminer les forces de poussée et butée du mur de soutènement.

Le présent travail a pour objectif la modélisation numérique d'un mur de soutènement rigide en béton armé, cette modélisation faite à l'aide du logiciel ROBOT EXPERT qui est un logiciel très utilisé dans la pratique. Une étude de cas sur un mur de soutènement en permis d'avoir la variabilité de déplacement en fonction de l'effort tranchant à la base par un program développant et le déplacement au sommet du mur par robot qui est un paramètre essentiel pour justifier la sécurité.

Mot clés : Mur de soutènement, comportement mécanique, béton armé, modélisation

Abstract :

Retaining walls are increasingly used in civil engineering. In order to ensure their stability, it is necessary to pre-dimension them correctly and to determine the active and passive forces of the retaining wall.

The objective of the present work is the numerical modelling of a rigid reinforced concrete retaining wall using the ROBOT EXPERT software which is a widely used software in practice. A case study on a retaining wall allowed to have the variability of displacement as a function of the shear force at the base by a development program and the displacement at the top of the wall by robot which is an essential parameter to justify safety.

Key words: Retaining wall, mechanical behaviour, reinforced concrete, modelling.

Table des matières

Table des matières

Introduction générale	01
-----------------------------	----

Chapitre 1 : GENERALITES SUR LES OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT

1.1 Introduction	03
1.2 Définition des ouvrages de soutènement	03
1.3 Différents types des ouvrages de soutènement	04
1.3.1 Murs de soutènement	04
1.3.1.1 Murs poids	05
1.3.1.2 Murs en béton armé ou mur cantilever.....	05
1.3.2 Écrans de soutènement	06
1.3.2.1 Rideaux de palplanches	06
1.3.2.2 Parois moulées	07
1.3.3 Systèmes de soutènement composites	07
1.3.3.1 Mur en sol renforcé	07
1.4 Classement des ouvrages de soutènement	09
1.4.1 Ouvrages Rigides	09
1.4.2 Ouvrages Souples	12
1.5 Fonctionnement des ouvrages de soutènement	13
1.5.1 Stabilité d'un ouvrage de soutènement	13
1.5.1.1 Stabilité interne	13
1.5.1.2 Stabilité externe	14
1.6 Conclusion	16

Table des matières

Chapitre 2 : METHODES DE CALCUL ET DIMENSIONNEMENT DU MUR DE SOUTÈNEMENT

2.1	Introduction	17
2.2	Comportement des sols	17
2.2.1	Définition	17
2.2.2	Contraintes et déformations dans les sols	18
2.2.2.1	Etat de contrainte en un point	18
2.2.2.2	Représentation de Mohr	18
2.2.2.3	Etats de sol au repos	19
2.2.3	Comportement drainé et non drainé	20
2.2.3.1	Sols fins ou cohérents	21
2.2.3.1	Sols grenus ou pulvérulents	22
2.3	Calcul des poussées et des butées des terres	23
2.3.1	Notions de poussée et de butée	23
2.3.2	Equilibre de poussée et de butée	23
2.3.3	Calcul des forces de poussée et de butée	25
2.3.3.1	Cas des sols pulvérulents	25
2.3.3.2	Cas des sols cohérents	27
2.4	Surcharges	28
2.4.1	Surcharge uniforme	28
2.4.2	Surcharge linéaire	29
2.4.3	Surcharge distribuée suivant une bande	29
2.4.4	Surcharge ponctuelle	29
2.5	Dimensionnement et justifications des murs de soutènement	30
2.5.1	justification vis-à-vis de la stabilité externe	30
2.5.1.1	justification vis-à-vis du glissement sur la base du mur	31
2.5.1.2	justification vis-à-vis du poinçonnement	32
2.5.1.3	justification vis-à-vis du renversement	33

Table des matières

2.5.1.4 justification vis-à-vis du glissement global-----	34
2.5.2 justification vis-à-vis de la stabilité interne-----	35
2.6 Conclusion -----	36

Chapitre 3 : CALCUL ANALYTIQUE D'UN MUR DE SOUTÈNEMENT EN BETON ARME

3.1 Introduction -----	37
3.2 Dimensionnement-----	37
3.3 Présentation du cas étudié-----	38
3.3.1 Détermination du poids de murs -----	40
3.3.2 Le coefficient de poussée-----	40
3.3.3 Calcul de contraintes de poussée -----	41
3.3.4 Calcul des forces de poussée-----	41
3.3.5 Vérification de la stabilité externe-----	42
3.3.6 Calcul du ferrailage -----	42
3.3.6.1 Ferrailage de la semelle-----	45
3.3.6.2 Ferrailage du rideau -----	47
3.4 Conclusion -----	48

Chapitre 4 : MODELISATION NUMERIQUE D'UN MUR DE SOUTÈNEMENT PAR LE LOGICIEL EXPERT

4.1 Introduction -----	50
4.2 Modèle numérique du Mur de soutènement en béton armé -----	50

Table des matières

4.2.1	Présentation de programme	51
4.2.1.1	Géométrie du mur	52
4.2.1.2	Sols	55
4.2.1.3	Charges	56
4.2.1.4	Paramètres de calcul	57
4.2.2	Résultats	58
4.2.3	Analyse du mur par le programme expert	60
4.2.3.1	Entrés des données	60
4.2.3.2	Résultats	61
4.2.4	Les résultats de robot expert	64
4.2.4.1	Résultats de calculs géotechniques	64
4.2.4.2	Résultats de calcul béton armé	66
4.2.4.3	Calcul des déplacements	68
4.3	Conclusion	68
	Conclusion générale	69
	Références bibliographiques	70
	Annexes	72

Liste des figures

Liste des figures

Figure 1.1 Exemples des ouvrages de soutènement	04
Figure 1.2 Exemple de mur formé de gabion	05
Figure 1.3 Mur en béton armé.....	06
Figure 1.4 Ecran de soutènement- rideaux de palplanche.....	06
Figure 1.5 Parois moulées.....	07
Figure 1.6 Mur de soutènement en sol renforcée, (a) Terre armé, (b) Terratel, (c) Pneusol, (d) Cloutage.....	09
Figure 1.7 Mode de rupture interne des ouvrages de soutènement.....	13
Figure 1.8 Trois types de stabilité externe.....	14
Figure 1.9 Influence de renversement sur le mur.....	14
Figure 1.10 Influence de glissement sur le mur.....	15
Figure 1.11 Influence de poinçonnement sur le mur.....	15
Figure 2.1 Représentation de Mohr	19
Figure 2.2. État initial du sol au repos	20
Figure 2.3. (a) Etat de butée et (b) Etat de poussée	23
Figure 2.4 Développement des pressions actives et passives de la terre	23
Figure 2.5 Etat limite du sol (terre horizontale avec surcharge q).....	24
Figure 2.6 Equilibre de poussée et de butée par le cercle de Mohr.....	25
Figure 2.7 Force de poussée exercée par un massif pulvérulent saturé, (b) force de butée sur un massif pulvérulent à surface inclinée	27
Figure 2.8 Cercles de Mohr de poussée et butée pour un sol purement cohérent---	27
Figure 2.9 Calcul élastique des contraintes horizontales apportées sur un écran par des surcharges	30
Figure 2.10 Forces s'exerçant sur un mur-poids.....	31
Figure 2.11 Déterminations de la contrainte de référence.....	33
Figure 2.12 Calcul de la stabilité au renversement par rapport à O	34

Liste des figures

Figure 2.13 Rupture par grand glissement et découpage en tranches pour un calcul de stabilité-----	35
Figure 2.14 Mode de rupture interne d'un mur en béton armé-----	35
Figure 3.1 Prédimensionnement d'un mur de soutènement en béton armé-----	38
Figure 3.2 Prédimensionnement du mur de soutènement en BA analysée-----	39
Figure 3.3 Schéma du mur en BA étudiée-----	40
Figure 3.4 Diagramme des contraintes de poussée-----	41
Figure 3.5 Répartition des forces de poussées F1, F2, F3 et F4-----	42
Figure 4.1 Donnée de Géométrie (général)-----	53
Figure 4.2 Donnée de Géométrie (voile)-----	54
Figure 4.3 Donnée de Géométrie (semelle)-----	54
Figure 4.4 Donnée de Géométrie (tablettes)-----	55
Figure 4.5 Donnée de Sol.-----	56
Figure 4.6 Donnée de charge-----	56
Figure 4.7 Donnée Paramètres de calcul.-----	58
Figure 4.8 Fenêtre de résultats-----	59
Figure 4.9 Donnée de Sols-----	60
Figure 4.10 Donnée de Géométrie-----	60
Figure 4.11 Donnée de ferrailage-----	61
Figure 4.12 Donnée de calcul-----	61
Figure 4.13 Donnée de Résultats.-----	62
Figure 4.14 Diagramme des moments-----	66
Figure 4.15 Les surfaces des ferrailages-----	67

Liste des Tableau

Liste des Tableau

Tableau 1.1 Ouvrages de soutènement qui reprend la poussée par leur poids -----	10
Tableau 1.2 Ouvrages de soutènement qui reprend la poussée par leur encastrement - -----	11
Tableau 1.3 Ouvrages de soutènement reprenant en totalité ou en partie la poussée par leur ancrage dans le massif retenu ou dans le sol de fondation -----	12
Tableau 2.1 Formules de répartition des contraintes-----	28
Tableau 3.1 Prédimensionnement du mur en BA étudié-----	40
Tableau 3.2 Ferrailage de la semelle et du voile-----	48
Tableau 4.1 Caractéristiques du sol de remblai-----	50
Tableau 4.2 Caractéristiques du béton-----	51
Tableau 4.3 Type des charges-----	57
Tableau 4.4 Paramètres géotechniques du sol.-----	63
Tableau 4.5 Calculs géotechniques du sol pulvérulent-----	64
Tableau 4.6 Moments de flexion-----	66
Tableau 4.7 Calcul de ferrailage-----	68

Introduction générale

La stabilisation des massifs de sols se fait généralement, soit par la construction d'un ouvrage de soutènement, ce procédé rentre dans le domaine de la structure, soit par l'ajout d'éléments de renforcement au sol en place, ce procédé appartient au domaine de la géotechnique. Un mur de soutènement est destiné à retenir un faible volume de terrain en amont d'un ouvrage. Qu'il s'agisse d'un mur de soutènement en remblai, lorsque le sol est placé derrière le mur, ou d'un mur de soutènement en excavation, lorsque le sol a été excavé, les besoins sont nombreux : protection contre les glissements de terrain ou les éboulements, le long des routes ou des berges, vers les fondations des ouvrages ou les bases des bâtiments, etc. Pour réaliser le dimensionnement correct d'un mur de soutènement, la considération principale est l'estimation correcte de la poussée du sol retenue par le mur.

Toutefois, il existe des méthodes qui utilisent ces deux domaines simultanément, c'est le cas des massifs en sol renforcé. Ce sont des ouvrages de soutènement construits par renforcement d'un sol de remblai. On utilise autrefois l'analyse à l'équilibre limite dans la conception classique des ouvrages de mur de soutènement segmentaires est généralement pour effectuer ces ouvrages. Parmi l'une des méthodes les plus utilisées pour l'étude des ouvrages de soutènement en béton armé, on trouve la méthode de modélisation numérique permettant l'analyse de la stabilité, la déformation, la résistance et l'influence de plusieurs paramètres en tout point du modèle dans un temps raisonnable.

Le présent travail a pour objectif de modéliser numériquement un ouvrage de soutènement en béton armé en T renversé. En premier temps ont été réalisé un prédimensionnement du mur selon les règlements recommandés aux littératures. Ensuite, des calculs des poussées et la stabilité externe (renversement, glissement, poinçonnement) du mur ont été effectués. Ce mur est étudié par l'utilisation de logiciel de calcul performant. Le ROBOT à titre d'exemple. Ce logiciel permet de modéliser n'importe quelle structure en remblai de sol en étudiant plusieurs paramètres influant sur son comportement.

Le travail présenté est composé de quatre chapitres :

- Le premier chapitre sera consacré à une recherche bibliographique sur les murs de soutènement en béton armé et de leur contenu, les types, les classements et fonctionnement de mur de soutènement.

Introduction générale

- Le deuxième chapitre sera consacré aux méthodes de calculs et dimensionnement du mur de soutènement en béton armé. Ainsi qu'une brève description des méthodes de calcul de stabilité externe et interne du mur.
- Le troisième chapitre sera consacré sur le calcul analytique d'un mur de soutènement en béton armé en T renversé. Le dimensionnement du mur et les calculs des forces de poussées ont été envisagés afin d'analyser la stabilité externe du mur.
- Le quatrième chapitre comporte une présentation de l'ensemble de fonctionnalités de l'outil de simulation numérique (ROBOT) nécessaire pour la modélisation des murs de soutènement.



Chapitre 01

GENERALITES SUR LES OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT

1.1. Introduction

Le rôle des ouvrages de soutènement est de retenir les massifs de terre. Ils sont conçus pour créer une dénivelée entre les terres situées à l'amont de l'ouvrage, c'est à dire soutenues par celui-ci, et les terres situées à l'aval. Il en existe une grande variété caractérisant par des fonctionnements différents et conduisant à des études de stabilité interne spécifiques. Les deux grandes familles d'ouvrages de soutènement sont les murs et les écrans.

Les ouvrages de soutènement sont des structures liées au sol pour lesquelles l'action de celui-ci intervient doublement. Le matériau derrière le mur (généralement du remblai) exerce des poussées sur l'ouvrage. L'ouvrage à son tour sollicite le sol de fondation et y crée des contraintes et éventuellement des tassements. Ces ouvrages qui sont souvent considérés comme secondaires par rapport à d'autres ouvrages d'art (ponts ...) restent cependant délicats et demandent un soin particulier depuis la conception jusqu'à la réalisation.

Les ouvrages de soutènement peuvent être classés en trois grandes catégories :

- ✚ Les murs de soutènement (murs-poids en maçonnerie ou béton, murs en béton armé avec semelle, murs à contreforts, murs cellulaires, murs-caissons, etc.)
- ✚ Les écrans de soutènement (rideaux de palplanches, parois en béton moulé dans le sol, parois préfabriquées, parois de type berlinois, blindages de fouilles, etc.)
- ✚ Les systèmes de soutènement composites (batardeaux composés de plusieurs rideaux de palplanches, murs en sol cloué, murs en Terre Armée, murs renforcés par des géotextiles ou des géogrilles, etc.).

1.2. Définition des ouvrages de soutènement

Le mur de soutènement est un mur vertical ou subvertical qui permet de contenir des terres (ou tout autre matériau granulaire ou pulvérulent) sur une surface réduite. La conception de ce type d'ouvrage peut être très variée, allant des murs poids en béton ou en maçonnerie aux parois ancrées, en passant par les murs en sol renforcé la retenue des terres par un mur de soutènement répond à des besoins multiples, parmi eux, préserver les

Chapitre 1 : GENERALITES SUR LES OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT

routes et chemins des éboulements et glissement de terrain (Figure 1.1). Le choix d'un ouvrage de soutènement dépend notamment de son implantation (en remblai, en déblai), du site (aquatique ou terrestre), du sol de fondation (caractéristiques mécaniques, hydrologie) et des contraintes d'intégration dans l'environnement (nuisance, traitement architectural).

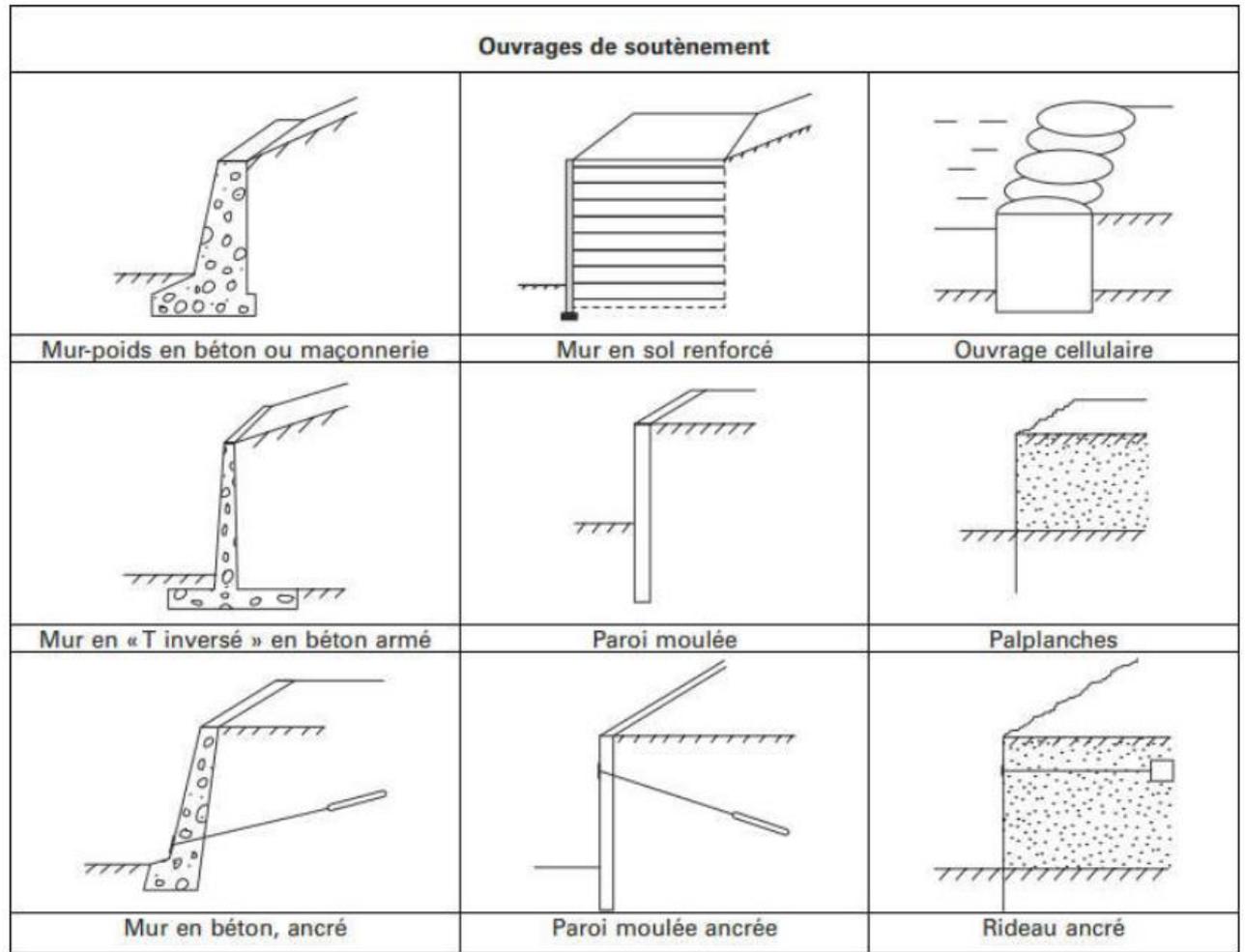


Figure 1.1 : Exemples des ouvrages de soutènement.

1.3. Différents types des ouvrages de soutènement

Il existe une grande variété d'ouvrages de soutènement, se caractérisant par des fonctionnements différents et conduisant à des études de stabilité interne spécifiques. Distinguons trois grandes classes d'ouvrages de soutènement :

1.3.1 Murs de soutènement

Chapitre 1 : GENERALITES SUR LES OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT

Ce sont des ouvrages généralement fondés superficiellement, dont le poids (incluant parfois une partie de la masse de sols retenus) joue un rôle prépondérant. Qui sont constitués d'une paroi résistante et d'une semelle de fondation, comme les murs en béton armé en (T renversé ou L) ou les murs-poids, qu'ils soient en maçonnerie (briques, pierres,) ou formés d'éléments spéciaux (gabions métalliques).

1.3.1.1 Murs poids

C'est un type d'ouvrage le plus classique et le plus ancien. Ils peuvent être réalisés en béton non armé, en maçonnerie. Ils peuvent être constitués d'un assemblage de pierres sèches, de gabions ou d'éléments préfabriqués, en béton armé ou non (blocs, caissons ou boîtes remplies de terre) (Figure 1.2). Ces murs, relativement étanches, sont la plupart du temps pourvus d'un dispositif de drainage.

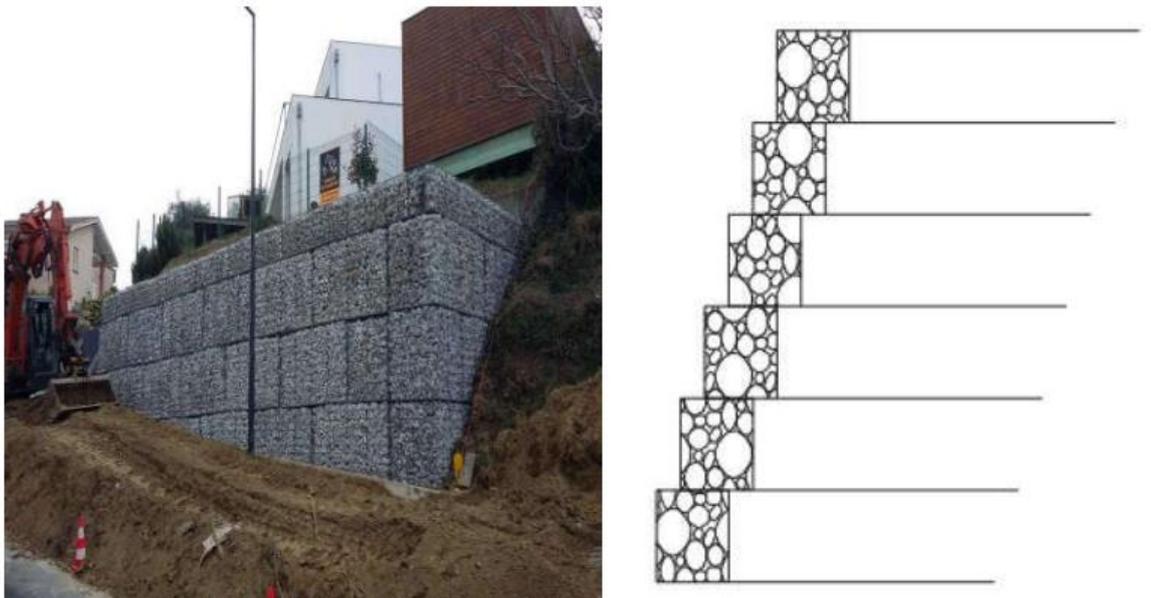


Figure 1.2 : Exemple de mur poids formé de gabion.

1.3.1.2 Murs en béton armé ou mur cantilever

Les murs en béton armé sont probablement le type d'ouvrage de soutènement le plus couramment employé (Figure 1.3). Un mur cantilever peut d'ailleurs être considéré comme un ouvrage poids, si l'on y inclut le poids du remblai compris entre le mur et la verticale qui passe par l'extrémité arrière de la semelle.

Chapitre 1 : GENERALITES SUR LES OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT

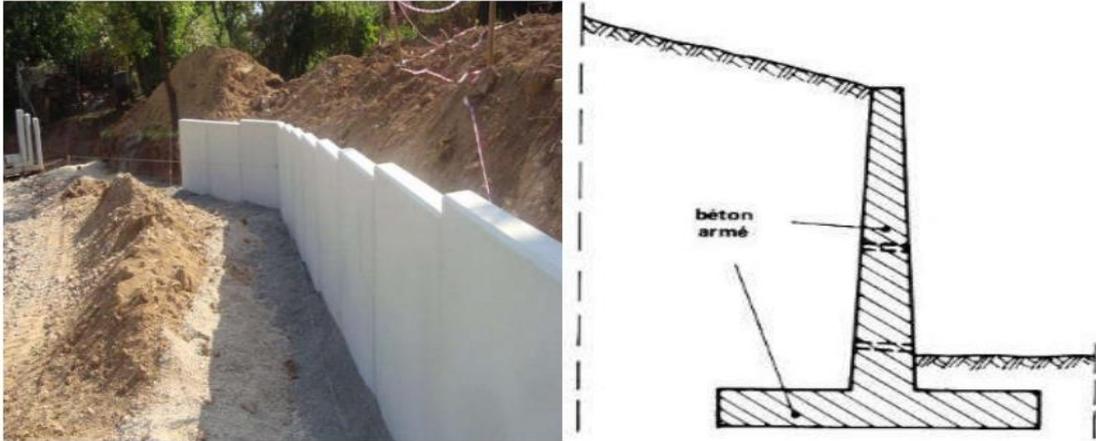


Figure 1.3 : Mur en béton armé.

1.3.2 Écrans de soutènement

Ce sont des ouvrages minces (acier, béton armé ou bois), retenus ou soutenus par des ancrages, des buttons ou la butée des terres. Leur résistance à la flexion joue un rôle important, alors que leur poids est insignifiant qui sont constitués uniquement d'une paroi résistante comme les rideaux de palplanches, les parois moulées en béton armé.

1.3.2.1 Rideaux de palplanches

Ce sont des ouvrages de soutènement flexibles, encastés dans le sol de fondation où l'interaction structure-remblai a une influence prépondérante sur le comportement de l'ouvrage.

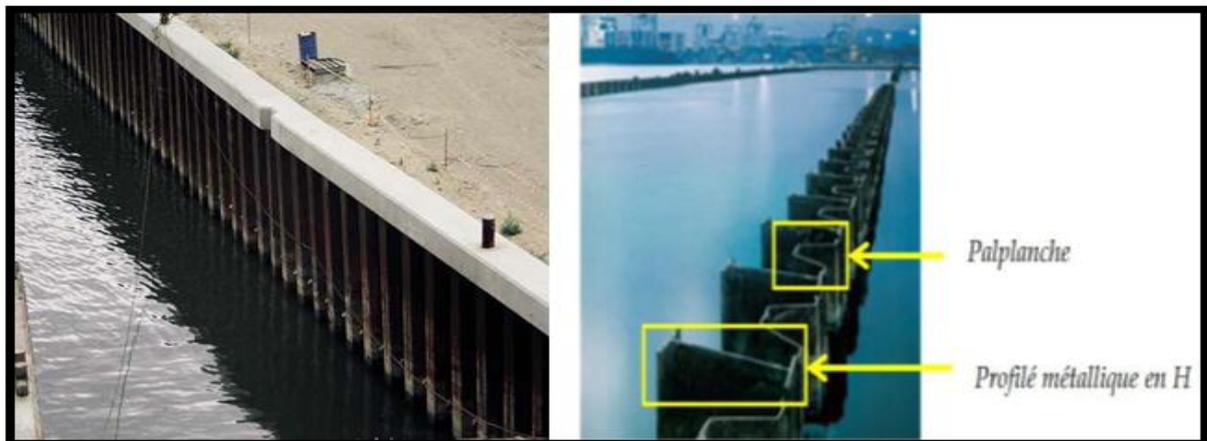


Figure 1.4 : Ecran de soutènement- rideaux de palplanche.

Chapitre 1 : GENERALITES SUR LES OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT

1.3.2.2 Parois moulées

Il s'agit d'une technique qui consiste à construire un mur au sein du sol en place, avant toute excavation, par bétonnage d'une tranchée remplie de boue pour en assurer la stabilité. Cette technique est particulièrement utilisée pour les travaux sous la nappe, en zones urbaine et portuaire.

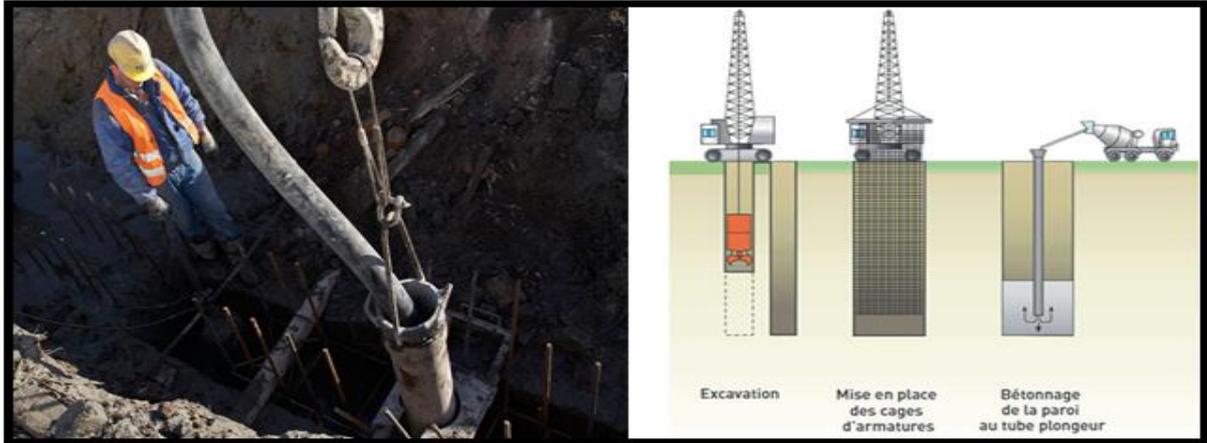


Figure 1.5 : Parois moulées.

1.3.3 Systèmes de soutènement composites

Ce sont des ouvrages qui comportent des rangées sensiblement horizontales de renforcements, interposés entre des couches successives du remblai au fur et à mesure de la construction de l'ouvrage (batardeaux composés de plusieurs rideaux de palplanches, murs en sol cloué, murs en Terre Armée, murs renforcés par des géotextiles ou des géogrilles, etc.). Si, par leurs dimensions, ces ouvrages se rapprochent des murs-poids, certains sont néanmoins relativement souples et peuvent tolérer des déformations importantes.

1.3.3.1 Mur en sol renforcé

La principale caractéristique de ces ouvrages est que c'est le volume de sol associé aux éléments de renforcement qui participe directement à la stabilité. Ces ouvrages sont constitués d'un massif de remblai mis en place par couches successives compactées, entre lesquelles sont disposés des éléments de renforcement (ou armatures) souples et résistants (géotextiles par exemple), généralement reliés à un parement. Ce type de renforcement qui peut apporter une stabilité à un massif en améliorant ses caractéristiques mécaniques. Cette

Chapitre 1 : GENERALITES SUR LES OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT

amélioration est obtenue, en général, par une incrustation dans le massif, d'éléments mécaniquement plus performants que le sol lui-même, donnant à celui-ci une meilleure résistance au cisaillement. Cependant, dans ce type de renforcement on distingue :

Terre armée

La terre armée est une méthode de construction basée sur l'association d'un remblai compacté et d'armatures (métalliques ou synthétiques) liées à un parement (Figure 1.6 (a)).

TerraTrel

Le TerraTrel est issu de la technologie de la Terre Armée qui associe un remblai pulvérulent à des armatures reliées à un parement. Le parement TerraTrel, léger, constitué par un treillis métallique, est une solution économique et durable aux soutènements. Il s'applique également aux ouvrages provisoires (Figure 1.6 (b)).

Le pneusol

Le Pneusol est un mélange de pneus et de sol, dans lequel les pneus sont utilisés comme renforts du sol. Ils sont capables de supporter des efforts de traction importants et sont soit entièrement soit partiellement découpés afin d'être associés en nappes, en couches superposées, grâce à des attaches métalliques (Figure 1.6 (c)).

Cloutage

Le cloutage de sol est un principe d'amélioration du sol à l'aide d'armatures métalliques mises en place à l'intérieur de forages réalisés dans le massif à stabiliser. L'intérêt d'un tel procédé est de réaliser le raidissage des pentes de talus avant de procéder au déblai. Le parement est réalisé à l'aide d'un béton projeté et les armatures sont courantes, car il s'agit d'armatures de béton armé sans autre prescription complémentaire (Figure 1.6 (d)).

Géo-synthétique

Les géosynthétiques sont produits sous différentes formes à partir de matières synthétiques sur la base de divers polymères provenant de l'industrie chimique.

Chapitre 1 : GENERALITES SUR LES OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT

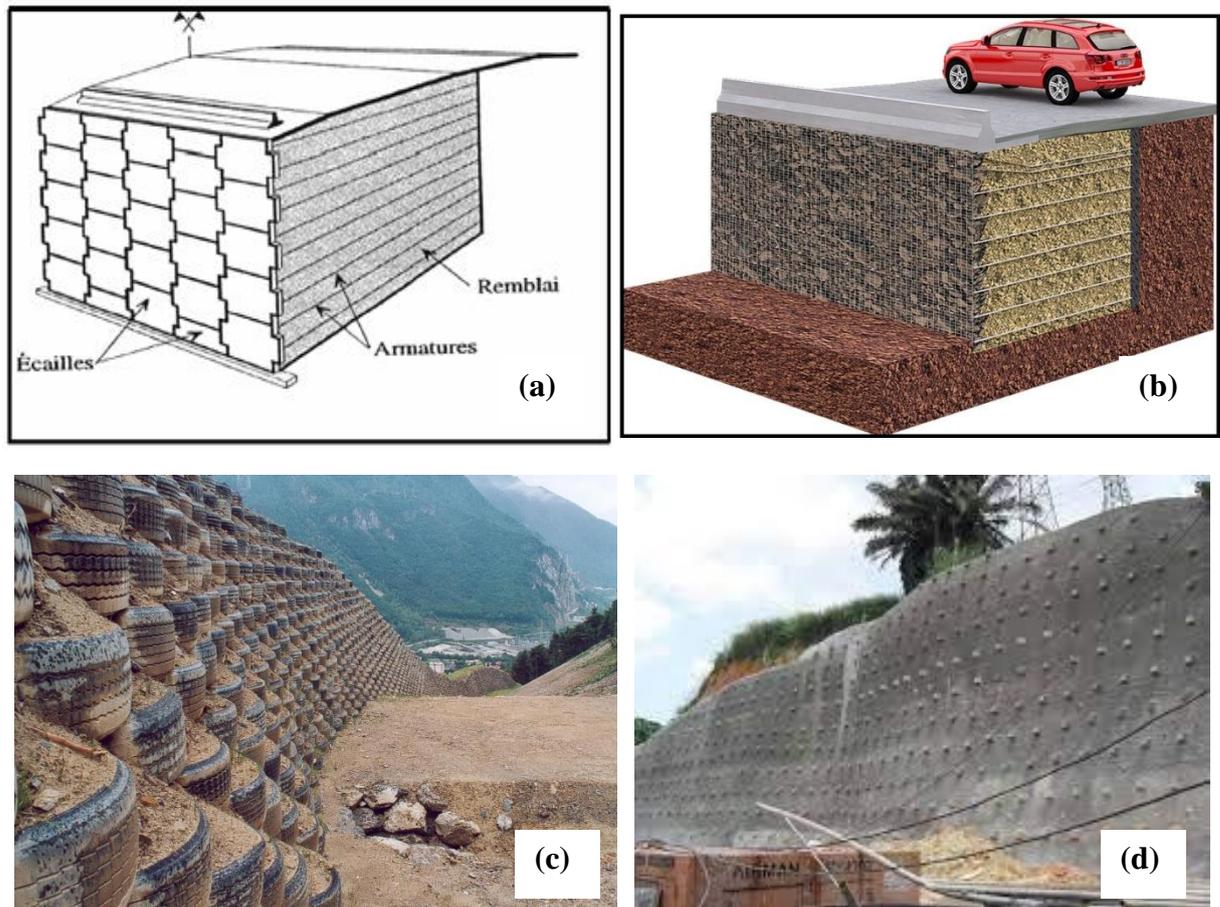


Figure 1.6 : Mur de soutènement en sol renforcée, (a) Terre armée, (b) Terratel, (c) Pneusol, (d) Cloutage.

1.4. Classement des ouvrages de soutènement

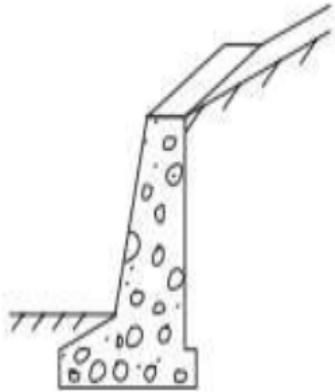
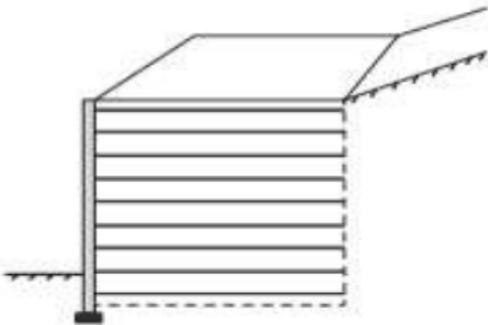
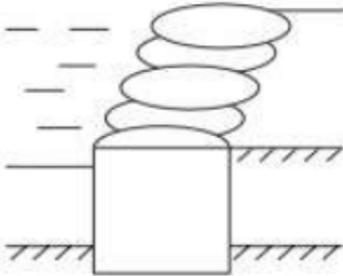
Tous ces ouvrages ont en commun la force de poussée exercée par le massif de sols retenu. Cette force de poussée est généralement reprise, on trouve dans cette catégorie deux types d'ouvrages, les ouvrages de soutènement rigides et les ouvrages de soutènement souples.

1.4.1 Ouvrages rigides

Les murs de soutènement classiques sont les ouvrages les plus courants de cette catégorie. La poussée est reprise par le poids de l'ouvrage (murs poids) ou par encastrement de l'ouvrage dans le sol (murs en béton armé). Dans ce dernier cas, le poids des terres participe à la stabilité de l'ouvrage par l'intermédiaire de la semelle.

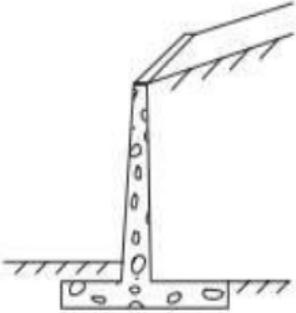
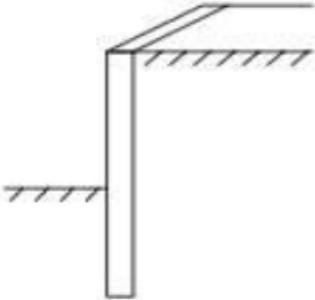
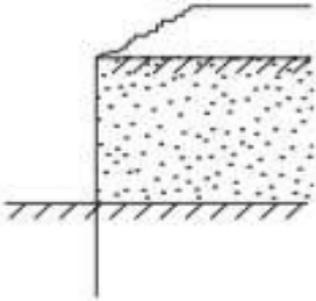
Chapitre 1 : GENERALITES SUR LES OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT

Tableau 1.1 : Ouvrages de soutènement rigides qui reprend la poussée par leur poids.

Type d'ouvrage	Caractéristiques de fonctionnement
 <p>Mur-poids en béton ou maçonnerie</p>	Ouvrage rigide qui ne peut supporter sans dommages des tassements différentiels supérieurs à quelques pour mille
 <p>Mur en sol renforcé</p>	Le sol retenu est renforcé par des inclusions souples résistant à la traction. Ouvrage souple qui supporte les tassements différentiels du sol de fondation.
 <p>Ouvrage cellulaire</p>	La cellule est remplie de sol et l'ensemble forme un ouvrage qui peut être, dans certains cas, très souple.

Chapitre 1 : GENERALITES SUR LES OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT

Tableau 1.2 : Ouvrages de soutènement rigides qui reprennent la poussée par leur encastrement.

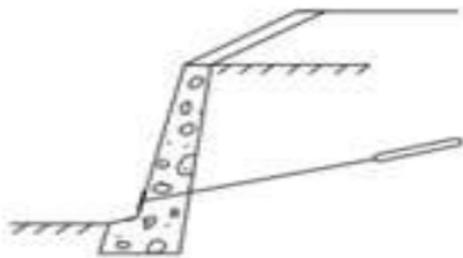
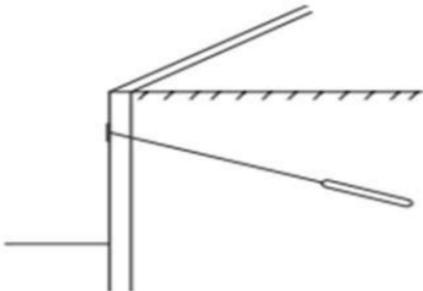
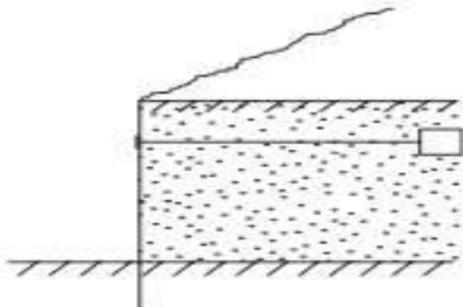
Type d'ouvrage	Caractéristiques de fonctionnement
 <p>Mur en « T inversé » en béton armé</p>	Ouvrage rigide doté d'une base élargie et encastree à la partie supérieure du sol de fondation. Il fonctionne en faisant participer à l'action de soutènement une partie du poids du remblai.
 <p>Paroi moulée</p>	Mur construit dans le sol en place, avant toute excavation, par bétonnage d'une tranchée remplie de boue pour en assurer la stabilité. Il fonctionne par encastrement total ou partiel dans le sol de fondation.
 <p>Palplanches</p>	Ouvrage flexible pour lequel l'interaction structure-sol retenue a une influence prépondérante sur le comportement de l'ouvrage

Chapitre 1 : GENERALITES SUR LES OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT

1.4.2 Ouvrages souples

Le type d'ouvrage représentatif de cette catégorie est le rideau de palplanches. Pour ce type de soutènement, la poussée est reprise soit par encastrement de l'ouvrage dans le sol, soit à l'aide d'ancrages.

Tableau 1.3 : Ouvrages de soutènement reprenant en totalité ou en partie la poussée par leur ancrage dans le massif retenu ou dans le sol de fondation.

Type d'ouvrage	Caractéristiques de fonctionnement
 <p>Mur en béton, ancré</p>	Ouvrage flexible renforcé par une série d'ancrages dans le sol. Les ancrages sont des armatures métalliques (câbles ou barres) qui sont attachées d'une part à la paroi (ou rideau) et d'autre part dans le massif de sol par un corps d'ancrage ou par un scellement avec un coulis d'injection
 <p>Paroi moulée ancrée</p>	
 <p>Rideau ancré</p>	Paroi réalisée à partir de poteaux placés préalablement dans le sol en place. Au fur et à mesure de l'excavation, des éléments préfabriqués (poutres, plaques), ou moulés sur place sont placés entre les poteaux. La poussée des terres est reprise par des ancrages fixés sur les poteaux.

Chapitre 1 : GENERALITES SUR LES OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT

1.5 Fonctionnement des ouvrages de soutènement

Pour stabiliser un massif de sols, on peut aussi s'opposer à la poussée des terres, par la construction d'une paroi ou d'un mur. Dans un massif de sols, le mur permet de réduire l'emprise du talus pour laisser place au passage d'une route ou préserver un bâtiment déjà présent.

1.5.1 Stabilité d'un ouvrage de soutènement

La stabilité d'un ouvrage de soutènement doit être étudiée à l'état limite ultime. Plusieurs modes de rupture doivent être envisagés. La vérification doit être conduite pour chacun d'entre eux. Parmi les modes de rupture possibles, on distingue la stabilité interne (rupture des éléments constitutifs de l'ouvrage sous l'action des forces extérieures), et la stabilité externe (renversement, instabilité d'ensemble, poinçonnement, glissement).

1.5.1.1 Stabilité interne

L'étude de la stabilité interne est propre à chaque type d'ouvrage. C'est la résistance propre de la structure, qu'il y a lieu de vérifier vis-à-vis des efforts (et déplacements) qui la sollicitent. Dans le cas des murs poids, cette étude relève des calculs classiques de béton. Pour les murs en béton armé (ou murs cantilever), la stabilité interne se vérifie par un calcul de béton armé.

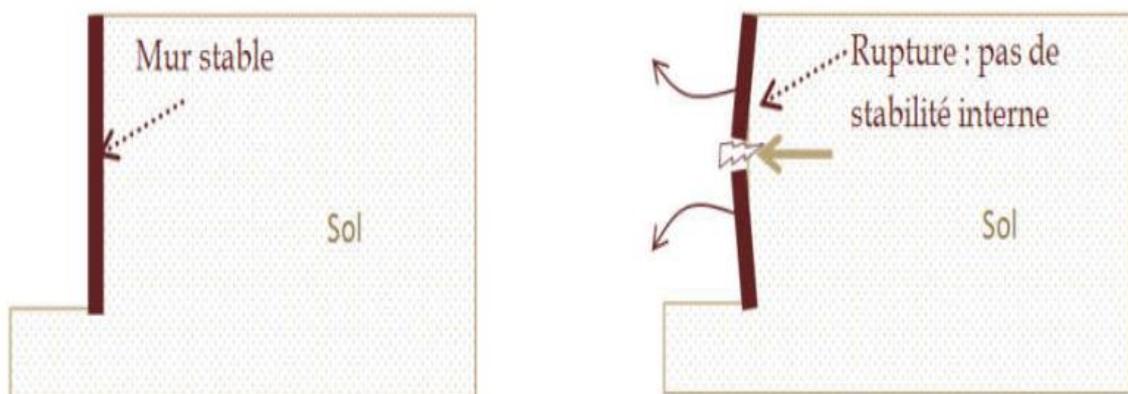


Figure 1.7 : Mode de rupture interne des ouvrages de soutènement.

Chapitre 1 : GENERALITES SUR LES OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT

1.5.1.2 Stabilité externe

Il existe trois types de stabilité externe :

- I. La stabilité au renversement.
- II. La stabilité au glissement.
- III. La stabilité au poinçonnement.

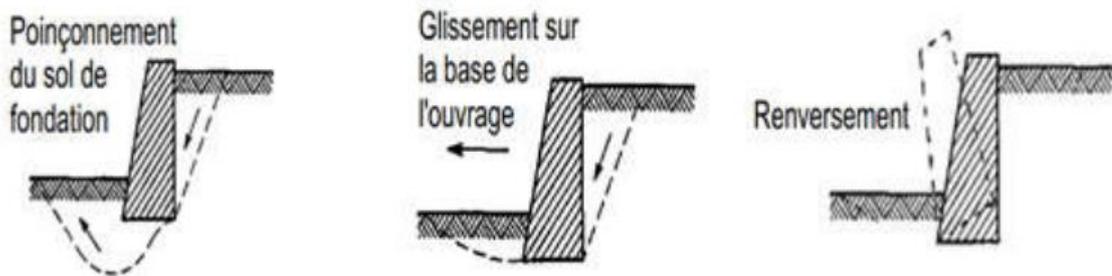


Figure 1.8 : Trois types de stabilité externe.

I. Stabilité au renversement

Un ouvrage de soutènement est soumis à des moments qui sont de nature à le faire tourner par rapport à sa base et le faire renverser. La conception du soutènement doit tenir compte de la valeur du moment moteur produit par les poussées des terres et des surcharges pour l'équilibrer à l'aide d'un moment résistant apporté par le poids du soutènement et celui des terres qu'il déplacerait dès qu'il se met à tourner.



Figure 1.9 : Influence de renversement sur le mur.

Chapitre 1 : GENERALITES SUR LES OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT

II. Stabilité au glissement

Un ouvrage de soutènement peut glisser sur sa base. La poussée des terres et celles des surcharges doivent être reprises par le frottement mobilisé à la sous-face de la semelle du mur. À défaut la semelle est muni d'une bêche permettant d'améliorer la résistance au glissement.

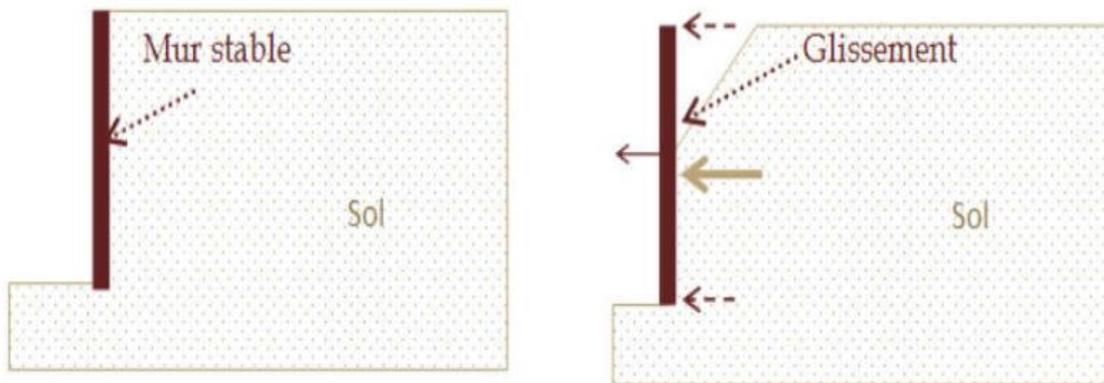


Figure 1.10 : Influence de glissement sur le mur.

III. Stabilité au poinçonnement

Un ouvrage de soutènement peut poinçonner par un excès de charges verticales. La conception de la semelle du mur doit tenir compte de ce risque d'instabilité.

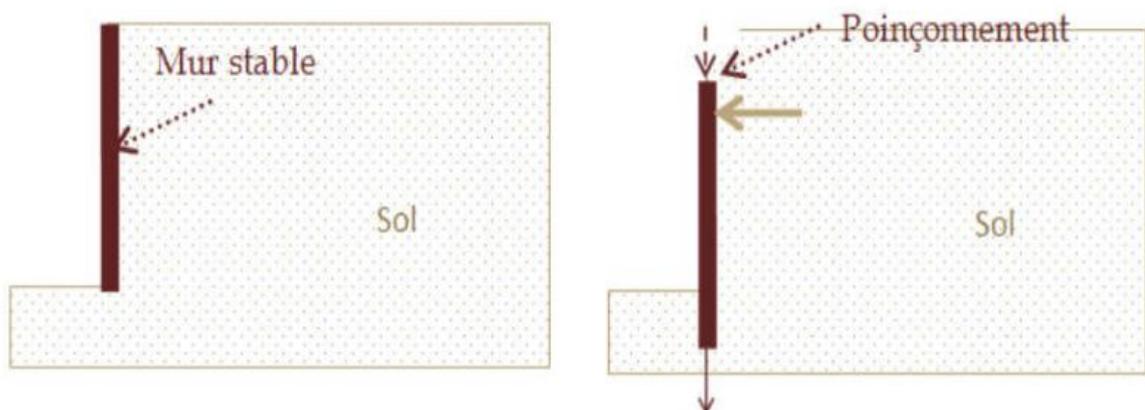


Figure 1.11 : Influence de poinçonnement sur le mur.

Chapitre 1 : GENERALITES SUR LES OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT

1.6. Conclusion

Les ouvrages de soutènement sont des constructions ont pour but de prévenir l'éboulement ou le glissement des talus raides ou verticaux ; leur mise en œuvre peut, être faite à titre temporaire ou définitif.

La réalisation des ouvrages de soutènement est nécessaire, soit pour protéger les chaussées routières contre le risque d'éboulement ou d'avalanches dans les zones montagneuses, soit pour réduire l'emprise des talus naturels dans les sites citadins, lors de la construction d'une route, d'un bâtiment ou d'un ouvrage d'art.



Chapitre 02

Chapitre 2 : METHODES DE CALCUL ET DIMENSIONNEMENT DU MUR DE SOUTÈNEMENT

METHODES DE CALCUL ET DIMENSIONNEMENT DU MUR DE SOUTÈNEMENT

2.1 Introduction

Le calcul complet d'un mur de soutènement est une œuvre assez laborieuse, le dimensionnement de l'ouvrage et ses vérifications demandant une succession de calculs longs et itératifs. Aussi pour arriver de la façon la plus rapide aux bons résultats, il est important de pré-dimensionner de la manière la plus juste possible les caractéristiques géométriques du mur.

Dimensionner un ouvrage de soutènement consiste à déterminer ses éléments géométriques ainsi que ses éléments structuraux pour qu'il soit stable sous l'action des forces qui lui sont appliquées, notamment de la poussée des terres qu'il retient. Néanmoins, la plupart des méthodes de dimensionnement reposent sur des calculs à la rupture de mur avec la prise en compte de coefficient de sécurité.

Ce chapitre fournit des détails sur les méthodes de calculs et dimensionnement du mur de soutènement en béton armé. Ainsi qu'une brève description des méthodes de calcul de stabilité externe du mur.

2.2 Comportement des sols

2.2.1 Définition

On considère généralement qu'un sol est constitué de 3 phases :

• Une phase solide : cette phase, aussi appelée squelette, est constituée des particules de sols. Entre ces particules, se trouvent des vides (interstices ou pores) de taille plus ou moins importante. Les particules de sols peuvent être :

- ✚ minérales non argileuses : Elles sont le résultat de la désagrégation mécanique d'une roche sous forme de grains (sables).
- ✚ minérales argileuses : Elles sont le résultat d'une dégradation chimique d'une roche. Ces particules se présentent sous forme de plaquettes ou feuillets.
- ✚ Organiques (restes de végétaux par exemple)
- ✚ Autres (fragments de coquillages par exemple)

Chapitre 2 : METHODES DE CALCUL ET DIMENSIONNEMENT DU MUR DE SOUTÈNEMENT

- Une phase liquide : Il s'agit généralement d'eau avec d'éventuels solutés. On distingue généralement l'eau libre qui circule librement dans les interstices de l'eau liée (ou adsorbée) qui est attachée par liaison moléculaire à la particule de sol.
- Une phase gazeuse : elle est généralement constituée d'air et de vapeur d'eau. On peut également rencontrer d'autres gaz comme par exemple du méthane dans les sols d'origine organique.

2.2.2 Contraintes et déformations dans les sols

2.2.2.1 Etat de contrainte en un point

L'état de contrainte en un point M d'un milieu continu est complètement défini par le tenseur des contraintes suivant :

$$\sigma^{\equiv} = \begin{bmatrix} \sigma_X & \sigma_{XY} & \sigma_{XZ} \\ \sigma_{XY} & \sigma_Y & \sigma_{YZ} \\ \sigma_{XZ} & \sigma_{YZ} & \sigma_Z \end{bmatrix}$$

Où : $\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z$ sont les contraintes totales dans les directions x, y et z respectivement.

$\sigma_{XY}, \sigma_{XZ}, \sigma_{YZ}$ sont les contraintes tangentielles.

Pour la convention de signe, à la différence de la mécanique des milieux continus, en mécanique des sols, une contrainte de compression est exprimée positivement.

- Contraintes positives en compression
- Déformations positives en compression

2.2.2.2 Représentation de Mohr

La représentation dite de Mohr est très utilisée en mécanique des sols. Cette représentation est équivalente à la donnée du tenseur des contraintes à six composantes. On représente les variations de σ et τ quand le plan π tourne autour du point M.

Le point F de coordonnées (σ, τ) est tel que $OF = f$ et l'angle $(O\sigma, OF)$ est égal à l'angle α du vecteur contrainte f avec la normale n au plan π . Lorsque le plan π balaie l'ensemble des orientations possibles autour du point M, le point F se déplace dans la zone hachurée de la figure suivante (σ_1, σ_2 et σ_3 sont les contraintes principales).

Dans le plan de Mohr (τ, σ) , la forme de la courbe enveloppe de ce critère est une droite appelée droite de coulomb (courbe intrinsèque) (Figure 2.1), d'équation :

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (2.1)$$

Chapitre 2 : METHODES DE CALCUL ET DIMENSIONNEMENT DU MUR DE SOUTÈNEMENT

Où : τ est la contrainte de cisaillement, c est la cohésion, σ est la contrainte normale et φ l'angle de frottement interne du sol.

Dans l'espace des contraintes principales ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$), la surface définie par la fonction de charge f est une pyramide de section hexagonale irrégulière à sa base ayant pour axe la droite d'équation : $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$. L'équation de la surface de charge est comme suivante :

$$f(\sigma_{ij}) = (\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi - 2C \cos \varphi = 0 \quad (2.2)$$

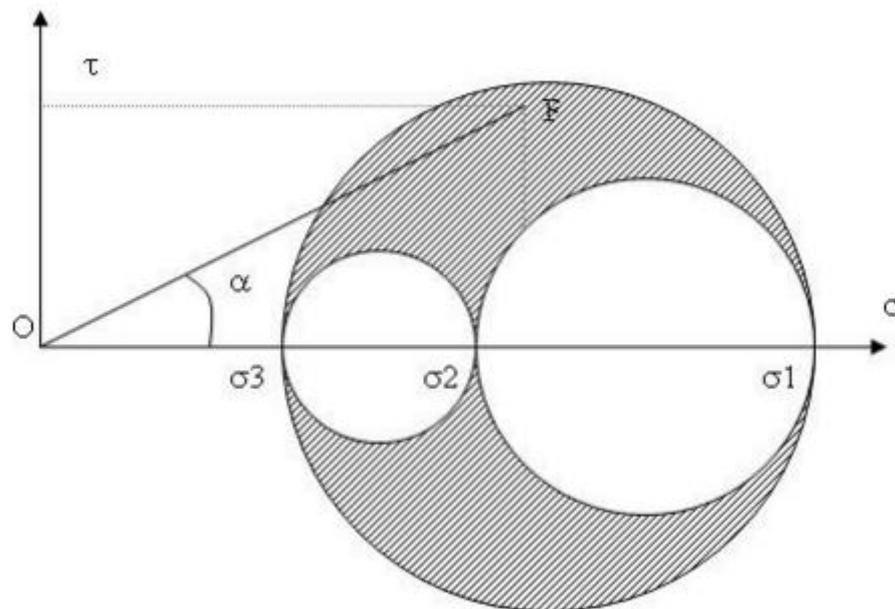


Figure 2.1 : Représentation de Mohr.

2.2.2.3 Etat de sol aux repos

Avant de subir des déplacements, le sol se trouve dans un état initial qui dépend de son histoire géologique. On nomme cet état « poussée des terres au repos » (sans déplacement). Pour le définir, on relie la contrainte effective horizontale à la contrainte effective verticale par le coefficient des terres au repos K_0 .

$$\sigma'_{h0} = K_0 \sigma'_{v0} \quad (2.3)$$

Chapitre 2 : METHODES DE CALCUL ET DIMENSIONNEMENT DU MUR DE SOUTÈNEMENT

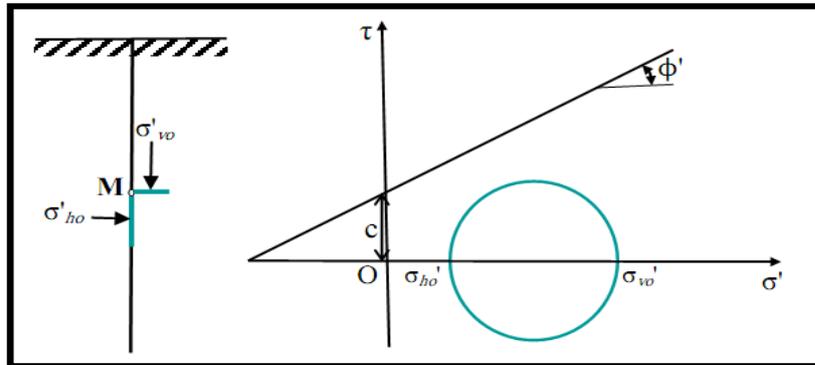


Figure 2.2 : État initial du sol au repos.

À défaut de mesurer le coefficient K_0 , on peut l'estimer :

- a) Si le sol avait un comportement élastique linéaire, K_0 serait égal : $K_0 = \frac{\nu}{1-\nu}$

Avec ν coefficient de poisson du sol, Cette valeur théorique s'éloigne trop de la réalité pour être utilisée pratiquement.

- b) Pour les sols pulvérulents et les sols fins normalement consolidés, on pourra utiliser la formule simplifiée de Jacky : $K_0 = 1 - \sin \varphi$

2.2.3 Comportement drainé et non drainé

Dans les sols saturés, la résistance au cisaillement est liée uniquement au squelette solide du sol, puisque l'eau interstitielle n'offre aucune résistance aux efforts de cisaillement ou de distorsion. Elle ne dépend, de ce fait, que des contraintes effectives qui s'exercent aux points de contact des particules solides.

Elle est donc directement influencée par les conditions d'application de ces efforts, conditions qui commandent la répartition des contraintes totales σ appliquées entre les phases liquides (pression interstitielle u) et solide (contrainte effective σ') du sol, selon le principe de Terzaghi :

$$\sigma = \sigma' + u$$

$$\tau = \tau'$$

On distingue de ce point de vue deux types de comportement du sol : un comportement drainé et un comportement non drainé.

Chapitre 2 : METHODES DE CALCUL ET DIMENSIONNEMENT DU MUR DE SOUTÈNEMENT

✚ Comportement drainé : lorsque l'application de l'effort vérifie l'une des conditions suivantes :

1. Elle est lente compte tenu de la perméabilité du sol et de la longueur du chemin de drainage pour n'induire à aucun moment de surpression interstitielle importante.
2. Elle a duré assez longtemps pour que les surpressions interstitielles éventuelles se soient dissipées au moment où l'on veut mesurer ou calculer le comportement du sol.

En l'absence d'eau, le sol a toujours un comportement de type non drainé. Les caractéristiques de résistance au cisaillement du sol dans un comportement de type drainé sont appelées caractéristiques drainées.

✚ Comportement non drainé : dans le comportement non drainé, le chargement est rapide, compte tenu de la perméabilité du sol, pour provoquer l'apparition de surpressions interstitielles qui ne peuvent se dissiper pendant la période considérée. Les caractéristiques non drainées traduisent le comportement global des deux phases solide et liquide et n'ont de signification que tant que la proportion de ces phases n'est pas modifiée, c'est-à-dire tant qu'il n'y a pas de drainage.

2.2.3.1 Sols fins ou cohérents

On distinguera pour ce type de sol un comportement à court terme et un comportement à long terme. La perméabilité du sol est trop faible ou le chargement qui lui est appliquée est trop rapide. Ces sollicitations rapides entraînent des phénomènes de surpression interstitielle dans les pores du sol. Ces phénomènes rendent impossible de distinguer les contraintes intergranulaires (σ') et les pressions interstitielles (u). Dans ce cas, on considère le sol (grains + eau) comme un matériau unique dans lequel règne le champ de contraintes totales σ .

La perméabilité du sol est suffisamment grande ou le chargement qui lui est appliquée est suffisamment long (calcul à long terme). Les surpressions interstitielles qui étaient présentes dans le sol au moment du chargement ont eu le temps de se dissiper. Dans ce cas, les calculs pourront s'effectuer en dissociant les contraintes totales en contraintes effectives d'une part et pression interstitielle d'autre part. Pour modéliser ce comportement en laboratoire, on réalise des essais en chargeant à vitesse lente et en laissant à l'eau le temps de sortir de l'échantillon.

Chapitre 2 : METHODES DE CALCUL ET DIMENSIONNEMENT DU MUR DE SOUTÈNEMENT

2.2.3.2 Sols grenus ou pulvérulents

La perméabilité est assez élevée pour que l'eau ait toujours la possibilité de s'écouler quelle que soit la vitesse de chargement. Il n'y a donc pas de distinction entre le court terme et le long terme. Les caractéristiques des sols grenus sont toujours des caractéristiques drainées et le comportement est toujours de type drainé pour les sols pulvérulents.

2.3 Calcul des poussées et des butées des terres

2.3.1 Notions de poussée et de butée

Le dimensionnement des ouvrages de soutènement, quel que soit leur type, passe par l'application des théories de poussée et de butée aux calculs des sollicitations exercées à l'ouvrage par le terrain. Lorsque l'on dit qu'un sol est soumis à une poussée ou une butée, on a tendance à parler de pression active et de pression passive du sol. La différence entre poussée et butée trouve son origine dans le sens du mouvement du sol ; elle met l'accent sur l'importance fondamentale du sens des déformations et des déplacements relatifs pour l'analyse de leurs mécanismes.

Les pressions statiques des terres sur les structures de soutènement sont fortement influencées par le déplacement relatif entre le mur et le sol. Suivant ce déplacement, le sol se trouvera en équilibre de poussée (état actif) ou de butée (état passif).

➤ Les pressions des terres actives (poussée) se développent lorsque le mur de soutènement se déplace loin du sol derrière lui, induisant des déformations latérales en extension dans le sol.

➤ Les pressions des terres passives (butée) se développent lorsque le mur de soutènement déplace vers le sol, produisant ainsi des déformations latérales de compression dans le sol.

Chapitre 2 : METHODES DE CALCUL ET DIMENSIONNEMENT DU MUR DE SOUTÈNEMENT

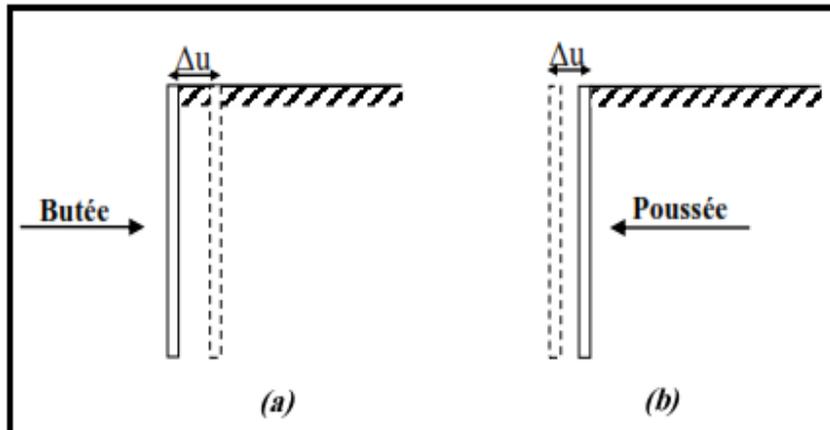


Figure 2.3: (a) État de butée et (b) État de poussée.

Théoriquement, deux états de rupture peuvent être résultats des déformations ou des déplacements atteignant une valeur suffisante qui vaut grossièrement $H/1000$ pour mobiliser la poussée et supérieure à $H/100$ pour mobiliser la butée.

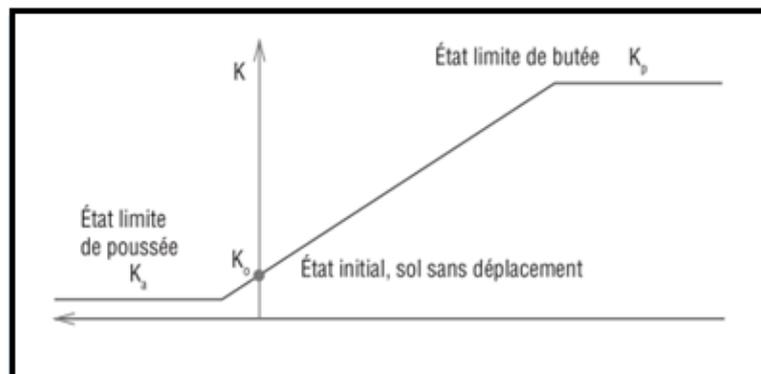


Figure 2.4 : Déplacements nécessaires à la mobilisation des états limites de poussée et butée.

2.3.2 Equilibre de poussée et de butée

Considérons un massif de sol soumis à la gravité et éventuellement à une surcharge surfacique q . Si l'on suppose que la contrainte verticale est une contrainte principale dans le massif de sol, nous avons la seconde contrainte principale qui est horizontale et définie par :

$$\sigma'_h = K_0 \sigma'_{v0}$$

$$\sigma'_v = \gamma \cdot z - u + q$$

Chapitre 2 : METHODES DE CALCUL ET DIMENSIONNEMENT DU MUR DE SOUTÈNEMENT

Avec K_0 le coefficient des pressions latérales au repos, γ le poids volumique du sol et u la pression interstitielle.

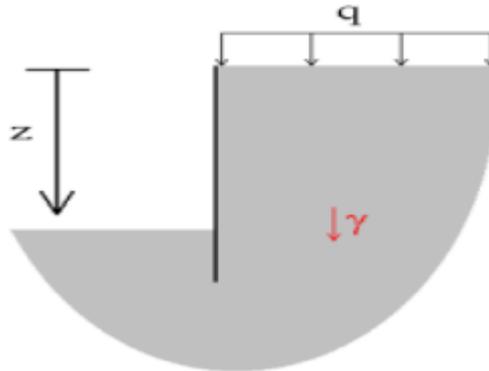


Figure 2.5 : Etat limite du sol (terre horizontale avec surcharge q).

Le critère de rupture du sol est du type Mohr-Coulomb, donné par:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (2.4)$$

Les cas de rupture en poussée et butée peuvent être représentés respectivement à gauche et à droite du point A dans le diagramme de Mohr (Figure 2.6).

Le calcul de la contrainte horizontale pour laquelle le cercle de Mohr est tangent au critère de rupture donne les relations :

➤ En poussée :

$$\sigma'_a = K_a \sigma'_v - 2C' \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi'}{2}\right) = K_a \sigma'_v - 2C' \sqrt{K_a}$$

➤ En butée :

$$\sigma'_p = K_p \sigma'_v + 2C' \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2}\right) = K_p \sigma'_v + 2C' \sqrt{K_p}$$

Avec :

$$K_a = \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'} = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi'}{2}\right)$$

$$K_p = \frac{1}{K_a} = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2}\right)$$

Chapitre 2 : METHODES DE CALCUL ET DIMENSIONNEMENT DU MUR DE SOUTÈNEMENT

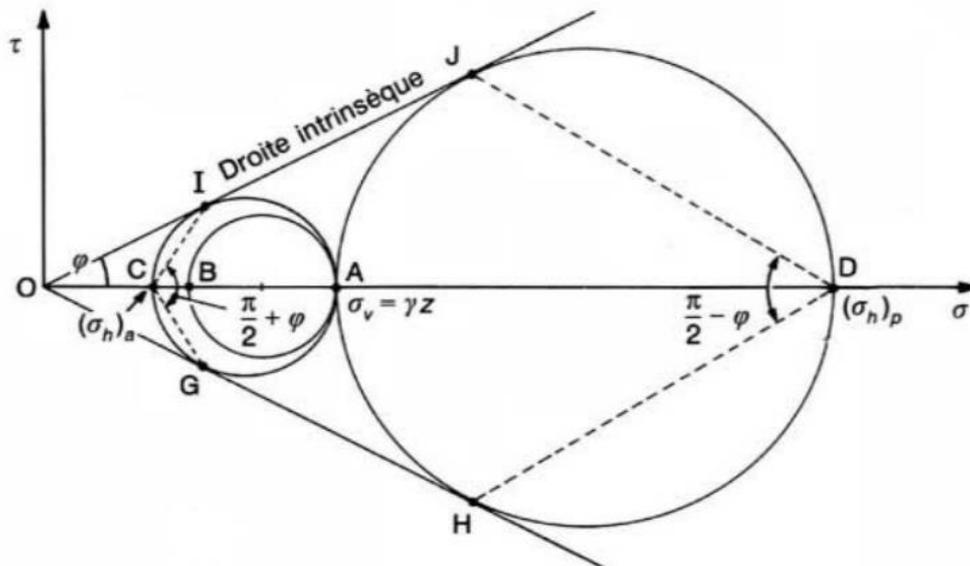


Figure 2.6 : Equilibre de poussée et de butée par le cercle de Mohr.

2.3.3 Calcul des forces de poussée et de butée

Plusieurs méthodes ont été développées en se basant sur la théorie des états limites de poussée et de butée et elles sont pratiquement utilisées dans les calculs des ouvrages de soutènements. La méthode de coulomb est la méthode fondatrice de toutes les autres méthodes développées ultérieurement à l'instar des méthodes de Rankine, Boussinesq-Caquot et Kérisel, Sokolovski, Cullmann, les états correspondants, Brunch Hansen, la ligne élastique et la poutre équivalente.

2.3.3.1 Cas des sols pulvérulents

Considérons un mur à parement vertical, dans un massif à surface horizontale, constitué d'un sol pulvérulent saturé. La nappe affleure à la surface du massif. Si le sol est en état de rupture de Poussée.

La contrainte qui s'exerce sur le mur est horizontale, principale et s'écrit :

$$\sigma_h = u + K_a \sigma'_v$$

Chapitre 2 : METHODES DE CALCUL ET DIMENSIONNEMENT DU MUR DE SOUTÈNEMENT

Avec le coefficient de poussée :

Soit encore :

$$\sigma_h = \gamma_w Z + (\gamma - \gamma_w) Z \cdot K_a$$

La répartition des contraintes est linéaire et la force de poussée F_a est appliquée au tiers de la hauteur à partir de la base. Elle a pour expression :

$$F_a = \int_0^H \sigma_h dz$$

$$F_a = \frac{1}{2} (\gamma_w + K_a \gamma') H^2 \quad (2.5)$$

Avec $\gamma' = \gamma - \gamma_w$

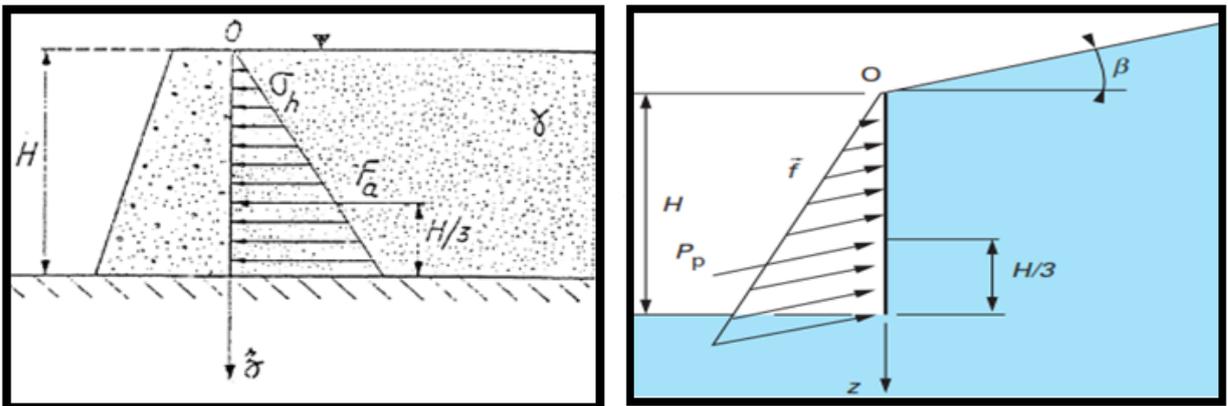
Soit un écran vertical appliqué sur un massif pulvérulent dont la surface est inclinée d'un angle β sur l'horizontale. Si l'on met le sol en rupture de butée, la force de butée exercée est donnée par :

$$F_p = P_p = \frac{1}{2} K_p(\beta) \gamma H^2 \cos \beta \quad (2.6)$$

Avec le coefficient de butée :

$$K_p(\beta) = \frac{1}{K_a(\beta)} = \frac{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi}}{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi}} \quad (2.7)$$

Cette force est inclinée de l'angle β et appliquée au tiers de la hauteur à partir de la base.



Chapitre 2 : METHODES DE CALCUL ET DIMENSIONNEMENT DU MUR DE SOUTÈNEMENT

Figure 2.7 : (a) Force de poussée exercée par un massif pulvérulent saturé, (b) force de butée sur un massif pulvérulent à surface inclinée.

2.3.3.2 Cas des sols cohérents

C'est le cas du sol fin saturé en comportement à court terme. Le calcul s'effectue donc en contraintes totales comme argile ou limon saturés non drainés.

On a immédiatement d'après la figure 2.8.

➤ La contrainte de poussée :

$$\sigma_a = \sigma_v - 2C_u \quad (2.8)$$

Avec : $K_a = 1 - 2 \frac{C_u}{\gamma.H}$

➤ La contrainte de butée :

$$\sigma_p = \sigma_v + 2C_u \quad (2.9)$$

Avec : $K_p = 1 + 2 \frac{C_u}{\gamma.H}$

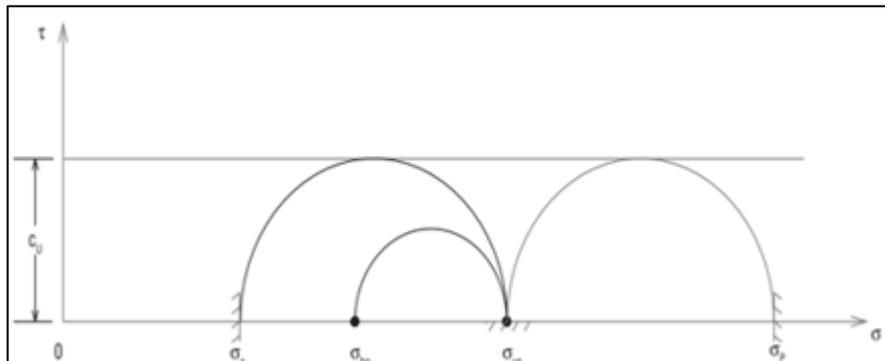


Figure 2.8 : Cercles de Mohr de poussée et butée pour un sol purement cohérent.

En résumé ces différentes formules donnent la répartition des contraintes en fonction de la profondeur dans le tableau suivant :

Chapitre 2 : METHODES DE CALCUL ET DIMENSIONNEMENT DU MUR DE SOUTÈNEMENT

Tableau 2.1 : Formules de répartition des contraintes.

Type de sol	Poussée	Butée
Sol frottant $\phi' \neq 0, c' = 0$ Comportement drainé	$\sigma'_a = K_a \sigma'_v$	$\sigma'_p = K_p \sigma'_v$
Sol cohérent $\phi_u = 0, c_u \neq 0$ Comportement non drainé	$\sigma_a = \sigma_v - 2C_u$	$\sigma_p = \sigma_v + 2C_u$
Sol frottant et cohérent $\phi' \neq 0, c' \neq 0$ Comportement drainé	$\sigma'_a = K_a \sigma'_v - 2C' \sqrt{K_a}$	$\sigma'_p = K_p \sigma'_v + 2C' \sqrt{K_p}$

2.4 Surcharges

Un mur de soutènement peut être soumis à des surcharges agissant soit directement sur le mur, soit par l'intermédiaire du remblai. Ces surcharges provoquent un accroissement de la pression latérale qui dépend de la nature de la surcharge. Quatre cas de surcharge peuvent se représenter :

Surcharge uniforme, surcharge distribuée suivant une bande, surcharge linéaire et surcharge ponctuelle.

2.4.1 Surcharge uniforme

Les contraintes de poussée ou de butée dues à cette surcharge sont constantes tout le long de l'écran et leur résultante appliquée au milieu de l'écran. La pression due à une surcharge uniforme est égale à :

$$\sigma_q = K_q \cdot q \quad (2.10)$$

Avec :

q : La surcharge uniforme.

K_q : Le coefficient de pression due à la surcharge. $K_q = f(\gamma, \phi, \beta, \delta)$ $K_q = \frac{K_a}{\cos(\beta - \lambda)}$

2.4.2 Surcharge linéaire

Chapitre 2 : METHODES DE CALCUL ET DIMENSIONNEMENT DU MUR DE SOUTÈNEMENT

La pression latérale, au point considéré, due à la surcharge linéaire peut être calculée moyennant les équations empiriques suivantes :

Si ($m > 0.4$)

$$\sigma_h = 1.27 \frac{q}{H} \frac{m^2 n}{(m^2 + n^2)^2} \quad (2.11)$$

Si ($m \leq 0.4$)

$$\sigma_h = 0.203 \frac{q}{H} \frac{n}{(0.16 + n^2)^2} \quad (2.12)$$

2.4.3 Surcharge distribuée suivant une bande

C'est généralement le cas d'une route, d'une voie ferrée ou d'une semelle filante, parallèle, à l'ouvrage de soutènement. La pression latérale à un point donnée, due à cette surcharge s'exprime comme suit :

$$\sigma_h = \frac{2q}{\pi} [(\beta + \sin \beta) \sin^2 \beta + (\beta - \sin \beta) \cos^2 \alpha] \quad (2.13)$$

Avec :

β : angle en radian sous lequel on voit du point à la largeur de la bande chargée.

α : angle de la verticale avec la bissectrice de β .

2.4.4 Surcharge ponctuelle

La pression latérale, au point considéré, due à la surcharge ponctuelle peut être calculée moyennant l'équation empirique suivante :

$$\sigma_h = \frac{3Q}{2\pi} x^2 Z R^{-5} \quad (2.14)$$

Chapitre 2 : METHODES DE CALCUL ET DIMENSIONNEMENT DU MUR DE SOUTÈNEMENT

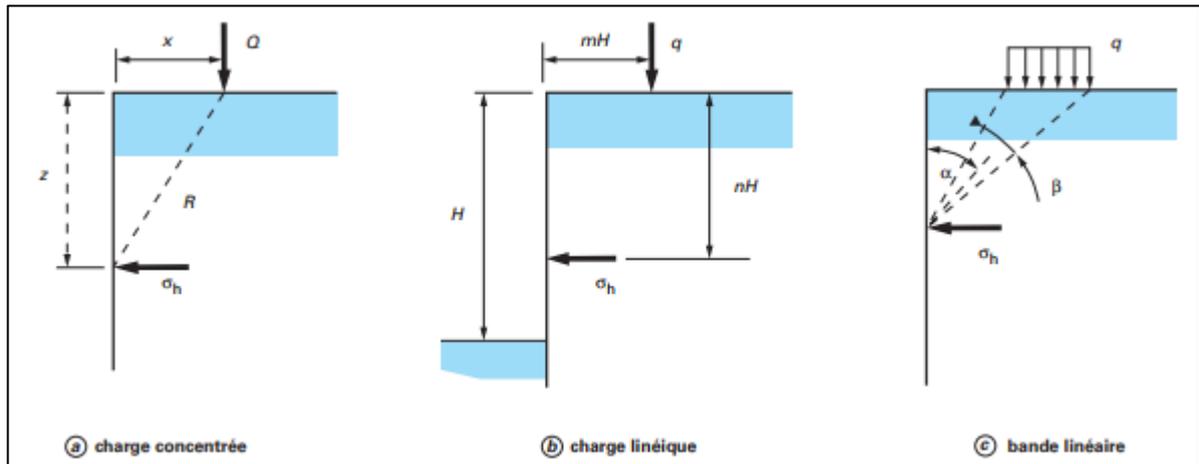


Figure 2.9 : Calcul élastique des contraintes horizontales apportées sur un écran par des surcharges.

2.5 Dimensionnement et justifications des murs de soutènement

Le dimensionnement et la justification des murs de soutènement doivent être examinés à la fois sous l'angle de la stabilité et de la résistance de l'ouvrage, mais aussi vis-à-vis des déplacements de l'ouvrage lui-même et de l'interaction avec les ouvrages existants proches du mur à exécuter. Les règles de dimensionnement développées dans cette partie ne s'appliquent pas au cas des séismes.

La bonne tenue d'un mur de soutènement, repose essentiellement sur la vérification de la stabilité complète. Pour cela, nous considérons deux types de stabilité à vérifier :

- Stabilité externe.
- Stabilité interne.

La stabilité externe caractérise, en général, la stabilité du mur sur son support. Elle consiste à la vérification au renversement, glissement et poinçonnement. Par ailleurs, la stabilité interne exprime la capacité de résistance du mur grâce à ces efforts internes, ceci revient alors à déterminer les dimensions et le ferrailage de ce dernier.

2.5.1 justification vis-à-vis de la stabilité externe

Chapitre 2 : METHODES DE CALCUL ET DIMENSIONNEMENT DU MUR DE SOUTÈNEMENT

L'étude la stabilité d'un ouvrage de soutènement requiert, en général, la détermination des différentes forces auxquelles il est soumis. Par conséquent, nous devons concevoir l'ouvrage de façon à ce qu'il résiste à ces forces, dont nous citons :

- P_a Force de poussée des terres.
- P_p Force de butée.
- W poids propre du mur.
- R réaction du sol sous fondation.

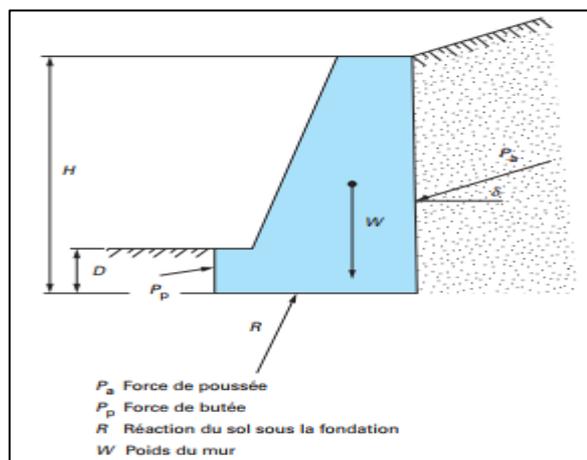


Figure 2.10 : Forces s'exerçant sur un mur-poids.

2.5.1.1 justification vis-à-vis du glissement sur la base du mur

On vérifie que le mur ne glisse pas sur le sol de fondation en écrivant que la résultante des forces horizontales qui tend à faire glisser le mur sur sa base reste inférieure aux forces de frottement entre la base du mur et le sol de fondation. Il convient de s'assurer que :

$$H_d \leq R_v + R_p \quad (2.15)$$

Avec :

H_d : charge horizontale mobilisatrice du glissement,

R_v : résistance au glissement de la fondation du mur,

R_p : résistance frontale ou tangentielle de la fondation sous l'effet de H_d .

Chapitre 2 : METHODES DE CALCUL ET DIMENSIONNEMENT DU MUR DE SOUTÈNEMENT

- **Résistance au glissement R_v**

En condition non drainé :

$$R_v = \min \left\{ \frac{A' C_u}{\gamma_{R;h} \gamma_{R;d;h}} ; 0.4 V_d \right\} = \min \left\{ \frac{A' C_u}{1.1 \cdot 0.9} ; 0.4 V_d \right\}$$

Avec :

A' : surface effective de la base de la fondation du mur = $A \left[1 - 2 \frac{e}{B} \right]$.

C_u : cohésion non drainée du terrain d'assise de la fondation,

V_d : charge totale verticale transmise par la fondation du mur,

$\gamma_{R;h}$ et $\gamma_{R;d;h}$: coefficients de sécurité partiel Eurocode 7.

En condition drainé :

$$R_v = \frac{V_d \tan \delta}{\gamma_{R;h} \gamma_{R;d;h}} = \frac{V_d \tan \delta}{1.1 \cdot 0.9}$$

Avec :

δ : angle de frottement entre la base de la fondation du mur et le terrain, $\delta = 2/3\varphi$ en générale.

V_d : charge totale verticale transmise par la fondation du mur.

Résistance tangentielle R_p : butée des terres devant la partie ancrée du mur, généralement négligée par sécurité.

2.5.1.2 justification vis-à-vis du poinçonnement

La ruine par défaut de capacité portante du sol d'ancrage de la fondation du mur se traduit par un poinçonnement du sol support ou une rotation excessive avec renversement. A l'ELU, et pour toutes les combinaisons de charge, il convient de démontrer que :

$$\sigma_{ref} \leq \sigma_{adm} \quad (2.16)$$

Chapitre 2 : METHODES DE CALCUL ET DIMENSIONNEMENT DU MUR DE SOUTÈNEMENT

Avec:

σ_{ref} : contraintes normales appliquées sous la base du mur au sol de fondation sous l'effet de la charge verticale transmise par le mur au terrain V_d .

σ_{adm} : contrainte admissible du sol ou résistance nette du terrain sous le mur.

On utilise souvent une méthode de calcul qui fait appel à la notion de la pression admissible. Le calcul est le suivant :

On admet la distribution des contraintes normales sous la fondation d'un mur de soutènement linéaire, et l'on détermine cette distribution pour que sa résultante soit égale à la composante normale N de la réaction R (Figure 2.11). Indique les deux cas de figure possible, suivant que N tombe dans le tiers central ou non, et donne les formules qui permettent de calculer l'intensité de la contrainte maximale. On vérifie alors que cette intensité maximale est bien inférieure à la pression admissible définie à priori indépendamment des dimensions de la fondation, de l'inclinaison et de l'excentricité des charges.

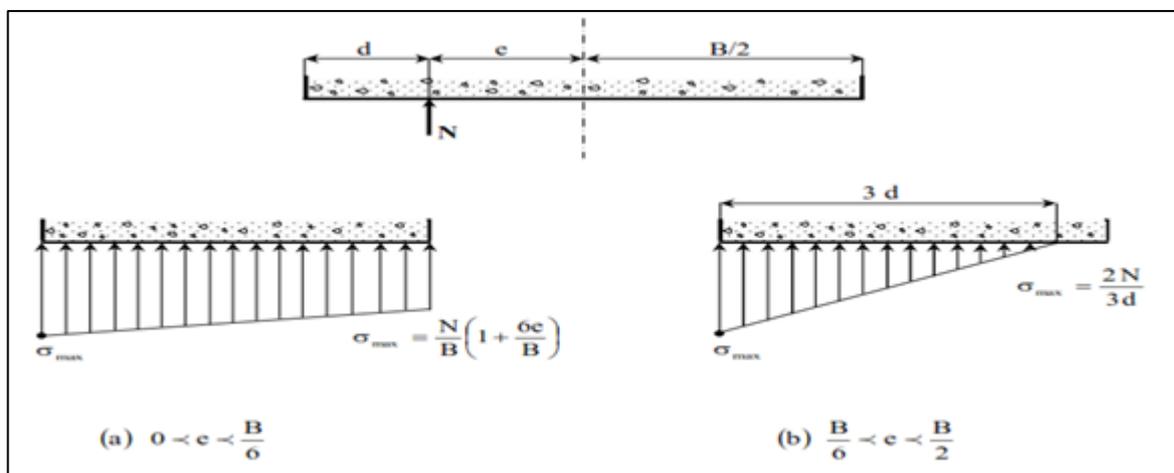


Figure 2.11 : Déterminations de la contrainte de référence.

2.5.1.3 justification vis-à-vis du renversement

La sécurité vis-à-vis du renversement sera assurée si le moment des forces stabilisantes est supérieur au moment des forces de renversement (forces qui tendent à renverser le mur autour de son arête extérieure) ; c'est à dire essentiellement la composante horizontale de la poussée (P_h).

Chapitre 2 : METHODES DE CALCUL ET DIMENSIONNEMENT DU MUR DE SOUTÈNEMENT

On définit le coefficient de sécurité au renversement F_R par :

$$F_R = \frac{\text{Moment stabilisant}}{\text{Moment de renversement}} = \frac{(W \cdot a) + P_v \cdot c}{P_h \cdot b} \quad (2.17)$$

La poussée F_a ou P est décomposée en une force verticale P_v et une force horizontale P_h . Le coefficient de sécurité F_R doit être supérieure ou égale à 1,5.

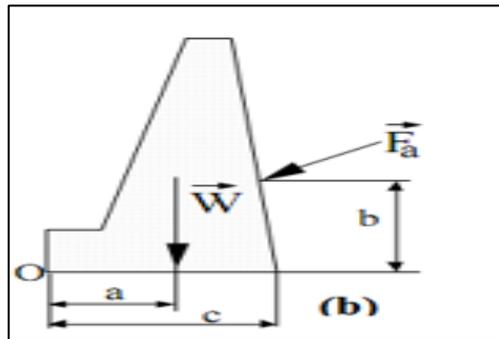


Figure 2. 12 : Calcul de la stabilité au renversement par rapport à O.

2.5.1.4 justification vis-à-vis du glissement global

Il y a rupture du mur par grand glissement lorsque la partie du massif de sol qui glisse englobe le mur, la surface de rupture passant alors à l'arrière du mur (figure 2.13).

Le coefficient de sécurité correspondant est défini comme le rapport du moment des forces motrices (forces de pesanteur) au moment des forces résistantes mobilisables le long de la surface de rupture. Cependant, la méthode la plus fréquemment utilisée est la méthode des tranches de Bishop. Le coefficient de sécurité adopté est celui des glissements soit 1,5.

Chapitre 2 : METHODES DE CALCUL ET DIMENSIONNEMENT DU MUR DE SOUTÈNEMENT

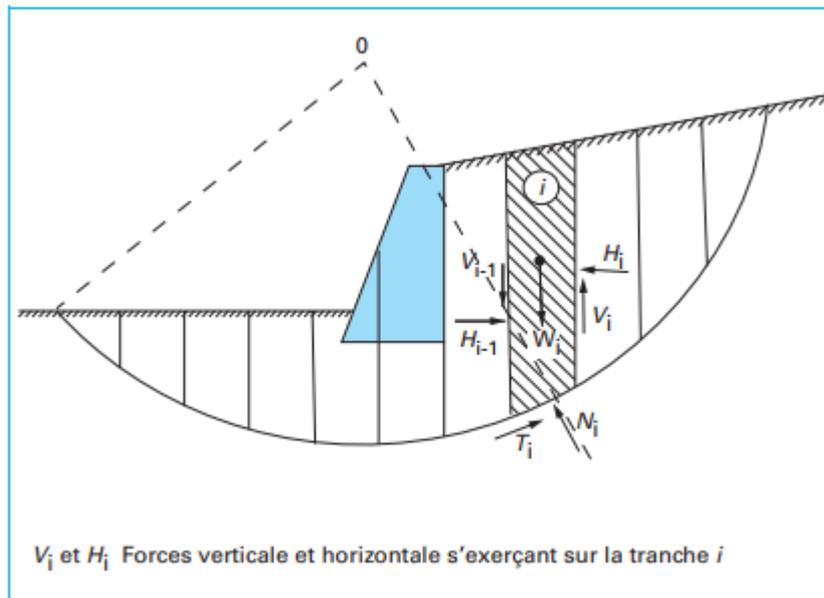


Figure 2.13 : Rupture par grand glissement et découpage en tranches pour un calcul de stabilité.

2.5.2 justification vis-à-vis de la stabilité interne

La justification vis-à-vis de la stabilité interne est propre à la technologie de chaque type de mur. Pour les murs en béton armé, la stabilité interne consiste à vérifier la résistance du voile et de la semelle vis-à-vis des règles de calcul du béton armé (figure 2.14).

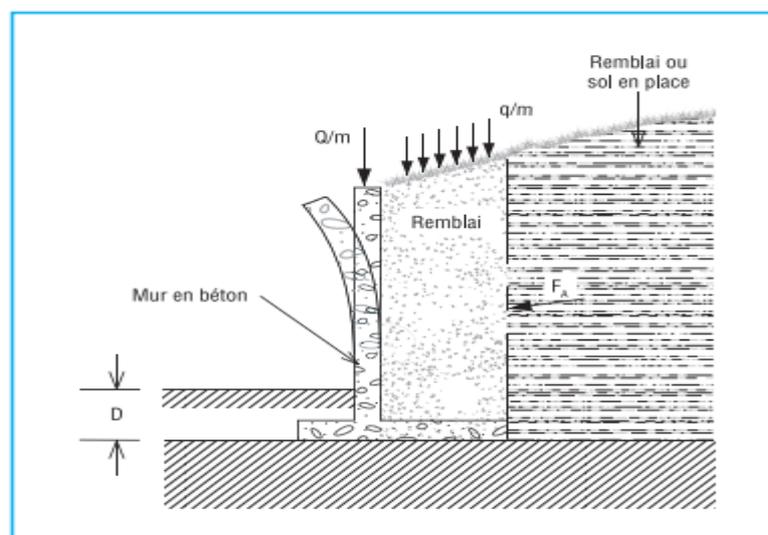


Figure 2.14 : Mode de rupture interne d'un mur en béton armé.

Chapitre 2 : METHODES DE CALCUL ET DIMENSIONNEMENT DU MUR DE SOUTÈNEMENT

2.6 Conclusion

A travers ce chapitre, le comportement des sols pulvérulents et cohérents a été abordé. Les différentes méthodes de calcul des forces de poussée et de butée, et notamment les coefficients de poussée et de butée ont été présentées. Tel que, un bon calcul de ces forces permet d'établir une vérification correcte de la stabilité du mur. A notre sens, cela met en place des socles théoriques solides pour le dimensionnement des ouvrages de soutènement.



Chapitre 03

CHAPITRE 03 : Calcul analytique d'un mur de soutènement en béton armé

CALCUL ANALYTIQUE D'UN MUR DE SOUTÈNEMENT EN BÉTON ARME

3.1 Introduction

Les déplacements du mur de soutènement, proviennent en général essentiellement des déformations d'ensemble du sol support sous l'effet des réactions que le mur lui transmet. Les mouvements observés (tassement, rotation, déplacement horizontal), sont similaires à ceux que l'on observe pour une fondation superficielle soumise à une charge excentrée et inclinée.

Dans ce chapitre, un mur de soutènement en béton armé en T renversé a été étudié. Cependant, le dimensionnement du mur et les calculs des forces de poussées ont été envisagés afin d'analyser la stabilité externe du mur. A la dernière partie, un détail de calcul de ferrailage a été présenté.

3.2 Dimensionnement

Dimensionner un mur consiste à déterminer sa géométrie et sa structure (ferrailage pour un mur en béton armé) pour qu'il soit stable sous l'action des forces suivantes :

- le poids du mur W ;
- la force de poussée P_a ;
- la force de butée à l'aval P_p ;
- la réaction du sol sous la fondation R .

Le dimensionnement comporte les étapes suivantes en ce qui concerne la stabilité externe :

- calcul des efforts de poussée et de butée ;
- sécurité vis-à-vis d'un glissement sur la base du mur ;
- sécurité au renversement ;
- sécurité vis-à-vis d'une rupture du sol de fondation ;
- sécurité vis-à-vis d'un grand glissement englobant le mur.

Le calcul complet d'un mur de soutènement est un travail assez délicat, le dimensionnement de l'ouvrage et ses vérifications demandant une succession de calculs longs et itératifs.

CHAPITRE 03 : Calcul analytique d'un mur de soutènement en béton armé

Aussi pour arriver de la façon la plus rapide aux bons résultats, il est important de pré dimensionné de la manière la plus juste possible les caractéristiques géométriques du mur comme suit :

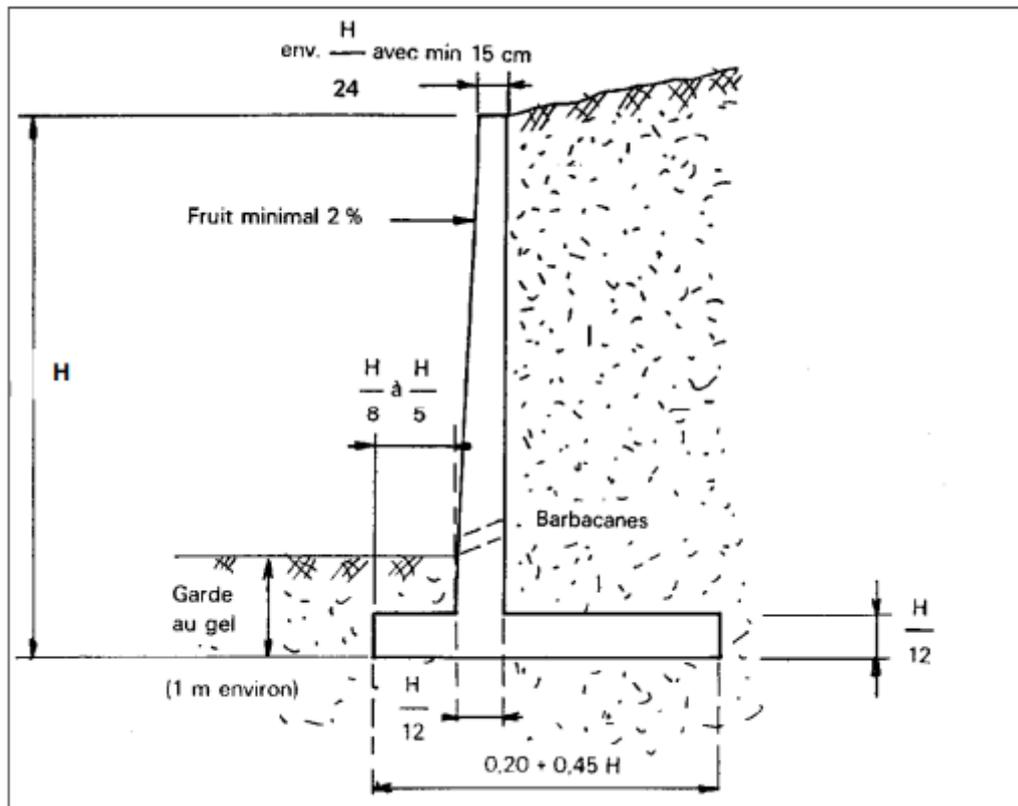


Figure 3.1 : Prédimensionnement d'un mur de soutènement en béton armé.

➤ La largeur de la semelle : $b = 0,20 + 0,45H$

➤ L'épaisseur : $e_0 = \frac{H}{24}$

$$e_1 = e_2 = \frac{H}{12}$$

➤ La largeur de patin : $b_1 = \frac{H}{5}$

➤ La largeur de talon : $P = b - (b_1 + e_1)$

3.3 Présentation du cas étudié

CHAPITRE 03 : Calcul analytique d'un mur de soutènement en béton armé

A titre d'illustration des différentes vérifications de calcul, considérons l'exemple suivant supposé entrant dans le domaine d'application de la norme NF P 94-281.

C'est un mur de soutènement en béton armé (Figure 3.2) de hauteur $H = 5\text{ m}$, limité en amont par un terre-plein horizontal infini recevant une charge d'exploitation $q = 10\text{ kPa}$. Le dimensionnement de ce mur a été fait comme suivant :

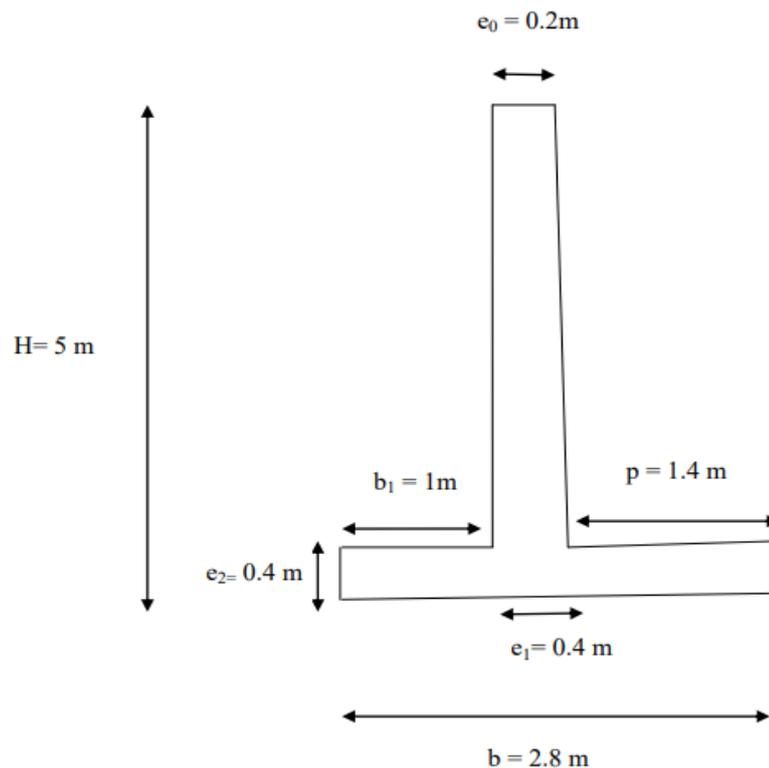


Figure 3.2: Prédimensionnement du mur de soutènement en BA analysée.

- La largeur de la semelle : $b = 0.20 + 0.45H = 2.45 + 15\%$

$$b = 2.8\text{ m}$$

- L'épaisseur : $e_0 = \frac{H}{24} = \frac{5}{24} = 0.2\text{ m}$

$$e_1 = e_2 = \frac{H}{12} = \frac{5}{12} = 0.4\text{ m}$$

- La largeur de patin : $b_1 = \frac{H}{5} = \frac{5}{5} = 1\text{ m}$

- La largeur de talon : $P = b - (b_1 + e_1) = 2.8 - (1 + 0.4) = 1.4\text{ m}$

CHAPITRE 03 : Calcul analytique d'un mur de soutènement en béton armé

Le prédimensionnement est résumé dans le tableau suivant :

Tableau 3.1: Prédimensionnement du mur en BA étudié.

Hauteur (m)	e_0 (m)	e_1 (m)	e_2 (m)	b (m)	b_1 (m)	P (m)
5	0.2	0.4	0.4	2.8	1	1.4

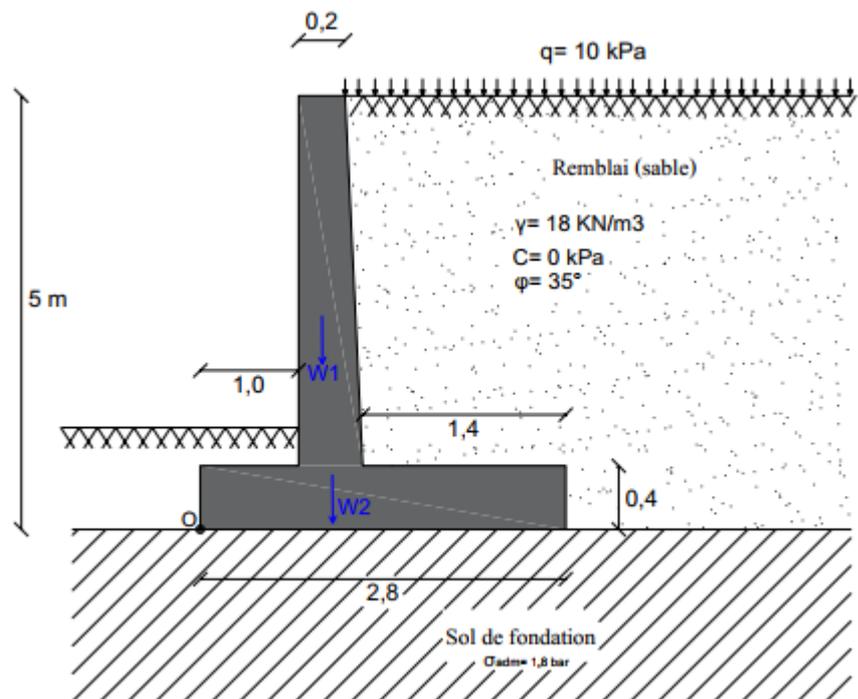


Figure 3.3: Schéma du mur en BA étudiée.

3.3.1 Détermination du poids de murs

- Le poids de voile W_1 = le poids de voile rectangulaire + le poids de voile triangulaire

$$W_1 = (4.6 \times 0.2 \times 1 \times 25) + (4.6 \times 0.2 \times 1/2 \times 25) = 23 + 11.5 = 34.5 \text{ KN/ml}$$

- Le poids de la semelle : $W_2 = 2.8 \times 0.4 \times 1 \times 25 = 28 \text{ KN/ml}$.

- Le poids total de mur : $W_T = W_1 + W_2 = 34.5 + 28 = 62.5 \text{ KN/ml}$.

3.3.2 Le coefficient de poussée K_a

CHAPITRE 03 : Calcul analytique d'un mur de soutènement en béton armé

Le coefficient de poussée : $k_a = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) = \tan^2\left(\frac{180}{4} - \frac{35}{2}\right) = 0.271$.

$$k_a = 0.271.$$

3.3.3 Calcul de contraintes de poussée

- Calcul des contraintes de poussée due à la surcharge :

$$\sigma_{a1} = q \times k_a = 10 \times 0.271 = 2.71 \text{ kPa}$$

Puisqu'il s'agit d'une surcharge uniformément répartie sur toute la largeur du terre-plein, la poussée est identique sur toute la hauteur du mur.

- Calcul des contraintes de poussée du remblai :

A la base du voile :

$$\sigma_{a2} = \sigma_{a1} + (\gamma \times z \times k_a) = 2.71 + (18 \times 4.6 \times 0.271) = 25.15 \text{ kPa}$$

A la base de la semelle :

$$\sigma_{a3} = \sigma_{a2} + (\gamma \times z \times k_a) = 25.15 + (18 \times 0.4 \times 0.271) = 27.10 \text{ kPa}$$

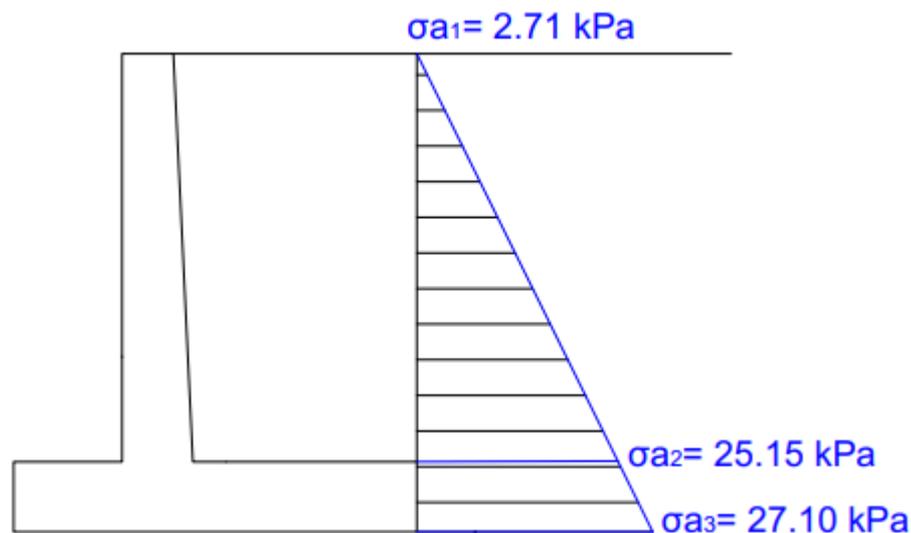


Figure 3.4 : Diagramme des contraintes de poussée.

3.3.4 Calcul des forces de poussée

CHAPITRE 03 : Calcul analytique d'un mur de soutènement en béton armé

- Force de poussée derrière le voile

Du aux surcharge :

$$F_1 = \sigma_{a1} \times h = 2.71 \times 4.6 = 12.47 \text{ KN/m}$$

Du remblai :

$$F_2 = \frac{(\sigma_{a2} - \sigma_{a1}) \times h}{2} = \frac{(25.15 - 2.71) \times 4.6}{2} = 51.64 \text{ KN/m}$$

- Force de poussée derrière la semelle

Du aux surcharge :

$$F_3 = (\sigma_{a2} - \sigma_{a1}) \times h = (25.15 - 2.71) \times 0.4 = 8.98 \text{ KN/m}$$

Du remblai :

$$F_4 = \frac{(\sigma_{a3} - \sigma_{a2}) \times h}{2} = \frac{(27.10 - 25.15) \times 0.4}{2} = 0.4 \text{ KN/m}$$

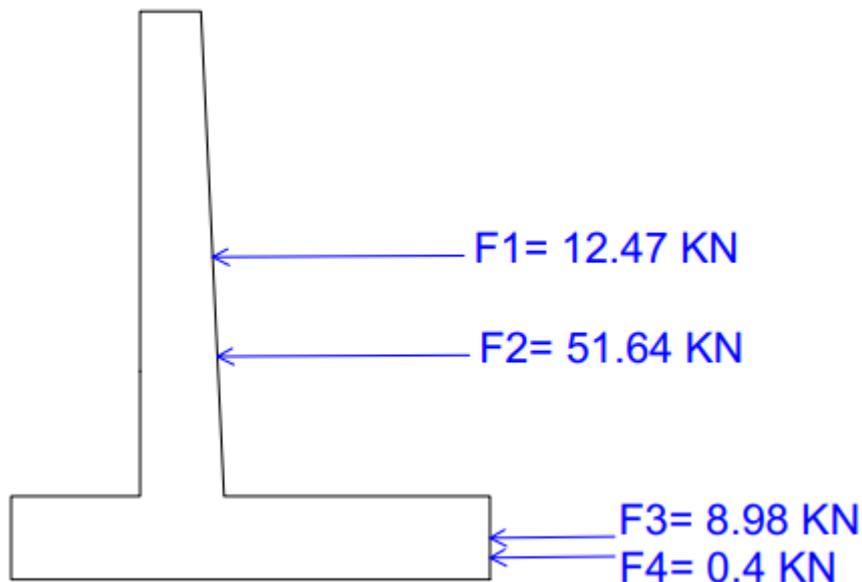


Figure 3.5: Répartition des forces de poussées F1, F2, F3 et F4.

3.3.5 Vérification de la stabilité externe

CHAPITRE 03 : Calcul analytique d'un mur de soutènement en béton armé

✓ Vérification de la stabilité au glissement

Les forces stabilisantes : $R_v = \Sigma F_v = WT + q_v + V_{sol}$

- Poids total : $WT = 62.5 \text{ KN}$.
- La surcharge sur le talon de la semelle : $q_v = 10 \times 1.4 \times 1 \text{ ml} = 14 \text{ KN}$
- La charge du remblai sur le talon de la semelle : $V_{sol} = 18 \times 4.6 \times 1.4 \times 1 \text{ ml} = 115.92 \text{ KN}$

$$R_v = \Sigma F_v = WT + q_v + V_{sol} = 62.5 + 14 + 115.92 = 192.42 \text{ KN}$$

Les forces motrices : $R_h = \Sigma F_h = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = 73.49 \text{ KN}$

Il convient de s'assurer que :

$$H_d \leq R_h$$

$$H_d = 73.49 \text{ KN}$$

On prend : $\delta = \varphi$

$$R_v = \frac{V_d \tan \delta}{\gamma_{R;h} \gamma_{R;d,h}} = \frac{192.42 \tan 35}{1.1 \cdot 0.9} = 136.1 \text{ KN}$$

$$73.49 \text{ KN} \leq 136.1 \text{ KN}$$

La vérification est satisfaite.

✓ Vérification de la stabilité au renversement

- Les moments renversants

$$M_r = \Sigma M_{r/o} = (F_1 \times Y1) + (F_2 \times Y2) + (F_3 \times Y3) + (F_4 \times Y4)$$

$$M_r = [12.47 \times ((4.6/2) + 0.4)] + [51.64 \times ((4.6/3) + 0.4)] + [8.98 \times (0.4/2)] + [0.4 \times (0.4/3)]$$

$$M_r = 33.67 + 99.83 + 1.80 + 0.005 = 135.30 \text{ KN.m}$$

- Les moments stabilisants

$$M_s = \Sigma M_{s/o} = (W_1 \times X1) + (W_2 \times X2) + (q_v \times X3) + (V_{sol} \times X4)$$

CHAPITRE 03 : Calcul analytique d'un mur de soutènement en béton armé

$$M_s = [34.5 \times ((0.4/2) + 1)] + [28 \times (2.8/2)] + [14 \times (2.8 - (1.4/2))] + [115.92 \times (2.8 - (1.4/2))]$$

$$M_s = 41.4 + 39.2 + 29.4 + 243.43 = \mathbf{382.532 \text{ KN.m}}$$

$$F_s = \frac{\text{Moment stabilisant}}{\text{Moment de renversement}} = \frac{382.532}{135.30} = \mathbf{2.82 > 1.5}$$

La vérification est satisfaite.

✓ Vérification de la stabilité au poinçonnement

$$\Sigma R_{\text{résul}} = \Sigma M (\text{stabilisant}) - \Sigma M (\text{renversant}) = M_o$$

Calcul de M_o :

$$M_o = 382.532 - 135.30 = \mathbf{247.232 \text{ KN.m}}$$

L'excentricité de la force par rapport au point O:

$$e_0 = \frac{M_o}{F_v}$$

$$e_0 = \frac{247.232}{192.42} = \mathbf{1.284 \text{ m}}$$

L'excentricité de la force par rapport au centre de la semelle est:

$$e_c = \frac{B}{2} - e_0$$

$$e_c = \frac{2.8}{2} - 1.284 = \mathbf{0.116 \text{ m}}$$

Répartition des contraintes est Trapézoïdal car : $0 < e < B/6$

$$\sigma_{\text{Max}} = \frac{192.42}{2.8} \times \left(1 + \frac{6 \times 0.116}{2.8}\right) = \mathbf{74.82 \text{ kPa}}$$

$$\sigma_{\text{Min}} = \frac{192.42}{2.8} \times \left(1 - \frac{6 \times 0.116}{2.8}\right) = \mathbf{51.64 \text{ kPa}}$$

La contrainte de référence:

$$\sigma_{\text{Ref}} = \frac{3 \sigma_{\text{max}} + \sigma_{\text{min}}}{4} \leq \sigma_{\text{adm}}$$

CHAPITRE 03 : Calcul analytique d'un mur de soutènement en béton armé

$$\sigma_{Ref} = \frac{(3 \times 74.82) + 51.64}{4} = 69.02 \text{ kPa} < 180 \text{ kPa}$$

La vérification est satisfaite.

Finalement, la stabilité externe du mur a été vérifiée aux glissement, renversement et au poinçonnement.

3.3.6 Calcul du ferrailage

Ferrailage du mur en flexion simple

3.3.6.1 Ferrailage de la semelle

Le ferrailage de la semelle se fait par la méthode des consoles.

Données :

$$A = 1.4 \text{ m} \quad / \quad C = 0.4 \text{ m} \quad / \quad B = 2.8 \text{ m} \quad / \quad Fe = 400 \quad / \quad \mu r = 0.392$$

$$\sigma_{st} = Fe / \gamma_s = 347.83 \text{ MPA} \quad / \quad \gamma_s = 1.15$$

A : patin de la semelle

B : la largeur de la semelle

C : surface de liaison entre la semelle et le voile

Longueur de la console (D) :

$$D = A + C/2 = 1.4 + 0.4/2 = 1.2 \text{ m.}$$

$$\sigma_d = \sigma_{Max} - \frac{(\sigma_{Max} - \sigma_{Min}) \cdot D}{B} = 74.82 - \frac{(74.82 - 51.64) \times 1.2}{2.8} = 64.89 \text{ kPa}$$

$$R = \frac{(\sigma_{Max} - \sigma_d) \cdot D}{2} = \frac{(74.82 - 64.89) \times 1.2}{2} = 5.95 \text{ KN.}$$

Le bras de levier (d) :

$$d = \frac{(\sigma_d + 2\sigma_{Max}) \cdot D}{(\sigma_d + \sigma_{Max}) \times 3} = \frac{(64.89 + 2 \times 74.82) \times 1.2}{(64.89 + 74.82) \times 3} = 0.204 \text{ m.}$$

CHAPITRE 03 : Calcul analytique d'un mur de soutènement en béton armé

Le moment (M) :

$$M=R \times d=5.95 \times 0.204=1.218 \text{ KN.m}$$

Section du patin :

$$d'=0.9 \times h=0.9 \times 0.4=0.36 \text{ m}$$

$$\mu = \frac{M}{bd^2 f_{bc}} = \frac{1.218}{1 \times (0.36)^2 \times 14.2 \times 10^3} = 0.0006$$

$\mu < \mu_r \implies$ Il n'est pas nécessaire de mettre des armatures comprimées.

$$\alpha = 1.25 \times (1 - \sqrt{1 - 2\mu}) = 1.25 \times (1 - \sqrt{1 - 2 \times 0.0006}) = 0.0015$$

$$Z = d (1 - 0.4\alpha) = 0.36 \times [1 - (0.4 \times 0.0015)] = 0.36 \text{ m}$$

$$A_s = \frac{M}{Z \cdot \sigma_{St}} = \frac{1.218}{0.36 \times 347.89 \times 10^3} = 9.72 \times 10^{-6} \text{ m}^2 = 0.097 \text{ cm}^2$$

Condition de non-fragilité :

$$A_{Min} = \frac{0.23 \times b \times d \times f_{t28}}{f_e} = \frac{0.23 \times 1 \times 0.36 \times 2.1}{400} = 4.35 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 4.35 \text{ cm}^2 \implies 6T12$$

Ferrailage de répartition : 25%. $A_s = 1.08 \text{ cm}^2$ $A_s = 6T6$

$$6T6 = 1.68 \text{ cm}^2$$

$\implies A_{Min} > A_s$ Donc on adopte 6T12 pour ferriller la semelle.

✚ Choix des barres

- Pour la nappe inférieure on prend : 6T12/ml \implies espacement 15 cm.

- Pour la nappe supérieure le ferrailage doit être un ferrailage de répartition, mais vu que l'autre côté de la semelle va être tendue on prévoit la même nuance d'armature :

6T12/ml \implies espacement 15 cm.

CHAPITRE 03 : Calcul analytique d'un mur de soutènement en béton armé

3.3.6.2 Ferrailage du rideau

Nous étudierons la section d'encastrement située au niveau supérieur de la semelle.

Calcul des forces de poussées pour 1 ml de largeur :

$$F_1 = 12.47 \text{ KN}$$

$$F_2 = 51.64 \text{ KN}$$

Point d'application de ces poussées :

$$Y_1 = \frac{H}{2} = 4.6/2 = 2.3 \text{ m}$$

$$Y_2 = \frac{H}{3} = 4.6/3 = 1.53 \text{ m}$$

Le moment utilisé dans le calcul de ferrailage M est calculé comme suit:

$$M = Y_1 \times F_1 + Y_2 \times F_2 = (12.47 \times 2.3) + (51.64 \times 1.53) = \mathbf{107.70 \text{ KN.m}}$$

$$\mu = \frac{M}{bd^2 f_{bc}} = \frac{107.70}{1 \times (0.36)^2 \times 14.2 \times 10^3} = \mathbf{0.0058}$$

$\mu < \mu_r \implies$ Il n'est pas nécessaire de mettre des armatures comprimées.

$$\alpha = 1.25 \times (1 - \sqrt{1 - 2\mu}) = 1.25 \times (1 - \sqrt{1 - 2 \times 0.0058}) = \mathbf{0.0072}$$

$$Z = d (1 - 0.4\alpha) = 0.36 \times [1 - (0.4 \times 0.0072)] = \mathbf{0.36 \text{ m}}$$

$$A_s = \frac{M}{Z \cdot \sigma_{st}} = \frac{107.70}{0.36 \times 347.89 \times 10^3} = \mathbf{8.6 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 8.60 \text{ cm}^2} \implies \mathbf{6T14 = 9.24 \text{ cm}^2}$$

✚ Choix des barres

Pour le côté intérieur on prend : **6T14/ml** \implies espacement 15cm. Armatures horizontales.

Pour le côté extérieur on prend un ferrailage de répartition, puisqu'il va être comprimé on prend **6T12/ml** \implies espacement 15 cm. Armatures horizontales.

CHAPITRE 03 : Calcul analytique d'un mur de soutènement en béton armé

Tableau 3.2: Ferrailage de la semelle et du voile.

Hauteur (m)	Ferrailage			
	Semelle		Voile	
	Nappe supérieure	Nappe Inférieure	Avant	Arrière
5	6T12	6T12	6T14	6T12

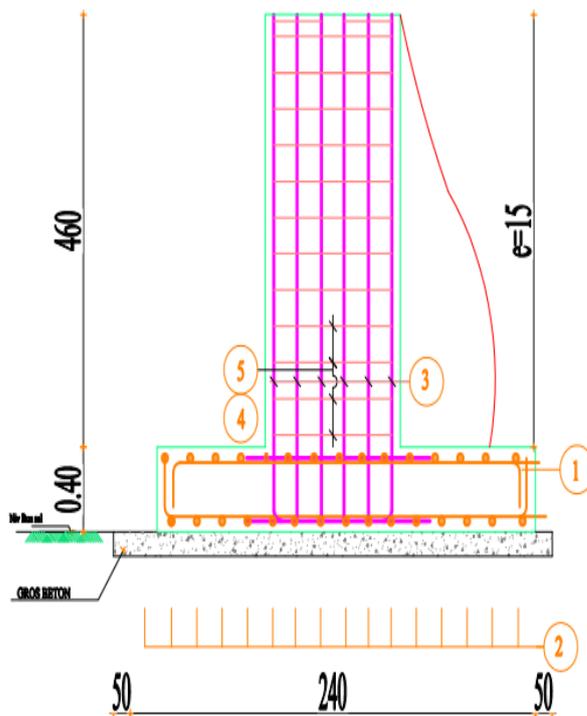
3.4 Conclusion

Le dimensionnement d'un ouvrage de soutènement nécessite la bonne connaissance des notions fondamentales des pressions des terres, le mode de reprise de ces pressions par l'ouvrage, les caractéristiques de sol et de béton...etc.

Dans ce présent chapitre, on s'est intéressé à aborder la méthode de prédimensionnement, méthode de calcul de stabilité externe et le ferrailage du mur de soutènement en béton armé en T renversé en détails.

CHAPITRE 03 : Calcul analytique d'un mur de soutènement en béton armé

SCHEMA de Ferrailage



NOMENCLATURE DES ACIERS

REP	Ø	ES	PLONG
1	T14	15	140
2	T12	15	100
3	T14	15	40
4	T12	15	100
5	T14	15	460



Chapitre 04

Chapitre 4 : Modélisation numérique d'un Mur de soutènement par le logiciel EXPERT

MODELISATION NUMERIQUE D'UN MUR DE SOUTÈNEMENT PAR LE LOGICIEL EXPERT

4.1 Introduction

Le calcul complet d'un mur de soutènement est une œuvre assez laborieuse, le dimensionnement de l'ouvrage et ses vérifications demandant une succession de calculs longs et itératifs. Aussi pour arriver de la façon la plus rapide aux bons résultats, il est important de pré-dimensionner de la manière la plus juste possible les caractéristiques géométriques du mur. Cependant, ce chapitre examine les étapes de modélisation d'un mur de soutènement en béton armé à l'aide de logiciel EXPERT.

4.2 Modèle numérique du Mur de soutènement en béton armé

On se propose l'étude du mur de soutènement de 5m de hauteur citée auparavant dans le chapitre 3, le calcul du mur a été fait par le **logiciel robot expert**. Le mur dispose des caractéristiques suivantes :

a) Caractéristiques du sol :

Ces caractéristiques sont fournies par **Le Laboratoire National Des Travaux Publics De l'Est SPA – Bordj Bou Arréridj** dont on résume dans le tableau suivant :

Tableau 4.1 : Caractéristiques du sol de remblai.

Poids volumique du sol (kN/m ³)	$\gamma_h \text{ sol} = 17$
Cohésion (kN/m ²)	$C = 0$
Angle de frottement interne (degré)	$\varphi = 35^\circ$
Angle de dilatance (degré)	$\psi = 2/3\varphi$
Contrainte admissible (bars)	$\sigma \text{ sol} = 2$

Chapitre 4 : Modélisation numérique d'un Mur de soutènement par le logiciel EXPERT

b) Caractéristiques du béton :

Tableau 4.2 : Caractéristiques du béton.

Poids volumique du béton (kN/m ³)	$\gamma_{\text{béton}} = 24$
Classe C25/30 (MN/m ²)	$25F_{c28} = 25$
Module de young (MN/m ²)	$E = 32164.2$

4.2.1 Présentation de programme

Le programme EXPERT Murs de soutènement est un outil performant permettant d'effectuer les calculs géotechniques et les calculs de la structure en béton armé (résistance ultime, surface théorique de ferrailage etc.). Le module permet aussi d'effectuer le redimensionnement de la section transversale de l'élément de la structure en béton armé.

Les calculs des murs de soutènement sont effectués conformément aux prescriptions des normes françaises suivantes :

- ✚ paramètres géotechniques : DTU 13.12 ou Fascicule N° 62 – Titre
- ✚ Ferrailage : BAEL 91 ou BAEL 91 mod.99

Les caractéristiques les plus importantes du programme EXPERT Murs de soutènement sont les suivantes:

- ✚ Personnalisation des systèmes d'unités utilisés, des formats d'affichage des valeurs numériques, des caractéristiques des matériaux
- ✚ Sélection de la géométrie du mur de soutènement
- ✚ Définition de différents types de profilé du talus
- ✚ Définition du sol composé de différentes strates et de nappe phréatique
- ✚ Édition et modification de la base de sols ; il est également possible de charger les stratifications du sol à partir des autres logiciels (ROBOT, EXPERT Semelles, etc.)

Chapitre 4 : Modélisation numérique d'un Mur de soutènement par le logiciel EXPERT

- ✚ Définition libre d'un nombre quelconque de charges appliquées (sur le talus et/ou sur le mur).
- ✚ Calculs des armatures du mur de soutènement pour la flexion et fissuration
- ✚ Sélection et génération des types d'armatures (ATTENTION : cette option est disponible uniquement dans le cas où ROBOT est installé sur Votre ordinateur et vous avez accès au module de génération des dessins des éléments BA).
- ✚ Génération du dessin des armatures dans l'éditeur des plans d'exécution du logiciel ROBOT (ATTENTION : cette option est disponible uniquement dans le cas où ROBOT est installé sur votre ordinateur et vous avez accès au module de génération des dessins des éléments BA).

Le dimensionnement du mur de soutènement comprend :

- ✚ Vérification des contraintes dans le sol sous la semelle du mur de soutènement.
- ✚ Définition des tassements moyens et de la différence de tassements;
- ✚ Vérification de la stabilité au renversement et au glissement.
- ✚ Calcul du déplacement et du renversement du mur.
- ✚ Définition de la section d'acier théorique dans le voile et la semelle.
- ✚ Définition des combinaisons dimensionnèrent lors de la vérification de la résistance du mur de soutènement.
- ✚ Quantitatif béton, coffrage.
- ✚ Génération des types d'armatures (ATTENTION : cette option est disponible uniquement dans le cas où ROBOT est installé sur votre ordinateur et vous avez accès au module de génération des dessins des éléments BA).

Pour vous faciliter l'étude des murs de soutènement, le programme EXPERT Murs de Soutènement comprend six onglets prédéfinis:

4.2.1.1. Géométrie du mur

Les options disponibles sur cet onglet servent à définir la géométrie du mur de soutènement.

Chapitre 4 : Modélisation numérique d'un Mur de soutènement par le logiciel EXPERT

La partie centrale de la boîte de dialogue contient le schéma du mur de soutènement. Dans la partie droite de la boîte de dialogue, les onglets suivants sont disponibles :

a) Général

Après la sélection de l'onglet Général, la boîte de dialogue Géométrie prend la forme suivante.

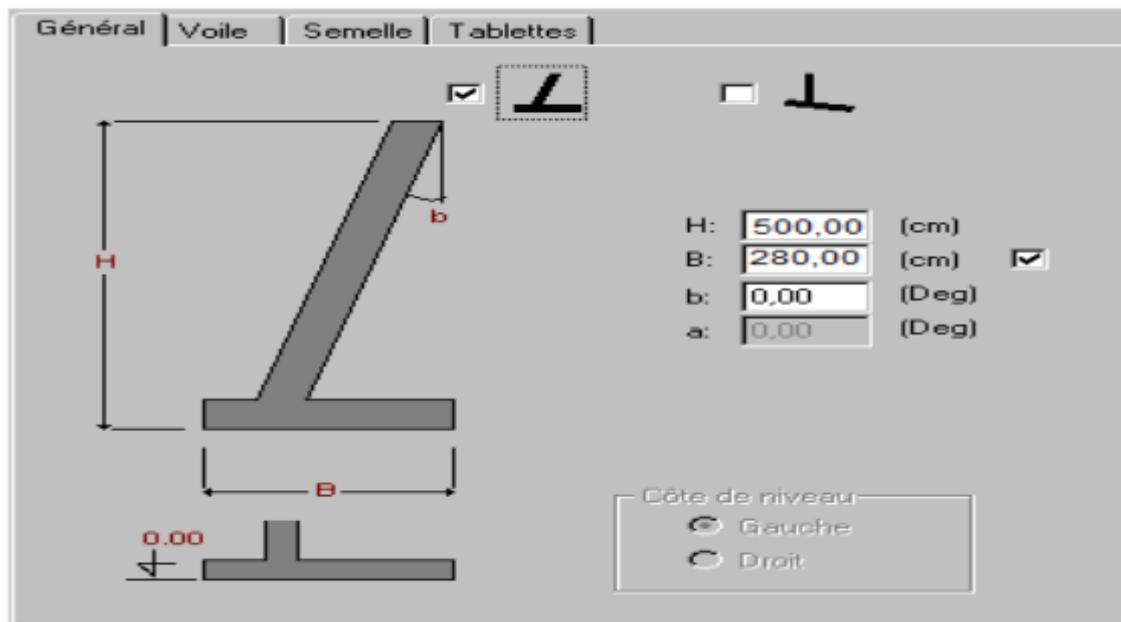


Figure 4.1 : Donnée de Géométrie (général).

b) Voile

Après la sélection de l'onglet Voile, la boîte de dialogue Géométrie prend la forme suivante :

Chapitre 4 : Modélisation numérique d'un Mur de soutènement par le logiciel EXPERT

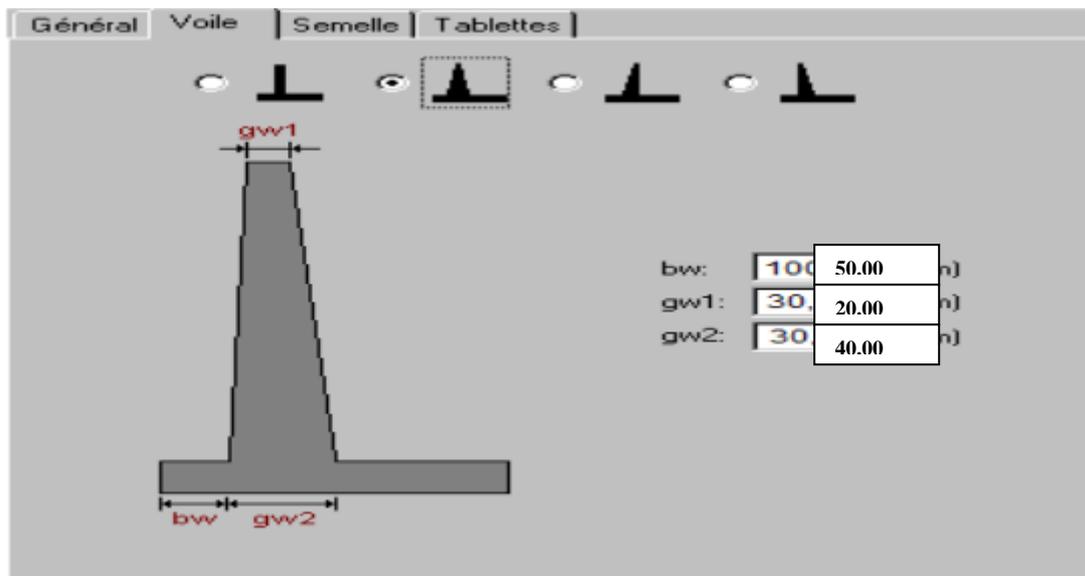


Figure 4.2 Donnée de Géométrie (voile).

c) Semelle

Après la sélection de l'onglet Semelle, la boîte de dialogue Géométrie prend la forme suivante :

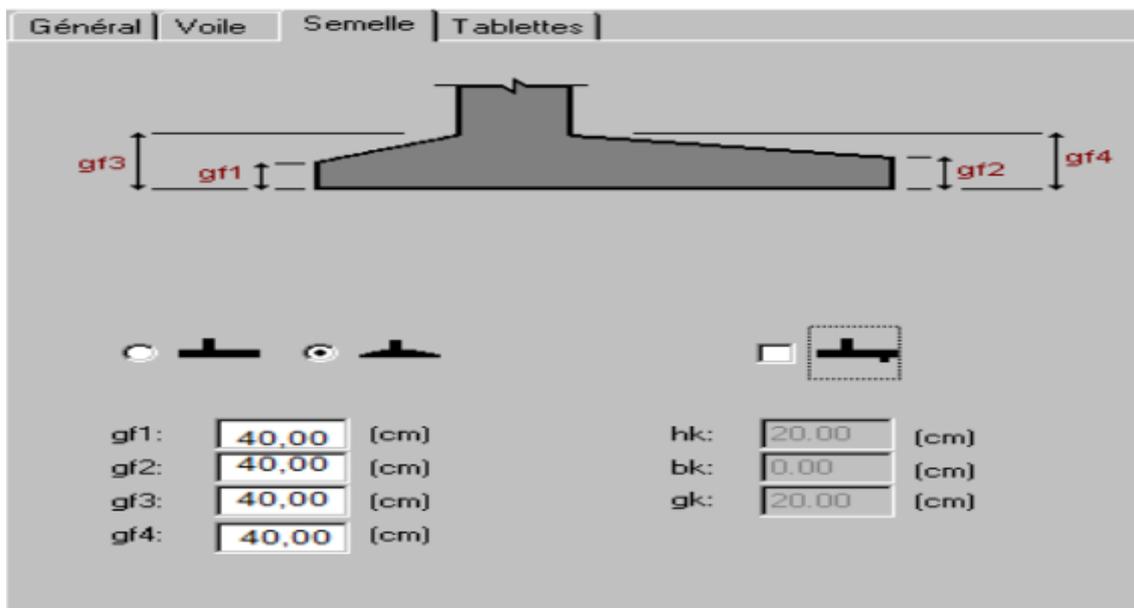


Figure 4.3 Donnée de Géométrie (semelle).

d) Tablettes

Chapitre 4 : Modélisation numérique d'un Mur de soutènement par le logiciel EXPERT

Après la sélection de l'onglet Tablettes, la boîte de dialogue Géométrie prend la forme suivante :

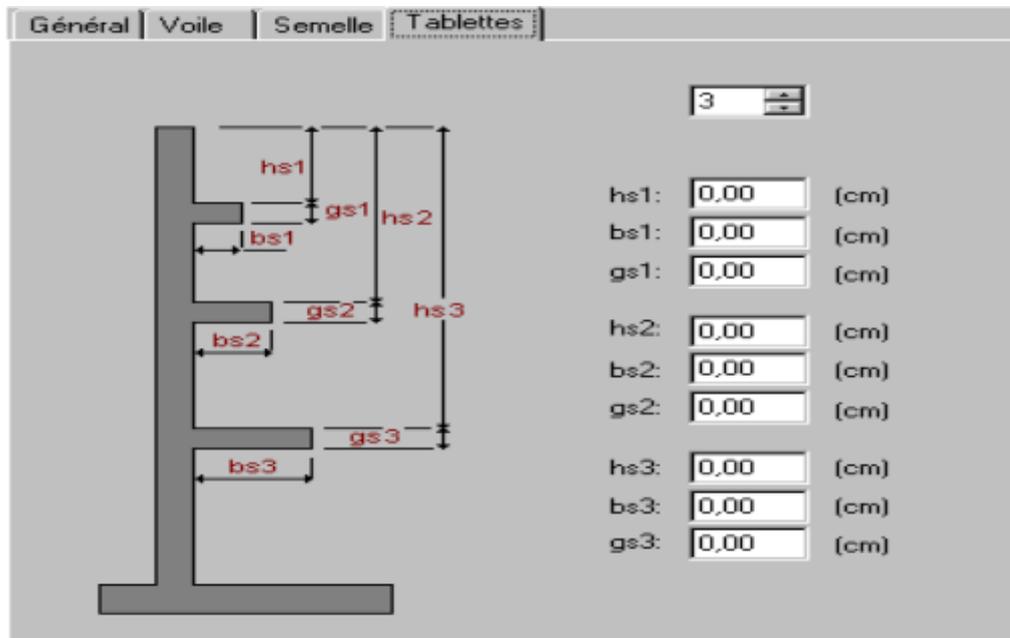


Figure 4.4 Donnée de Géométrie (tablettes).

4.2.1.2 Sols

Les sols qui se trouvent du côté droit/gauche du mur et ceux au-dessous du mur peuvent être définis dans l'onglet Sols présenté sur la figure ci-dessous.

La définition des sols concerne les sols situés en amont et en aval du mur de soutènement est présenté dans la figure 4.5.

Chapitre 4 : Modélisation numérique d'un Mur de soutènement par le logiciel EXPERT

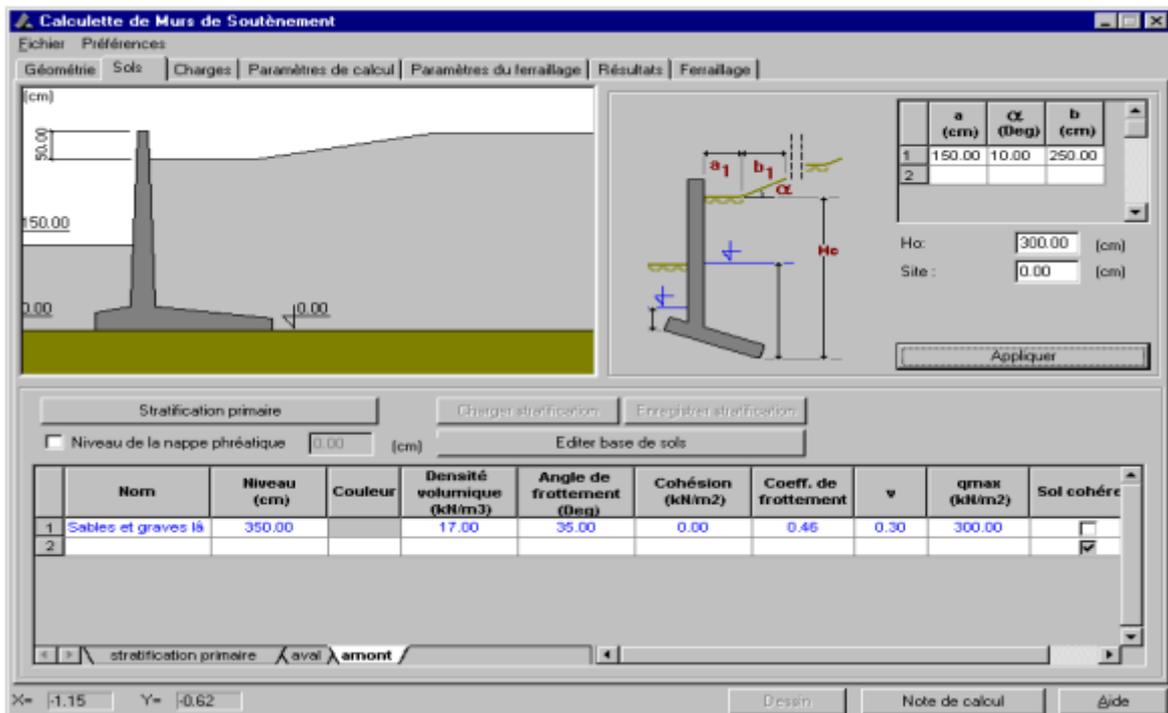


Figure 4.5 Donnée de Sols.

4.2.1.3 Charges

Les charges appliquées sur le talus ou directement sur le voile du mur de soutènement peuvent être définies dans l'onglet Charges représenté sur la figure ci-dessous.

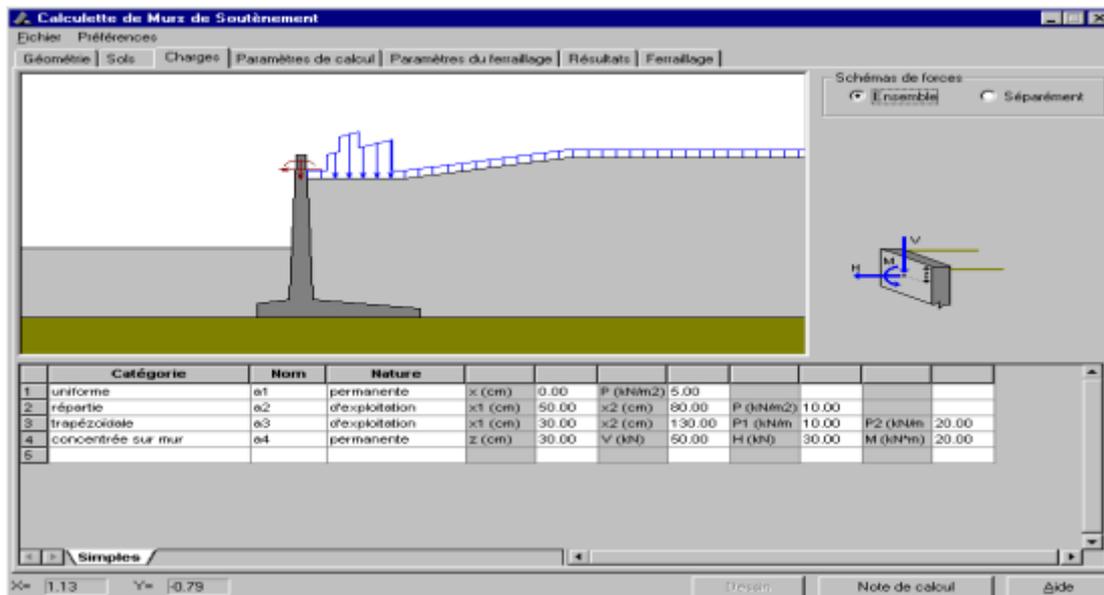
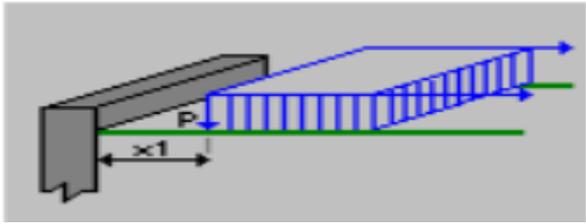
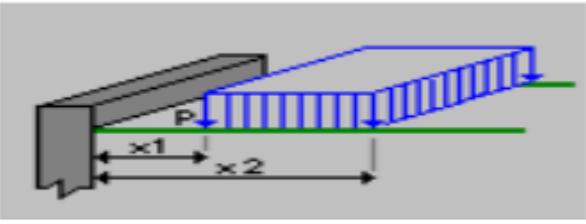
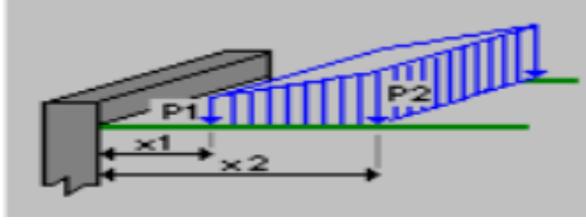
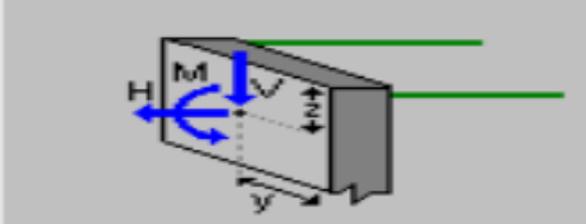


Figure 4.6 Donnée de charge.

Chapitre 4 : Modélisation numérique d'un Mur de soutènement par le logiciel EXPERT

Définir les types de charges suivants :

Tableau 4.3 Type des charges.

	charge uniforme sur le talus (la charge uniforme agissant à partir d'une distance donnée à partir du voile)
	charge uniforme sur le talus (la charge uniforme agissant sur une distance donnée)
	charge trapézoïdale sur le talus
	charge ponctuelle appliquée directement sur le voile

4.2.1.4 Paramètres de calcul

Dans l'onglet Paramètres de calcul, vous pouvez définir les paramètres géotechniques à utiliser lors des calculs du mur de soutènement : étendue des calculs pour ELS et ELU, coefficients de réduction et de correction, sélection de la méthode de calcul de la poussée, coefficients de frottement sol-voile, etc.

Chapitre 4 : Modélisation numérique d'un Mur de soutènement par le logiciel EXPERT

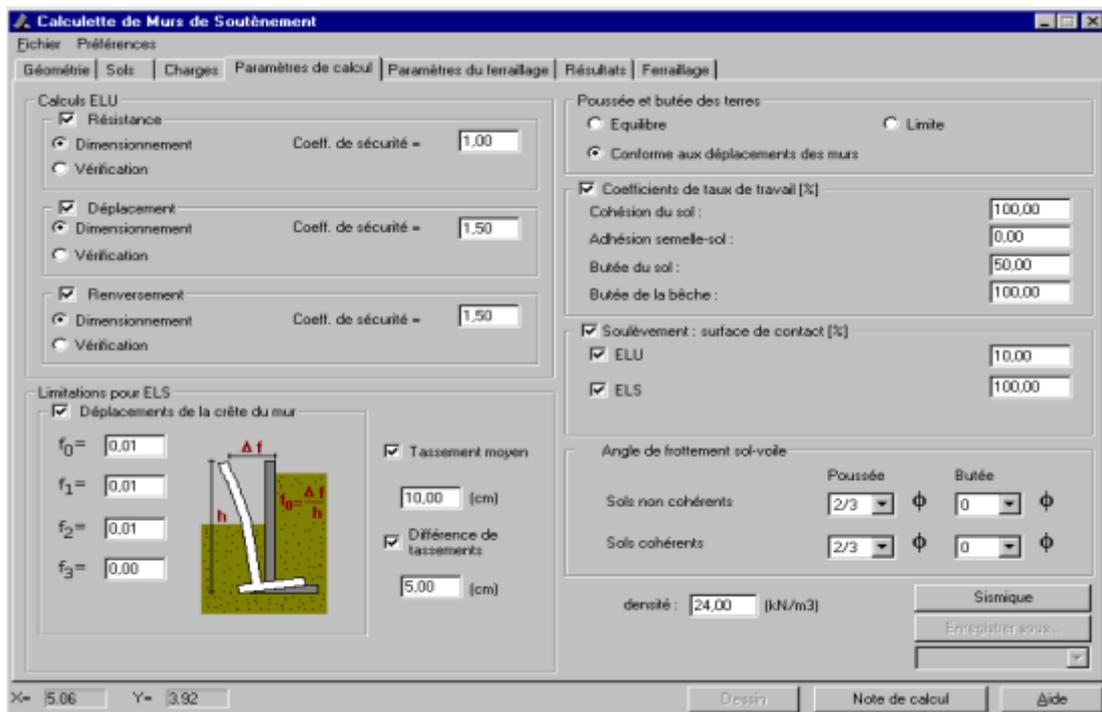
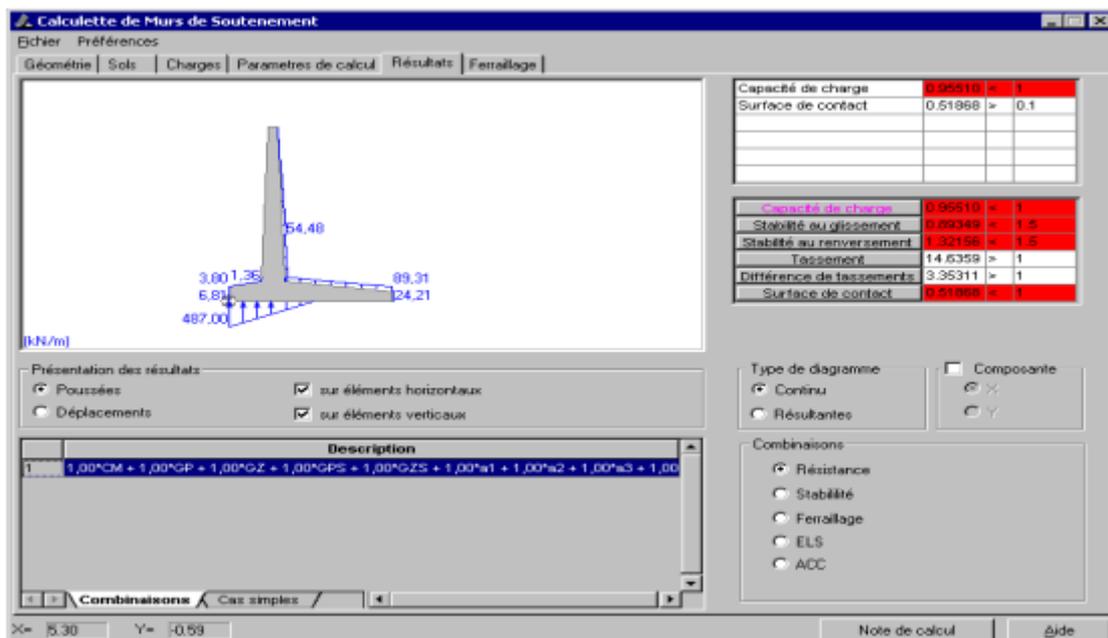


Figure 4.7 Donnée Paramètres de calcul.

4.2.2 Résultats

Les résultats des calculs effectués pour le mur de soutènement défini sont représentés sur l'onglet Résultats :



Chapitre 4 : Modélisation numérique d'un Mur de soutènement par le logiciel EXPERT

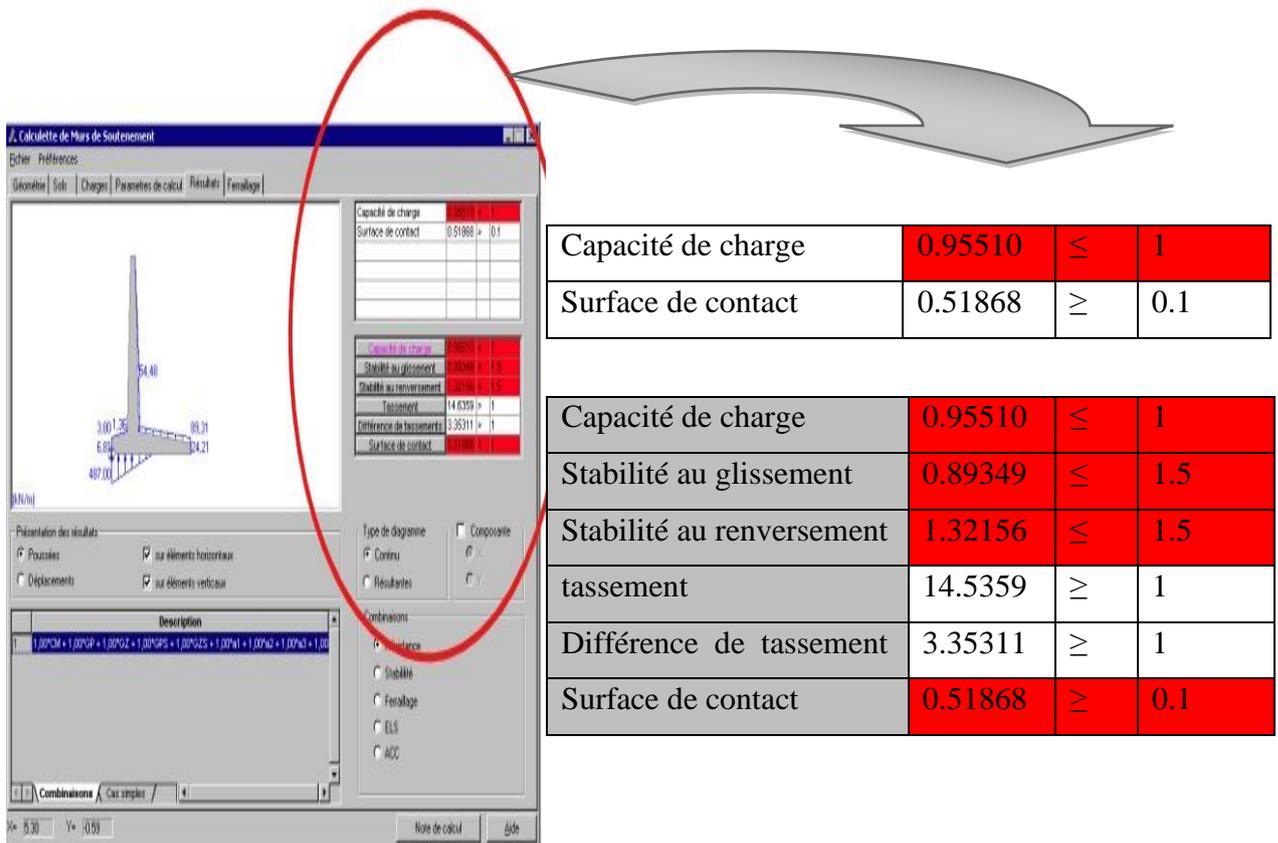
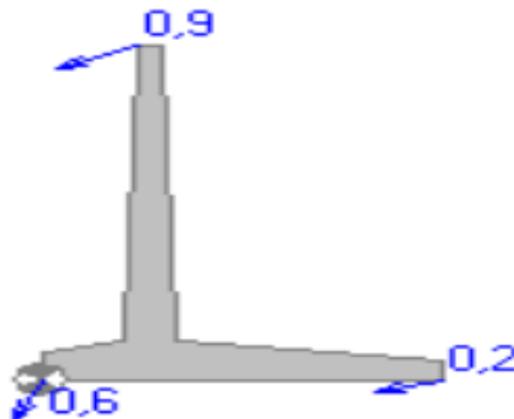


Figure 4.8 Fenêtre de résultats.

➤ résultats pour les déplacements.



Chapitre 4 : Modélisation numérique d'un Mur de soutènement par le logiciel EXPERT

4.2.3 Analyse du mur par le programme expert

4.2.3.1 Entrées des données

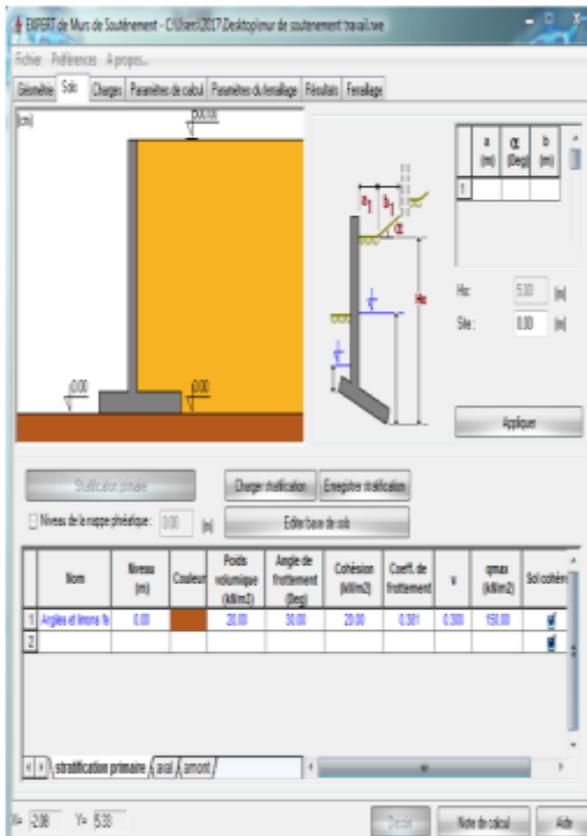


Figure 4.9 Donnée de Sols

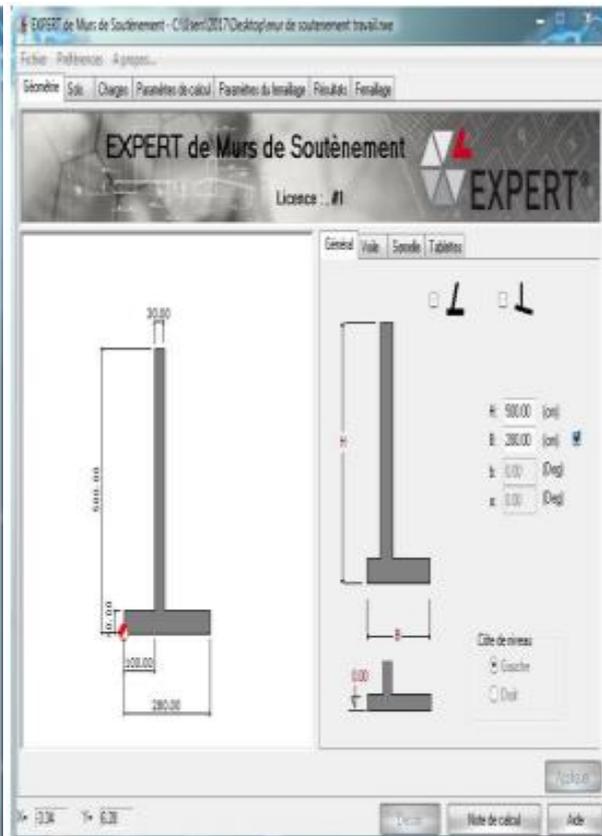


Figure 4.10 Donnée de Géométrie

Chapitre 4 : Modélisation numérique d'un Mur de soutènement par le logiciel EXPERT

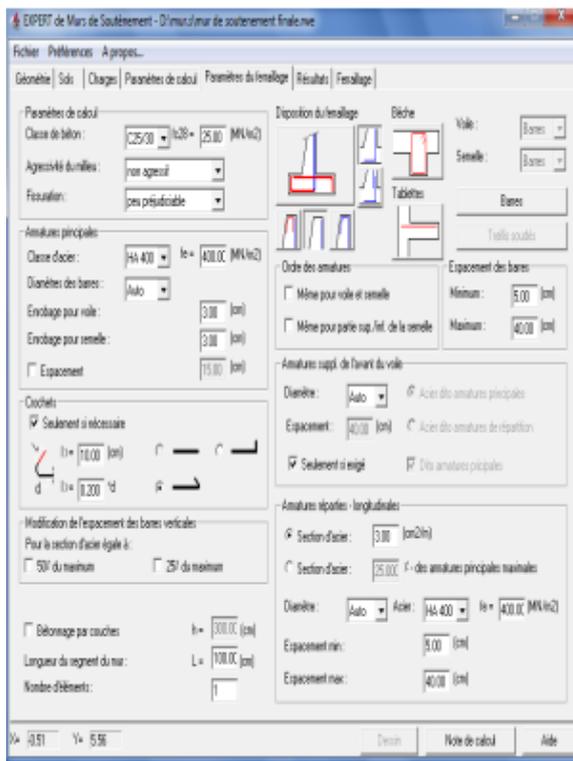


Figure 4.11 Donnée de ferrillage

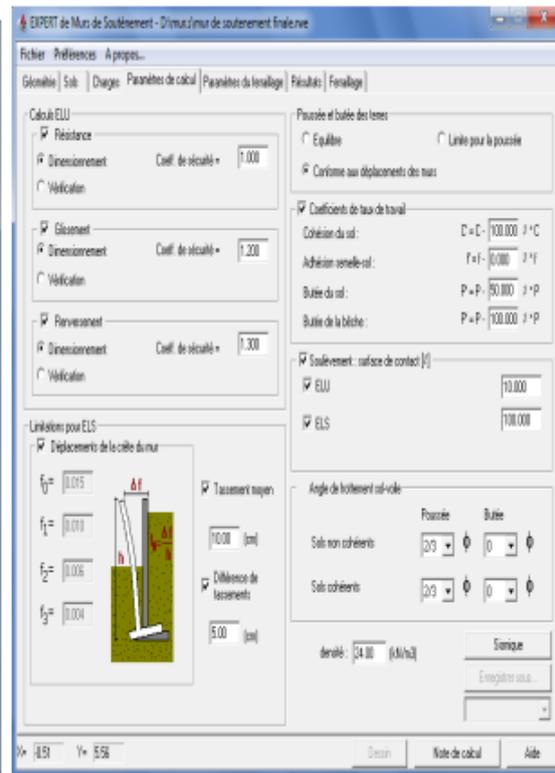
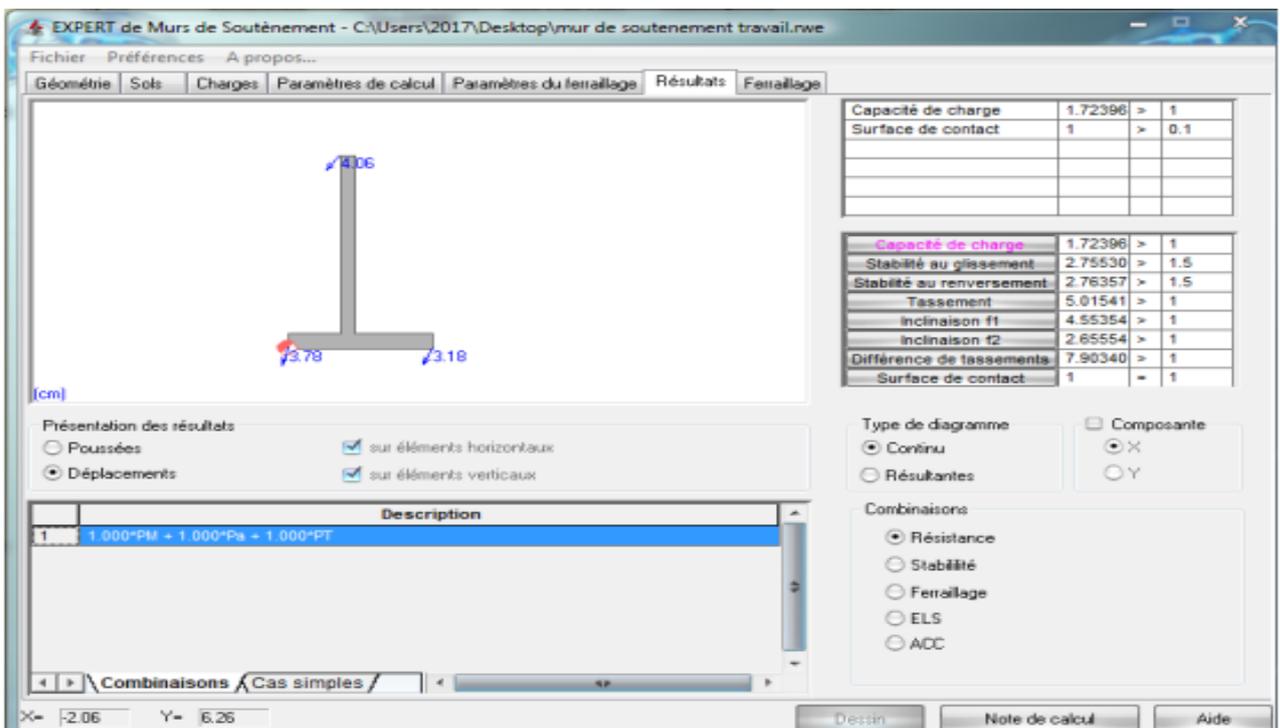


Figure 4.12 Donnée de Calcul.

4.2.3.2 Résultats



Chapitre 4 : Modélisation numérique d'un Mur de soutènement par le logiciel EXPERT

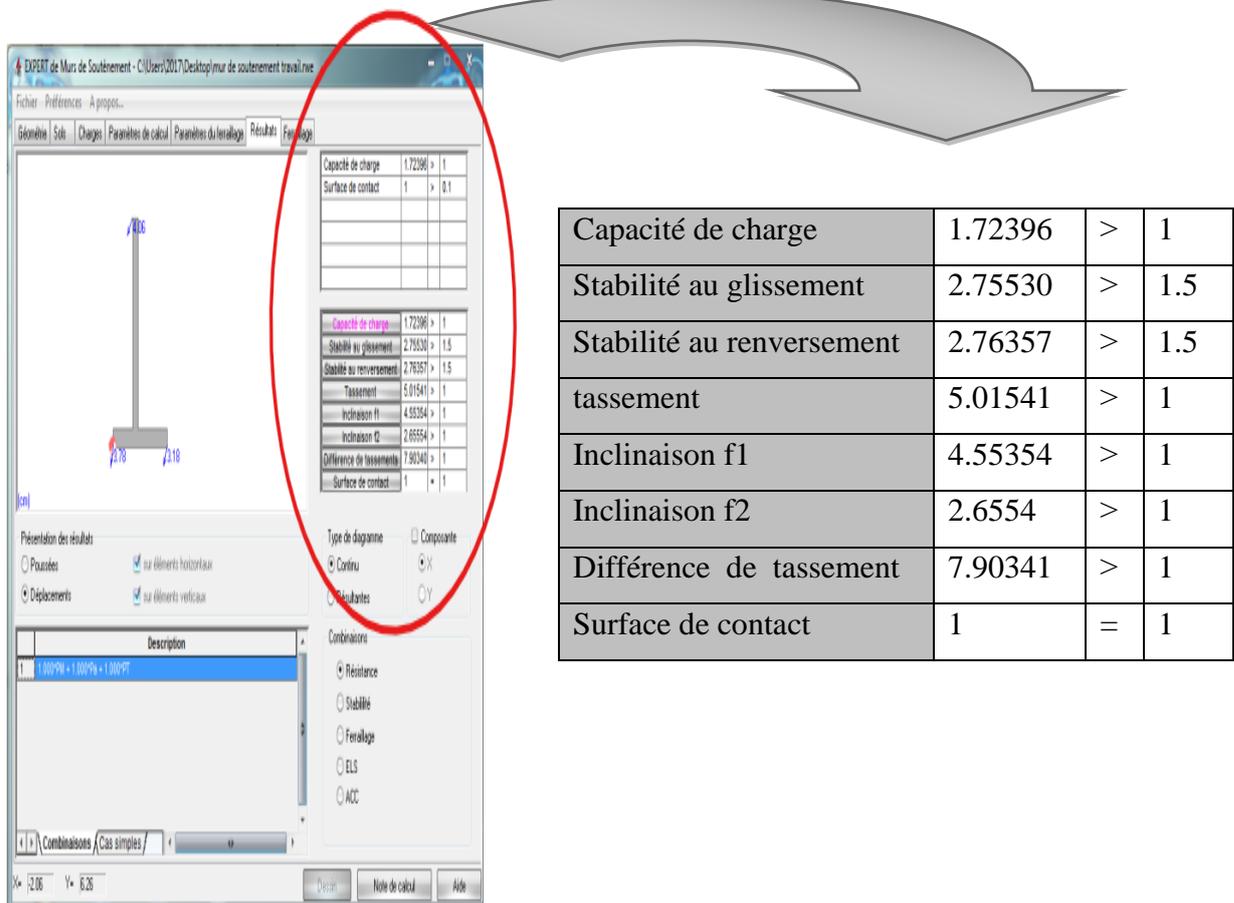


Figure 4.13 Donnée de Résultats.

Paramètres de calculs

MATERIAU

- **BETON:** classe C25/30, $f_{c28} = 25.00$ (MN/m²), poids volumique = 25.00 (kN/m³)
- **ACIER:** classe HA 500, $F_e = 500.00$ (MN/m²)
- **OPTIONS:** Calculs suivant la norme:
 - ❖ béton: BAEL 91 mod. 99.
 - ❖ sols: DTU 13.12.
- Enrobage: $c_1 = 30.0$ (mm), $c_2 = 50.0$ (mm)
- Agressivité du milieu: non agressif
- Fissuration: peu préjudiciable
- Dimensionnement du mur en fonction de:

Chapitre 4 : Modélisation numérique d'un Mur de soutènement par le logiciel EXPERT

-Résistance -Glissement $g = 1.500$ - Renversement $g = 1.500$

- Vérification du mur en fonction de:
 - Tassement moyen: $S_{dop} = 10.00$ (cm)
 - Différence de tassements: $DS_{dop} = 5.00$ (cm)
 - Déplacements de la crête du mur: $f_0 = 0.015$, $f_1 = 0.010$, $f_2 = 0.006$, $f_3 = 0.004$.
- Coefficients de réduction pour:
 - Cohésion du sol 100.000 %
 - Adhésion semelle-sol 0.000 %
 - Butée du voile 50.000 %
 - Butée de la bèche 100.000 %
- Angle de frottement sol-voile:
 - Butée pour les sols incohérents : $0 \times \varphi$
 - Poussée pour les sols cohérents : $2/3 \times \varphi$
 - Butée pour les sols cohérents : $0 \times \varphi$
 - Poussée pour les sols incohérents : $2/3 \times \varphi$

✚ Sol

- Définition des paramètres géotechniques suivant la méthode: A
- Talus Profondeur du sol aval $H_0 = 500.00$ (cm)
- Stratification primaire:

Tableau 4.4 Paramètres géotechniques du sol.

N°	Nom du sol	Niveau [cm]	Epaisseur [cm]	Cohésion [kN/m ²]	Angle de frottement [Deg]	Densité [kN/m ³]
1	Pulvérulent	500.00	500.00	00	35.00	17.00
2	cohérent	0.00	-	20.00	30.00	20.00

✚ Charges

1/ concentrée sur mur

Accidentelle $z = 2.50$ (m) , $V = -0.00$ (kN) , $H = 128.60$ (kN) , $M = 0.00$ (kN.m)

Chapitre 4 : Modélisation numérique d'un Mur de soutènement par le logiciel EXPERT

4.2.4. Les résultats de robot expert

4.2.4.1 Résultats de calculs géotechniques

➤ **POUSSEES**

Poussée et butée des terres : conforme aux déplacements du mur, les coefficients de poussées et butées limites et équilibres pour les sols:

1/ Angle d'inclinaison moyen du talus $\varepsilon = 0.00$ (Deg) .

2/ Angle d'inclinaison du voile $\beta = 0.00$ (Deg) .

$$K_a = \frac{\cos^2(\beta - \phi)}{\cos^2 \beta \cdot \cos(\beta + \delta) \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi - \varepsilon)}{\cos(\beta + \delta) \cdot \cos(\beta - \varepsilon)}} \right)^2}$$

$$K_p = \frac{\cos^2(\beta + \phi)}{\cos^2 \beta \cdot \cos(\beta + \delta) \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi + \varepsilon)}{\cos(\beta + \delta) \cdot \cos(\beta - \varepsilon)}} \right)^2}$$

$$K_o = \frac{\sigma_x}{\sigma_z} = \frac{\nu}{1 - \nu}$$

$$K_a \leq K_o \leq K_p$$

Tableau 4.5 Calculs géotechniques du sol pulvérulent.

N°	Nom du sol	Niveau [cm]	Angle de frottement [Deg]	Kp	Ka	Ko
1	Pulvérulent	500.00	35.00	3.690	0.27	0.426

✚ Déplacements limites totaux

- Butée 0.120
- Poussée 0.012

✚ **RESISTANCE**

- Type de sol sous la semelle: Uniforme
- Combinaison dimensionnant: 1.000*PM + 1.000*Pa + 1.000*PT
- Charge dimensionnant réduite:

Chapitre 4 : Modélisation numérique d'un Mur de soutènement par le logiciel EXPERT

$N=-197.87$ (kN/m) $My=-59.71$ (kN.m) $Fx=-47.69$ (kN/m)

- Coefficient de sécurité: $1.724 > 1.000$.

✚ TASSEMENT

- Type de sol sous la fondation: uniforme
- Combinaison dimensionnant: $1.000*PM + 1.000*Pa + 1.000*PT$
- Charge dimensionnant réduite: $N=-197.87$ (kN/m) $My=-59.71$ (kN*m) $Fx=-47.69$ (kN/m)
- Charge caractéristique unitaire due aux charges totales: $q = 0.07$ (MN/m²)
- Epaisseur du sol en tassement active: $z = 280.00$ (cm)
- Contrainte au niveau z:
 - additionnelle: $szd = 0.01$ (MN/m²)
 - due au poids du sol: $szg = 0.06$ (MN/m²)
- Tassement: $S = 1.99$ (cm) < $S_{dop} = 10.00$ (cm)

✚ RENVERSEMENT :

- Combinaison dimensionnant: $1.000*PM + 1.553*Pa + 0.900*PT$
- Charge dimensionnant réduite:
 $N=-197.51$ (kN/m) $My=-20.10$ (kN.m) $Fx=-74.04$ (kN/m) .
- Moment de renversement: $Mo= 123.40$ (kN.m).
- Moment empêchant le renversement de la fondation: $Muf = 341.01$ (KN.m)
- Coefficient de sécurité: $2.764 > 1.500$.

✚ GLISSEMENT

- Combinaison dimensionnant: $1.000 \times PM + 1.000 \times Pa + 1.000 \times PT$
- Charge dimensionnant réduite $N=-197.87$ (kN/m) $My=-59.71$ (kN*m) $Fx=-47.69$ (kN/m)
- Dimensions équivalentes de la semelle: $A = 280.00$ (cm)
- Coefficient de frottement: Du sol (position du sol): $f = 0.381$
- Coefficient de réduction de la cohésion du sol = 100.000 %
- Cohésion: $C = 20.00$ (kN/m²)
- Valeur de la force de glissement: $Q_{tr} = 47.69$ (kN/m)
- Valeur de la force empêchant le glissement du mur:

$$Q_{tf} = N \times F + C \times A$$

Chapitre 4 : Modélisation numérique d'un Mur de soutènement par le logiciel EXPERT

Au niveau du sol: $Q_{tf} = 131.40$ (kN/m)

- Coefficient de sécurité: $2.755 > 1.500$.

✚ ANGLES DE ROTATION

- Type de sol sous la fondation: uniforme
- Combinaison dimensionnant: $1.000*PM + 1.000*Pa + 1.000*PT$
- Charge dimensionnant réduite:
 $N = -197.87$ (kN/m) $My = -59.71$ (kN.m) $Fx = -47.69$ (kN/m)
- Contraintes unitaires maximales caractéristiques dues aux :
charges totales: $q_{max} = 0.08$ (MN/m²)
- Contraintes unitaires minimales caractéristiques dues aux :
charges totales: $q_{min} = 0.06$ (MN/m²)
- Angle de rotation: $ro = 0.13$ (Deg)
- Coordonnées du point de rotation du voile:
 $X = 1603.25$ (cm)
 $Z = 0.00$ (cm)

- Coefficient de sécurité: $7.903 > 1.500$

4.2.4.2 Résultats de calcul béton armé

- Moments: la figure 4.14 représente le diagramme du moment :

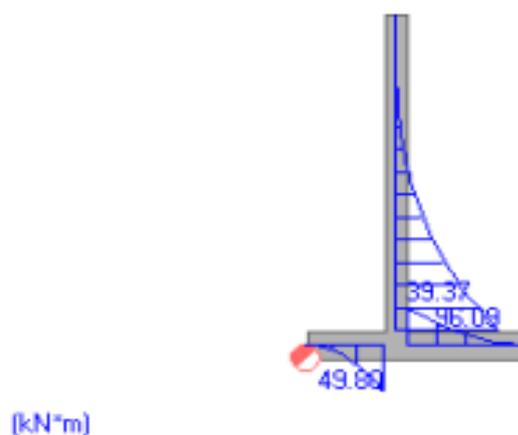


Figure 4.14 Diagramme des moments.

- Le tableau (4.6) regroupe les moments de flexion dans le mur :

Chapitre 4 : Modélisation numérique d'un Mur de soutènement par le logiciel EXPERT

Tableau 4.6 Moments de flexion.

Combinaison	Elément	Position [cm]	valeur [kN.m]	Moments
1.350*PM + 1.553*Pa + 1.485*PT	Voile	20.00	96.09	maximum
1.000*PM + 0.850*Pa + 1.485*PT	Voile	500.00	-0.00	minimum
1.350*PM + 1.553*Pa + 0.900*PT	Semelle	50.00	50.22	maximum
1.000*PM + 1.553*Pa + 0.900*PT	Semelle	50.00	-42.12	minimum

➤ Ferrailage: la figure (4.15) représente les surfaces des ferrailages :

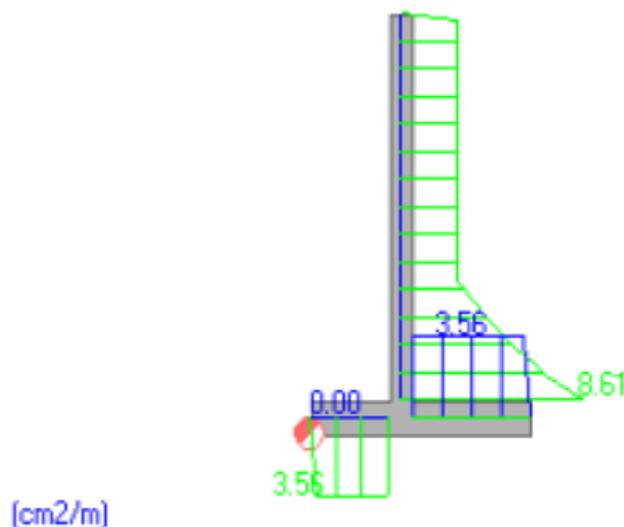


Figure 4.15 Les surfaces des ferrailages

➤ Le tableau (4.7) regroupe le ferrailage du mur:

Chapitre 4 : Modélisation numérique d'un Mur de soutènement par le logiciel EXPERT

Tableau 4.7 Calcul de ferrailage

Position	Surface réelle [cm ² /m]	Section d'acier théorique [cm ² /m]	Espacement [cm]	Barres
Voile	8.20	8.61	12	12
Semelle	4.19	3.56	15	12

4.2.4.3 Calcul des déplacements

Le déplacement horizontal à chaque niveau " δ_{hK} " de la structure est calculé comme suit [4]:

$$\delta_{hK} = R \times \delta_{eK}$$

Avec :

δ_{eK} : Déplacement dû aux forces sismiques

R : Coefficient de comportement égale 2 (Console verticale à masses réparties).

$\delta_{eK} = 4.02$ cm

$R = 8.13$ cm.

4.3 Conclusion

Les principaux résultats obtenus dans ce chapitre sont :

1. La ligne des tractions maximales définie par le calcul numérique d'un mur en béton Armée est localisée au niveau du parement.
2. Le mur de soutènement en Béton Armée résiste mieux face aux charges dynamiques.
3. La comparaison entre le Robot Expert (élément finis) et calcul analytique montre une moins de différence dans les valeurs de déplacement horizontal (Ecart inférieur 1%), cette différence est importante en augmentant l'action sismique.

Conclusion générale

Le domaine de génie civil se caractérise par la construction d'ouvrages uniques adaptés dans chaque cas à un problème spécifique, ces ouvrages peuvent être traités par plusieurs méthodes. Dans ce contexte, il est normal de constater des divergences entre les prévisions de comportements données par les méthodes de calcul et le comportement réellement observé à l'aide d'une auscultation des ouvrages réels ou par un modèle réduit.

Le présent travail a été élaboré dans le but de modéliser numériquement le comportement d'un mur de soutènement en béton armé. Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel ROBOT EXPERT basé sur la méthode des éléments finis afin de modéliser correctement les composantes qui les constituent.

Cette étude nous a permis de rassembler plusieurs connaissances sur les ouvrages de soutènement en béton armé, leur comportement, les différentes approches de calcul et l'influence de quelques paramètres sur sa stabilité.

Les calculs effectués dans la présente étude montrent que :

- Les calculs analytiques de la stabilité externe du mur montrent que le mur est stable vis-à-vis le renversement, le glissement et le poinçonnement.
- Lorsqu'il y a une surcharge appliquée à la surface du sol (remblai), la stabilité du mur de soutènement diminue.
- Les résultats de modélisation numérique du mur montrent qu'il est stable et ils sont conformes aux résultats analytiques.
- Le mur de soutènement en béton armé en forme T renversé est un bon choix pour la stabilité des terrains.
- Les résultats de chaque méthode diffèrent que ce soit pour un calcul manuel ou le calcul logiciel, chacun ayant ses avantages, on peut être plus économique avec un calcul manuel en prenant le ferraillement minimal alors que le calcul logiciel peut s'avérer plus rapide en comparaison.

Enfin nous espérons avoir fait de notre mieux et que la présente étude aura répondu aux objectifs qui lui ont été assignés au départ et qu'elle sera bénéfique pour tous les étudiants.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- BAZIZ. K (2011), Thèse de magistère, 'Effet de la variabilité des paramètres de calcul sur la stabilité des murs de soutènement', Université Mouloud MAMMERRI-Tizi Ouzou.
- BOUZIDI M A (2010), Mémoire de Master, 'Stabilité de talus sur remblais', Université de Ahmed Mira- BEJAIA.
- CASSAN M (1978), Essai in-situ en Mécanique des sols- tome II- application et méthode de calcul, édition Eyrolles.
- SHUMSHER P, (1981) 'Soil Dynamics' edition McGraw-Hill, Book Company, University of Missouri-Rolla.
- PLUMELLE.C (2004), 'Cours de fondations profondes' C.N.A.M- géotechnique B1/B6.
- FEMA-365 (2000), 'Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings', Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.
- FEMA-440 (2005), 'Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures', Federal Emergency Management Agency Report. Redwood City, CA.
- Belazouz.L (2012), 'Influence de la disposition des voiles sur le comportement dynamique des structure' Thèse de Magister, Université de Tizi-Ouzou.
- Hachi.S, (2016), 'Effet de l'incertitude dans les paramètres mécanique et dynamique sur la performance et le coefficient de comportement global des structure', Mémoire de Master Académique, Université de Djelfa.
- PROFRACTAL (Engineering & Consulting), (2000) 'La conception des murs de soutènement'.
- Schlosser, F., Juillie, Y. (2015) 'Murs et écrans de soutènement', Techniques de l'Ingénieur, traité de construction C244.
- BIETH E M. (2010), 'Murs de soutènement', Cours de Mécanique des sols appliqués.
- Baziz, S.E. (2012), 'Modélisation numérique des ouvrages de soutènement en sol renforcé'. Thèse de Magistère, Université de Biskra.

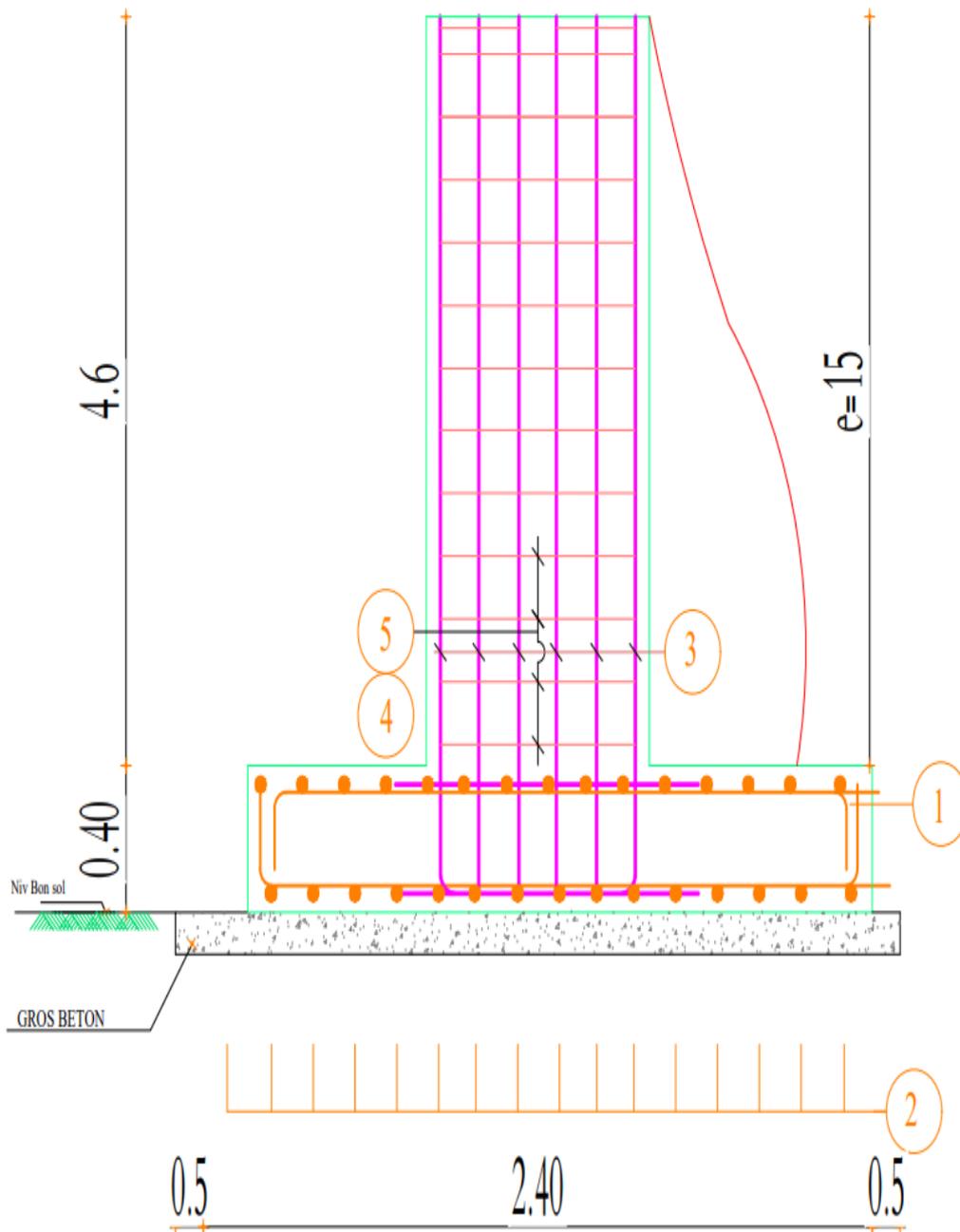
Références bibliographiques

- Chebira, H., Mekki, A. 'Etude d'un tronçon de Mur de soutènement a hauteur variable', Mémoire de Master, Université de Tlemcen.
- Fabrice R, (2011), 'Support numérique, Cours de mécanique des sols II, ouvrages de soutènement' –ENTPE, France.
- Schlosser, F., Unterreiner, P, (2014), ' Renforcement des sols par inclusions' Technique de l'ingénieur c245.
- Serre, A. (1995). 'Ouvrages renforcés par des géotextiles chargés en tête : Comportement et Dimensionnement', Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées-France.
- Schlosser, F., Briançon, Y. L et Delmas, P. (2016), 'Les géosynthétiques de renforcement', Techniques de l'Ingénieur, traité de construction C305.
- LCPC (Techniques et Méthodes des laboratoires des ponts et chaussées), (2003). 'Recommandations pour l'inspection détaillée, le suivi et le diagnostic des murs en remblai renforcé par éléments', Guide technique, pp 83.
- Azzaz, I., Chouikha, S. (2017), 'Étude numérique de la stabilité d'un remblai sur sol mol traité par des colonnes ballastées entouré par de géosynthétique'. Thèse de magistère, Université de Djelfa
- Guler, E., M. Hamderi et M. Demirkan (2007), ' Numerical analysis of reinforced soil retaining wall structures with cohesive and granular backfills'. Geosynthetics International, Vo 14, No 6, pp 330 -345.
- Khennouf A, Souadok A (2016), Mémoire de master, 'Etude du comportement d'un mur de soutènement renforcée par géogrille', Université Farhat Abbas, Sétif 1.
- Technique de L'ingénieur (2015), 'Ouvrages de soutènement- Poussée et butée'.
- Gahmous, S. (2018), 'Étude de la stabilité d'un ouvrage de soutènement renforcé par géosynthétique'. Mémoire de master, Université de Biskra.

Annexes

Annexes :

Ferrailages double armature de la mure :



Annexes

REP.	Ø	ESP.	LONG.
1	T14	15	140
2	T12	15	100
3	T14	15	40
4	T12	15	100
5	T14	15	460