



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

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

SCIENTIFIQUE

جامعة سعد دحلب \_ البليدة

UNIVERSITE DE BLIDA 1

كلية التكنولوجيا-دائرة الهندسة المدنية  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

## MEMOIRE DE PROJET DE FIN D'ETUDES

POUR L'OBTENTION DU DIPLOME  
DE MASTER 2 EN GENIE CIVIL  
OPTION : Géotechnique

### ***Thème***

***Calcul automatique des murs de soutènements  
en béton armé.***

***Etablissement d'un programme en VB.net.***

***Réalisé par :***

***MAHIEDDINE Aya.***

***BOUCHAM Bouchra.***

***Encadré par :***

***Dr.ABED Younes***

***Promotion : 2019/2020***

## *Dédicace*

Rêve qui se réalise grâce à Dieu le tout puissant, ce mémoire est enfin achevé, je le dédie aux personnes qui sont très chères pour moi :

A mes très chers parents Mahmoud et Nassima, tout au long de mon cursus, ils m'ont toujours soutenu, encouragé et aidé. Sans eux je n'y arriverais jamais à être la personne que je suis. Qu'ils trouvent, dans la réalisation de ce travail, l'aboutissement de leurs efforts ainsi que l'expression de ma plus affectueuse gratitude.

A mon frère Youcef.

A ma sœur Marwa, son mari Mohamed et leur deux filles Meriem et Oumnia. Ainsi qu'à ma sœur Khadidja.

A mes cousines Lamia et Feriel.

A mes plus chers amis pour leur présence de tous les instants, pour le soutien qu'ils m'ont apporté Selma, Lamia et Amina.

A mon binôme Bouchra pour tous les moments durs et agréables passés ensemble.

Mes dédicaces sont également adressées à tous mes camarades avec lesquels j'ai partagé de beaux moments et dont je garde d'excellents souvenirs.

Mahieddine Aya.

*Dédicace*

*Je dédie ce travail*

*A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse,  
Leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,*

*A ma chère sœur :khouloud*

*A ma petite famille : mon marie et mon fils ilyes*

*A la famille de mon marie chacun a son nom*

*A toute mes amies et surtout : DIF AHLEM. HADDAD LYNDA .NADA RIAD*

*A mon binôme :MAHIEDDINE AYA*

*Et à ceux avec qui je partage de bons souvenirs*

*Boucham bouchra.*

## **Résumé**

Les murs de soutènement, ont pour but de soutenir le terrain, autrement dit contré les glissements de terrain, pour que cet ouvrage arrive à résister à ce phénomène il doit être étudié et calculé de telle manière soit conçus en normes de sécurité.

Ce projet de fin d'études consiste à développer un programme en utilisant le langage

(Visual Basic). Ce programme permet de faciliter le calcul et de vérifier rapidement la stabilité d'un mur autostable a l'ingénieur géotechnicien quelque soient les différents paramètres à prendre en compte.

Dans ce mémoire, nous allons traiter deux parties importantes :

Dans la première partie, nous allons parler du calcul manuel des murs de soutènements autostable selon le règlement en vigueur : **Eurocode 7** pour le calcul géotechnique.

En seconde partie nous allons effectuer un programme inclut les différents calculs nécessaires de résistance, tel que le calcul des forces et les moments ensuite les vérifications de la stabilité pour des différents types du murs.

## **ملخص**

تهدف الجدران الاستنادية إلى دعم الأرض ، أي لمواجهة الانهيارات الأرضية ، بحيث يتمكن هذا الهيكل من مقاومة هذه الظاهرة ، يجب دراسته وحسابه بحيث يتم تصميمه وفقاً لمعايير السلامة.

لقد قمنا من خلال مشروع نهاية الدراسة بتطوير برنامج ألي باستعمال لغة البرمجة Visual Basic هذا البرنامج يتيح للمستخدم بالتحقق بطريقة سريعة من ثبات الجدران الداعمة للمهندس الجيوتقني، مهما كانت المعايير المختلفة التي يجب أخذها في عين الاعتبار.

في هذا الموجز، سوف نغطي جزأين مهمين:

في الجزء الأول، سنتطرق الى الحساب اليدوي للجدران الإسنادية القائمة بذاتها وفقاً للوائح المعمول بها **Eurocode 7** للحساب الجيوتقني.

في الجزء الثاني، سننفذ برنامجاً يتضمن مختلف الحسابات الضرورية للمقاومة، مثل حساب القوى واللحظات، ثم فحوصات الثبات لأنواع مختلفة من الجدران الإسنادية.

## ***Abstract***

The retaining walls are intended to support the ground, in other terms, to prevent landslides. So, in order to that structure manages to resist this phenomenon it must be studied and calculated in such a way that it is designed in accordance with safety standards.

This final project consists in developing a program using the language (Vb.Net). This program allows to facilitate the calculation and to quickly check the stability of a retaining wall for the geotechnical engineer despite the different parameters to be taken into account.

In this work, we will deal with two important parts:

In the first part, we are going to talk about the manual calculation of retaining walls according to the current regulation (Eurocode 7) for geotechnical calculations.

In the second part we will make a program that includes the different necessary strength calculations, such as the calculation of forces and moments and then the stability verifications for different types of walls.

## ***REMERCIEMENTS***

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

Nous tenons à remercier sincèrement Monsieur le promoteur **Dr.ABED Younes**, qui a toujours été très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide ,la patience et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Nos vifs remerciements vont également au prestigieux membre du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail en acceptant de l'examiner.

Ces remerciements vont aussi au corps professoral et administratif de la Faculté des Sciences technologiques département de Génie Civil pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Enfin nous remercions chaleureusement nos chers parents qui nous ont soutenu et encouragé et qui ont toujours été là dans les moments difficiles pour nous pousser à aller de l'avant.

Merci à toutes et à tous.

# SOMMAIRE

RESUME

REMERCIEMENT

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES SYMBOLES

INTRODUCTION GENERALE

*PARTIE 1 : Synthèse bibliographique*

*Chapitre 1 : Les différents types de soutènements*

1.1. Introduction .....	1
1.2. Définition des murs de soutènement .....	1
1.3. Les différents types de soutènements .....	1
1.3.1. Les Murs poids .....	1
1.3.2. Les murs en éléments préfabriqués .....	2
1.3.3. Les murs en béton armé .....	2
1.3.3.1. Mur en « T renversé » classique .....	2
1.3.3.2. Mur à contreforts .....	3
1.3.4 Les écrans plans de soutènement .....	3
1.3.4.1 Les murs en parois moulées .....	3
1.3.4.2 Les murs en parois berlinoises .....	4
1.3.4.3 Les rideaux de palplanches .....	5
1.3.5 Les murs composés.....	5
1.3.5.1 Les murs cloués en béton .....	5
1.3.5.2 Les murs en terre armée .....	6
1.3.5.3 Les pneus sol .....	7
1.3.5.4 Les géosynthétiques .....	8

1.3.5.4.1. Les géotextiles .....	8
1.3.5.4.2. Les géogrilles .....	9
1.3.5.4.3. Les géomembranes .....	9
1.4. Conclusion .....	10
<b>Chapitre 2 : Calcul des pressions sur un soutènement</b>	
2.1. Introduction .....	11
2.2. Murs de soutènements autostables en béton armé .....	11
2.2.1. Définition .....	11
2.3. Les pressions des terres .....	11
2.3.1. Le calcul statique .....	12
2.3.1.1. La pression de poussé .....	13
2.3.1.2. La pression de butée .....	13
2.3.1.3. Pression due à la surcharge .....	14
2.3.1.4. La pression due à la cohésion .....	15
2.3.2. Poids propre du mur .....	16
2.3.3. Poids propre du remblai .....	17
2.3.4. La pression interstitielle .....	18
2.4 Le calcul statique équivalent .....	18
2.4.1 Généralités sur les effets des séismes .....	18
2.4.2. Méthodes statiques équivalentes .....	19
2.4.2.1. Méthode de Mononobe-Okhabe .....	19
A) Cas d'un sol sec .....	19
B)- Cas d'une surcharge uniforme .....	21
C)- Cas d'un sol cohérent .....	21



D)- Cas d'un sol saturé .....	21
2.5. Conclusion .....	23

### ***Chapitre 3 : Vérification de la stabilité d'un soutènement***

3.1 Introduction .....	24
3.2 Dimensionnement .....	24
3.3 Pré-dimensionnement .....	25
3.3.1 La méthode classique de pré-dimensionnement .....	25
3.4 Justification de la stabilité .....	26
3.4.1 Mur de soutènement avec un calcul statique .....	26
3.4.1.1. Vérification de la capacité portante .....	26
3.4.1.2. Vérification de la stabilité au renversement .....	27
3.4.1.3. Vérification de la stabilité au glissement .....	28
3.4.2. Mur de soutènement avec un calcul statique équivalent .....	28
3.5. Conclusion .....	29

## ***PARTIE 2 : Etablissement du programme et étude paramétrique***

### ***Chapitre 4 : Présentation du compilateur VB.net utilisé et établissement de l'organigramme de calcul***

4.1. Introduction .....	30
4.2. Création d'un projet Visual Basic .NET .....	30
4.3. L'environnement de développement .....	30
4.3.1. Menu principal et barre d'outils .....	31
4.3.2. Boite d'outils .....	31
4.3.3. Fenêtre des propriétés .....	32
4.3.4. Fenêtre de solutions .....	32
4.3.5. Création d'un formulaire .....	33

4.3.5.1. Définition des propriétés d'un formulaire .....	33
4.4. L'environnement Visual basic code .....	34
4.4.1. Règles fondamentales de présentation .....	34
4.5. Le langage VB.net .....	35
4.5.1. Les variables .....	35
4.5.1.1. Les types de variables .....	35
4.5.2. Les énonces conditionnels .....	35
4.5.3. Association d'opérateurs logiques et d'opérateurs de comparaison .....	36
4.5.4. La fonction MsgBox .....	36
4.6. Les schémas .....	37
4.8. L'organigramme de calcul .....	37
4.8.1. La fenêtre principale du programme .....	39
4.8.2. Barre de défilement verticale .....	39
4.9. Conclusion .....	46

## ***Chapitre 5 : Etablissement du programme de calcul***

5.1. Introduction .....	47
5.2. Les exemples de validation du programme avec un calcul statique .....	47
5.2.1. Exemple 1 .....	47
5.2.1.1. Les données de calcul .....	47
A) Le calcul manuel .....	48
B) Le calcul automatique.....	53
5.2.2. Exemple 2 .....	59
5.2.2.1. Les données de calcul .....	59
5.2.2.2. La solution .....	60
5.2.3. Exemple 3 .....	62

5.2.3.1. Les données de calcul .....	62
5.2.3.2. La solution .....	63
5.3. Conclusion .....	64
<b>Chapitre 6 : Etude paramétrique</b>	
6.1. Introduction .....	65
6.2. Effet de l'inclinaison du ponton ( $\beta_1$ ) du sol amont .....	65
6.2.2. Effet de l'inclinaison du ponton ( $\beta_1$ ) du sol amont sur la capacité portante de la semelle du mur .....	66
6.3. Effet de la rugosité $\delta$ .....	67
6.3.1. Effet de la rugosité ( $\delta$ ) sur les coefficients (Fsg et Fsr) .....	67
6.3.2. Effet de la rugosité ( $\delta$ ) sur la capacité portante de la semelle du mur .....	68
6.4. Effet de la semelle arrière du mur (Lt) .....	69
6.4.1. Effet de la semelle arrière (Lt) sur les coefficients (Fsg et Fsr) .....	69
6.3.1. Effet de la semelle arrière (Lt) sur la capacité portante de la semelle du mur .....	70
6.4. Conclusion .....	71
Conclusion général .....	72
Référence bibliographique .....	74
Annexe.	

## ***LISTE DES FIGURES***

Figure.1.1 : Mur poids .....	2
Figure.1.2 : Dimensionnement d'un mur poids .....	2
Figure.1.3 : Mur en éléments préfabriqués en béton empilés .....	2
Figure.1.4 : Mur en « T renversé » classique .....	3
Figure.1.5 : Mur a contreforts .....	3
Figure 1.6 : Mur en parois moulées.....	4
Figure 1.7 : exécution d'une paroi moulée .....	4
Figure 1.8 : Les murs en parois berlinoises .....	5
Figure1.9 : Les rideaux de palplanches .....	5
Figure 1.10 : Exemple de mur cloué .....	6
Figure 1.11 : Murs en terre armée .....	6
Figure 1.12 : Domaines d'utilisation de la terre armée dans l'ouvrage ferroviaire (a) et l'ouvrage routier (b).....	7
Figure 1.13 : Eléments d'un mur en Terre Armée.....	7
Figure 1.14 : Mur en pneu sol .....	8
Figure 1.15 : Exemple de géotextile .....	9
Figure 1.16: Exemple de géogrille .....	9
Figure 1.17 : Rouleaux de géomembrane .....	10
Figure 1.18 : Exemples de géomembranes .....	10
Figure 2.1 : (a) Etat de butée et (b) Etat de poussée .....	11
Figure 2.2 : Principe de la poussée et de la butée .....	12
Figure 2.3 : Directions des forces actives et passives en présence de frottement dans le mur .....	12
Figure 2.4 : Force des poussées et butées suivant X et Y avec les bras de levier .....	13
Figure 2.5 : Force des poussées et butées due à la surcharge suivant X et Y avec les bras de levier.....	14
Figure 2.6 : Schéma de calcul de la pression dans un sol multicouche.....	15

Figure 2.7 : Force des poussées et butées due à la cohésion suivant X et Y.....	16
Figure.2.8 : Exemple des surfaces sur lesquelles le mur de soutènement est divisé.....	17
Figure 2.9 : Le centre de gravité du mur et le avec le bras de levier .....	17
Figure 2.10 : Le centre de gravité du remblai .....	17
Figure 2.11 : Schéma de calcul des pressions de poussées dynamiques selon la méthode de Mononobe-Okabe.....	20
Figure 3.1 : Les éléments d'un mur de soutènement.....	24
Figure 3.2 : L'abaque de Pré-dimensionnement d'un mur de soutènement .....	25
Figure 3.3 : Différents modes d'instabilité d'un mur.....	26
Figure 4.1 : Organigramme de Création d'un projet Visual Basic .NET .....	30
Figure 4.2 : L'environnement de développement .....	31
Figure 4.3 : Menu et barre d'outils .....	31
Figure 4.4 : Boîte d'outils .....	32
Figure 4.5 : Fenêtre des propriétés .....	32
Figure 4.6 : Fenêtre de solutions.....	33
Figure 4.7 : Création d'un formulaire.....	33
Figure 4.8 : Définition des propriétés d'un formulaire.....	34
Figure 4.9 : L'environnement Visual basic code.....	34
Figure 4.10. Exemple d'association d'opérateurs logiques et d'opérateurs de comparaison.....	36
Figure 4.11 : Boite de dialogue (MsgBox).....	36
Figure 4.12 : Exemple de La géométrie d'un mur de soutènement.....	37
Figure 4.13 : La fenêtre principale du programme.....	39
Figure 4.14 : Barre de défilement verticale.....	40
Figure 4.15 : La fenêtre projet.....	40
Figure 4.16 : La fenêtre Norme.....	41
Figure 4.17 : La fenêtre Matériaux .....	41

Figure 4.18 : La fenêtre Matériaux.....	41
Figure 4.19 : Exemple de fenêtre sol pour un sol de trois couches.....	42
Figure 4.20 : fenêtre chargement .....	42
Figure 4.21 : fenêtre Terrain .....	42
Figure 4.22 : fenêtre Nappe .....	43
Figure 4.23 : fenêtre Bilan des efforts .....	43
Figure 4.24 : fenêtre Résultante .....	44
Figure 4.25 : fenêtre des vérifications .....	44
Figure 4.26 : fenêtre de la vérification du renversement .....	45
Figure 4.27 : fenêtre de la vérification du renversement .....	45
Figure 4.28 : fenêtre de la capacité portante .....	46
Figure 4.29 : le bouton quitter .....	46
Figure 5.1 : le type de mur utilisé dans notre exemple .....	47
Figure 5.2 : Introduction des données du projet .....	53
Figure 5.3 : La norme .....	53
Figure 5.4 : la déclaration du poids volumique du mur dans le programme .....	54
Figure 5.5 : La géométrie du mur et le choix du type de mur .....	54
Figure 5.6 : les caractéristiques du sol .....	55
Figure 5.7 : La déclaration des charges agissent sur le muret de $(\alpha_1, \alpha_2)$ .....	55
Figure 5.8 : La déclaration des coefficients $\beta_1, \beta_2$ et le calcul du poids du remblai .....	55
Figure 5.9 : la présence de la nappe d'eau .....	56
Figure 5.10 : Le calcul des forces et les coefficients .....	56
Figure 5.11 : Le calcul des bilans des efforts .....	57
Figure 5.12 : La vérification de la stabilité au glissement .....	57
Figure 5.13 : La stabilité au renversement .....	57

Figure 5.14 : La stabilité de la semelle.....	58
Figure 5.15 : Le type de mur utilisé dans notre exemple .....	59
Figure 5.16 : types de mur utilisé dans exmep3 .....	62
Figure 6.1 : la variation de $F_{sg}$ et $F_{sr}$ en fonction du $\beta_1$ .....	66
Figure 6.2 : la variation de $q_{adm}$ et $q_{trans}$ en fonction $\beta_1$ .....	67
Figure 6.3 : la variation de $F_{sg}$ et $F_{sr}$ en fonction $\delta$ .....	68
Figure 6.4 : la variation de $q_{adm}$ et $q_{tran}$ en fonction $\delta$ .....	69
Figure 6.5 : la variation de $F_{sg}$ et $F_{sr}$ en fonction $Lt$ .....	70
Figure 6.6 : la variation de $F_{sg}$ et $F_{sr}$ en fonction $Lt$ .....	71

## ***LISTE DES TABLEAUX***

Tableau 5.1 : les caractéristiques du sol d'exemple1 .....	48
Tableau 5.2 : les résultats de l'exemple1 .....	59
Tableau 5.3 : les caractéristiques du sol d'exemple2 .....	60
Tableau 5.4 : les résultats de l'exemple2 .....	61
Tableau 5.5 : les caractéristiques du sol d'exemple3 .....	63
Tableau 5.6 : les résultats de l'exemple3 .....	64
Tableau 6.1 : les valeurs de $F_{sg}$ et $F_{sr}$ .....	65
Tableau 6.2 : les valeurs de $q_{adm}$ et $q_{trans}$ .....	66
Tableau 6.3 : les valeurs de $F_{sg}$ et $F_{sr}$ en fonction de $\delta$ .....	67
Tableau 6.4 : les valeurs de $q_{adm}$ et $q_{trans}$ .....	68
Tableau 6.5 : les valeurs de $F_{sg}$ et $F_{sr}$ en fonction de $Lt$ .....	69
Tableau 6.6 : les valeurs de $q_{adm}$ et $q_{trans}$ .....	70



## ***LISTE DES SYMBOLES***

$C$  : cohésion.

$\varphi$  : L'angle de frottement interne.

$\gamma$  : est le poids volumique des terres (dépond le comportement du sol).

$\beta$  : L'angle que fait le talus avec l'horizontale.

$\lambda$  : l'angle d'inclinaison du parement sur la verticale.

$\delta$  : L'angle d'inclinaison de la poussée unitaire sur la normale à l'écran dépend de l'état de surface du parement

$p_a^\gamma$  : La pression de poussée des terres.

$K_a$  : Coefficient de poussée des terres.

$F_a^\gamma$  : La force des poussées des terres.

$P_p^\gamma$  : La pression de butée des terres

$F_p^\gamma$  : La force de butée des terres.

$k_p$ : Coefficient de butée des terres.

$p_{aq}$  : La pression de poussé due à la surcharge.

$p_{pq}$  : La pression de butée due à la surcharge.

$F_{aq}$ : La force de poussé due à la surcharge.

$F_{pq}$ : La force de butée due à la surcharge

$K_{aq}$ : Coefficient de poussée due la surcharge.

$K_{pq}$  : Coefficient de butée due à la surcharge

$q$  : La surcharge.

$P_c$  : La pression due à la cohésion.

$F_{ca}$  : La force de poussé due à la cohésion.

$F_{cp}$  : La force de butée due à la cohésion.

$F_{cd}$  : Force de cohésion directe.

$F_{c\_ind}$  : Force de cohésion indirecte.

$F_{aw}$  : Force due à la pression d'eau.

$W$  : Le poids propre du mur.

$\sum S_i$  : La somme des surfaces du mur.

$\gamma_b$  : Poids volumique du béton

$X_G$  : Le point d'application du poids au niveau de la semelle correspond au centre de gravité.

$W_S$  : Le poids propre du remblai.

$P_{Ay}^E$  : La pression de poussée sismique due au poids des terres

$F_{ay}^E$  : La force de poussée sismique.

$K_{ay}^E$  : Le coefficient de poussée sismique.

$\delta_h$  : La composante horizontale de l'accélération sismique.

$\delta_v$  : La composante verticale de l'accélération sismique

$a_v$  : L'accélération sismique verticale.

$a_h$  : L'accélération sismique horizontale.

$g$  : L'accélération de gravité (10m/s<sup>2</sup>)

$P_{py}^A$  : La pression de butée sismique

$F_{py}^A$  : La force de butée sismique.

$K_{py}^E$  : Le coefficient de butée sismique.

$\mu$  : L'inclinaison des composantes horizontale et verticale ( $\delta_h, \delta_v$ ) par rapport à la verticale.

$Z_A^Y$  : Le point d'application de la force de poussée sismique.

$P_{Aq}^E$  : La pression sismique due à la surcharge.

$F_{Aq}^E$  : La force sismique due à la surcharge.

$K_q^E$  : Le coefficient de pression.

$F_{ci}^E$  : La force indirecte sismique due à la cohésion.

$F_{cd}^E$  : La force directe sismique due à la cohésion.

$r_u$  : Le rapport surpression.

$\gamma'_e$  : Le poids volumique déjaugé équivalent.

$\delta_h^e$  : La fraction horizontale équivalente.

$\mu_e$  : L'inclinaison équivalente des composantes horizontale et verticale ( $\delta_h, \delta_v$ ) par rapport à la verticale.

$F_\gamma^E$  : La force sismique effective.

$F_W^S$  : La force hydrostatique.

$F_w^d$  : Force hydrodynamique.

$\gamma_w^e$  : Poids volumique équivalent de l'eau.

H : la hauteur du mur.

$q_{adm}$  : Contrainte admissible du sol.

$F_S$  : Coefficient de sécurité.

$B'$  : La largeur réduite de la semelle.

$q_o$  : Contrainte verticale initiale à la base de la fondation.

$q_l$  : Pression verticale limite.

$N_\gamma, N_q, N_c$ , Sont des facteurs de portance.

e : excentricité de la résultante R par rapport au centre de gravité de la fondation.

$F_s$  : La stabilité au glissement.

$H_r$  : Hauteur du rideau.

$S_{tot}$  : La surface totale du mur.

$S_r$  : La surface du remblai.

$W_r$  : Poids propre du remblai.

$M_r$  : Moment du Poids du remblai.

$R_v$  : La composante verticale des efforts.

$R_H$  : La composante horizontale des efforts.

$\theta$  : L'inclinaison par rapport à la verticale.

X : Le point d'application de la force.

$Ls'$ : La largeur réduite.

$F_{sr}$  : Le coefficient de sécurité au renversement.

$F_{sg}$  : Le coefficient de sécurité au glissement.

## ***INRODUCTION GENERALE***

Les ouvrages de soutènements sont importants au vu de leurs coûts et de leurs fonctions. Leur protection est très recommandée car les dégâts qu'ils peuvent occasionner sont énormes en cas de renversement ou de glissement, c'est pour ça qu'il est demandé un soin particulier depuis la conception jusqu'à la réalisation.

Le calcul automatique dans le domaine du génie civil permet de faciliter le travail d'ingénieur et de faire gagner un temps considérable en effectuant des calculs complexes en un temps quasi instantané automatiquement, procéder à plusieurs calculs parallèlement avec précision grâce aux différents logiciels de calculs.

Visual Basic (VB.Net) est un langage de programmation événementielle de troisième génération ainsi qu'un environnement de développement intégré, créé par Microsoft. Visual Basic est directement dérivé du BASIC et permet le développement rapide d'applications, la création d'interfaces utilisateur graphiques, l'accès aux bases de données.

L'objectif de notre travail est d'élaborer un programme de calcul qui vérifie la stabilité d'un mur de soutènement autostable tel que la stabilité au glissement, au renversement et la vérification de la capacité portante avec une validation de ces derniers par un calcul manuel, ensuite de connaître l'influence des différents paramètres sur la stabilité du mur.

Dans la première partie (la partie bibliographique) débute par le chapitre 1 (les différents types de soutènements), ce chapitre est consacré aux différents types de soutènements avec une définition générale de ce dernier.

Dans le second chapitre (Calcul des pressions sur un soutènement) on va voir les différentes pressions agissantes sur le mur.

Le chapitre 3 est dédié à la vérification de la stabilité d'un soutènement en utilisant la théorie de Coulomb.

D'autre part, la 2<sup>em</sup> partie du mémoire (Etablissement du programme et étude paramétrique) commence à partir du chapitre 4 (Présentation du compilateur VB.net utilisé et établissement de l'organigramme de calcul).

Concernant le chapitre 5 (Etablissement du programme de calcul), nous avons élaboré un programme de calcul en **Vb.Net**, qui vérifie la stabilité d'un mur de soutènement (le glissement, le renversement et la capacité portante de la semelle), suite à ceci, nous avons fait quelques

exemples de calcul validés par un calcul manuel pour la comparaison avec le calcul automatique.

À la fin, le chapitre 6 (Etude paramétrique) fait l'objet d'une étude de l'influence des différents paramètres sur la stabilité d'un mur autostable.

---

# Partie 1

---

*Synthèse Bibliographique*

## **Chapitre 1 : Les différents types de soutènements**

### **1.1 Introduction**

L'ouvrage de soutènements est largement rencontré en génie civil, avec des formes, dimensions et matériaux très variées.

Comme son titre l'indique, ce chapitre est consacré aux différents types de soutènements.

### **1.2 Définition**

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

- ❖ Soit en site montagneux pour protéger les chaussées routières contre le risque d'éboulement ou d'avalanches.
- ❖ Soit, en site urbain pour réduire l'emprise d'un talus naturel, en vue de la construction d'une route, d'un bâtiment ou d'un ouvrage d'art [2].

### **1.3. Les différents types de soutènements [3]**

L'effort de poussée exercé par le massif de terre retenu peut être repris de diverses manières. Trois modes principaux peuvent être distingués :

- ❖ La poussée est reprise par le poids de l'ouvrage soutènement (Les murs poids).
- ❖ La poussée est reprise par encastrement de l'ouvrage de soutènement (Les écrans plans).
- ❖ La poussée est reprise par des ancrages (Les murs composés).

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

- ❖ Les murs de soutènement ;
- ❖ Les écrans de soutènement ;
- ❖ Les systèmes de soutènement composites.

#### **1.3.1. Les murs de soutènement**

##### **1.3.1.1. Les Murs poids**

C'est le 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 remplis de terre,).



Ces murs, relativement étanches, sont la plupart du temps pourvus d'un dispositif de drainage [4].



Figure 1.1 : Mur poids

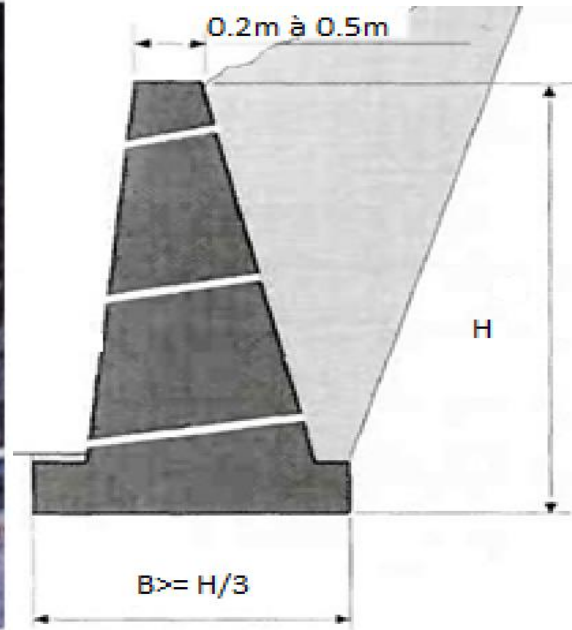


Figure I.2 : Dimensionnement d'un mur poids

### 1.3.1.2. Les murs en éléments préfabriqués

Ce sont des murs en béton armé préfabriqué ou en métal constitués d'éléments superposés. Ce dispositif offre un aspect architectural très intéressant, la face visible n'est pas forcément plane et uniforme certains éléments étant avancés ou reculés les uns par rapport aux autres [3].



Figure 1.3 : Mur en éléments préfabriqués en béton empilés.

### 1.3.1.3. Les murs en béton armé

#### 1.3.1.3.1. Mur en « T renversé » classique

Le mur en « T renversé » est la forme classique pour un mur en béton armé de treillis soudé. Il est économique sans contreforts, tant que sa hauteur n'excède pas 5 à 6 mètres, et peut-être réalisé sur un sol de qualités mécaniques peu élevées. En effet, par rapport à un mur-poids de même hauteur, il engendre des contraintes sur le sol plus faible pour une même largeur de semelle. Dans le cas de murs en déblai (c'est-à-dire réalisés en terrassant un talus) les limitations de volume de terrassement et les difficultés de tenue provisoire des fouilles obligent à réduire le talon et à augmenter le patin [5].

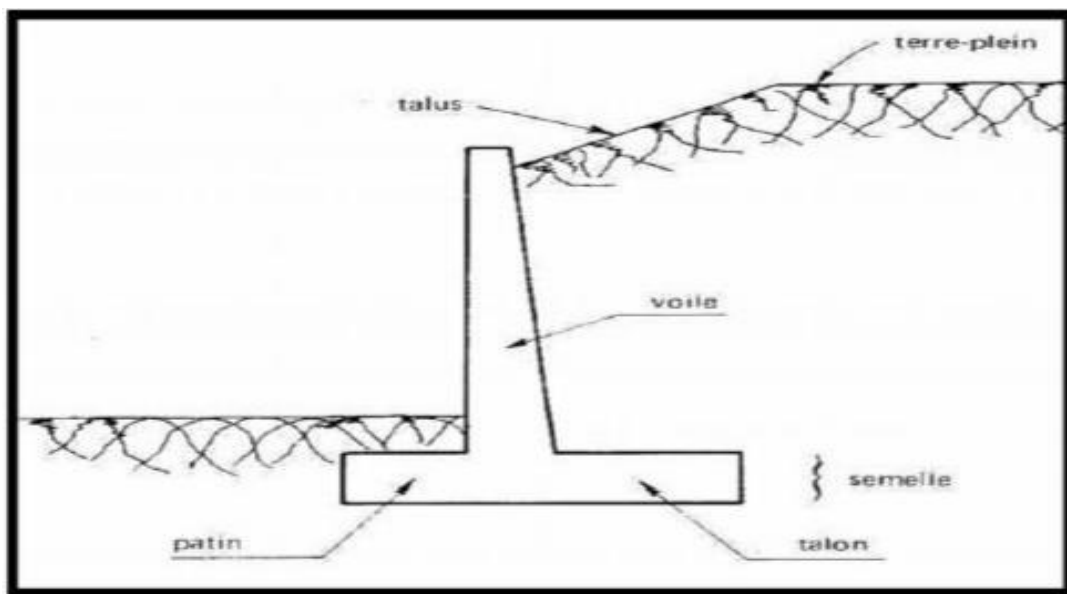


Figure 1.4 : Mur en « T renversé » classique.

#### 1.3.1.3.2. Mur à contreforts

Adopté comme solution quand la hauteur des terres à soutenir est importante ou lorsque le coefficient de pousse est élevé. Très onéreux à cause des complications du calcul de ferrailage et d'exécution des travaux. Les contreforts soulagent le voile en reliant à la semelle de fondation [6].

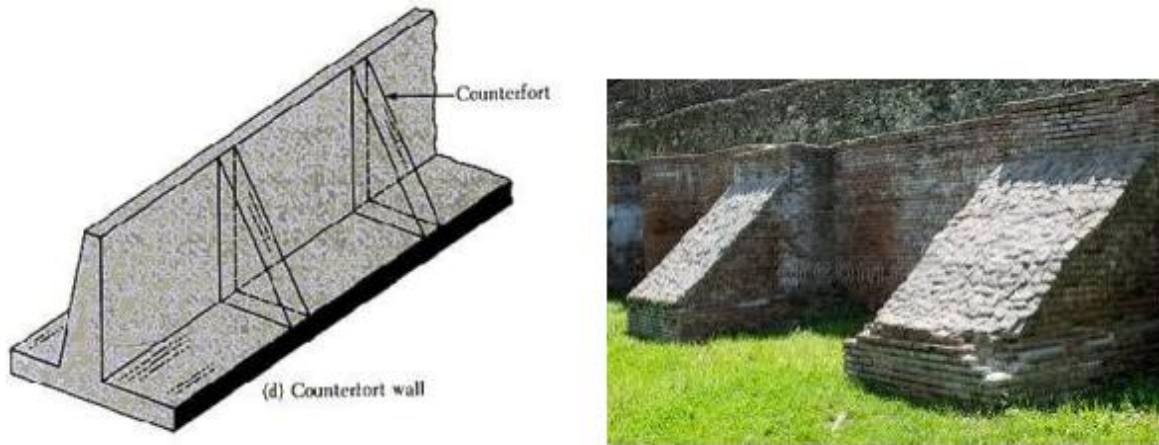


Figure 1.5 : Mur à contreforts.

### 1.3.2 Les écrans de soutènement

#### 1.3.2.1 Les murs en parois moulées



Figure 1.6. mur en parois moulées.

Les murs en parois moulées, 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. Une paroi moulée fonctionne par encastrement total ou partiel dans le sol de fondation [6].

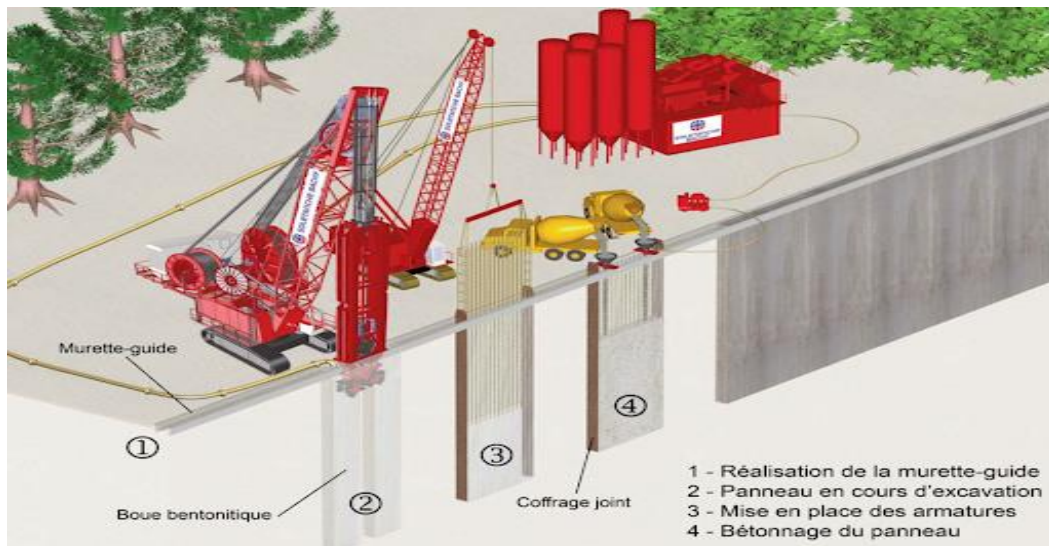


Figure 1.7. exécution d'une paroi moulée

### 1.3.2.2 Les murs en parois berlinoises

Dans son originalité, qui s'est développée lors de la construction du métro de Berlin, au début du 20ème siècle, il s'agit de profils en acier battus dans le sol et la surface entre axes est couverte par des madriers en bois généralement horizontaux.

Les murs à la berlinoise se caractérisent par une grande facilité d'adaptation aux différentes situations géologiques rencontrées (canalisation, ou conduite d'eau,...etc.) parce que les distances entre les étais (profilés) peuvent être adoptés aux obstacles rencontrés pendant l'excavation et la méthode de remplissage (revêtement) de l'espace entre les étais peut être varié. C'est pour cela, les murs à la berlinoise sont utilisées de nos jours de plus en plus. Les parois sont généralement fixées contre le sol avec des cales ou d'autres moyens identiques.

L'utilisation des parois berlinoises est nécessaire lors des constructions dans des emplacements restreints. En effet, elles démontrent toute leur efficacité lorsque des fouilles sont irréalisables en raison de talus à proximité immédiate d'ouvrages existants ou de terrains privés. Elles sont le plus souvent utilisées en milieu urbain où la surface du chantier coïncide souvent à la surface de l'ouvrage à réaliser.

La paroi berlinoise est généralement un ouvrage provisoire, mais peut devenir définitif selon l'utilité. Les avantages principaux sont la rapidité d'exécution et son retour sur investissement [3].



Figure 1.8 : Les murs en parois berlinoises

### 1.3.2.3 Les rideaux de palplanches

Les rideaux de palplanches sont constitués de palplanches métalliques en général, emboîtées les unes dans les autres et battues dans le sol de fondation, pour former un écran vertical, le plus souvent rectiligne, servant de soutènement à un massif de sol [7].

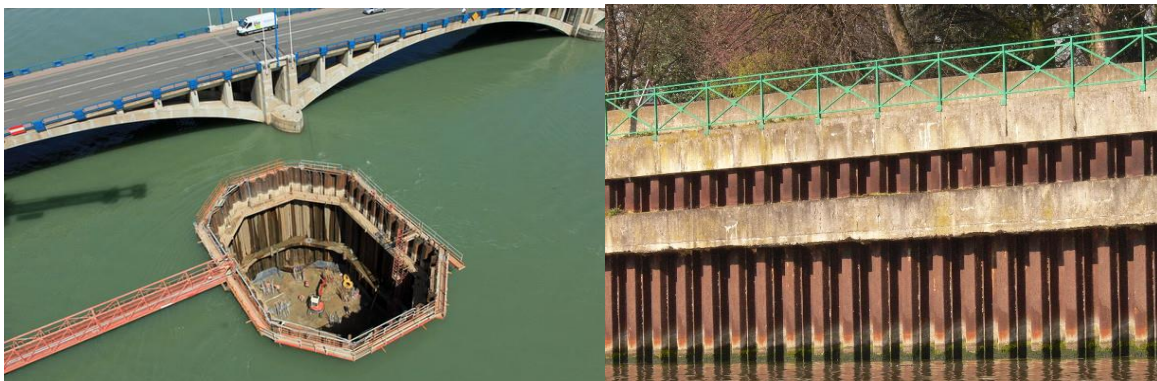


Figure 1.9 : Les rideaux de palplanches.

### 1.3.3 Les systèmes de soutènement composites

#### 1.3.3.1 Les murs cloués en béton

La technologie de construction des murs cloués consiste à renforcer un sol en déblai, au fur et à mesure de son excavation, par la mise en place de barres passives, peu inclinées sur l'horizontale, travaillant essentiellement à la traction. Ces barres peuvent également travailler partiellement à la flexion et au cisaillement. C'est par le biais du frottement qui s'exerce entre le sol et les barres que ces dernières peuvent se mettre en traction et tenir la structure.

On construit ainsi progressivement et de haut en bas un massif de sol renforcé. Pour éviter que la terre ne s'écroule entre les barres, on doit placer un parement généralement constitué d'un treillis soudé et d'un béton projeté. Ce parement peut être vertical, incliné à des angles très variables ou constitué de redans. Le béton n'a ici aucun rôle de soutien de la structure. Il permet

de protéger la terre de l'érosion et empêche des morceaux de terres de tomber. De nos jours c'est une technique extrêmement répandue car le comportement des ouvrages est satisfaisant et le coût de la mise en œuvre est inférieur à celui des murs en L pour la même hauteur de mur [3].



**Figure 1.10** : Exemple de mur cloué

### **1.3.3.2 Les murs en terre armée**

La terre armée est une technique relativement récente. Le principe consiste à associer à un sol pulvérulent et un renforcement (armature) résistant à l'attraction.

L'ouvrage est terminé sur sa face vue par un parement destiné à retenir les grains de sol entre les lits d'armatures. Les principaux avantages de la terre armée résident dans son économie, son intégration aux ouvrages en terre et surtout dans sa grande déformabilité qui lui permet de s'adapter sans risque à des mouvements de terre important [5].



**Figure 1.11** : Murs en terre armée.

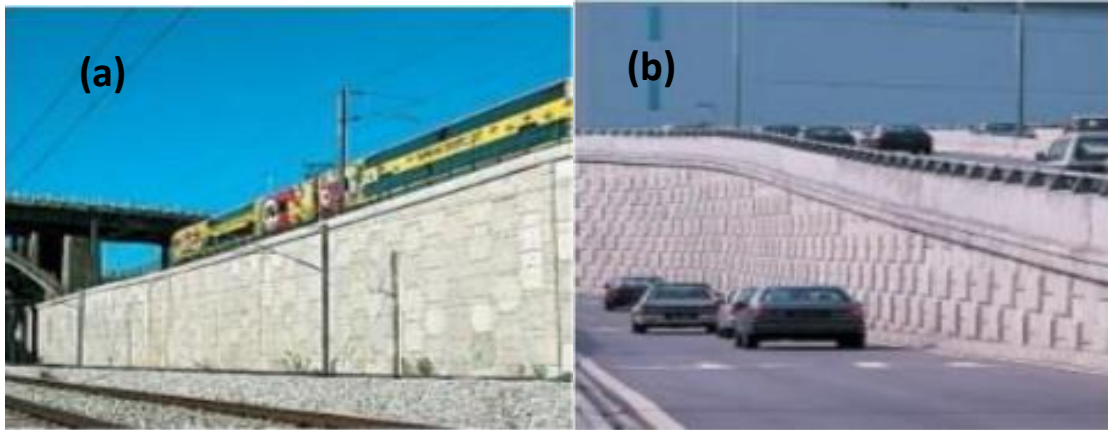


Figure 1.12 : Domaines d'utilisation de la terre armée dans l'ouvrage ferroviaire (a) et l'ouvrage routier (b)

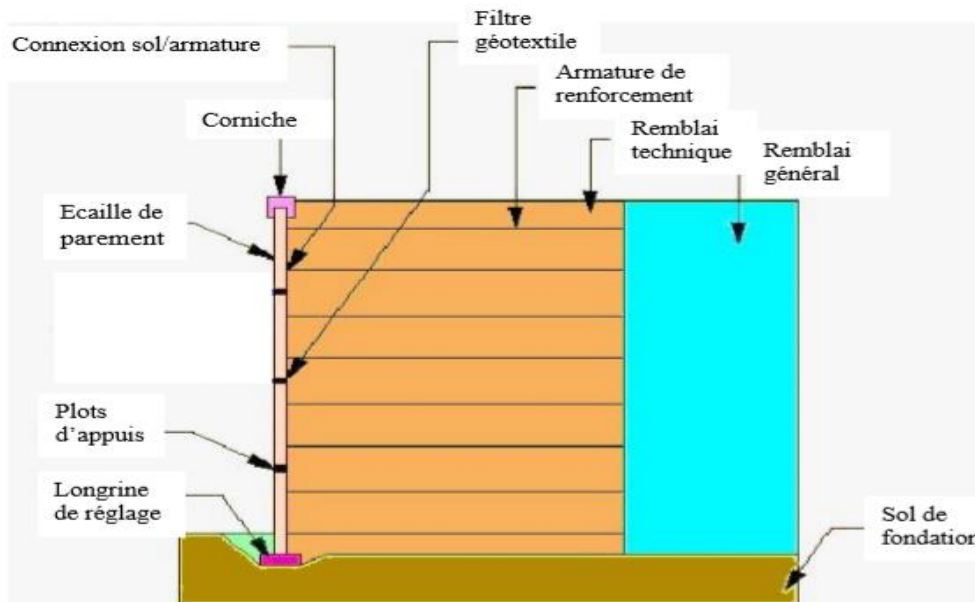


Figure 1.13 : Eléments d'un mur en Terre Armée.

### 1.3.3.3 Les pneus sol

Un mur de soutènement en Pneu sol est constitué :

- ❖ De pneus : (pneumatiques ou éléments de pneumatique qu'és disposés linéairement ou en nappes selon des lits horizontaux).
- ❖ De remblai remplissant les vides laissés et séparant les lits de pneus, ne présentant pas des caractéristiques géotechniques contraignantes,
- ❖ De parements préfabriqués en béton protégeant les Pneus vus, empêchant le remblai de s'ébouler entre les lits de pneus et pouvant jouer un rôle architectural : s'il n'y a pas de parements en béton comme dans le cas des raidissements de pente (pente d 1 /2 ou 1 /3), les pneus vus ne jouent aucun rôle mécanique [3].



Figure 1.14 : Mur en pneu sol

#### 1.3.3.4 Les géosynthétiques

Ce sont des produits dont au moins l'un des constituants est à base de polymère synthétique ou naturel, se présentant sous forme de nappe, de bande ou de structure tridimensionnelle, utilisé en contact avec le sol ou avec d'autres matériaux dans les domaines de la géotechnique et du génie civil. Ces produits sont utilisés dans les domaines tels que la construction routière, les travaux hydrauliques, les chemins de fer, les terrains d'aviation, etc. Les géosynthétiques peuvent être produits à partir de différents polymères, polyester (PET) polyvinyle alcool (PVA), polypropylène (PP). L'avantage du PET est un faible allongement lié à une grande résistance à la traction (haute ténacité). L'avantage du PVA est un allongement extrêmement bas et une excellente résistance chimique.

L'avantage du PP est aussi très bonne résistance chimique avec un allongement acceptable.

Ils se distinguent en trois familles principales : les géotextiles, les géomembranes et les géogrilles [5].

##### 1.3.3.4.1. Les géotextiles

Sont des produits tissés, non tissés, ou tricotés, perméables, fabriqués à base de polymères (polypropylènes, polyesters, polyéthylènes) et utilisés dans les domaines de la géotechnique et du génie civil. La fonction du géotextile dans le sol peut être la séparation, la filtration, et aussi le renforcement. Géotextiles non tissés : la fabrication consiste au filage en continu des fibres, à leur étirement, avant de les napper et de les lier par aiguilletage ; Géotextiles tissés : leurs bandelettes en polypropylène sont fabriquées par un procédé d'extrusion, elles sont ensuite tissées [7].





**Figure 1.15 :** Exemple de géotextile.

#### 1.3.3.4.2. Les géogrilles

Les géogrilles sont des géosynthétiques dont la fonction est le renforcement des sols. Une géogrille est une structure plane à base de polymère, constituée par un réseau ouvert et régulier d'éléments résistants à la traction et pouvant être assemblés par extrusion, par collage ou par entrelacement, dont les ouvertures ont des dimensions supérieures à celles des constituants et permettant le confinement du sol [3].

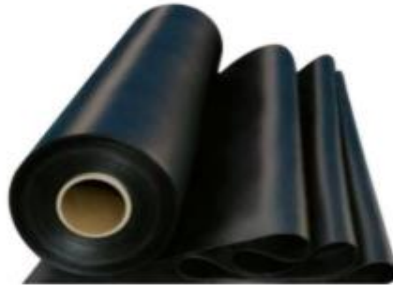


**Figure 1.16:** Exemple de géogrille.

#### 1.3.3.4.3. Les géomembranes

Les géomembranes sont des produits adaptés au génie civil, minces, souples, continus, étanches aux liquides mêmes sous des sollicitations de service. Dans l'état actuel des techniques, ni les produits de faible épaisseur fonctionnelle (inférieure à 1mm), ni les produits dont l'étanchéité est assurée uniquement par un matériau argileux, ne sont considérés comme des géomembranes.

Elles sont généralement fabriquées en polyéthylène, haute et basse densités (HDPE, VFPE), en bitume élastomère, en polypropylène (PP) ou en chlorure de polyvinyle (PVC).



**Figure 1.17 :** Rouleaux de géomembrane.

Elles sont généralement stockées sous forme de rouleaux de longueurs et largeurs différentes, pouvant aller de 1m par 10m pour les géomembranes bitumineuses à 7,5m par 200m pour les géomembranes en polyéthylène par exemple.

Elles sont utilisées en génie civil, bâtiment, agriculture, environnement et industries, en génie civil elles font partie de la famille des géosynthétiques.

Elles sont souvent thermo-soudables pour réaliser les joints dans des conditions de qualité et de fiabilité optimales [5].



**Figure 1.18 :** Exemples de géomembranes

#### **1.4. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons cité les différents types de soutènements avec leur conception, leur utilisation et leurs matériaux de construction utilisés.

Dans notre étude nous nous sommes intéressées aux murs de soutènements autostables en béton armé. Nous verrons ça en détail dans les chapitres suivants.

## Chapitre 2 : Calcul des pressions sur un soutènement

### 2.1. Introduction

Tous les ouvrages de soutènement qui doivent résister à la pression latérale des terres nécessitent la détermination de la répartition des contraintes auxquelles ils sont soumis ou qu'ils mobilisent.

Ces ouvrages de soutènement concernent les murs (mur-poids, murs cantilevers, murs cellulaires...) et les écrans (parois moulées, parois berlinoises et dérivées, rideaux de palplanches...). Suivant le problème traité, on fera un calcul à la rupture (sol dans un comportement rigide-plastique) ou un calcul en déplacement (sol dans un comportement élasto-plastique, ou autre...).

En zone sismique les risques sont amplifiés et la préservation de ces ouvrages commence par une bonne conception et donc un bon calcul [8].

### 2.2. Murs de soutènements autostables en béton armé

#### 2.2.1. Définition

Ils sont constitués d'un voile encastré sur semelle. En coupe, ils ont une forme de L ou de T renversé. Certaines variantes de conception existent :

- Avec contreforts avant ou arrière ;
- En console ;
- Sur pieux...

Ces murs peuvent être coulés en place, totalement ou partiellement préfabriqués (voile ou parement du voile) [13].

### 2.3. Les pressions des terres

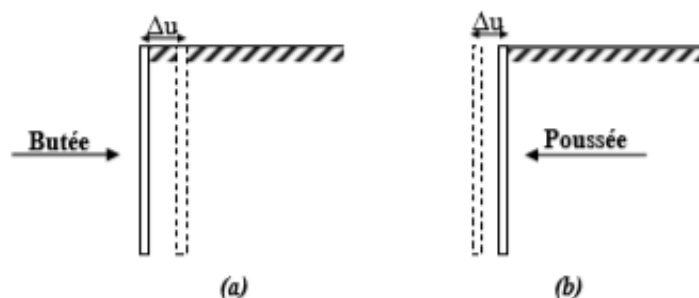


Figure 2.1 : (a) Etat de butée et (b) Etat de poussée.

❖ 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 (Fig2.1b).

❖ Les pressions des terres passives (butée)

Les pressions des terres passives (butée) se développent lorsque le mur de soutènement se déplace vers le sol, produisant ainsi des déformations latérales de compression dans le sol (Fig. 2.1a) [10].

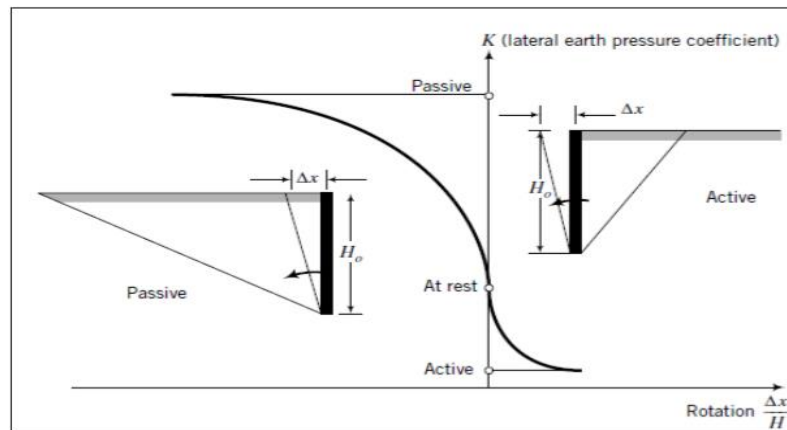


Figure 2.2 : Principe de la poussée et de la butée [16]

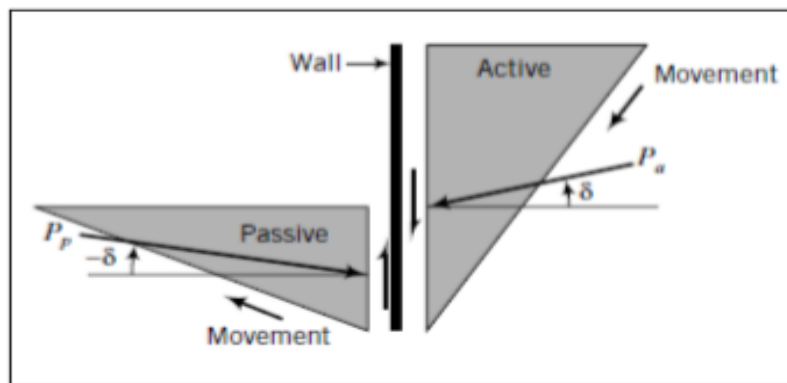


Figure 2.3 : Directions des forces actives et passives en présence de frottement dans le mur [16]

2.3.1. Le calcul statique

Les pressions agissant sur les murs non fixes dans un sol frottant ( $\varphi \neq 0$ ), sont évaluées en état d'équilibre limite du sol, par superposition approchée des effets séparés du poids des terres ( $P_\gamma$ ), de la cohésion du sol ( $P_c$ ), ainsi que celui de la surcharge ( $P_q$ ) : [12]

$$\vec{P} = \vec{P}_\gamma + \vec{P}_c + \vec{P}_q$$

Plusieurs méthodes sont utilisées pour déterminer la pression  $P_\gamma$  due au poids des terres dans un sol non chargé, les plus utilisées sont celles de Coulomb (1776), Rankine (1860), et Boussinesq (1882). On se limite à l'exposé de la première méthode tel que : [12]

$$P^\gamma = K_\gamma \gamma H$$

### 2.3.1.1. La pression de poussé

La pression de poussée des terres est donnée par :

$$P_a^\gamma = K_a^\gamma \gamma H$$

La force des poussées des terres est donnée par :

$$F_a^\gamma = \frac{1}{2} \gamma_i K_a (H^2)$$

Avec :

$K_a$  : coefficient de poussée des terres, calculé à partir de la théorie de Coulomb, comme suit [14]:

$$K_a = \frac{\cos^2(\varphi - \lambda_1)}{\cos^2(\lambda_1) \times \cos(\delta + \lambda_1) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta)}{\cos(\delta + \lambda_1) \cos(\beta - \lambda_1)}} \right]^2}$$

### 2.3.1.2. La pression de butée

La pression de butée des terres est donnée par :

$$P_p^\gamma = K_p^\gamma \gamma P_{fe}$$

La force de butée des terres est donnée par :

$$F_p^\gamma = \frac{1}{2} \gamma_{but} K_p (P_{fe}^2)$$

Avec :

$K_p$  : Coefficient de butée des terres, calculé à partir de la théorie de Coulomb, comme suit [9] :

$$K_p = \frac{\cos^2(\varphi + \lambda_2)}{\cos^2(\lambda_2) \times \cos(\delta - \lambda_2) \left[ 1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi + \beta)}{\cos(\delta - \lambda_2) \cos(\beta - \lambda_2)}} \right]^2}$$

La figure si dessous montre les Force des poussées et butées suivante X et Y avec les bras de levier ;

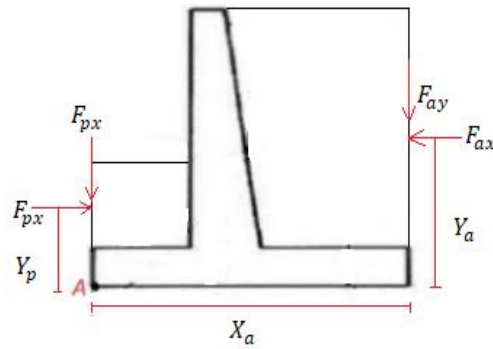


Figure 2.4: Force des poussées et butées suivant X et Y avec les bras de levier.

### 2.3.1.3. Pression due à la surcharge

La présence d'une surcharge  $q$  sur la surface du sol induit une poussée des terres supplémentaire. Les contraintes de poussée dues à l'influence de cette surcharge ont une valeur constante tout le long du parement, leur résultante est en conséquence le produit de la contrainte par le long du parement [16].

La pression de poussée/butée due à la surcharge  $q_a/q_p$  sont appliquées au milieu du parement amont/aval correspondant respectivement à la poussée/butée, leur formules sont données par [13]:

$$p_{aq} = K_{aq}q_a \quad P_{pq} = K_{pq}q_p$$

La force de poussée/butée due à la surcharge donnée par :

$$F_{aq} = K_{aq} q_a H ; \quad F_{pq} = K_q q_p p_{fe}$$

Avec :

$K_q$  : Coefficient de poussée/butée de la surcharge [14]

$$K_q = \frac{\cos \delta_{\pm} \sin \varphi_1 \cos \Delta_2}{\cos \alpha_{\pm} \sin \varphi_2 \cos \Delta_1} \exp(\pm 2\psi \tan \varphi_1)$$

Avec :

$$\psi = \omega - \frac{\pi}{2} + \frac{\Delta_1 + \Delta_2 + \alpha_{\pm} \pm \delta}{2} \text{ (En radian)}$$

$$\omega = \frac{\pi}{2} - \lambda + \beta$$

$$\sin \Delta_1 = \frac{\sin \alpha}{\sin \varphi} \quad \sin \Delta_2 = \frac{\sin \delta}{\sin \varphi}$$

Les signes supérieur et inférieur correspondent respectivement a poussé et à la butée.

Les moments des forces de poussée et de butée due à la surcharge par rapport au point A sont donnés comme suit :

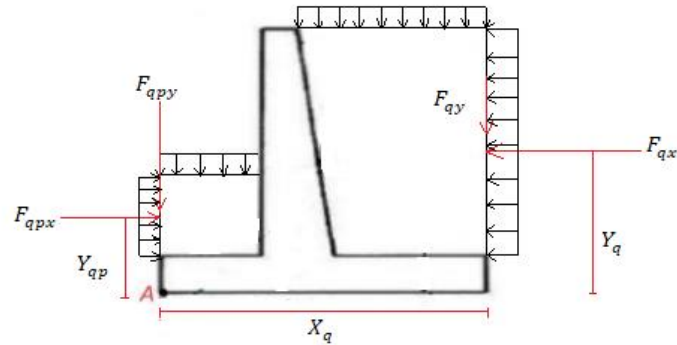


Figure 2.5 : Force des poussées et butées due à la surcharge suivant X et Y avec les bras de levier.

Les murs que nous avons programmés résistent à un remblai multicouche tel que le calcul des pressions dans ce dernier s'effectue en tenant compte de la règle suivante : lors de l'étude des pressions d'une couche, les couches sus-jacentes agissent comme une surcharge uniforme au toit de cette couche. La figure 2.6 illustre un exemple d'application de cette règle. Les couches sus-jacentes à la couche i agissent comme une surcharge  $q'$  au niveau AA', égale à [9]:

$$q' = q + \sum_{j < i} \gamma_j H_j$$

La force de poussée due à cette surcharge sur la paroi AB est:

$$F_q = K_p(\varphi_i) q' \overline{AB} = K_q(\varphi_i) q' \frac{H_i}{\cos \lambda}$$

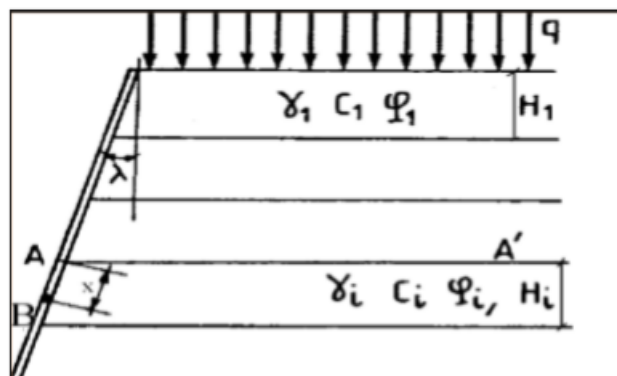


Figure 2.6 : Schéma de calcul de la pression dans un sol multicouche

### 2.3.1.4. La pression due à la cohésion

Les matériaux de remblai recommandés pour la construction des ouvrages sont en principe dépourvus de cohésion. L'introduction d'une cohésion non nulle est cependant nécessaire pour des raisons pratiques et réalisation de calcul. Elle peut améliorer la convergence numérique. Cette cohésion est prise en compte à travers une surcharge directe appliquée normalement au

parement amont/aval du mur et une surcharge indirecte appliquée à la surface du remblai dont la pression induite sur le parement amont/aval est inclinée de ( $\delta$ ) correspondent respectivement à la poussée et à la butée, la formule générale de la pression due à la cohésion est donnée par [9] :

$$P_c = \pm \left[ \frac{c}{\tan \varphi} (1 - K_q \cdot \cos \delta) \right]$$

La force de poussée/butée due aux cohésions est donnée par :

$$F_c = \pm \left[ \frac{c}{\tan \varphi} (1 - K_q \cdot \cos \delta) \right] H$$

Les signes plus et moins correspondent respectivement à la poussée et à la butée.

D'où :  $F_{cd} = \frac{c}{\tan \varphi} H$  ;  $F_{c\_ind} = \frac{c}{\tan \varphi} H K_q$

$F_{cd}$  Appliqué à H/2 de direction normale au mur.

$F_{c\_ind}$  Appliqué à H/2 de direction inclinée de  $\delta$ .

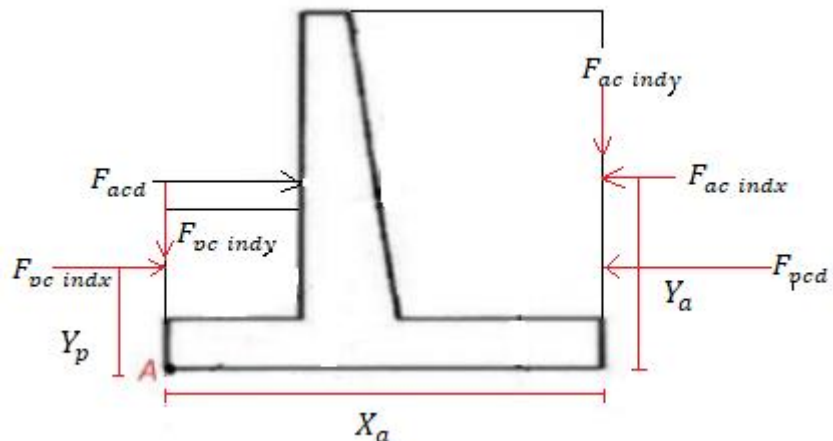


Figure 2.7 : Force des poussées et butées due à la cohésion suivant X et Y.

### 2.3.2. Poids propre du mur

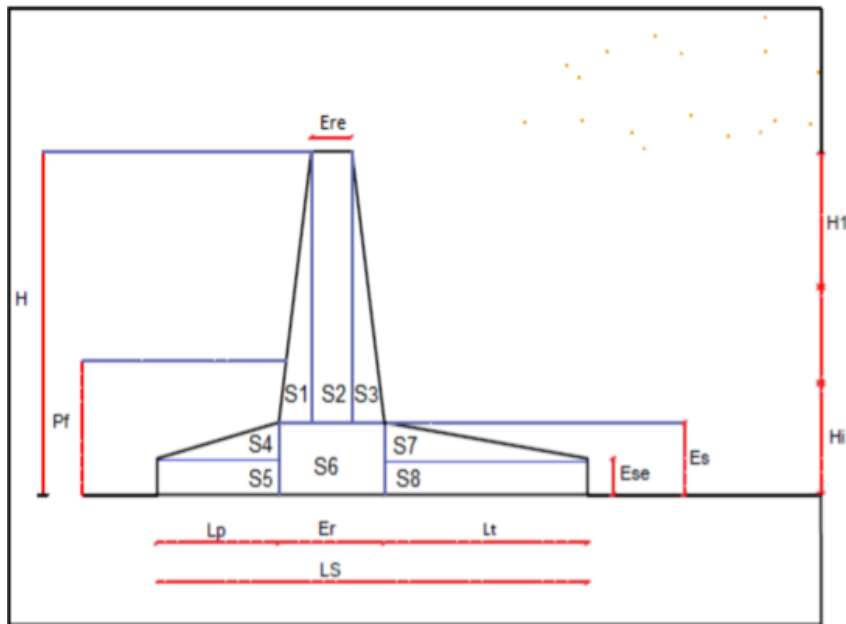
Le poids propre du mur est déterminé comme suit :

$$W = \sum S_i \times \gamma_b$$

Avec :

- $\sum S_i$ : la somme des surfaces définies sur la figure 2.8.
- $\gamma_b$  : Poids volumique du béton égal à 25kN/m<sup>3</sup>.





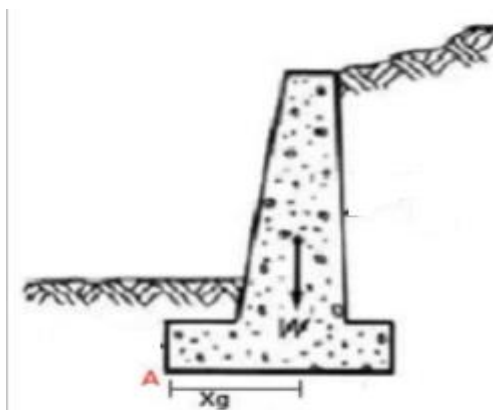
**Figure 2.8 :** exemple des surfaces sur lesquelles le mur de soutènement est divisé

Le point d'application du poids au niveau de la semelle correspond au centre de gravité du mur dans le repère défini sur la Figure 2.9.

$$X_G = \frac{\sum S_i \times X_i}{\sum S_i}$$

Le moment de forces du poids du mur par rapport au point A est donné par :

$$M_W = W \cdot X_G$$



**Figure 2.9 :** Le centre de gravité du mur et le avec le bras de levier

### 2.3.3. Poids propre du remblai

Le poids propre du remblai est déterminé comme suit :

$$W_s = S_{sol} \cdot \gamma_{sol}$$

Le point d'application du poids du remblai correspond au centre de gravité du remblai dans le repère défini sur la Figure 2.10

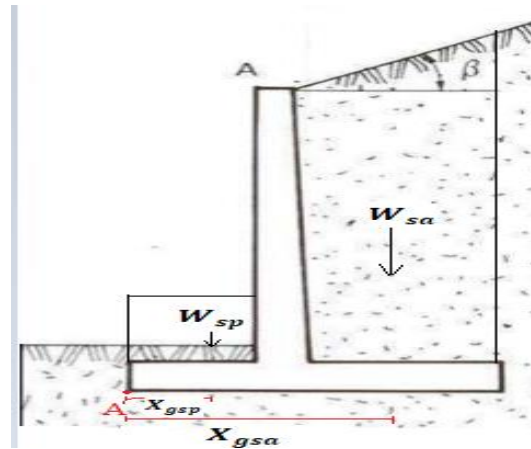


Figure 2.10 : Le centre de gravité du remblai

### 2.3.4. La pression interstitielle

Selon le principe des contraintes effective de Terzaghi, le vecteur de pression  $\mathbf{P}$  du au poids des terres est la somme vectorielle de la pression effective  $P'_\gamma$  des grains et celle de l'eau  $\mathbf{u}$ . Cette dernière, étant normale à la surface de contact sol/mur, ne doit pas s'ajouter scalairement à la pression  $\mathbf{P}'$  qui est en générale inclinée de  $\delta$ .

La pression donnée par :

$$P_\gamma = P'_\gamma + u$$

La force donné par :

$$F_\gamma = \frac{1}{2} K_\gamma (\gamma' + i\gamma_w) h^2$$

Selon Schlosser (1994), un remblai horizontal totalement saturé poussé environ 2.5 fois plus que le même remblai sec. C'est pour cette raison, le souci d'économie dans le dimensionnement d'une part, et de sécurité d'autre part font qu'il faut veiller à annuler la part la pression interstitielle ans les forces de poussée. Les murs de soutènement sont ainsi toujours conçus avec un système de drainage qui permet d'annuler les pressions d'eau sur le mur [14].

## 2.4 Le calcul statique équivalent

### 2.4.1 Généralités sur les effets des séismes

L'analyse des mécanismes et des caractéristiques d'un séisme montre que l'action sismique est avant tout définie par un mouvement de sol. Ce mouvement peut être caractérisé en termes de déplacement, vitesse ou accélération. Chacun de ces paramètres fluctue avec le temps et suivant toutes les directions de l'espace. L'action sismique peut également être définie par une définition fréquentielle de cette action. Un mouvement de terre est le phénomène géodynamique le plus répandue, il se traduit en surface par des vibrations du sol plus ou moins violentes et destructrices. Il provient de la fracturation des roches en profondeur provoquant des ondes sismiques naissant lors de déplacements saccadés de la croûte terrestre dans une zone de rupture (faille active).

Les tremblements de terre sont couramment provoqués par des ondes sismiques naissant lors de déplacements saccadés de la croûte terrestre dans une zone de rupture (faille active). L'endroit où se produit le séisme est appelé foyer ou hypocentre, le point de la surface du sol directement au-dessus est appelé épicentre. Dans l'état actuel, il n'est pas possible de prédire l'instant et le lieu où un séisme va se produire, mais il est possible d'identifier les zones à haut [14].

#### 2.4.2. Méthodes statiques équivalentes

Le principe est le remplacer les forces dynamique causée par le séisme par des forces statiques volumique (force de repos) équivalente [12].

##### 2.4.2.1. Méthode de Mononobe-Okhabe

###### A) Cas d'un sol sec

La pression de poussé sismique due au poids des terres est donné par [12] :

$$P_{Ay}^E = \frac{1}{2} K_{Ay}^E (1 + \delta_v) \gamma H$$

La force de poussé sismique est donné par [12]:

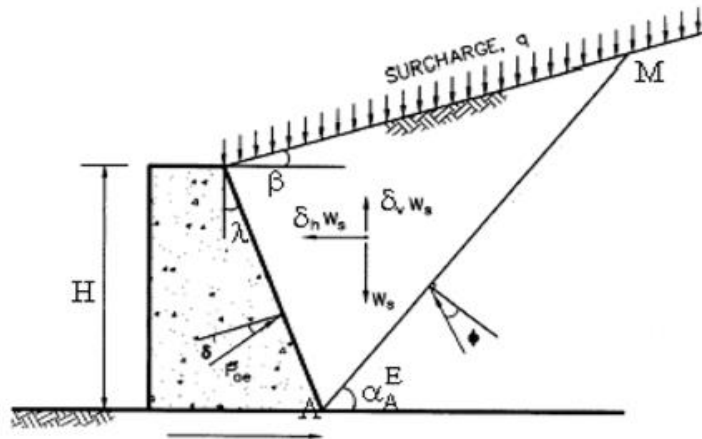
$$F_{Ay}^E = \frac{1}{2} K_{Ay}^E (1 + \delta_v) \gamma H^2$$

Le coefficient de poussée sismique est donné par [12] :

$$K_{Ay}^E = \frac{\cos^2(\varphi - \lambda_1 - \mu)}{\cos \mu \cos^2(\lambda_1) \times \cos(\delta + \lambda_1 + \mu) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta - \mu)}{\cos(\delta + \lambda_1 + \mu) \cos(\beta - \lambda_1)}} \right]^2}$$

Avec :

$$\delta_h = \frac{a_h}{g} \qquad \delta_v = \frac{a_v}{g}$$



**Figure 2.11** : Schéma de calcul des pressions de poussées dynamiques selon la méthode de Mononobe-Okabe

En cas de butée limite, la pression de butée sismique  $P_{PY}^E$  due au poids des terres est donnée par [12] :

$$P_{PY}^A = \frac{1}{2} K_{pY}^E (1 + \delta_v) \gamma H$$

La force de butée sismique  $F_{PY}^A$  due au poids des terres est donnée par [12] :

$$F_{PY}^A = \frac{1}{2} K_{pY}^E (1 + \delta_v) \gamma H^2$$

Le coefficient de butée sismique est donné par [12] :

$$K_{pY}^E = \frac{\cos^2 (\varphi + \lambda_1 - \mu)}{\cos \mu \cos^2 (\lambda_1) \times \cos(\delta - \lambda_1 + \mu) \left[ 1 + \frac{\sin (\varphi + \delta) \sin (\varphi + \beta - \mu)}{\cos(\delta - \lambda_1 + \mu) \cos(\beta - \lambda_1)} \right]^2}$$

La combinaison des forces volumiques dues au poids et aux forces statiques équivalentes donne un vecteur poids volumique équivalent  $\gamma_E$ , ayant pour composantes horizontale et verticale  $\delta_h \gamma$  et  $(1 + \delta_v) \gamma$  respectivement, et incliné par rapport à la verticale de [12] :

$$\mu = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\delta_h}{1 + \delta_v}$$

Une procédure simplifiée de détermination du point d'application de la force de poussée sismique, est de supposer que l'incrément  $\Delta F_A^Y$ , différence entre les forces sismique et statique, soit  $F_{AY}^E - F_A^Y$ , s'applique à  $0.6 H$  à partir de la base, ce qui permet de déduire la profondeur  $Z_A^Y$  de ce point comme suit [12]:

$$Z_A^Y = H - \frac{F_{A2}^Y H + \Delta F_A^Y (0.6H)}{F_{AY}^E}$$

### B)- Cas d'une surcharge uniforme

En présence d'une surcharge uniforme  $q$  d'obliquité quelconque, une force additionnelle  $F_q$  s'ajoute  $F_{AY}^E$  à la force due au poids du sol, telle que :

La pression sismique due à la surcharge est donnée par [12]:

$$P_{Aq}^E = qK_q^E$$

La force sismique due à la surcharge est [12]:

$$F_{Aq}^E = qK_q^E H$$

Le coefficient de pression  $K_q^E$  donné par [12]:

$$K_q^E \approx K_Y^E \frac{\cos^2 \lambda}{\cos(\beta - \lambda)} (1 + \delta_h)$$

### C)- Cas d'un sol cohérent

La prise en compte de la cohésion du sol se fait à la base du théorème des états correspondants, en considérant un massif pulvérulent équivalent ayant le même angle de frottement et soumis, en plus du chargement du sol cohérent, à une pression d'intensité  $C/\text{tg}\varphi$  normale à toute facette. Autrement dit, à la surface du remblai est appliquée une surcharge uniforme  $q=C/\text{tg}\varphi$  induisant une force  $F_{ci}^E$  inclinée de  $\delta$  et appliquée au milieu du mur [12] :

$$F_{ci}^E = K_q^E \frac{C}{\tan \varphi} \frac{H}{\cos \lambda}$$

En outre, à la surface de contact sol/mur, une force directe  $F_{cd}^E$  normale ( $\delta=0$ ) et appliquée au milieu de cette surface, est donnée par [12] :

$$F_{cd}^E = \frac{C}{\tan \varphi} \frac{H}{\cos \lambda}$$

### D)- Cas d'un sol saturé

En présence d'une nappe d'eau, l'équilibre des forces est modifié et le comportement sismique du mur dépend entre autres de la nature du matériau sol et des possibilités de drainage de la nappe d'eau. En cas où la sollicitation sismique engendre de surpressions interstitielles, les massifs pulvérulents lâches ont tendance à se liquéfier à cause de la dégradation de la résistance

au cisaillement au fur et à mesure du cumul des surpressions interstitielles. La liquéfaction peut être totale, avec perte complète de la résistance au cisaillement, ou partielle. La surpression interstitielle est définie, en un temps  $t$  au cours de la sollicitation sismique et en un point donné du sol, par le rapport de surpression [12] :

$$r_u = \frac{\Delta U(Z,t)}{\sigma v'_0(z)}$$

Le rapport  $r_u$  varie entre 0 et 1, respectivement en absence de liquéfaction et en cas de liquéfaction totale.

La force sismique effective agissant sur les grains se calcule à partir d'un poids volumique déjaugé équivalent  $\gamma'_e$  en fonction des possibilités de drainage et de génération de surpression interstitielle, comme suit [12] :

$$F'_\gamma{}^E = \frac{1}{2} K_\gamma^E (1 + \delta_v) \gamma'_e H^2$$

Dans cette expression, le coefficient de poussée/butée sismique est calculé en fonction d'une fraction horizontale équivalente  $\delta_h^e$  et de l'angle équivalent  $\mu_e$ . Selon le principe des contraintes effectives de Terzaghi, la force sismique totale  $F_\gamma^E$  est la somme vectorielle de  $F'_\gamma{}^E$  et  $F_w^E$  [12]:

$$\overrightarrow{F_\gamma^E} = \overrightarrow{F'_\gamma{}^E} + \overrightarrow{F_w^E} = \overrightarrow{F'_\gamma{}^E} + \overrightarrow{F_w^S}$$

En cas de génération de surpression interstitielle, on introduit un poids volumique équivalent de l'eau, soit  $\gamma_w^E$ , pour l'évaluation d'une force hydrostatique  $F_w^S$  intégrant aussi bien les pressions hydrostatiques initiales que les surpressions interstitielles [12] :

$$\gamma_w^E = \gamma_w + r_u \gamma'$$

Avec ; 
$$F_w^S = \frac{1}{2} \gamma_w^E H^2$$

En présence de matériaux pulvérulents saturés de grande perméabilité, tels que les sables moyens à grossiers, les graviers, les galets et les enrochements, les particules du sol peuvent se déplacer par rapport à l'eau, et avoir ainsi une accélération différente. On parle ainsi des sols non restreints (ou ouverts). Outre la force hydrostatique exercée préalablement par l'eau sur le sol, soit [12] :

$$F_w^S = \frac{1}{2} \gamma_w H^2$$

l'écoulement de l'eau se traduit par une force hydrodynamique  $F_w^d$ , appliquée normalement au mur à  $0.4H$  par rapport à la base du mur, et évaluée selon Westerggard (1931) comme suit [12] :

$$F_w^d = \frac{7}{12} \delta_h \gamma_w H^2_w$$

La force sismique totale  $F_\gamma^E$  est la somme vectorielle de  $F_\gamma^{E'}$  et  $F_w^E$  [12] :

$$\overrightarrow{F_\gamma^E} = \overrightarrow{F_\gamma^{E'}} + \overrightarrow{F_w^E} = \overrightarrow{F_\gamma^{E'}} + \overrightarrow{F_w^s} + \overrightarrow{F_w^d}$$

## 2.5. Conclusion

La théorie de Coulomb peut être utilisée pour prédire les poussées du sol sur les murs avec des remblais de pentes irrégulières, des charges concentrées sur la surface du remblai et des forces d'infiltration. En considérant le sol au-dessus d'un plan de rupture potentiel comme corps libre et en incluant les forces dues aux charges concentrées, et ainsi de suite, la grandeur de la résultante de poussée peut être facilement calculée.

Le calcul de mur de soutènement est basé sur plusieurs paramètres qui ont de l'influence sur le résultat. Ce calcul est établi sur plusieurs étapes, premièrement le calcul des pressions qui agissent sur le mur et par la suite il est nécessaire de vérifier la stabilité de ce mur. Dans le chapitre suivant nous citons les différentes étapes de calcul de la stabilité.

## Chapitre 3 : Vérification de la stabilité d'un soutènement

### 3.1 Introduction

La vérification de la stabilité du soutènement est très importante et nécessite plusieurs Conditions. Elle doit être étudiée à état limite ultime. Plusieurs modes de rupture doivent être envisagés. La vérification doit être conduite pour Chacun entre eux.

Dans ce chapitre nous citons les conditions de stabilité (la stabilité au glissement, renversement et de la capacité portante), dans le calcul statique et statique équivalent.

### 3.2 Dimensionnement

Dimensionner un ouvrage de soutènement consiste à déterminer ses dimensions géométriques et ses éléments structuraux pour qu'il soit stable sous l'action des forces qui lui sont appliquées et notamment de la poussée des terres qu'il retient.

La plupart des méthodes de dimensionnement reposent sur des calculs à la rupture du mur avec la prise en compte de coefficient de sécurité.

La conception des murs de soutènement en béton armé diffère sensiblement de celle des murs gravitaires, les terres sont retenues par un voile vertical dont l'équilibre est assuré par une semelle qui se prolonge sous le remblai, cette semelle supporte le poids des terres dont le rôle de stabilisateur est évident.

La partie la plus délicate de l'ouvrage se situe à l'encastrement du voile dans la semelle, il se développe là des moments fléchissant notables [2].

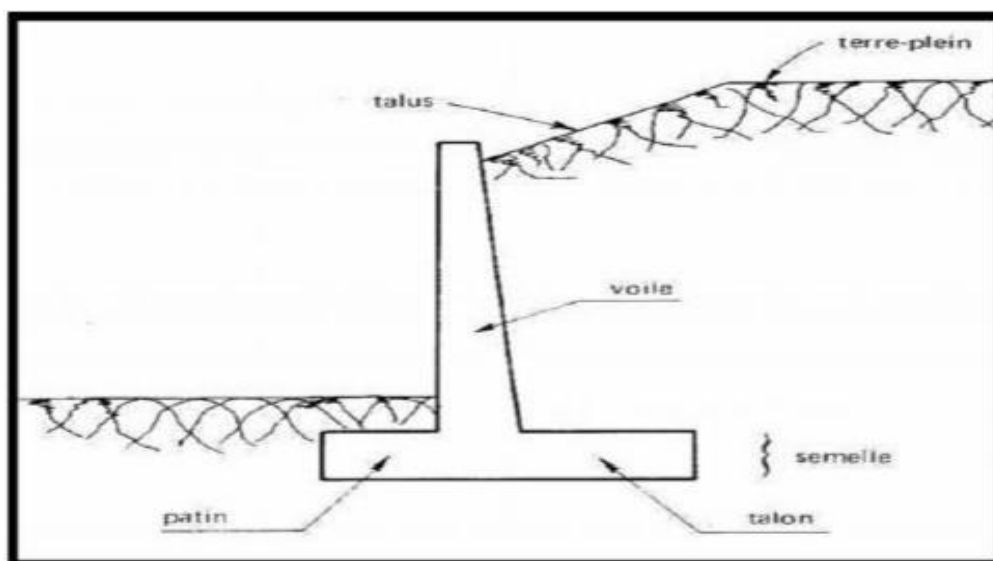


Figure 3.1 : Les éléments d'un mur de soutènement



### 3.3 Pré-dimensionnement

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.

#### 3.3.1 La méthode classique de pré-dimensionnement

Le guide pour l'étude et la réalisation des soutènements donne quelques règles simples pour les murs-cantilever «courants» en béton armé, (Il est prudent de majorer de 15 % la largeur de semelle ainsi déterminée, car elle ne permet pas toujours de satisfaire les vérifications de la stabilité externe).

La profondeur de fondation a été fixée forfaitairement de la façon suivante :

$$H_{\text{aval}} = 1 \text{ m si } H \leq 4 \text{ m}$$

$$H_{\text{aval}} = 1,5 \text{ m si } H > 4 \text{ m}$$

La figure 3.2 représente l'abaque de Pré-dimensionnement d'un mur de soutènement [9].

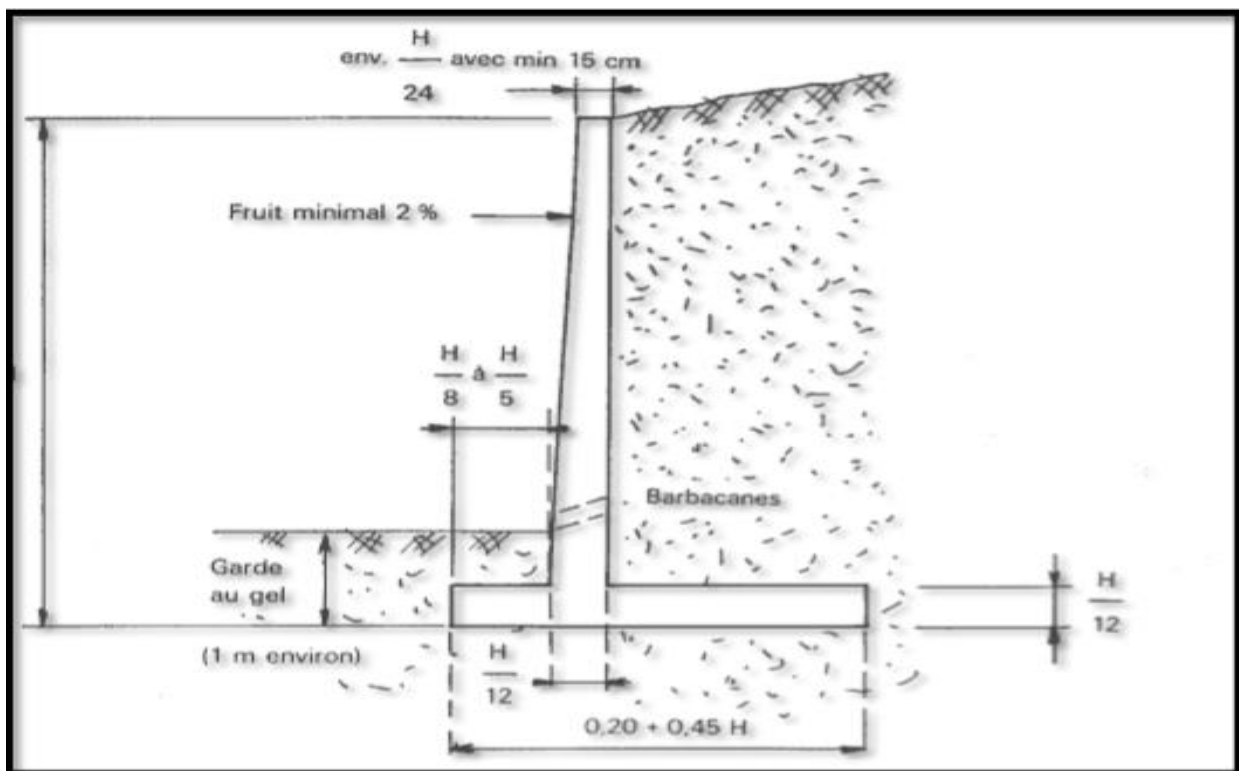


Figure 3.2 : L'abaque de Pré-dimensionnement d'un mur de soutènement

### 3.4 Justification de la stabilité [13]

#### 3.4.1 Mur de soutènement avec un calcul statique

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 (Pour les murs en béton armé, la stabilité interne se vérifie par un calcul de béton armé) et la stabilité externe (capacité portante, renversement, glissement).

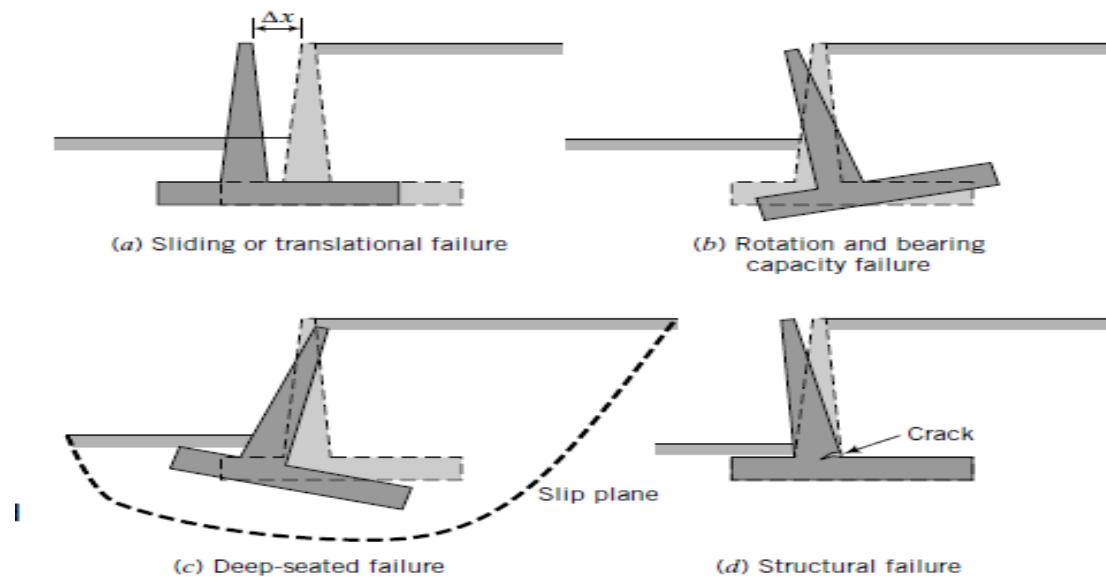


Figure 3.3 : Différents modes d'instabilité d'un mur

#### 3.4.1.1. Vérification de la capacité portante

Elle consiste à vérifier que l'on se trouve suffisamment loin des conditions de rupture du sol de fondation.

Dans son principe, sa justification consiste à vérifier la capacité portante du sol sous la fondation du mur en considérant celle-ci comme une semelle continue de largeur réduite  $B'$ , transmettant la résultante  $R$  des efforts agissants sur le mur qui est une force inclinée et excentrée dont la composante verticale est  $R_v$ , soit :

$$q_v = \frac{R_v}{B'} \leq q_{adm}$$

Tel que :

$q_{adm}$  : Contrainte admissible du sol calculée selon la théorie des contraintes admissibles faisant intervenir un coefficient de sécurité  $F_s = 3$

$$q_{adm} = q_0 + \left( \frac{q_L - q_0}{F_s} \right)$$

$B'$  : La largeur réduite de la semelle

$B$  : La largeur de la semelle

$$B' = B - 2e$$

Avec :

$q_0$  : Contrainte verticale initiale à la base de la fondation

$$q_0 = \gamma_i \times P_f$$

$q_l$  : Pression verticale limite

$$q_l = 0.5\gamma N_\gamma i_\gamma + \gamma_i P_f N_q i_q + C N_c i_c$$

$N_\gamma, N_q, N_c$ , Sont des facteurs de portance :

$$N_q = \frac{1 - \sin \varphi_2}{1 + \sin \varphi_2} \exp(\pi \tan \varphi_2)$$

$$N_c = \begin{cases} \frac{N_q - 1}{\tan \varphi_2} & \text{si : } \varphi_2 \neq 0 \\ \pi + 2 & \text{si : } \varphi_2 = 0 \end{cases}$$

$$N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \varphi_2$$

$$i_\gamma = \left( 1 + \frac{\theta}{90} \right)^2$$

$$i_q = i_c = \left( 1 - \frac{\theta}{90} \right)^2$$

### 3.4.1.2. Vérification de la stabilité au renversement

Ce risque de basculement est fonction de l'excentrement de la réaction de la rigidité du terrain. Pour un sol parfaitement rigide, le basculement ne pourrait avoir lieu qu'autour de l'arête externe de la base (Point A) ; il suffirait que la réaction recoupe cette base pour éviter tout basculement [15].

La sécurité au renversement est souvent étudiée en comparant les moments des forces par rapport au point A [15].

- Les conditions de vérifications au renversement

La première condition à vérifier est formulée par la règle du tiers central qui est donnée par la formule suivante [15]:

$$e \leq \frac{B}{6}$$

Avec :

$e$  : excentricité de la résultante  $R$  par rapport au centre de gravité de la fondation.

Si cette condition n'est pas vérifiée il y'a lieu de vérifier une deuxième condition qui est donnée comme suit [15] :

$$F_s = \frac{\sum M/A_{stabilisants}}{\sum M/A_{Rbvrants}} \geq 1.5$$

La stabilité se définit comme le rapport du moment des forces stabilisatrices sur le moment des forces de renversement, moments calculés par rapport au point (A) [15].

### 3.4.1.3. Vérification de la stabilité au glissement

On doit s'assurer que les contraintes de cisaillement mobilisées à la base du mur sont en deçà de la résistance à l'adhérence base/sol. Par analogie avec le critère de rupture du sol de Mohr-Coulomb, on écrit que la contrainte de cisaillement maximum à la base du mur ou résistance à l'adhérence est égale à :

$a$  est "l'adhérence" sol/base du mur et  $\delta_a$  est l'angle d'adhérence, prise souvent égale à  $(2/3)\varphi$ .

La stabilité au glissement à la base est assurée si ce coefficient est au moins égal à 1.50 :

La stabilité au glissement est assurée par l'expression suivante [15]:

$$F_s = \frac{\tau_1}{\tau_2} \geq 1.5$$

Avec :

$$\tau_1 = R_v \cdot \tan_{\delta_{d'assise}} + (\delta_a \cdot B)$$

$$\tau_2 = R_h$$

### 3.4.2. Mur de soutènement avec un calcul statique équivalent [16].

Le calcul reste identique à celui de la stabilité statique en introduisant les forces sismiques avec un changement des coefficients de sécurités.

La stabilité au glissement sous la fondation du mur est vérifiée en tenant compte de l'application à la résistance ultime au glissement d'un coefficient de sécurité de 1,2.

$$F_s = \frac{\tau_1}{\tau_2} \geq 1.2$$

La stabilité au renversement du mur autour de l'arête aval de la semelle sera vérifiée en tenant compte d'un coefficient de sécurité de 1,3.

$$F_s = \frac{\sum M/A \text{ stabilisants}}{\sum M/A \text{ Rnversants}} \geq 1.3$$

La stabilité au poinçonnement de la semelle du mur (la capacité portante) est identique à celle d'une semelle de fondation avec un coefficient de sécurité 2.

$$q_v = \frac{R_v}{B'} \leq 2.$$

### **3.5. Conclusion**

Le calcul de mur de soutènement se constitue de plusieurs paramètres qui ont de l'influence sur le résultat, établie sur plusieurs étapes à suivre ensuite nous vérifions la stabilité.

Dans le chapitre suivant nous présentons le logiciel (Vb.Net) qui permet de réaliser un programme pour faire tous ces calculs et tous ces vérifications en temps minimal et avec moins d'effort pour aider et faciliter le travail à l'ingénieur.

---

# Partie 2

---

*Etablissement du programme et étude  
paramétrique*

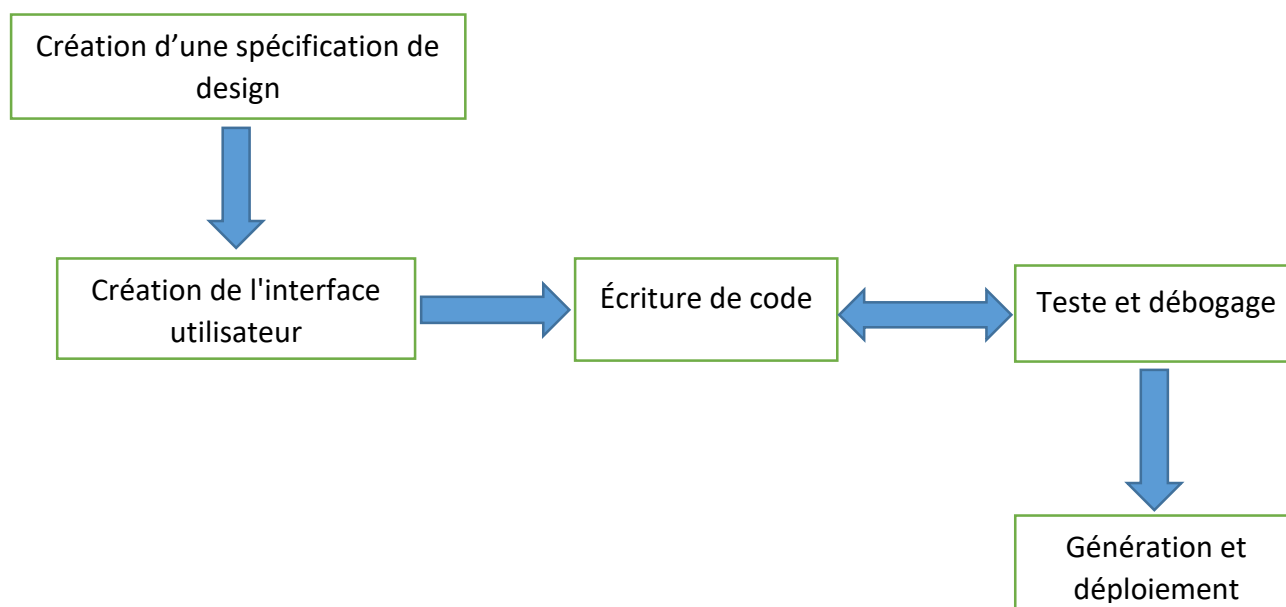
## **Chapitre 4 : Présentation du compilateur VB.net utilisé et établissement de l'organigramme de calcul**

### **4.1. Introduction**

Visual Basic (VB.Net) est un langage de programmation événementielle de troisième génération ainsi qu'un environnement de développement intégré, créé par Microsoft [17].

Nous établissons un programme de calcul à l'aide de Visual Basic qui vérifie la stabilité d'un mur de soutènement autostable. Dans ce chapitre nous représentons l'organigramme de calcul de ce programme.

### **4.2. Création d'un projet Visual Basic .NET**



**Figure 4.1** : Organigramme de Création d'un projet Visual Basic .NET [16]

### **4.3. L'environnement de développement**

Pour coder en Visual Basic, il nous faut des outils adaptés pour créer des interfaces graphiques et ergonomiques pour nos logiciels, comme [16] :

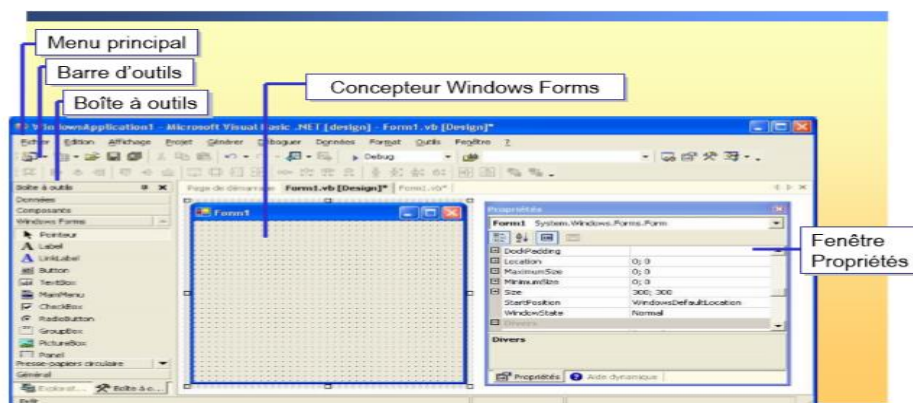


Figure 4.2 : L'environnement de développement [16]

### 4.3.1. Menu principal et barre d'outils

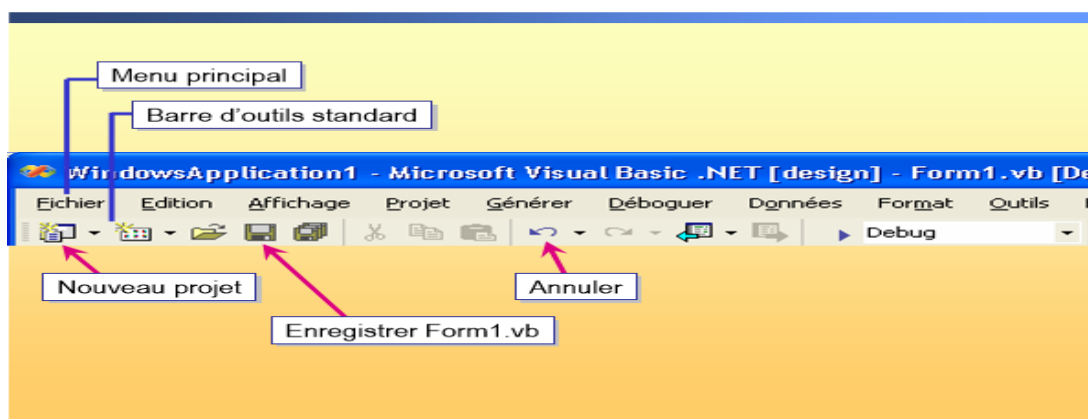


Figure 4.3 : Menu et barre d'outils [16]

### 4.3.2. Boîte d'outils

C'est un control permettant de créer l'interface utilisateur et placer des contrôles sur le formulaire.

Sur la gauche de l'interface, nous avons accès à la boîte à outils. Pour afficher cette boîte, vous allez devoir cliquer sur le petit onglet qui dépasse sur la gauche. Une fois la boîte sortie, cliquez sur la punaise pour la « fixer » et la maintenir visible. La boîte à outils nous sera d'une grande utilité lorsque nous créerons la partie graphique de nos applications, mais inutile lors de l'écriture du code VB. Dès lors, si vous voulez la rentrer automatiquement, cliquez une nouvelle fois sur la punaise [17].



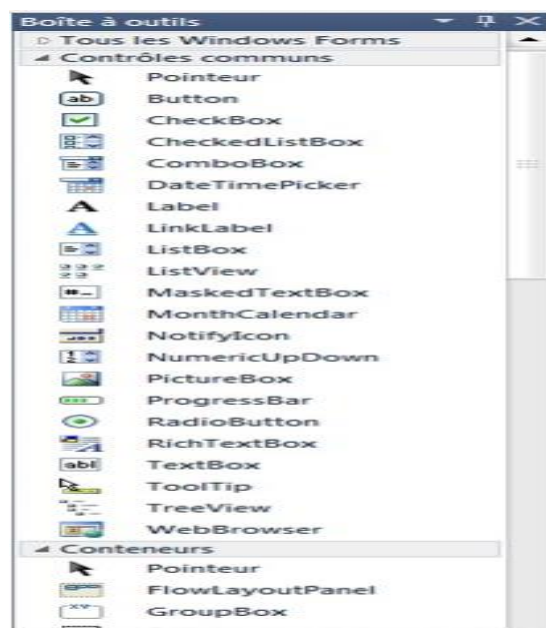


Figure 4.4 : Boite d'outils [19]

#### 4.3.3. Fenêtre des propriétés

Autre partie essentielle est la fenêtre des propriétés qui va nous permettre, en mode conception, de modifier les propriétés de nos objets comme (la taille, le nom, le texte ou la couleur...) [16].

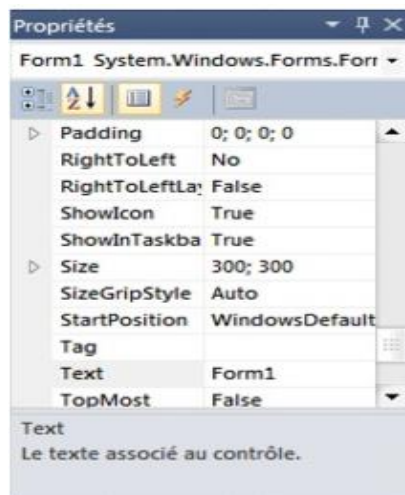
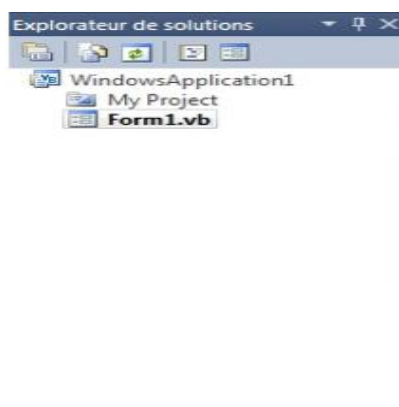


Figure 4.5 : Fenêtre des propriétés [17]

#### 4.3.4. Fenêtre de solutions

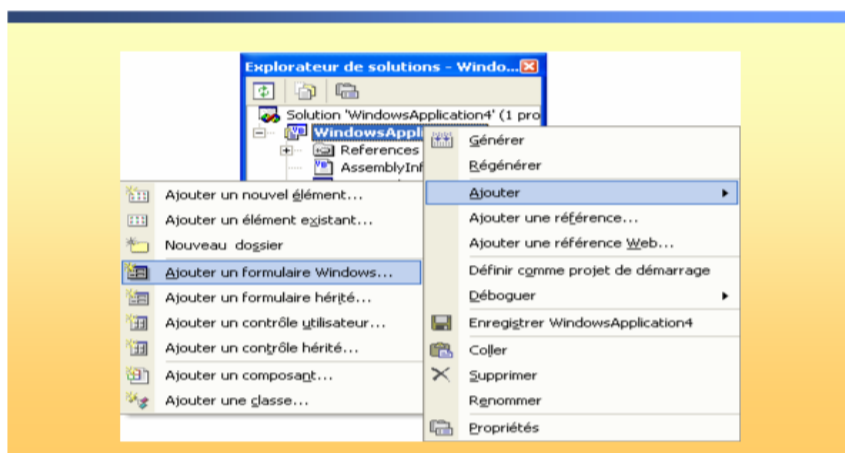
De l'autre côté de notre écran, nous remarquons la fenêtre de solutions : elle récapitule l'arborescence de notre projet. Elle servira également à gérer les bases de données [17].



**Figure 4.6 :** Fenêtre de solutions [17]

### 4.3.5. Création d'un formulaire

Les formulaires sont le composant très basique d'une application VB, donc la compréhension de la mise en page, le codage et la conception aide les développeurs à se lancer dans l'utilisation de ces composants [16].



**Figure 4.7 :** Création d'un formulaire [16]

#### 4.3.5.1. Définition des propriétés d'un formulaire

Si vous modifiez la propriété Name de Form1, vous devez aussi donner le nouveau nom à l'objet de démarrage de votre projet [16].

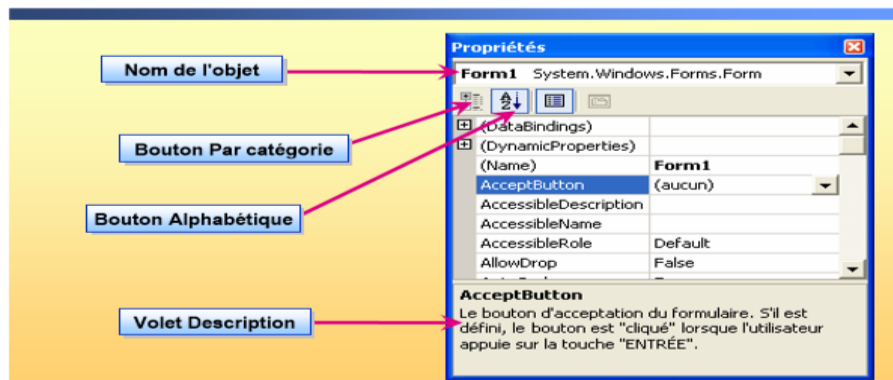


Figure 4.8 : Définition des propriétés d'un formulaire [16]

## 4.4. L'environnement Visual basic code

Ajoutez du code entre Private Sub et End Sub

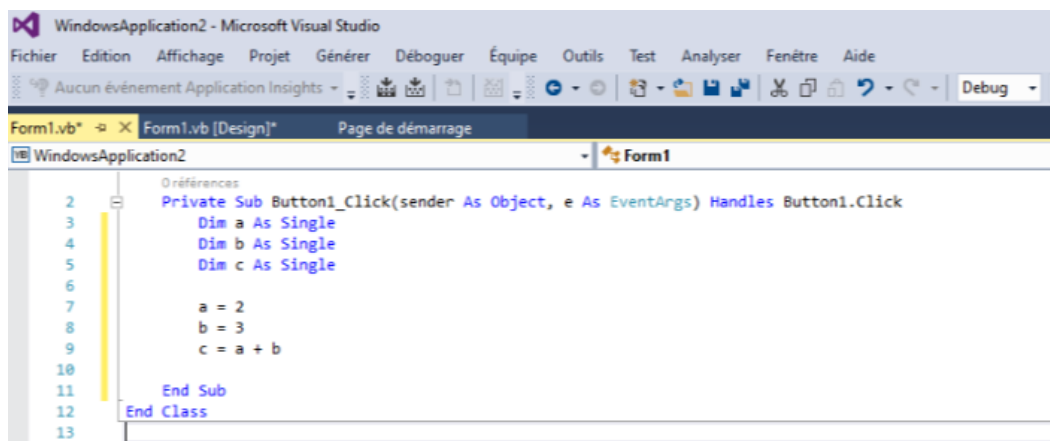


Figure 4.9 : L'environnement Visual basic code

### 4.4.1. Règles fondamentales de présentation

- Les opérateurs doivent être entourés d'espaces, mais vous n'êtes pas obligés de les taper, l'éditeur VB.net les fournira sauf pour &. Si vous tapez  $a=b+c$  vous obtiendrez  $a = b + c$ .
- On ne doit en aucun cas incorporer d'espaces à l'intérieur d'un mot-clé, d'un nom d'objet prédéfini, d'un nombre ou d'un nom de variable : ces mots ne seraient pas reconnus.
- Un commentaire sur VB.net doit être précédé par ' ou bien le mot (Rem).

- peut-être déclarer une variable par ligne, ou plusieurs variables avec un (,) entre les variables.
- Un messageBox sur VB.net doit être précédé par " " .

## **4.5. Le langage VB.net**

### **4.5.1. Les variables**

Pour la déclaration des variables en VB, on utilise le mot-clé Dim suivi par le nom de la variable, le mot-clé As puis le type de la variable. Le mot-clé Dim permet de déclarer explicitement une variable. Un des intérêts de la déclaration explicite des variables est d'éviter les erreurs de frappe dans le nom de la variable.

Exemple : Dim Mser As Single.

#### **4.5.1.1. Les types de variables**

- Integer et Long pour les entiers ;
- Single, Double et Currency pour les réels ;
- String pour les chaînes de caractères ;
- Date pour les dates ;
- Decimal Jusqu'à 29 chiffres significatifs avec des valeurs comprises jusqu'à  $7,9228 \times 10^{28}$  (signées);
- Boolean, Ce type n'accepte que deux valeurs : vrai ou faux.

#### **4.5.2. Les énonces conditionnels**

L'instruction If écrite sur une seule ligne a la syntaxe suivante : If condition Then Inst\_si\_vrai [Else Inst\_si\_faux].

La structure de bloc If permet aux sections Then et Else de contenir plusieurs instructions. Elle peut avoir la syntaxe suivante :

If condition Then

    Instructions\_si\_vrai

[Else

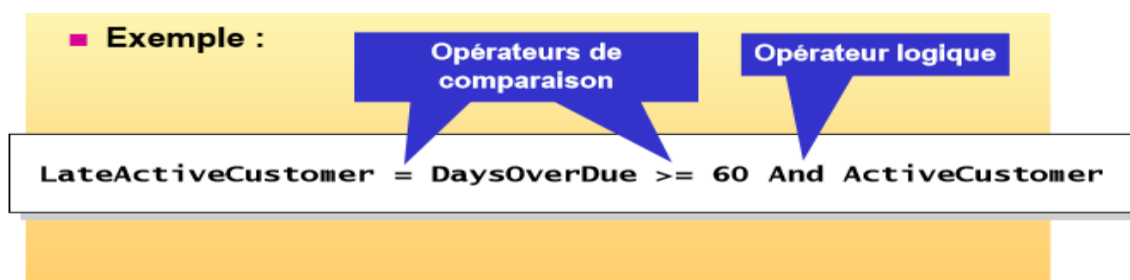
    Instructions\_si\_faux]

End If

### 4.5.3. Association d'opérateurs logiques et d'opérateurs de comparaison

Vous pouvez combiner des opérateurs de comparaison avec des opérateurs logiques à l'aide d'instructions conditionnelles [16].

Exemple:



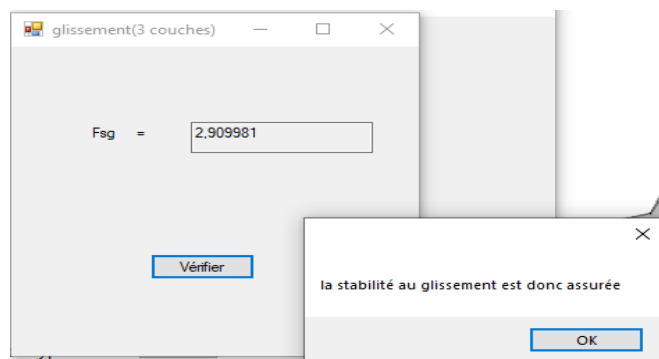
**Figure 4.10.** Exemple d'association d'opérateurs logiques et d'opérateurs de comparaison [16]

### 4.5.4. La fonction MsgBox

La fonction MsgBox affiche un message dans une boîte de dialogue.

Exemple : Dans notre projet dans la vérification de la résistance au glissement le programme affiche un message à l'aide d'un code suivant :

```
Private Sub Button4_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button4.Click
    If Fg < 1.5 Then
        MessageBox.Show("La stabilité au glissement est donc non assurée")
    Else
        MessageBox.Show("la stabilité au glissement est donc assurée")
    End If
End Sub
End Class
```



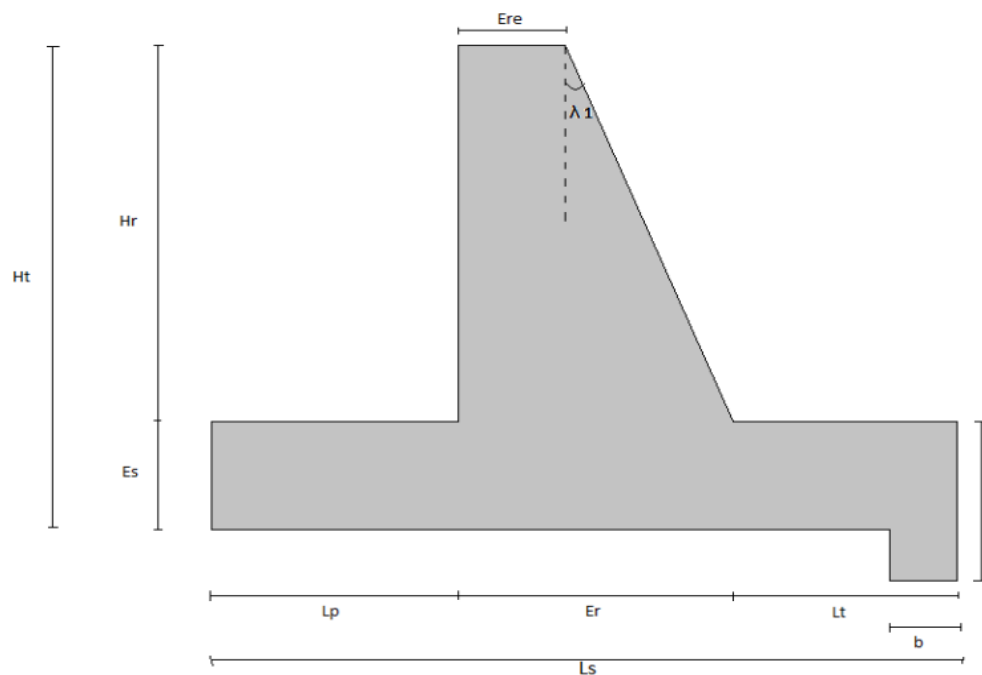
**Figure 4.11 :** Boite de dialogue (MsgBox)

#### 4.6. Les schémas

Varie d'une fenêtre à l'autre où ils représentent des dessins sur l'élément auquel le programme est affecté. Contient divers symboles trouvés dans les calculs, pour faciliter la saisie des données à l'utilisateur.

Exemple :

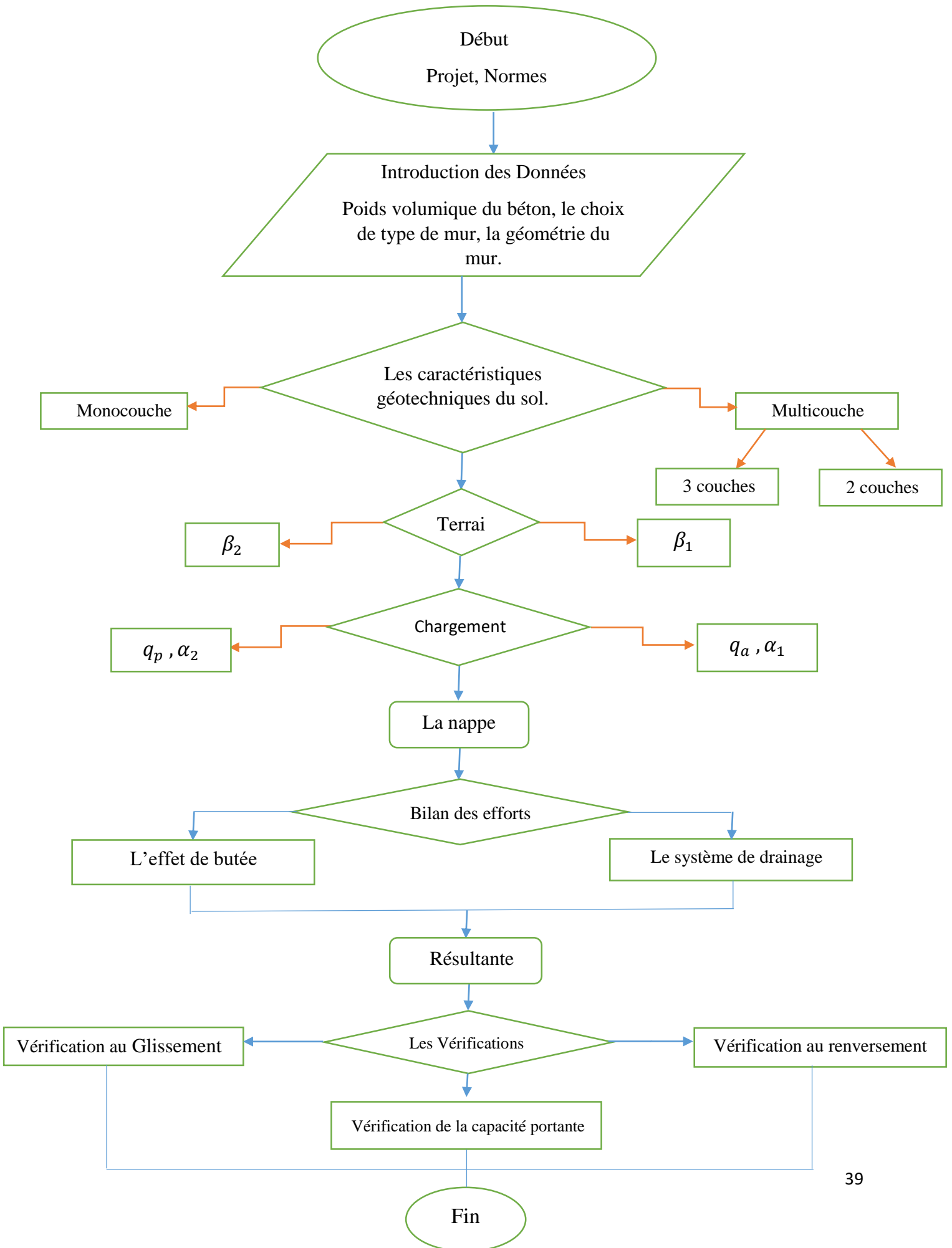
Dans notre programme on se trouve le schéma ci-dessous, tel qu'il montre les dimensions du mur de soutènement et les angles.



**Figure 4.12 :** Exemple de La géométrie d'un mur de soutènement

#### 4.7. L'organigramme de calcul

L'organigramme ci-dessous résume le processus du programme que nous avons créé, en commençant par la première phase (le projet) jusqu'à la phase finale (les différentes vérifications de la stabilité).



## Chapitre 4 *Présentation du compilateur VB.net utilisé et établissement de l'organigramme de calcul*

### 4.7.1. La fenêtre principale du programme

**Paramètre à introduire :** en donnant la possibilité à l'utilisateur de choisir le type de mur. Cette fenêtre contient une barre de défilement verticale, contenant des fenêtres, facilitant l'introduction des données par groupe, voir la figure (4.13)

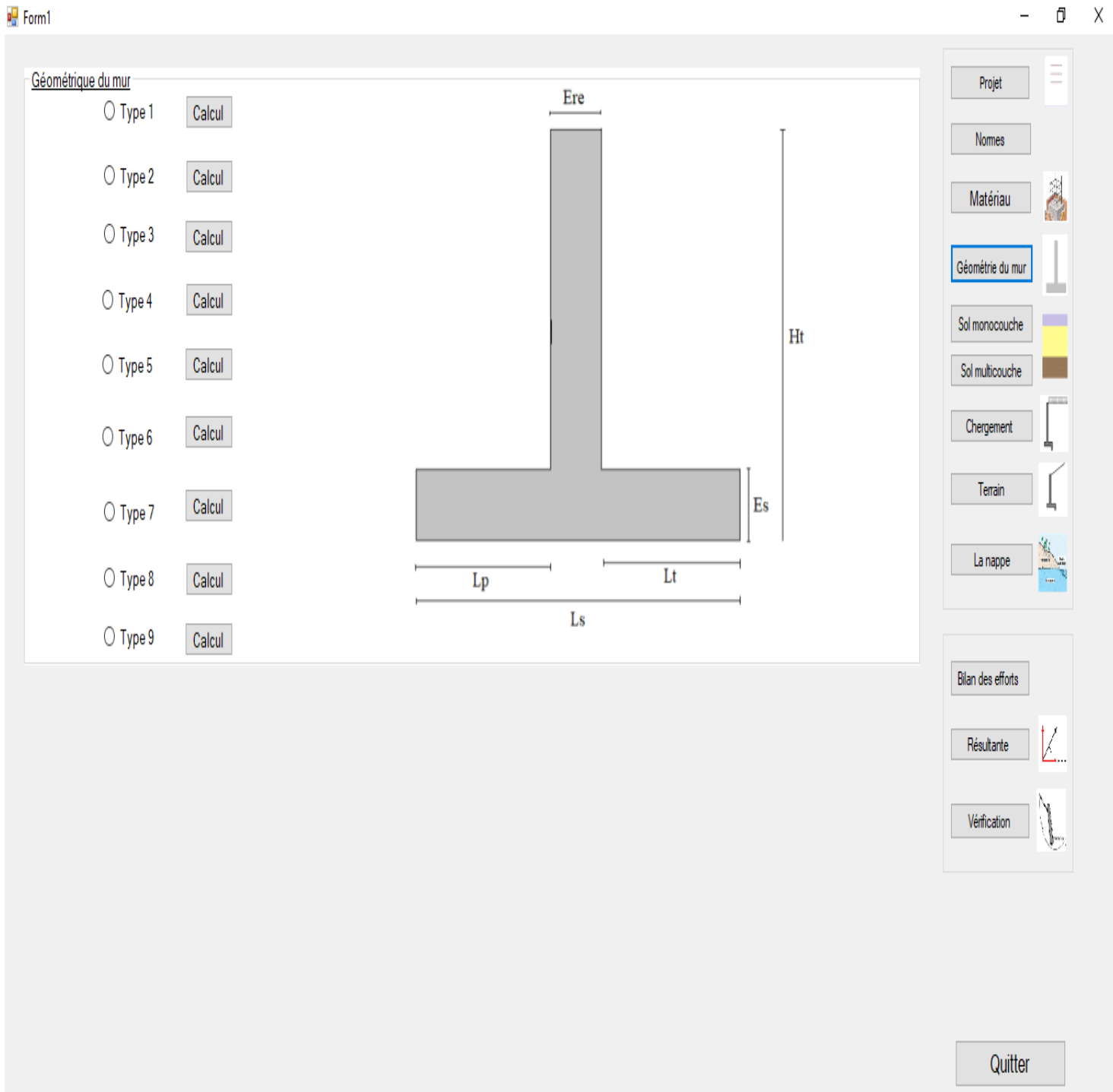


Figure 4.13 : La fenêtre principale du programme



#### **4.7.2. Barre de défilement verticale**

La barre de défilement se situe à droite de la fenêtre principale, la fenêtre de défilement verticale contient plusieurs fenêtres et se divise en deux parties. Voir la figure 4.14



**Figure 4.14 :** Barre de défilement verticale

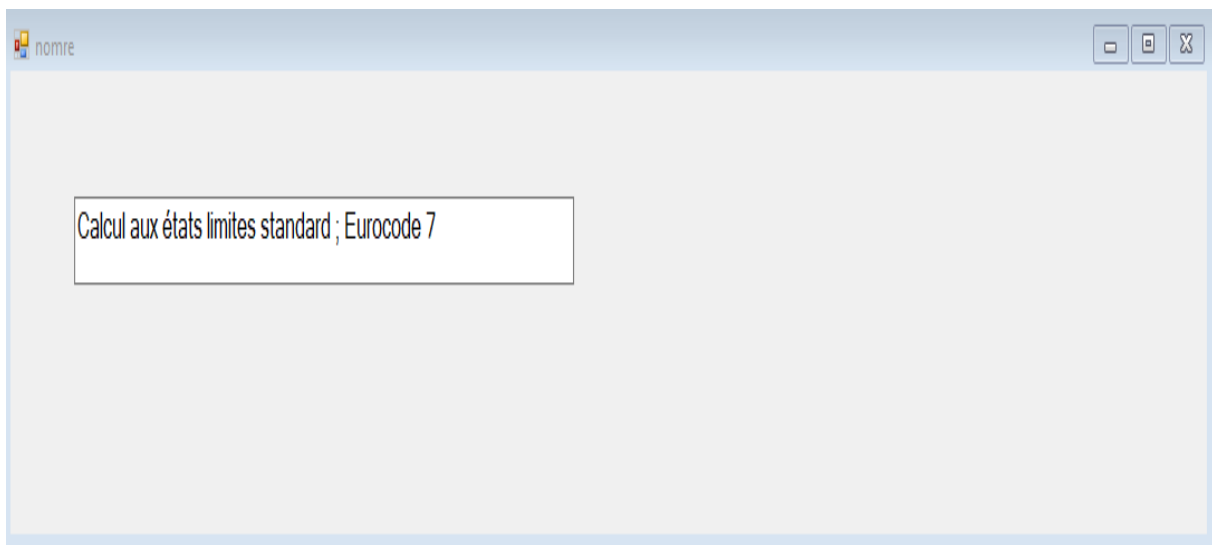
##### **a)- Les données**

- **Le projet :** grâce à a cette fenêtre, l'utilisateur peut mettre divers informations sur son projet (Identification, partie, Description, élaboré par, Date, Client). Voir la figure 4.15



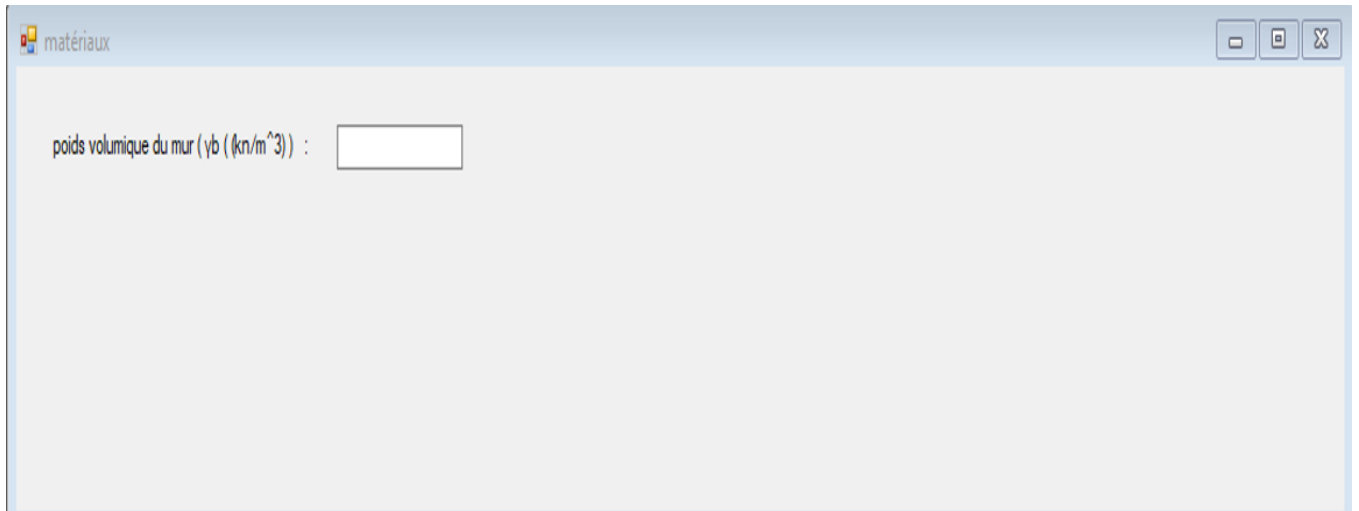
**Figure 4.15 :** La fenêtre projet

- **La Norme :** vous pouvez voir la norme qui est disponible.  
La norme que nous utilisons dans le programme est (calcul aux états limites standard ; Eurocode 7). Voir la figure 4.16



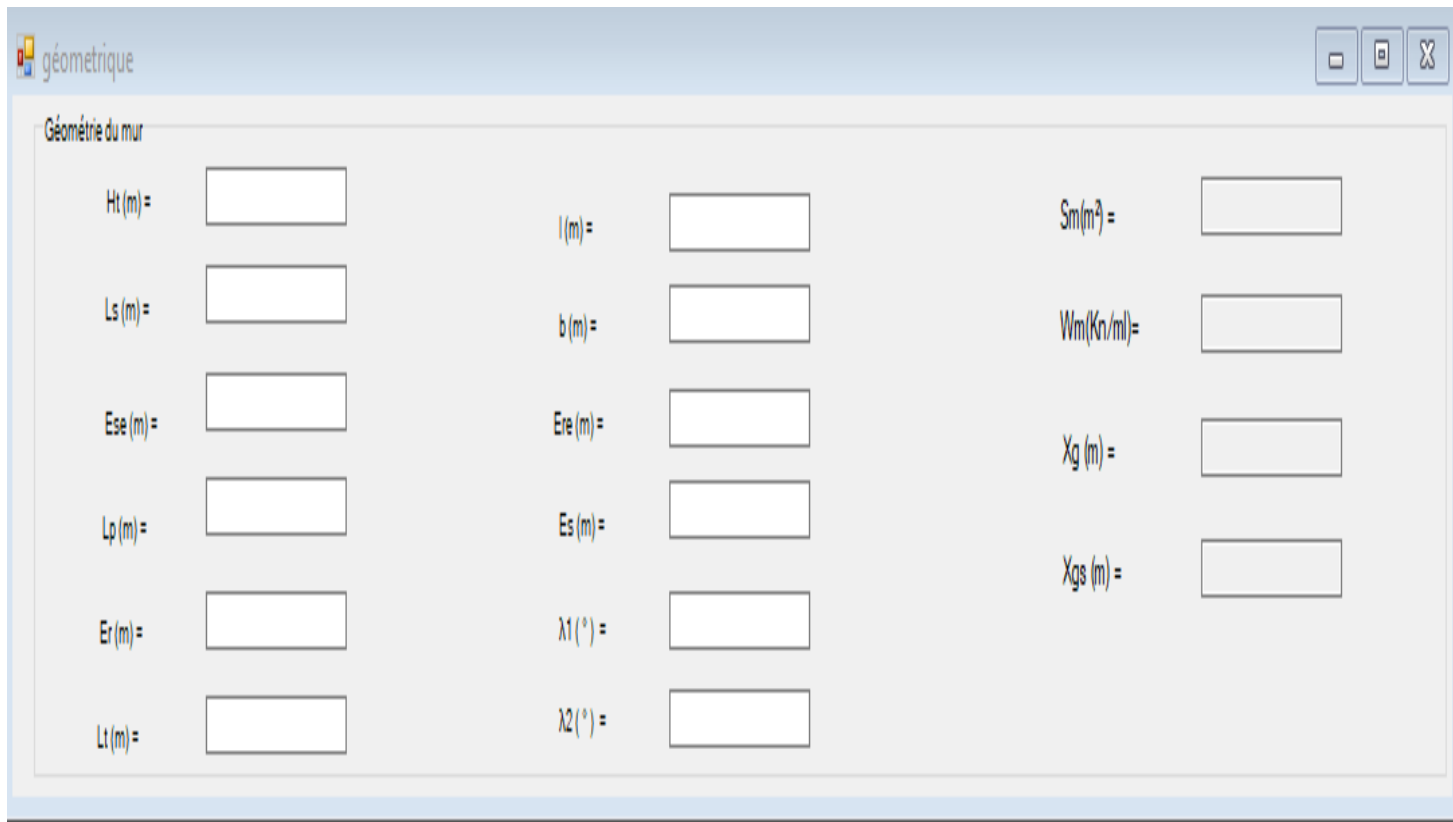
**Figure 4.16 :** La fenêtre Norme

- **Matériaux :** pour mettre la valeur du poids volumique du mur ( $\gamma_b$ ). Voir la figure 4.17



**Figure 4.17** : La fenêtre Matériaux

- **Géométrie du mur** : pour insérer les dimensions du mur, le programme calcule : (surface du mur, le poids du mur, le point d'application du mur et le centre de gravité de la semelle). Voir la figure 4.18



**Figure 4.18** : La fenêtre Géométrie du mur

## Chapitre 4 *Présentation du compilateur VB.net utilisé et établissement de l'organigramme de calcul*

- **Sol** : pour ajouter les différentes couches du sol et leurs caractéristiques géotechniques (on a le choix d'un sol mono couches, ou le sol multicouches avec 2 couches ou 3 couches). Voir la figure 4.19

The screenshot shows a software interface for defining soil parameters. The window title is "3 couches".

**Couches amont (Upstream Layers):**

- Couche1:**  $\gamma_{sat1}$  (kn/m<sup>3</sup>),  $C1$  (Kpa),  $\gamma_{d1}$  (kn/m<sup>3</sup>),  $h1$  (m),  $\gamma_1$  (kn/m<sup>3</sup>),  $\gamma_w1$  (kn/m<sup>3</sup>),  $\phi1$  (°). Radio buttons for "Sol saturé" and "Sol sec".
- Couche2:**  $\gamma_{sat2}$  (kn/m<sup>3</sup>),  $C2$  (Kpa),  $\gamma_{d2}$  (kn/m<sup>3</sup>),  $h2$  (m),  $\gamma_2$  (kn/m<sup>3</sup>),  $\gamma_w2$  (kn/m<sup>3</sup>),  $\phi2$  (°). Radio buttons for "Sol saturé" and "Sol sec".
- Couche3:**  $\gamma_{sat3}$  (kn/m<sup>3</sup>),  $C3$  (kpa),  $\gamma_{d3}$  (kn/m<sup>3</sup>),  $h3$  (m),  $\gamma_3$  (kn/m<sup>3</sup>),  $\gamma_w3$  (kn/m<sup>3</sup>),  $\phi3$  (°). Radio buttons for "Sol saturé" and "Sol sec".

**Couche aval (Downstream Layer):**  $\gamma_t$  (kn/m<sup>3</sup>),  $C$  (Kpa),  $\gamma_d$  (kn/m<sup>3</sup>),  $h$  (m),  $\gamma$  (kn/m<sup>3</sup>),  $\gamma_w$  (kn/m<sup>3</sup>),  $\phi$  (°). Radio buttons for "Sol saturé" and "Sol sec".

**La couche D'assise (Base Layer):**  $\gamma_t$  (kn/m<sup>3</sup>),  $C$  (Kpa),  $\gamma_d$  (kn/m<sup>3</sup>),  $h$  (m),  $\gamma$  (kn/m<sup>3</sup>),  $\gamma_w$  (kn/m<sup>3</sup>),  $\phi$  (°). Radio buttons for "Sol saturé" and "Sol sec".

**La Rugosité du mur (Wall Roughness):**

- Couches amont:**
  - Couche1:** Radio buttons for "Très rugueuse", "Lisse", "peu rugueuse", "Intermédiaire".  $\delta1$  (°) = [ ]
  - Couche2:** Radio buttons for "Très rugueuse", "Lisse", "peu rugueuse", "Intermédiaire".  $\delta2$  (°) = [ ]
  - Couche3:** Radio buttons for "Très rugueuse", "Lisse", "peu rugueuse", "Intermédiaire".  $\delta3$  (°) = [ ]
- Couche aval:** Radio buttons for "Très rugueuse", "Lisse", "peu rugueuse", "Intermédiaire".  $\delta$  (°) = [ ]

**Figure 4.19 :** Exemple de fenêtre sol pour un sol de trois couches

- **Chargement** : pour définir les valeurs des surcharges et leurs inclinaisons par rapport à vertical, du sol amont et aval (charge uniforme répartie). Voir la figure 4.20

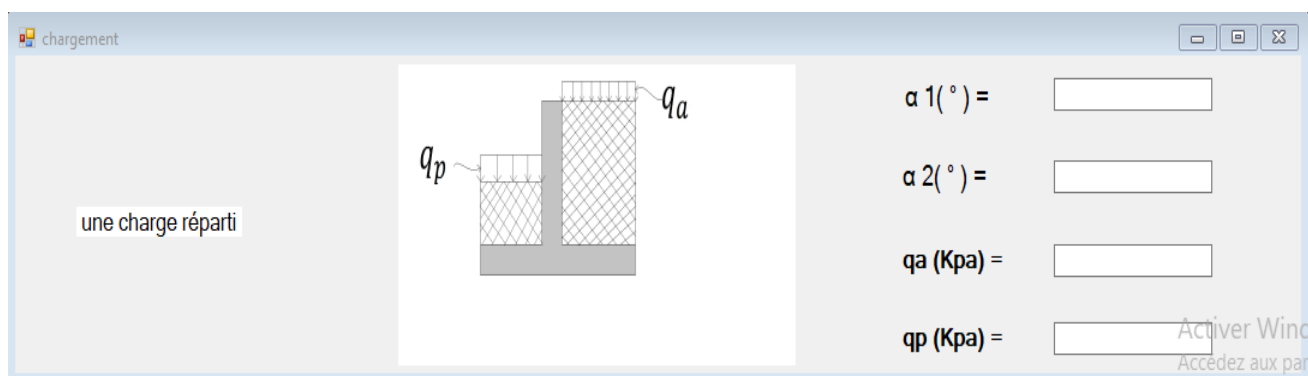


Figure 4.20 : fenêtre chargement

- **Terrain** : vous pouvez choisir la forme du terrain, tel que la pente ( $\beta > 0$  ou  $\beta = 0$ ).

Voire la figure 4.21

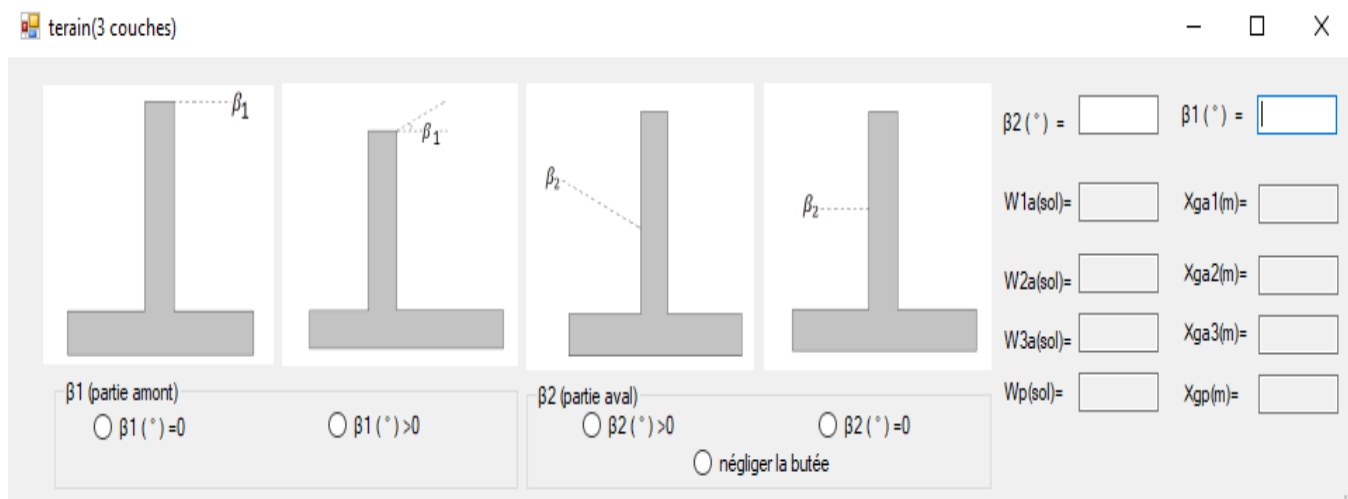


Figure 4.21 : fenêtre Terrain

- **La nappe** : vous pouvez sélectionner s'il y a une nappe dans les différentes couches du sol. Voire la figure 4.22

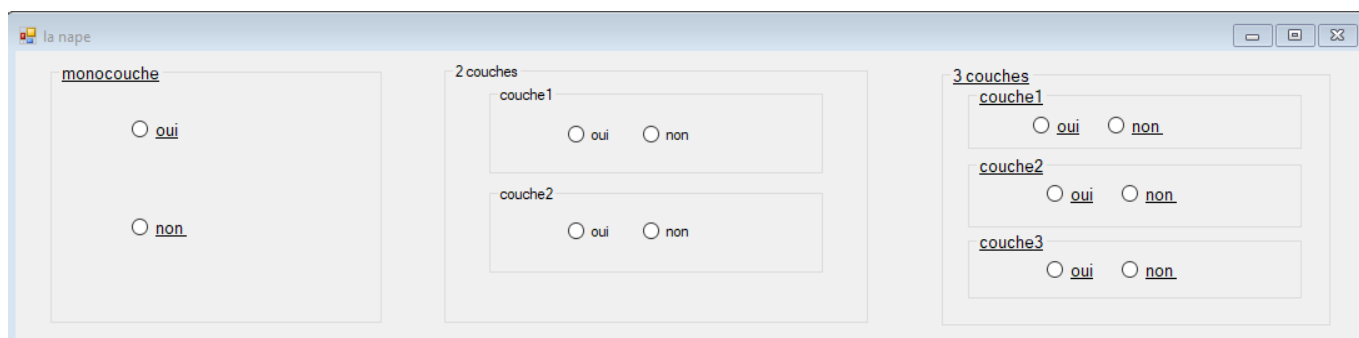


Figure 4.22 : fenêtre Nappe

**b)-Les Résultats**

- **Bilan des efforts** : à l'aide de ce programme que nous avons établie on peut calculer les différents coefficients et les forces agissantes sur le mur avec ou sans système de drainage et aussi l'effet de butée peut être prise en compte dans les calculs ou négligée. Voir la figure 4.23

The screenshot shows a software interface for calculating forces and coefficients for three layers. The window title is "force et coefficient(3 couches)".

**couches amont (poussé)**

**Couche 1**

Kay1 =  Fcd1(kn/m)=

Kaq1 =  Fci1(kn/m)=

Fay1(kn/m)=  Faq1(kn/m)=

Faw1(kn/m)=

**Couche 2**

Kay2 =  Fcd2 (kn/m)=

Kaq2 =  Fci2(kn/m) =

Fay2(kn/m) =  Faq2(kn/m) =

Faw2(kn/m)=

**Couche 3**

Kay3  Fcd3(kn/m) =

Kaq3  Fci3(kn/m) =

Fay3(kn/m) =  Faq3(kn/m) =

Faw3(kn/m)=

**L'effet de butée est pris en compte?**

oui et avec système de drainage

oui et sans système de drainage

Non

**Le système de drainage**

Mur avec système de drainage

Mur sans système de drainage

**Couche aval (la buté)**

Kpy1=  Fpq(kn/m) =

Kpq1 =  Fpcd(kn/m) =

Fpy1(kn/m) =  Fpci(kn/m) =

Fpw(kn/m)=

**Figure 4.23** : fenêtre Bilan des efforts

- **Résultante** : pour le calcul des réactions horizontale et vertical, les moments renversent et stabilisent, le point d'application (X), l'excentricité (é), et d'autre paramètres, en voit constat tout ça en détail dans les exemples de calcul. Voir la figure 4.24

The image shows a software window titled 'Résultante'. It contains several input fields for numerical values, each preceded by a label:  $R_h$  (Kn) =,  $R_v$  (Kn) =,  $\theta$  (°) =,  $X$  (m) =,  $\epsilon$  (m) =,  $Ls'$  (m) =,  $M_{stabl}$  (Kn) =, and  $M_{renv}$  (Kn) =. Below these fields is a button labeled 'Calculer'.

Figure 4.24 : fenêtre Résultante

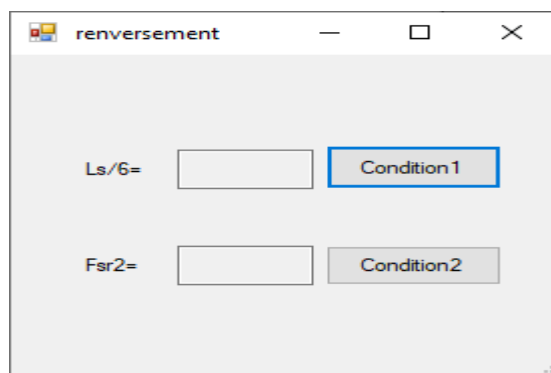
- **Vérification** : pour assurer la stabilité du mur au glissement, renversement avec le calcul des coefficients ( $F_{sg}$  et  $F_{sr}$ ), puis vous pouvez afficher les résultats de calcul de la capacité portante de la couche d'assise (la couche qui se situe sous la semelle du mur).  
Voire la figure 4.25

The image shows a software window titled 'les vérifications'. It is divided into two main sections: 'monocouche' and 'multicouches'. Under 'monocouche', there are three buttons: '1- glissement', '2- renversement', and '3- la capacité portante de la semelle'. Under 'multicouches', there are two buttons: '2 couches' and '3 couches'. The '3- la capacité portante de la semelle' button is highlighted with a blue border.

Figure 4.25 : fenêtre des vérifications

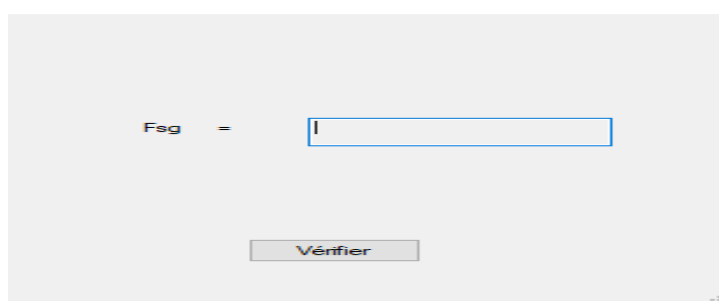
- La vérification au renversement : l'utilisateur trouve deux boutons de la vérification, en commence par la première condition. Si le renversement est vérifié le programme affiche un message qui contient : (la stabilité au renversement est assurée), mais si la stabilité n'est pas assurée avec la première condition le programme affiche un message pour passer à la deuxième condition.  
En passe à la deuxième condition ou l'utilisateur clique sur le second bouton. Si la vérification de renversement est assurée le programme affiche un message qui contient :

(la vérification au renversement est assurée). Sinon le programme affiche que (la stabilité au renversement n'est pas assurée).



**Figure 4.26** : fenêtre de la vérification du renversement

- La vérification au glissement : l'utilisateur trouve un bouton de la vérification au glissement, lorsqu' il clique sur ce dernier le programme affiche un message qui contient deux possibilités : soit (la stabilité au glissement est donc assurée) ou (la stabilité au glissement est donc non assurée).



**Figure 4.27** : fenêtre de la vérification au glissement

- La vérification de la capacité portante de la semelle du mur : le programme calcule tous les paramètres dont il a besoin pour la vérification de la capacité portante de la semelle. Puis l'utilisateur clique sur le bouton (vérifier) à cet effet le programme affiche deux possibilités : soit (la capacité portante de la semelle est donc vérifiée) au contraire (la capacité portante de la semelle est donc non vérifiée).



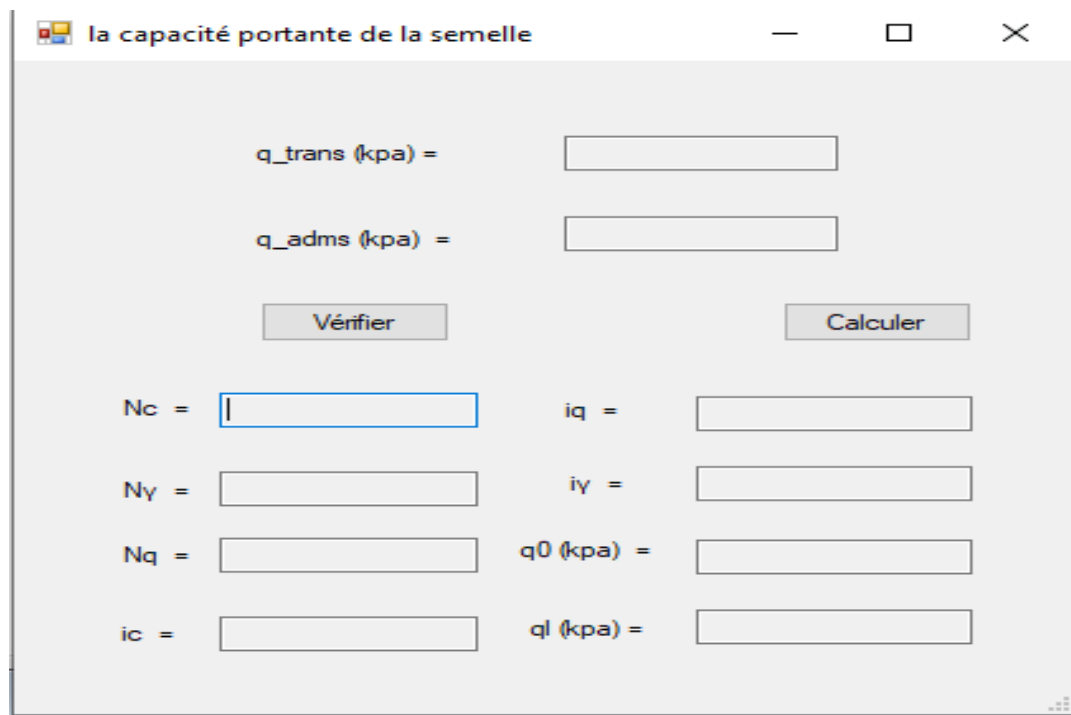


Figure 4.28 : fenêtre de la capacité portante

Afin de quitter le programme on appuie sur le bouton (**Quitter**).



Figure 4.29 : le bouton quitter

#### 4.8. Conclusion :

Le programme que nous avons établi vérifie la stabilité du mur autostable. Il contient plusieurs fenêtres et les messages à afficher pour faciliter le travail à l'utilisateur.

Dans le chapitre suivant nous vérifions l'efficacité de ce programme avec des différents exemples et nous montrons les étapes de calcul.

## Chapitre 5 : Etablissement du programme de calcul

### 5.1. Introduction

Nous avons élaboré un programme de calcul avec Vb.Net ; baptisé (CW-STAB), qui vérifie la stabilité d'un mur de soutènement (le glissement, le renversement et la capacité portante de la semelle).

Afin de valider le programme établi, nous avons fait quelques exemples de calcul manuel pour la comparaison avec le calcul automatique.

### 5.2. Les exemples de validation du programme avec un calcul statique

#### 5.2.1. Exemple 1

##### 5.2.1.1. Les données de calcul

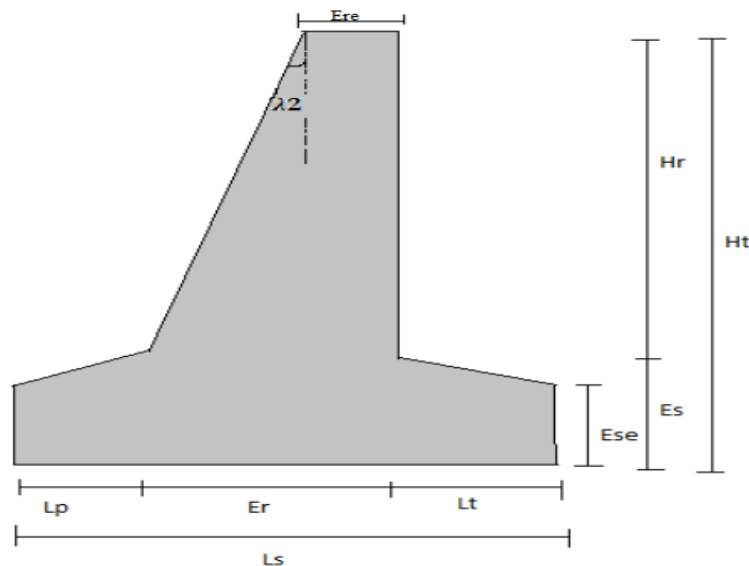


Figure 5.1 : le type de mur utilisé dans notre exemple 1

#### - La géométrie du mur

$H = 6\text{m}$	$L_p = 1.5$	$L_t = 1.5\text{m}$
$E_s = 1\text{m}$	$E_r = 2\text{m}$	$E_{se} = 0.5\text{m}$
$E_{re} = 1\text{m}$	$L_s = 5\text{m}$	$\lambda_1 = 0^\circ \quad \lambda_2 = 11.33^\circ$

#### - Les Caractéristiques du sol Un sol monocouche (Sable)

Le tableau suivant regroupe les caractéristiques du sol

	Couche amont	Couche aval	Couche d'assise
$\gamma \left(\frac{kn}{m^3}\right)$	$\gamma_{sat} = 25$	$\gamma_d = 11$	$\gamma_{sat} = 22$
$\gamma_w \left(\frac{kn}{m^3}\right)$	10	10	10
$c \left(\frac{kn}{m^2}\right)$	26	0	20
H(m)	5	2	6
$\varphi(^{\circ})$	32	20	13
La rugosité	intermédiaire	Très rugueuse	Très rugueuse

Tableau 5.1 : les caractéristiques du sol d'exemple 1

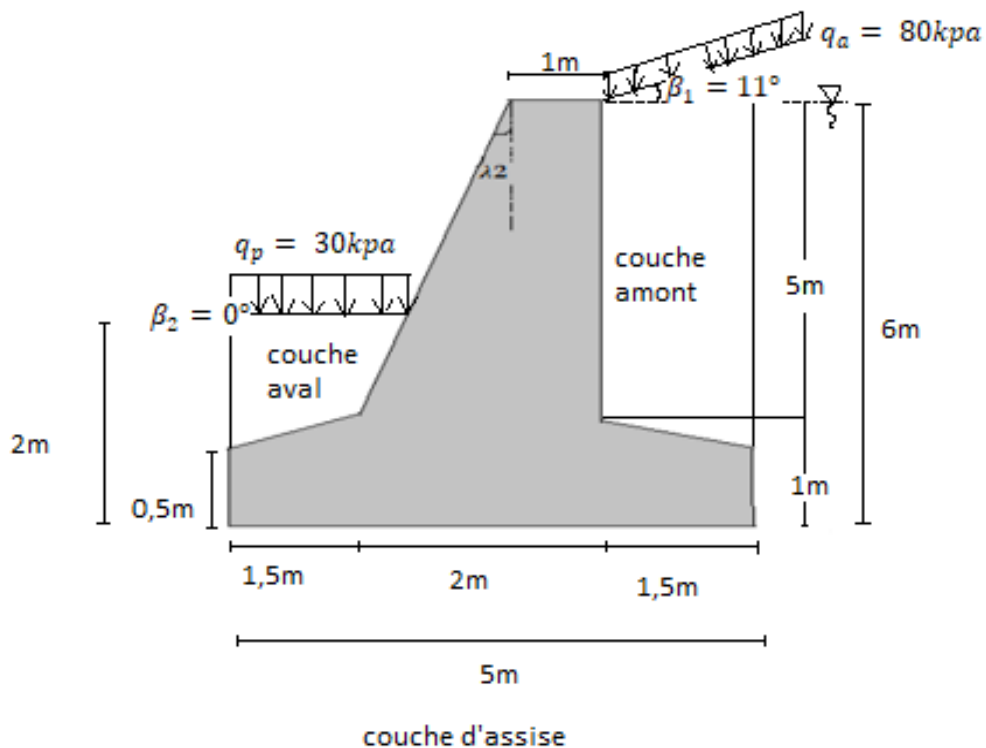
L'effet de butée est pris en compte : OUI

Le mur sans système de drainage

$q_a = 80Kpa$        $\alpha_1 = 0$  (L'inclinaison la force  $q_a$  par rapport à vertical)

$q_p = 30Kpa$        $\alpha_2 = 0$  (L'inclinaison la force  $q_p$  par rapport à vertical)

$\beta_1 = 11^{\circ}$        $\beta_2 = 0^{\circ}$



## A. Le calcul manuel

 Calcul des angles et des coefficients

## ➤ Calcul de l'angle (La rugosité)

Sol amont :  $\delta = 2/3 \varphi = 21.33^\circ$ Sol aval :  $\delta = \varphi = 20^\circ$ Sol d'assise :  $\delta = \varphi = 13^\circ$ ➤ Calcul des coefficients  $K_a$ ,  $K_q$  et  $K_p$  $K_a$  : coefficient de poussée des terres, calculé comme suit :

$$K_a = \frac{\cos^2(\varphi - \lambda_1)}{\cos^2(\lambda_1) \times \cos(\delta + \lambda_1) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta)}{\cos(\delta + \lambda_1) \cos(\beta - \lambda_1)}} \right]^2}$$

 $\varphi = 32^\circ, \lambda_1 = 0^\circ, \delta = 21.33^\circ, \beta = 11^\circ, C = 26 \text{Kn/m}^2$ 

$$K_a = \frac{\cos^2(32 - 0)}{\cos^2(0) \times \cos(21.33 + 0) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(32 + 21.33) \sin(32 - 11)}{\cos(21.33 + 0) \cos(11 - 0)}} \right]^2}$$

$$K_a = 0.318$$

 $K_p$  : coefficient de butée des terres, calculé comme suit :

$$K_p = \frac{\cos^2(\varphi + \lambda_2)}{\cos^2(\lambda_2) \times \cos(\delta - \lambda_2) \left[ 1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi + \beta)}{\cos(\delta - \lambda_2) \cos(\beta - \lambda_2)}} \right]^2}$$

 $\varphi = 20^\circ, \lambda_1 = 11.33^\circ, \delta = 20^\circ, \beta = 0^\circ, C = 0 \text{Kn/m}^2$ 

$$K_p = \frac{\cos^2(20 + 11.33)}{\cos^2(11.33) \times \cos(20 - 11.33) \left[ 1 - \sqrt{\frac{\sin(20 + 20) \sin(20 + 0)}{\cos(20 - 11.33) \cos(0 - 11.33)}} \right]^2}$$

$$K_p = 2.793$$

 $K_{qa}$  : Coefficient de poussée de la surcharge, calculé comme suit :

$$\sin \Delta_1 = \frac{\sin \alpha}{\sin \varphi} = \frac{\sin 0}{\sin 32} \quad \Delta_1 = 0^\circ$$

$$\sin \Delta_2 = \frac{\sin \delta}{\sin \varphi} = \frac{\sin 21.33}{\sin 32} \quad \Delta_2 = 43.81^\circ$$

$$\omega = \frac{\pi}{2} - 11$$

$$\psi = \omega - \frac{\pi}{2} + \frac{\Delta_1 + \Delta_2 + \alpha \pm \delta}{2} = \omega - \frac{\pi}{2} + \frac{\Delta_1 + \Delta_2 + \alpha \pm \delta}{2} = \frac{\pi}{2} - 11 - \frac{\pi}{2} + \frac{0 + 43.81 + 0 - 21.33}{2}$$

$$\psi = 22.24^\circ \quad \psi = 0.38 \text{rad}$$

$$K_{qa} = \frac{\cos 21.33^\circ \sin 32^\circ \cos 43.81^\circ}{\cos 0^\circ \sin 32^\circ \cos 0^\circ} \exp(-2 * 0.38 \tan 32^\circ)$$

$$K_{qa} = 0.223$$

$K_{qp}$  : Coefficient de butée de la surcharge, calculé comme suit :

$$\sin \Delta_1 = \frac{\sin \alpha}{\sin \varphi} = \frac{\sin 0^\circ}{\sin 20^\circ} \quad \Delta_1 = 0^\circ$$

$$\sin \Delta_2 = \frac{\sin \delta}{\sin \varphi} = \frac{\sin 20^\circ}{\sin 20^\circ} \quad \Delta_2 = 90^\circ$$

$$\omega = \frac{\pi}{2} - 11.33$$

$$\psi = \omega - \frac{\pi}{2} + \frac{\Delta_1 + \Delta_2 - \alpha + \delta}{2} = \omega - \frac{\pi}{2} + \frac{\Delta_1 + \Delta_2 - \alpha + \delta}{2} = \frac{\pi}{2} - 11.33 - \frac{\pi}{2} + \frac{0 + 90 - 0 + 20}{2}$$

$$\psi = 43.67^\circ \quad \psi = 0.761 \text{ rad}$$

$$K_{qp} = \frac{\cos 20^\circ \sin 20^\circ \cos 90^\circ}{\cos 0^\circ \sin 20^\circ \cos 0^\circ} \exp(+2 * 0.38 \tan 20^\circ)$$

$$K_{qp} = 2.463$$

#### Evaluation des charges agissantes sur le mur

##### ➤ Poids propre du mur

Hauteur du rideau :  $H_r = H - E_s$

La surface totale du mur :  $S_{tot} = \sum S_i = 11.75 \text{ m}^2$

Poids propre du mur :  $S_{tot} \times \gamma_b = 293.75 \text{ Kn/m}$

Le point d'application du poids au niveau de la semelle correspond au centre de gravité du mur tel que :

$$X_g = \frac{\sum S_i X_i}{\sum S_i} = 2.64 \text{ m}$$

Le centre de gravité de la semelle du mur :  $X_{gs} = 2.5 \text{ m}$

Moment de Poids propre du mur :  $M_w = W \cdot X_g = 775.5 \text{ Kn}$

##### ➤ Poids propre du remblai

Sol amont :

La surface du remblai :  $S_r = 7.71 \text{ m}^2$

Pois propre du remblai :  $S_r \times \gamma_{sol} = 115.67 \text{ Kn/m}$

Le point d'application du poids du remblai amont :  $X_{gs} = \frac{\sum S_i X_i}{\sum S_i} = 4.25 \text{ m}$

Moment de Poids propre du mur :  $M_w = W \cdot X_{gs} = 491.51 \text{ Kn}$

Sol aval :

La surface du remblai :  $S_r = 1.6m^2$

Pois propre du remblai :  $S_r \times \gamma_{sol} = 17.60Kn/m$

Le point d'application du poids du remblai amont :  $X_{gs} = \frac{\sum S_i X_i}{\sum S_i} = 0.8m$

Moment du Poids du remblai :  $M_r = W_r \cdot X_{gsol} = 14.08 Kn$

➤ **Force de poussé due au poids des terres**

$F_a^y = \frac{1}{2} 15 \times 0.318(5)^2 = 59.62 Kn/m$  inclinée de ( $\delta = 21.33^\circ$ ) par rapport à un axe horizontal est appliquée a ( $Hr/3$ ) par rapport à la base du parement du mur.

➤ **Force de poussé due à la surcharge**

$F_{aq} = K_{aq} q_a Hr = 89.2 Kn/m$  inclinée de ( $\delta = 21.33^\circ$ ) par rapport à un axe horizontal et appliquée a ( $Hr/2$ ) par rapport à la base du parement du mur

➤ **Force de poussé due à la cohésion**

$F_{acd} = \frac{c}{\tan \varphi} Hr = \frac{26}{\tan 32} 5 = 208.04Kn/m$  appliquée a ( $Hr/2$ ) de la direction normal au mur.

$F_{aci} = \frac{c}{\tan \varphi} Hr K_{aq} = \frac{26}{\tan 32} 5 \times 0.223 = 46.39Kn/m$  appliquée a ( $H/2$ ) de la direction inclinée de ( $\delta = 21.33^\circ$ ).

➤ **Force due à la pression d'eau**

$F_{aw} = \frac{1}{2} \gamma_w \times (Hr)^2 = \frac{1}{2} 10 \times (5)^2 = 125kn/m$

➤ **Force de butée due du poids des terres**

$F_p^y = \frac{1}{2} \gamma_{but} K_p (P_{fe})^2$

$F_{py} = \frac{1}{2} 2.793 \times \left(\frac{1}{\cos 11.33}\right)^2 \times 11 = 15.97Kn/m$  inclinée de ( $\delta = 20^\circ$ ) par rapport à un axe horizontal est appliquée a ( $p_{fe}/3$ ) par rapport à la base du parement du mur.

➤ **Force de butée due au a la surcharge**

$F_{pq} = K_q q_p p_{fe} = 2.465 \times 30 \times \left(\frac{1}{\cos 11.33}\right) = 75.35Kn/m$

**➤ Résultante des efforts**

**➤ La composante verticale des efforts**

$$R_v = (59.62 \times \sin 21.33) + (89.2 \times \sin 21.33) + (46.3 \sin 21.33) + (115.7) + (293.75) + (17.6) + (15.97 \times \sin 20) + (75.35 \sin 20)$$

$$R_v = 529.24 \text{Kn/m}$$

**➤ La composante horizontale des efforts**

$$R_H = (59.62 \times \cos 21.33) + 125 + (89.2 \times \cos 21.33) - (46.3 \times \cos 21.33) - (15.97 \times \cos 20) - (75.35 \times \cos 20) - 208.04$$

$$R_H = 12.84 \text{KN/m}$$

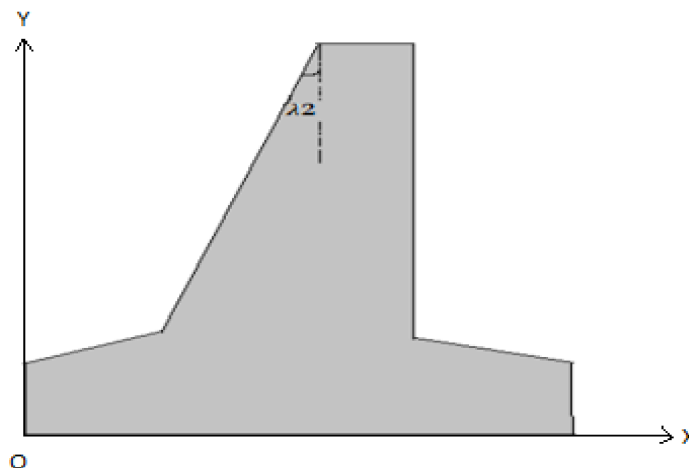
**➤ L'inclinaison par rapport à la verticale**

$$\tan(\theta) = \frac{R_H}{R_v} = \frac{12.84}{529.2} \quad \text{Alors : } \theta = 1.02^\circ$$

**➤ Le point d'application de la force**

L'équilibre des moments par rapport au point O, en introduit les composantes R<sub>v</sub> et R<sub>h</sub> de la réaction du sol au niveau de la base de la semelle l'égale en intensité a la résultante R et de sens opposé.

La figure suivante représente le point O :



$$R_s + R = 0$$

$$X = (59.62 \sin (21.33) 5) + (89.2 \sin (21.33) 5) + (46.3 \sin (21.33) 5) + (115.77 \times 4.25) + (293.75 \times 2.64) + (17.6 \times 0.8) - (59.77 \cos (21.33) \cdot (5/3 + 1)) - (125(5/2 + 1)) -$$

$$(89.62 \cos(21.33) \cdot (5/2+1)) - (46.3 \cos(21.33) \cdot (5/2+1)) + (15.97 \cos(20) \cdot (1/3+1)) + (75.35 \cos(20) \cdot (1/2+1)) + (208.04 \cdot (5/2+1)) / (529.3)$$

$$X = 2.76m$$

$$L' \text{ excentricité : } e = X - X_{gs} = 0.26m$$

$$\text{La largeur réduite } L'_s = L_s - (2e) = 4.48m$$

➤ **Les moments**

$$M_{stabilisant} = 2489.55Kn$$

$$M_{renversant} = 1027.64Kn$$

 **Justification à la stabilité**

➤ **La vérification de la stabilité au glissement**

$$F_{sg} = \frac{\tau_1}{\tau_2}$$

$$\tau_1 = R_V \tan \delta_{d'assise} + C_{d'assise} \times L_s$$

$$\tau_2 = R_H$$

Calcul de  $\delta_{d'assise}$  : On a une Surface très rugueuse  $\delta_{d'assise} = \varphi_{d'assise} = 13^\circ$

$$\text{Alors : } \tau_1 = 222.19Kn \quad \tau_2 = 11$$

$$F_{sg} = 20.19 \gg \gg 1.5 \quad \text{Condition satisfaite}$$

➤ **Vérification de la stabilité au renversement**

$$\text{La première condition : } e = 0.28 < \frac{L_s}{6} = 0.83$$

Condition satisfaite, pas besoin de vérifier la seconde condition

➤ **Vérification de la capacité portante**

$$N_q = 6.39$$

$$N_c = 23.34$$

$$N_\gamma = 3.41$$

$$i_\gamma = 0.82$$

$$i_q = i_c = 0.97$$

$$q_l = 0.5 \times 12 \times 4.44 \times 3.41 \times 0.82 + 11 \times 2 \times 6.39 \times 0.97 + 20 \times 23.34 \times 0.97$$



$$q_l = 665.58 \text{Kpa}$$

$$q_0 = 2 \times 11 = 22 \text{Kpa}$$

La contrainte admissible :  $q_{adm} = \frac{665.58-22}{3} + 22 = 236.52 \text{Kpa}$

La pression transmise :  $q_{trans} = \frac{529.24}{4.48} = 118.89 \text{Mpa}$

$$q_{trans} < q_{adm} \text{ Condition satisfaite.}$$

### B. Le calcul automatique

Nous prenons les mêmes données de l'exemple1 et établir le programme. Voir Les étapes de calcul automatique dans (l'annexe 1 jusqu'à l'annexe 6).

Le tableau suivant regroupe tous les résultats d'exemple1 :

	Le calcul manuel	Le calcul automatique
$S_{mur}$	11.75m <sup>2</sup>	11.75m <sup>2</sup>
$W_{mur}$	293.75Kn/m	293.83Kn/m
$X_G$	2.64m	2.64m
$X_{gs}$	2.5m	2.5m
$W_{sa}$	115.67Kn/m	115.77Kn/m
$X_{ags}$	4.25m	4.25m
$W_{ps}$	17.6m	17.6m
$X_{pgs}$	0.81m	0.80
$K_{ay}$	0.318	0.317
$F_{ay}$	59.62Kn/m	59.47Kn/m
$K_{aq}$	0.223	0.221
$F_{aq}$	89.2Kn/m	88.43Kn/m
$F_w$	125Kn/m	125Kn/m
$F_{cd}$	208.04Kn/m	208.174Kn/m
$F_{cia}$	46.39Kn/m	46.22Kn/m
$K_{py}$	2.793	2.796
$F_{py}$	15.97Kn/m	16Kn/m
$K_{pq}$	2.463	2.486
$F_{pq}$	75.35Kn/m	76.064Kn/m
$R_H$	12.84Kn/l	10.95Kn/m

$R_v$	529.24Kn/m	529.198Kn/m
$\theta$	1.02°	1.18°
X	2.76m	2.77m
$\epsilon$	0.26m	0.27m
$L'_s$	4.48m	4.45m
$M_{stab}$	2489.55Kn	2491.86Kn
$M_{renvr}$	1027.64Kn	1023.609Kn
$F_{sg}$	20.19	20.26
$F_{SR1}$	0.83	0.83
$q_{tran}$	118.89Kpa	118.89Kpa
$q_{adm}$	236.52Kpa	237.13Kpa

Tableau 5.2 : les résultats de l'exemple1

5.2.2. Exemple 2

Dans l'exemple 3 nous effectuons les mêmes étapes que celle l'exemple 1, l'exemple 2 et l'exemple 3.

Les étapes de calculs automatique dans (l'annexe 7 jusqu'à l'annexe 12)

5.2.2.1. Les données de calcul

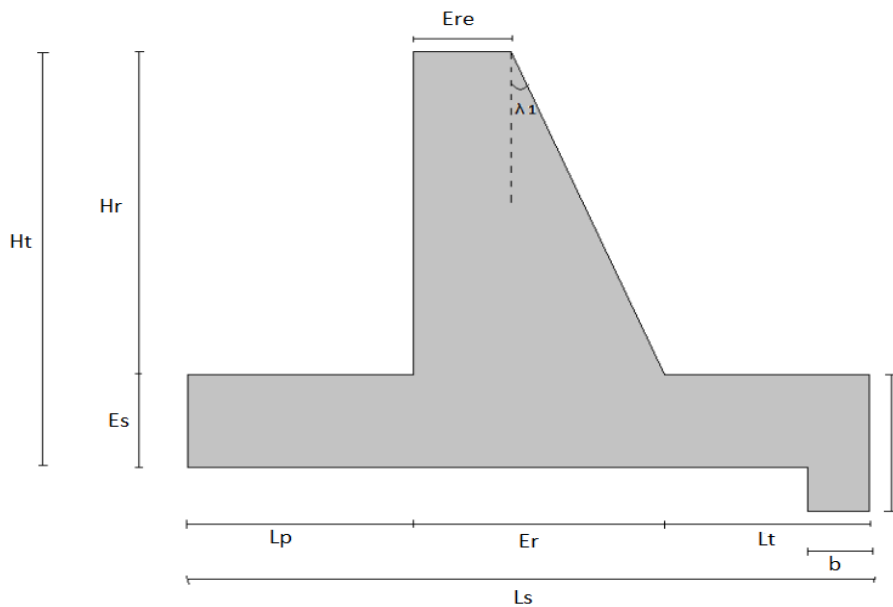


Figure 5.15 : Le type de mur utilisé dans notre exemple

- La géométrie du mur

$H_t = 5m$

$L_p = 1.5$

$l = 0.75m$

$$\begin{array}{lll}
 E_s = 0,5\text{m} & E_r = 1\text{m} & b = 0.5\text{m} \\
 E_{se} = 0.5\text{m} & L_t = 1.5\text{m} & E_{re} = 0,5\text{m} \\
 L_s = 4\text{m} & \lambda_1 = 6.34^\circ & \lambda_2 = 0^\circ
 \end{array}$$

Les Caractéristiques du sol : Un sol multicouche : 02 couches (Sable)

	Couche1 (amont)	Couche2 (amont)	Couche aval	Couche d'assise
$\gamma \left(\frac{\text{kn}}{\text{m}^3}\right)$	$\gamma_d = 12$	$\gamma_{sat} = 23$	$\gamma_d = 11$	$\gamma_{sat} = 22$
$\gamma_w \left(\frac{\text{kn}}{\text{m}^3}\right)$	0	10	0	10
$c \left(\frac{\text{kn}}{\text{m}^2}\right)$	13	0	0	10
H(m)	2	2.5	2	3
$\varphi(^\circ)$	22	30	20	11
La rugosité	Très rugueuse	Très rugueuse	Intermédiaire	intermédiaire

Tableau 5.3 : les caractéristiques du sol d'exemple2

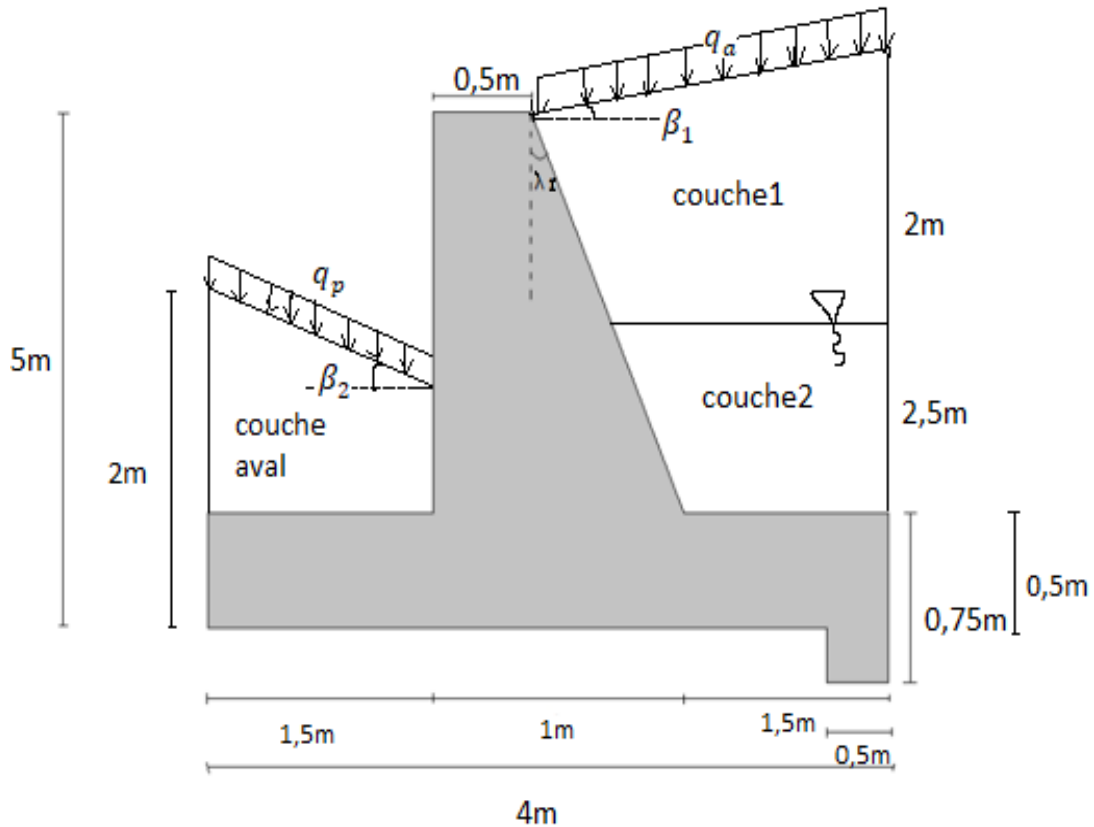
L'effet de butée est pris en compte : OUI

Le mur avec système de drainage

$$q_a = 180\text{Kpa} \quad \alpha_1 = 0$$

$$q_p = 30\text{Kpa} \quad \alpha_1 = 0$$

$$\beta_1 = 9^\circ \quad \beta_2 = 12^\circ$$



5.2.2.2. La solution

Le tableau suivant regroupe tous les résultats d'exemple 2 :

	Le calcul manuel	Le calcul automatique
$S_{mur}$	$5.5m^2$	$5.5m^2$
$W_{mur}$	137.5Kn/m	137.5Kn/m
$X_G$	1.97m	1.97m
$X_{gs}$	2.10m	2.10m
$W_{sa1}$	49.128Kn/m	49.126Kn/m
$W_{sa2}$	53.26kn/m	53.26kn/m
$X_{ags1}$	3.07m	3.07m
$X_{ags2}$	3.1m	3.1m
$W_{ps}$	27.37m	27.37m
$X_{pgs}$	0.72m	0.72m
$K_{a\gamma 1}$	0.527	0.527
$K_{a\gamma 2}$	0.402	0.401
$F_{a\gamma 1}$	12.80Kn/m	12.82Kn/m

$F_{ay2}$	16.53kn/m	16.50kn/m
$K_{aq1}$	0.402	0.402
$K_{aq2}$	0.299	0.299
$F_{aq1}$	145.61Kn/m	145.74Kn/m
$F_{aq2}$	153.40kn/m	153.48kn/m
$F_{cd1}$	64.73Kn/m	64.78Kn/m
$F_{cia}$	26.02Kn/m	26.06Kn/m
$K_{py}$	4.69	4.70
$F_{py}$	58.03Kn/m	58.16Kn/m
$K_{pq}$	3.08	3.08
$F_{pq}$	138.6Kn/m	138.9Kn/m
$R_H$	62.1Kn/l	61.81Kn/m
$R_v$	466.64Kn/m	466.80Kn/m
$\theta$	7.58°	7.54°
X	1.68m	1.66m
é	0.42m	0.43m
$L'_s$	3.1m	3.1m
$M_{stab}$	1701.82Kn	1708.96Kn
$M_{renvr}$	931.58Kn	932.58Kn
$F_{sg}$	1.61	1.61
$F_{SR1}$	0.66	0.66
$q_{tran}$	150.52Kpa	149.59Kpa
$q_{adm}$	132.94Kpa	133.43Kpa

Tableau 5.4 : les résultats de l'exemple2

### 5.2.3. Exemple 3

Dans l'exemple 3 nous effectuons les mêmes étapes que celle l'exemple 1, l'exemple 2 et l'exemple 3.

Les étapes de calculs automatique dans (l'annexe 12 jusqu'à l'annexe 18)

#### 5.2.3.1. Les données de calcul

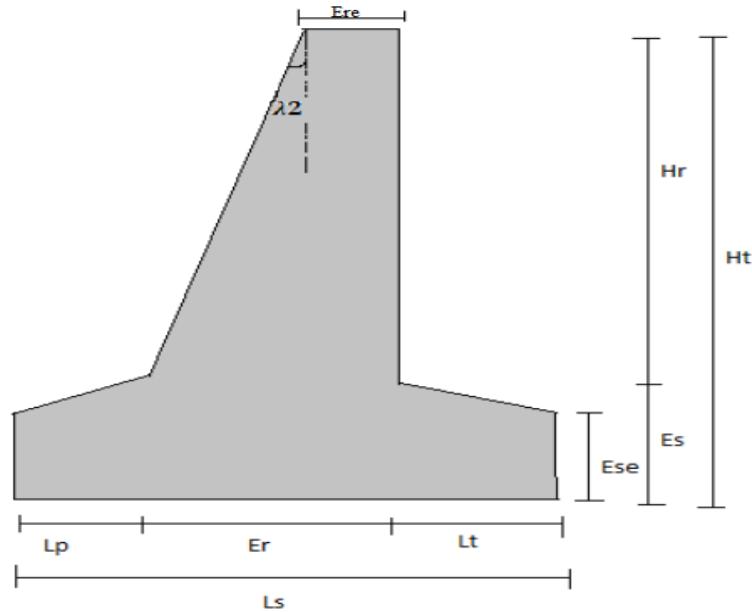


Figure 5.16 : types de mur utilisé dans exmple3

- La géométrie du mur

- $H_t = 6.5m$                        $L_p = 1m$                        $L_s = 5.18m$
- $E_s = 0.5m$                        $E_r = 2.68m$                        $E_{re} = 0,5m$
- $E_{se} = 0.25m$                        $L_t = 1.5m$                        $\lambda_1 = 0^\circ$                        $\lambda_2 = 20^\circ$

- Les Caractéristiques du sol

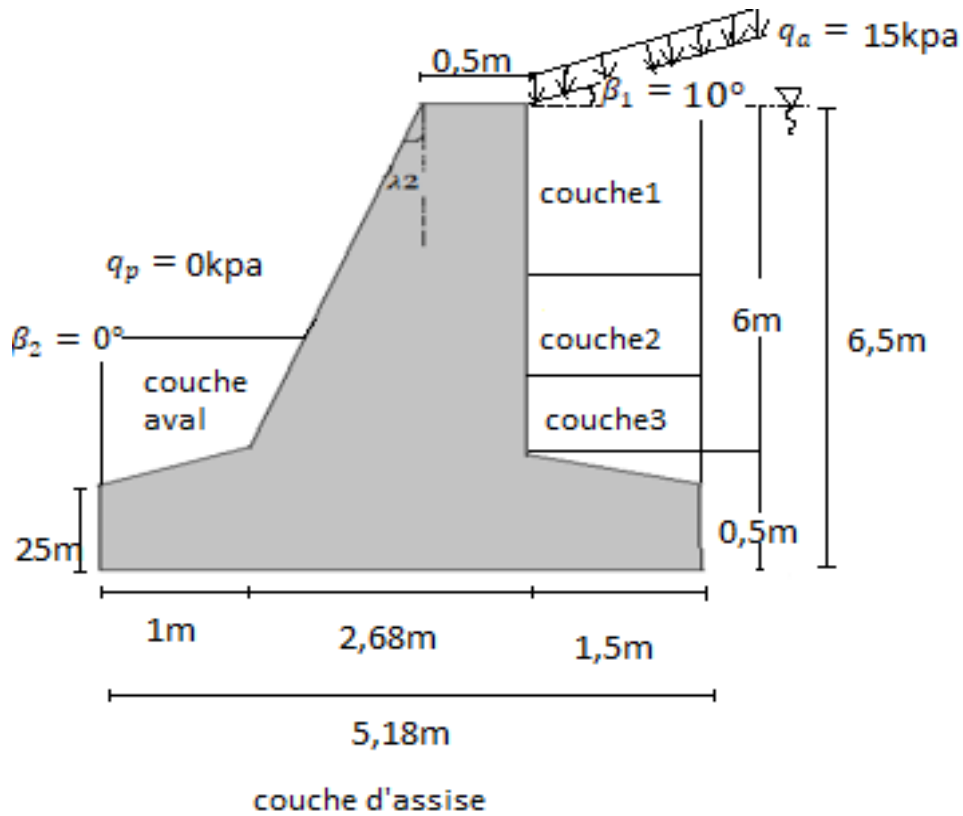
Un sol multicouche : 03 couches  
 L'effet de butée est pris en compte : NON  
 Le mur avec système de drainage

- $\beta_1 = 10^\circ$                        $\beta_2 = 0^\circ$
- $q_a = 15Kpa$                        $\alpha = 0^\circ$
- $q_p = 0 KPa$                        $\alpha = 0^\circ$

	Couche1 (amont)	Couche2 (amont)	Couche3 (amont)	Couche aval	Couche d'assise
$\gamma(\frac{kn}{m^3})$	$\gamma_d = 10$	$\gamma_d = 20$	$\gamma_d = 20$	$\gamma_d = 25$	$\gamma_d = 20$

$\gamma_w \left(\frac{kn}{m^3}\right)$	0	0	0	10	0
$c \left(\frac{kn}{m^2}\right)$	0	15	20	13	15
H(m)	3	1,6	1.4	2	3
$\varphi(^{\circ})$	10	20	20	20	30
La rugosité	Peu rugueuse	Peu rugueuse	Peu rugueuse	Peu rugueuse	intermédiaire

Tableau 5.5 : les caractéristiques du sol d'exemple 3



5.2.3.2. La solution

Le tableau suivant regroupe tous les résultats d'exemple 3 :

	Le calcul manuel	Le calcul automatique
$S_{mur}$	$11.82m^2$	$11.82m^2$
$W_{mur}$	295.63Kn/m	295.63Kn/m
$X_G$	2.71m	2.71m
$X_{gs}$	2.54m	2.54m

$W_{sa1}$	46.98Kn/m	46.98Kn/m
$W_{sa2}$	48kn/m	48kn/m
$W_{sa3}$	42kn/m	42kn/m
$X_{ags1}$	4.44m	4.43m
$X_{ags2}$	4.43m	4.43m
$X_{ags3}$	4.43m	4.43m
$K_{ay1}$	0.97	0.971
$K_{ay2}$	0.540	0.540
$K_{ay3}$	0.540	0.540
$F_{ay1}$	43.65Kn/m	43.71Kn/m
$F_{ay2}$	13.82kn/m	13.84kn/m
$F_{ay3}$	10.58kn/m	10.60kn/m
$K_{aq1}$	0.63	0.636
$K_{aq2}$	0.405	0.405
$K_{aq3}$	0.405	0.405
$F_{aq1}$	28.63Kn/m	28.63Kn/m
$F_{aq2}$	29.16kn/m	29.19kn/m
$F_{aq3}$	43.7kn/m	43.71kn/m
$F_{cd2}$	65.93Kn/m	65.97Kn/m
$F_{cia2}$	26.70Kn/m	26.75Kn/m
$F_{cd3}$	76.92kn/m	76.97kn/m
$F_{id3}$	31.15Kn/m	31.21Kn/m
$R_H$	83.4Kn/l	83.5Kn/m
$R_v$	454.73Kn/m	454.84Kn/m
$\theta$	10.4°	10.41°
$X$	2.57m	2.58m
$\epsilon$	0.03m	0.039m
$L'_s$	5.12m	5.10m
$M_{stab}$	1790.501Kn	1796.532Kn
$M_{renvr}$	621.45Kn	622.327Kn
$F_{sg}$	2.91	2.90



$F_{SR1}$	0.86	0.86
$q_{tran}$	88.29Kpa	89.17Kpa
$q_{adm}$	168.88Kpa	168.34Kpa

**Tableau 5.6** : les résultats de l'exemple3

### 5.3. Conclusion

Après l'établissement du programme en Vb.Net, qui permet de vérifier la stabilité d'un mur de soutènement, ensuite la vérification de l'efficacité de ce programme avec la comparaisent d'un calcul manuelle par apport a un calcul automatique à l'aide de ce programme nous avons assuré que le programme est réussi. Selon les résultats des calculs que nous avons trouvé en exemple1, exemple2 et exemple3.

## Chapitre 6 : Etude paramétrique

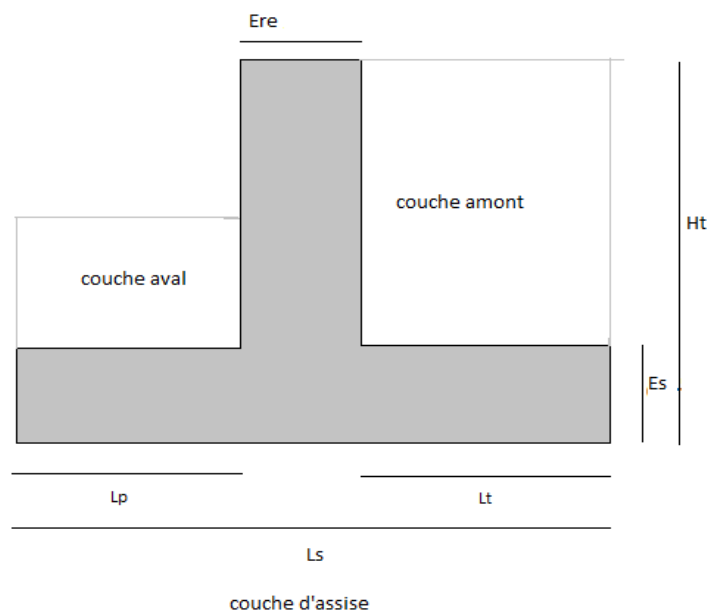
### 6.1. Introduction

L'étude paramétrique a été effectuée pour un sol monocouche et un mur de soutènement de ( $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$ ), une hauteur de  $H_t$  et une largeur de  $B$ .

Différents cas ont été étudiés en faisant varier plusieurs paramètres de calcul :

- Effet de l'inclinaison du pente ( $\beta_1$ ) du sol amont.
- Effet de la semelle arrière  $L_t$ .
- Effet de la rugosité ( $\delta$ ).

La figure suivante représente le type de mur utilisé dans l'étude paramétrique :



### 6.2. Effet de l'inclinaison de la pente ( $\beta_1$ ) du sol amont

On propose d'étudier un mur de soutènement autostable avec un système de drainage fonctionnant, et négliger la butée.

#### 6.2.1. Effet de l'inclinaison de la pente ( $\beta_1$ ) du sol amont sur les coefficients (Fsg et Fsr)

Le tableau suivant regroupe les résultats trouvés pour la variation des coefficients de sécurité de glissement (Fsg) et de renversement (Fsr) en fonction de la variation de l'augmentation de la pente ( $\beta_1$ ) :

$\beta_1$ (°)	0	3	6	9	12	15
Fsg	4.81	5.41	6.09	6.79	7.44	7.87
Fsr	2.59	2.66	2.73	2.79	2.85	2.90

**Tableau 6.1** : Valeurs de Fsg et Fsr.

### ❖ Interprétation des résultats

Les résultats obtenus de la variation des coefficients de sécurité de renversement et de glissement en fonction de l'augmentation du ( $\beta_1$ ) par le tableau (6.1) et la figure (6.1), La lecture de ces résultats confirme bien que les deux coefficients de sécurité (Fsg et Fsr) augmente en fonction de l'augmentation de la de la pente  $\beta_1$ .

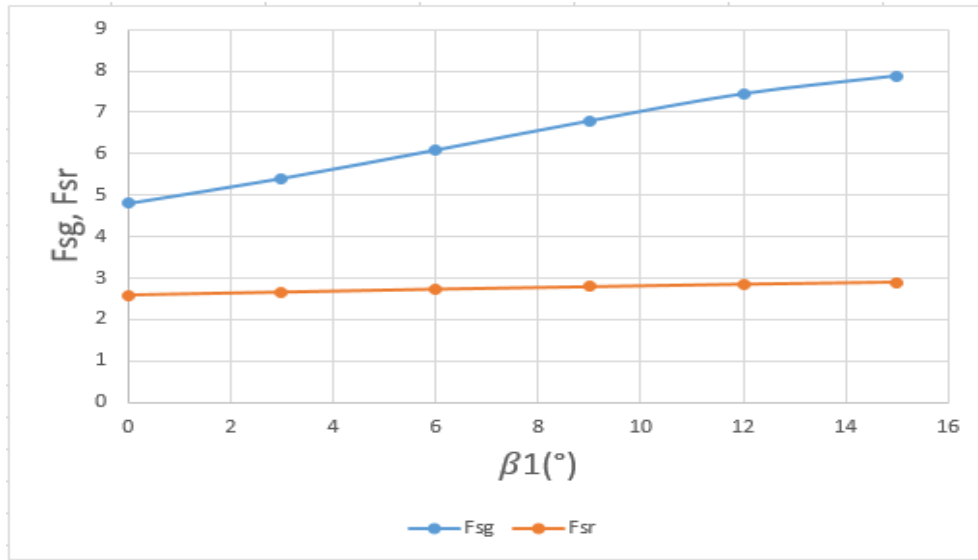


Figure 6.1 : la variation de Fsg et Fsr en fonction du  $\beta_1$

### 6.2.2. Effet de l'inclinaison de la pente ( $\beta_1$ ) du sol amont sur la capacité portante de la semelle du mur

Le tableau suivant regroupe les résultats trouvés pour la variation de la pression transmise à la semelle et la contrainte admissible en fonction de la variation de l'augmentation de la pente ( $\beta_1$ ) :

$\beta_1$ (°)	0	3	6	9	12	15
q transmise	158.95	163.26	167.58	171.81	175.84	179.48
q admissible	285.53	293.37	300.21	305.81	309.87	311.87

Tableau 6.2 : les valeurs de  $q_{adm}$  et  $q_{trans}$

### ❖ Interprétation des résultats

Les résultats obtenus de la variation de pression transmise et de la contrainte admissible en fonction de l'augmentation du ( $\beta_1$ ) par le tableau (6.2) et la figure (6.2), La lecture de ces

résultats confirme bien que  $q_{adm}$  et  $q_{trans}$  augmente en fonction de l'augmentation de la de la pente  $\beta_1$ .

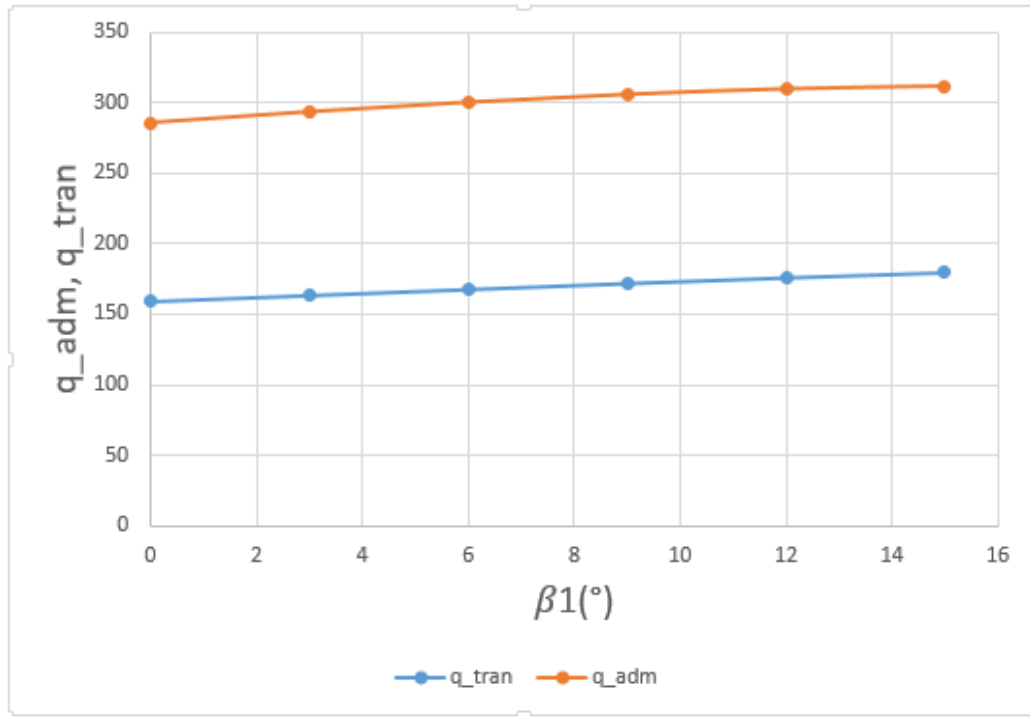


Figure 6.2 : la variation de  $q_{adm}$  et  $q_{trans}$  en fonction  $\beta_1$

### 6.3. Effet de la rugosité $\delta$

On propose d'étudier un mur de soutènement autostable avec un système de drainage fonctionnant, et prendre l'effet de buté en considération.

#### 6.3.1. Effet de la rugosité ( $\delta$ ) sur les coefficients (Fsg et Fsr)

Le tableau suivant regroupe les résultats trouvés pour la variation des coefficients de sécurité de glissement (Fsg) et de renversement (Fsr) en fonction de la variation de l'augmentation de la rugosité du couche amont, aval et couche d'assise :

Les valeurs de la rugosité (0, 6.66, 13.33 et 20) qui représente dans le tableau 6.1 sont respectivement pour un mur de surface (lisse, peu rugueuse, intermédiaire et très rugueuse)

$\delta$ (°)	0	6.66	13.33	20
Fsg	0.922	1.81	3.47	6.18
Fsr	1.42	1.69	1.95	2.20

Tableau 6.3 : les valeurs de Fsg et Fsr en fonction de  $\delta$

### ❖ Interprétation des résultats

Les résultats obtenus de la variation des coefficients de sécurité de renversement et de glissement en fonction de l'augmentation du ( $\delta$ ) par le tableau (6.3) et la figure (6.3), La lecture de ces résultats confirme bien que les deux coefficients de sécurité ( $F_{sg}$  et  $F_{sr}$ ) augmente en fonction de l'augmentation de la de la pente  $\delta$ .

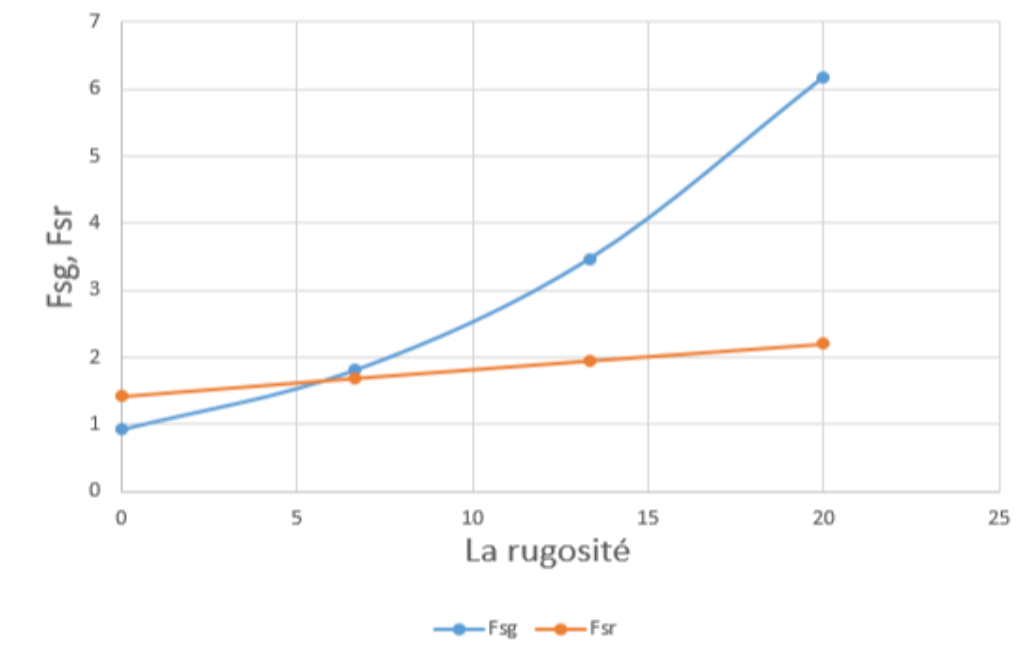


Figure 6.3 : la variation de  $F_{sg}$  et  $F_{sr}$  en fonction  $\delta$

### 6.3.2. Effet de la rugosité ( $\delta$ ) sur la capacité portante de la semelle du mur

Le tableau suivant regroupe les résultats trouvés pour la variation de la pression transmise au semelle et la contrainte admissible en fonction de la variation de l'augmentation de la rugosité:

$\delta$ (°)	0	6.33	13.33	20
q transmise	96.18	103.066	143.75	189.52
q admissible	89.80	113.21	130.59	140.47

Tableau 6.4 : les valeurs de  $q_{adm}$  et  $q_{trans}$

### ❖ Interprétation des résultats

Les résultats obtenus de la variation de pression transmise et de la contrainte admissible en fonction de l'augmentation du ( $\delta$ ) par le tableau (6.4) et la figure (6.4), La lecture de ces résultats confirme bien que  $q_{adm}$  et  $q_{trans}$  augmente en fonction de l'augmentation de la de la rugosité  $\delta$ .

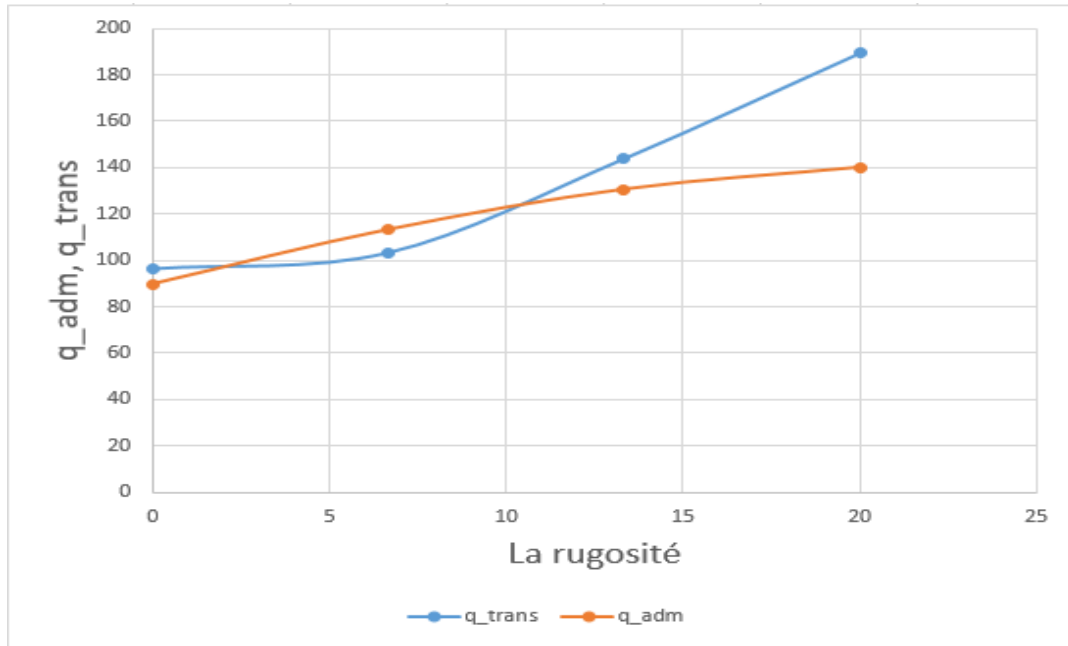


Figure 6.4 : la variation de  $q_{adm}$  et  $q_{tran}$  en fonction  $\delta$

#### 6.4. Effet de la semelle arrière du mur ( $L_t$ )

On propose d'étudier un mur de soutènement autostable avec un système de drainage qui fonctionne, tout on négligeant l'effet de la buté.

##### 6.4.1. Effet de la semelle arrière ( $L_t$ ) sur les coefficients ( $F_{sg}$ et $F_{sr}$ )

Le tableau suivant regroupe les résultats trouvé pour la variation des coefficients de sécurité de glissement ( $F_{sg}$ ) et de renversement ( $F_{sr}$ ) en fonction de la variation de l'augmentation de la semelle arrière du mur :

$L_t$ (m)	0	0.5	1	1.5	2
$F_{sg}$	0.487	0.586	0.685	0.784	0.884
$F_{sr}$	1.045	1.142	1.252	1.375	1.513

Tableau 6.5 : les valeurs de  $F_{sg}$  et  $F_{sr}$  en fonction de  $L_t$

#### ❖ Interprétation des résultats

Les résultats obtenus de la variation des coefficients de sécurité de renversement et de glissement en fonction de l'augmentation du ( $Lt$ ) par le tableau (6.5) et la figure (6.5), La lecture de ces résultats confirme bien que les deux coefficients de sécurité ( $F_{sg}$  et  $F_{sr}$ ) augmente en fonction de l'augmentation de la semelle arrière du mur.

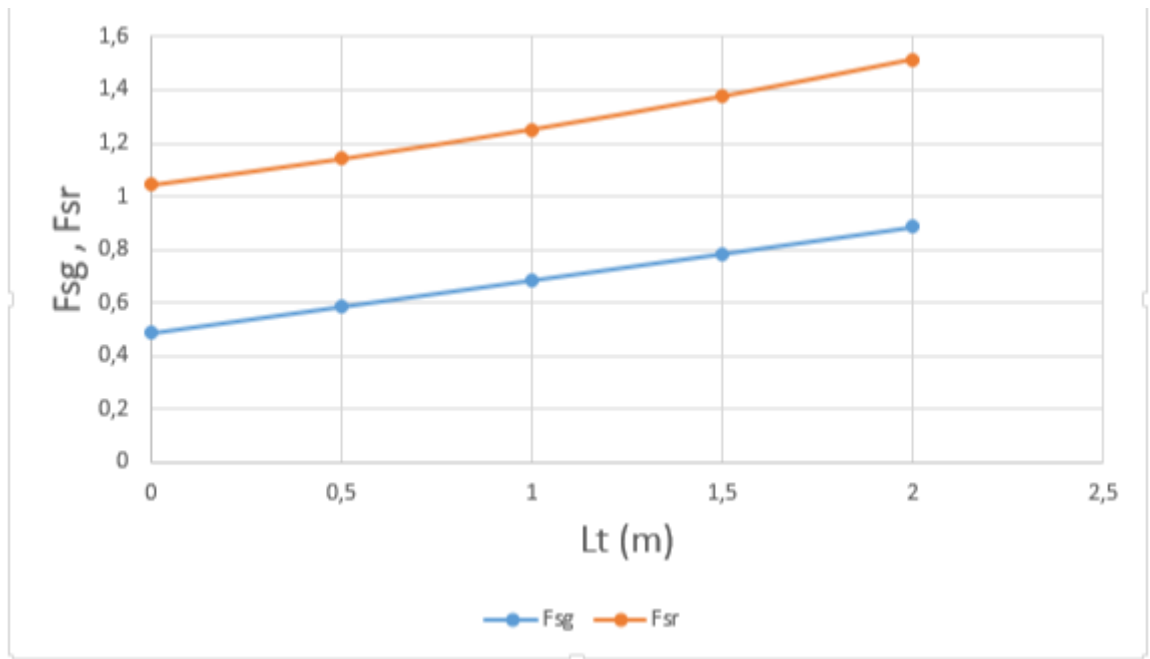


Figure 6.5 : la variation de  $F_{sg}$  et  $F_{sr}$  en fonction  $Lt$

### 6.3.1. Effet de la semelle arrière ( $Lt$ ) sur la capacité portante de la semelle du mur

Le tableau suivant regroupe les résultats trouvés pour la variation de la pression transmise à la semelle et la contrainte admissible en fonction de la variation de l'augmentation de la ( $Lt$ ):

$Lt$ (m)	0	0.5	1	1.5	2
q transmise	442.28	197.66	147.33	126.93	115.86
q admissible	31.64	38.20	40.97	42.17	42.72

Tableau 6.6 : les valeurs de  $q_{adm}$  et  $q_{trans}$

#### ❖ Interprétation des résultats

Les résultats obtenus de la variation de pression transmise et de la contrainte admissible en fonction de l'augmentation du ( $Lt$ ) par le tableau (6.6) et la figure (6.6), La lecture de ces résultats confirme bien que  $q_{tran}$  diminue avec l'augmentation de  $Lt$  et  $q_{adm}$  augmente avec  $Lt$ .

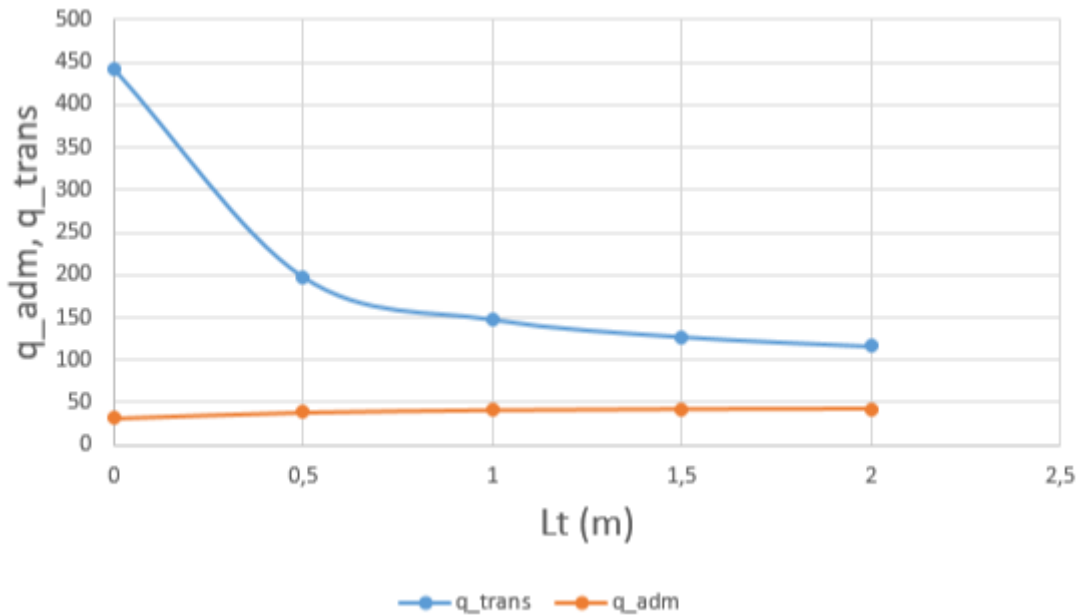


Figure 6.6 : la variation de  $F_{sg}$  et  $F_{sr}$  en fonction  $L_t$

#### 6.4. Conclusion

L'analyse des résultats de l'étude paramétrique réalisée dans ce chapitre, permet de tirer un certain nombre de conclusions sur l'influence des paramètres sur la stabilité d'un mur autostable.

Les résultats regroupés dans les Figures 6.1, 6.3, et 6.5 montrent une comparaison entre l'influence de l'angle ( $\beta$ ), la rugosité et la semelle arrière du mur résume les conclusions suivantes :

Plus les paramètres ( $\beta, \delta, L_t$ ) augmente plus la sécurité de glissement et de renversement du mur augmente.

Par ailleurs, les résultats regroupés dans les Figures 6.2, 6.4, et 6.6; Plus les paramètres ( $\beta, \delta$ ) augmente plus  $q_{adm}$  augmente et  $q_{tran}$  augmente mais, l'augmentation de  $L_t$  provoque une diminution de  $q_{trans}$  et une augmentation de  $q_{adm}$ .

L'un des fruits d'un calcul automatique est la possibilité de réaliser des études paramétriques est de tester la sensibilité de (la capacité portante, glissement et de renversement) de certains



paramètres; ceci est rendu possible grâce au nombre volume de calcul important qu'on peut réaliser en un temps record et avec moins d'efforts.

## ***CONCLUSION GENERALE***

Ce mémoire nous a permis de voir en détail le calcul d'un mur de soutènement autostable avec sa vérification de stabilité, d'approfondir et d'apprendre un autre domaine qui est la programmation en utilisant le code Vb.Net. D'autre part, nous avons réalisé un programme de calcul de mur de soutènement. Il suffit à l'utilisateur de ce programme d'introduire les données relatives aux murs de soutènement par étape. Les différents résultats et les vérifications sont effectués et affichés par un simple clic.

La réalisation du programme nécessite une maîtrise des différentes étapes de calcul des soutènements selon l'eurocode7, chose qui nous a permis de divulguer certaines difficultés de programmation.

L'étude des murs de soutènements autostables nous a mené à :

- Conclure que la méthode utilisée, dans la détermination du bilan des forces et justification de la stabilité se fait en tenant compte de toutes les sollicitations auxquelles est soumis le mur (poussée des terres, butée des terres, force due à la surcharge, la force d'eau et à la cohésion), tous les paramètres de calcul (caractéristiques géotechniques du sol multi couche qui surmonte le mur et du sol à sa base et toutes les caractéristiques géométriques du mur en lui-même, la présence du système de drainage ou non ) et englobe tous les types de murs de soutènements en béton armé avec différentes formes géométriques ce qui nous a permis d'obtenir des résultats précis.

Dans la deuxième partie de ce calcul qui est la réalisation de programme de calcul sous **VB.Net**, le programme établi contient certaines options, telles que :

- La prise en compte ou non de l'effet de la butée ;
- La présence ou non de la nappe ;
- La présence ou non du système de drainage.

Les résultats obtenus sont validés par un calcul manuel.

L'étude paramétrique a montré que :

- Plus les paramètres (l'angle du talus  $\beta$ , la rugosité  $\delta$  et  $L_t$ ) augmente plus la sécurité de glissement et de renversement du mur augmente Et plus  $q_{adm}$  augmente et  $q_{tran}$  augmente mais, l'augmentation de  $L_t$  provoque une diminution de  $q_{trans}$  et une augmentation de  $q_{adm}$ .

Nous recommandons aux futurs étudiants de reprendre le programme établi et le perfectionner en ajoutant les possibilités de calcul dynamique d'une part et d'enrichir le programme par d'autres codes de calcul.

**REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE**

- [1]- Schlosser.F (1991), "Murs de soutènement", Techniques de l'ingénieur, Traité Construction Volume C 244, Paris.
- [2]- Zeroual. F," Etude du comportement d'un mur de soutènement soumis à des sollicitations dynamiques", Mémoire de Magister, Université Batna.
- [3]- Bouguerra Amar, Magroud Brahim, (Conception et calcul de mur de soutènement en zone sismique), Mémoire de Master, Université 08 Mai 1945 de Guelma, Juin 2018.
- [4]- S.Gahmous, Étude de la stabilité d'un ouvrage de soutènement renforcé par géosynthétique, Mémoire de projet fin d'étude, Mohamed khidher-Biskra.
- [5]- M. Bennour, I.Khedimallah, Calcul du ferrailage d'un mur de soutènement avec prise en compte de l'effet sismique, Mémoire de fin d'étude, Université 8Mai 1945 – Guelma, Juin 2018.
- [6]- H.Chebira, A.Mekki, Etude d'un tronçon de mur de soutènement a hauteur variable, Mémoire de projet fin d'étude, Univrité Aboubekr Belkaid Tlemcen, 2017/2018.
- [7]- S.Tedjini, Conception et vérification d'un mur de soutènement type cantilever par la méthode de chargement progressives (pushover), Mémoire de projet fin d'étude, Université Ziane Achour de Djelfa, 2016-2017.
- [8]- Nbri.I, Slougui.M, Elaboration de programmes de calcul automatique sur EXCEL VBA d'éléments et structures en béton armé, Mémoire de projet fin d'étude, Univrité de blida1, 2018/2019.
- [9]- le SERVICE D'ETUDES TECHNIQUES DES ROUTES ET AUTOROUTES, « Ouvrages de soutènement- MUR 73 », Ministère de l'Equipement, du Transport et du Tourisme France, 1998.
- [10]- BOUAFIA.A : Calcul pratique des fondations et des soutènements, 2Péme Pediton revue et corrigée, Office des Publication Universitaire, 02-2009.
- [11]- Ministère de l'Habitat, de l'Urbanisme et de la ville, Règles Parasismiques Algériennes RPA 99/Version 2003. DTR-BC 248 - Centre National de Recherche Appliquée en Génie sismique (CGS), Alger, 2004.

## *Bibliographie*

[12]- Dr.Ali Bouafia : introduction à la dynamique des sols, Tome 2, calcul dynamiques des ouvrages géotechniques. Office des publications universitaires, Alger, 2010.

[13]- BOUAFIA A, « CALCUL DES OUVRAGES GEOTECHNIQUES- PROBLEMES RESOLUS », Département de génie civil, université Blida 1, 2018.

[14]- Ministère de l'Habitat, de l'Urbanisme et de la ville, Règles Parasismiques Algériennes RPA 99/Version 2003. DTR-BC 248 - Centre National de Recherche Appliquée en Génie sismique (CGS), Alger, 2004.

[15]- FILLIAT G, « La pratique des sols et fondations », conservatoire national des arts et métiers de paris, Chapitre 7.

### ➤ Sites internet

[16]- Wikipédia.

[17]- [www.microsoft.com/vbasic](http://www.microsoft.com/vbasic)

# ANNEXE

## Les étapes de Calcul automatique de l'exemple 1, l'exemple 2 et l'exemple 3

### Exemple 1

- La fenêtre projet :

projet

Identification :

élabore par :

partie :

Date :

Discription :

Client :

- Pour connaître la norme utilisée :

nomre

Calcul aux états limites standard ; Eurocode 7

- La déclaration du poids volumique du mur  $\gamma_b$  en ( $kn/m^3$ )

matériaux

poids volumique du mur (  $\gamma_b$  (  $kn/m^3$  ) ) :

# ANNEXE

- La géométrie du mur en suite le calcul de (la surface du mur, leur poids propre, le centre de gravité du mur et le centre de gravité de la semelle :

Form1

Géométrie du mur

Type 1

Type 2

Type 3

Type 4

Type 5

Type 6

Type 7

Type 8

géométrique

Géométrie du mur

Ht (m) =	<input type="text" value="6"/>	l (m) =	<input type="text"/>	Sm (m <sup>2</sup> ) =	<input type="text" value="11,75325"/>
Ls (m) =	<input type="text" value="5"/>	b (m) =	<input type="text"/>	Wm (Kor/ml) =	<input type="text" value="293,8312"/>
Ese (m) =	<input type="text" value="0,5"/>	Ese (m) =	<input type="text" value="1"/>	Xg (m) =	<input type="text" value="2,64245"/>
Lp (m) =	<input type="text" value="1,5"/>	Es (m) =	<input type="text" value="1"/>	Xgs (m) =	<input type="text" value="2,5"/>
Er (m) =	<input type="text" value="2"/>	lambda 1 (°) =	<input type="text" value="0"/>		
Lt (m) =	<input type="text" value="1,5"/>	lambda 2 (°) =	<input type="text" value="11,33"/>		

# ANNEXE

- Les caractéristiques du sol monocouche :

caractéristique du sol
— □ ×

**Couche amont**

$\gamma_{sat}(kn/m^3) = 25$      $C(kpa) = 26$      Sol saturé

$\gamma_d(kn/m^3) =$      $h(m) = 5$      $\gamma(kn/m^3) = 15$

$\gamma_w(kn/m^3) = 10$      $\phi(^{\circ}) = 32$      Sol sec

**La Rugosité du mur**

**Couche amont**

Très rugueuse     Lisse

peu rugueuse     Intermédiaire

$\delta(^{\circ}) = 21.33333333$

**Couche aval**

Très rugueuse     Lisse

peu rugueuse     Intermédiaire

$\delta(^{\circ}) = 20$

**La couche d'assise**

Très rugueuse     Lisse

peu rugueuse     Intermédiaire

$\delta(^{\circ}) = 13$

**Couche aval**

$\gamma_t(kn/m^3) =$      $C(kpa) = 0$      Sol saturé

$\gamma_d(kn/m^3) = 11$      $h(m) = 2$      $\gamma(kn/m^3) = 11$

$\gamma_w(kn/m^3) = 0$      $\phi(^{\circ}) = 20$      Sol sec

**La couche D'assise**

$\gamma_t(kn/m^3) = 22$      $C(kpa) = 20$      Sol saturé

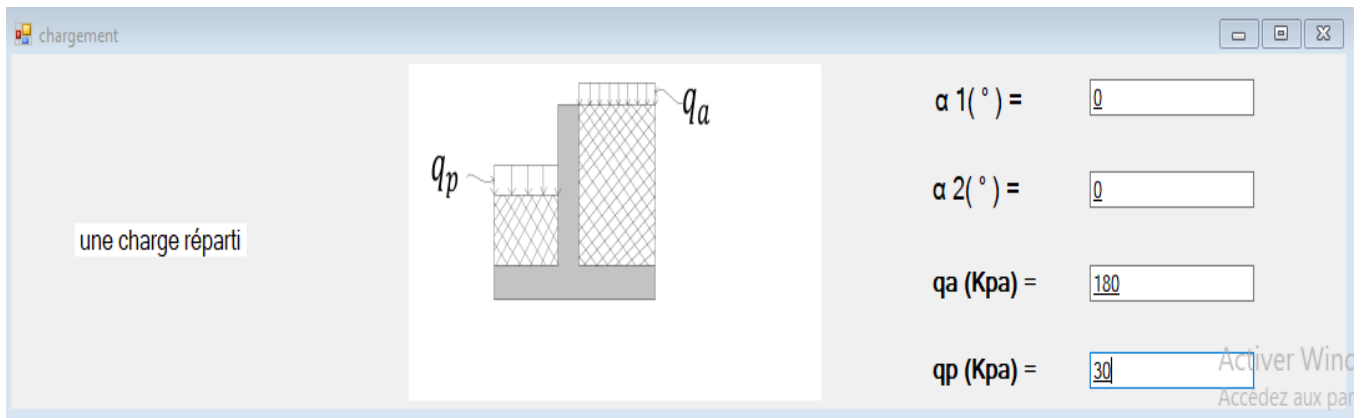
$\gamma_d(kn/m^3) =$      $h(m) = 6$      $\gamma(kn/m^3) = 12$

$\gamma_w(kn/m^3) = 10$      $\phi(^{\circ}) = 13$      Sol sec

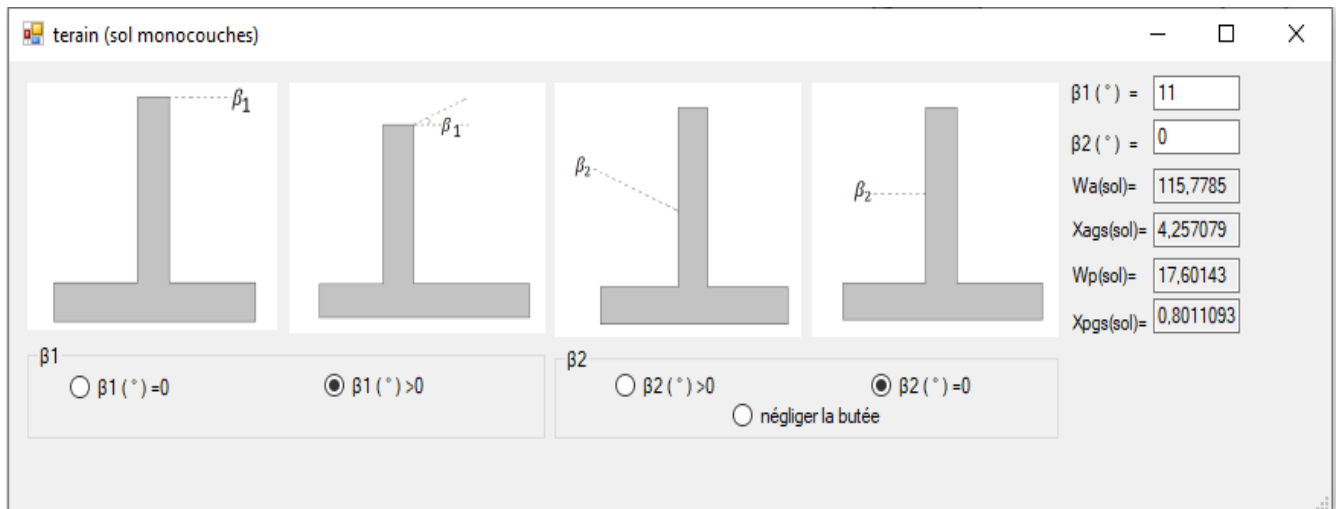


## ANNEXE

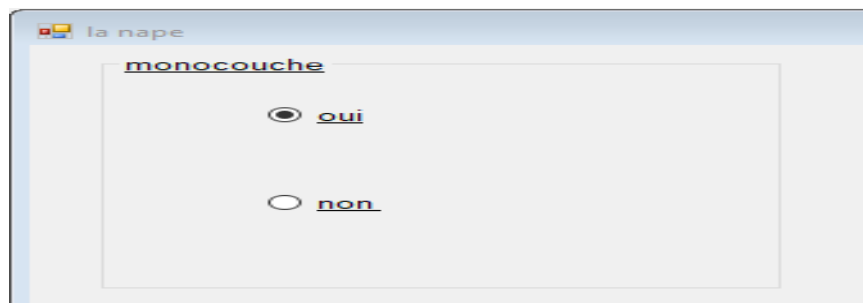
- La déclaration du  $\alpha_1, \alpha_2, q_1$  et  $q_2$  :



- La déclaration des coefficients  $\beta_1, \beta_2$  ensuite le calcul du poids du remblai du sol amont et aval et les points d'applications du remblai du sol amont et aval :



- La déclaration de la présence d'eau :



- Le calcul des coefficients et des forces agissant sur le mur avec la présence ou non de système de drainage, et le choix de prendre l'effet de butée en considération ou pas :

# ANNEXE

**force et coefficient monocouche**

**Couche amont (poussé)**

$K_{ay} =$	<input type="text" value="0,317175"/>	$F_{cd}(kn/m) =$	<input type="text" value="208,1746"/>
$K_{aq} =$	<input type="text" value="0,2210782"/>	$F_{ci}(kn/m) =$	<input type="text" value="46,02288"/>
$F_{ay}(kn/m) =$	<input type="text" value="59,47032"/>	$F_{aq}(kn/m) =$	<input type="text" value="88,4313"/>
$F_{aw}(kn/m) =$	<input type="text" value="125"/>		

**Couche aval (la buté)**

$K_{py} =$	<input type="text" value="2,79695"/>	$F_{pq}(kn/m) =$	<input type="text" value="76,06411"/>
$K_{pq} =$	<input type="text" value="2,486109"/>	$F_{pcd}(kn/m) =$	<input type="text" value="0"/>
$F_{py}(kn/m) =$	<input type="text" value="16,00015"/>	$F_{pci}(kn/m) =$	<input type="text" value="0"/>
$F_{pw}(kn/m) =$	<input type="text" value="0"/>		

**Le système de drainage**

Mur avec système de drainage

Mur sans système de drainage

**L'effet de butée est pris en compte?**

oui et avec système de drainage

oui et sans système de drainage

Non

- La résultante des forces horizontale et vertical :

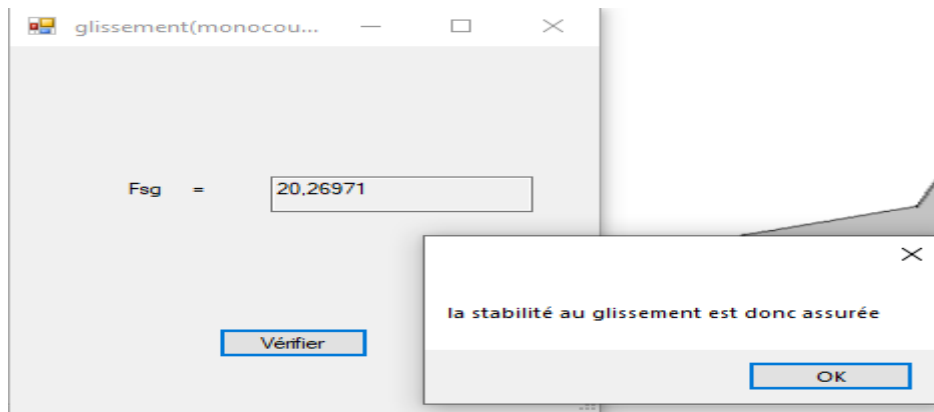
**bilan monocouche**

$R_h (Kn/m) =$	<input type="text" value="10,95777"/>
$R_v (Kn/m) =$	<input type="text" value="529,198"/>
$\theta (^\circ) =$	<input type="text" value="1,186215"/>
$X(m) =$	<input type="text" value="2,774496"/>
$\acute{e}(m) =$	<input type="text" value="0,2744956"/>
$Ls'(m) =$	<input type="text" value="4,451009"/>
$M_{stabl}(Kn) =$	<input type="text" value="2491,866"/>
$M_{renv}(Kn) =$	<input type="text" value="1023,609"/>

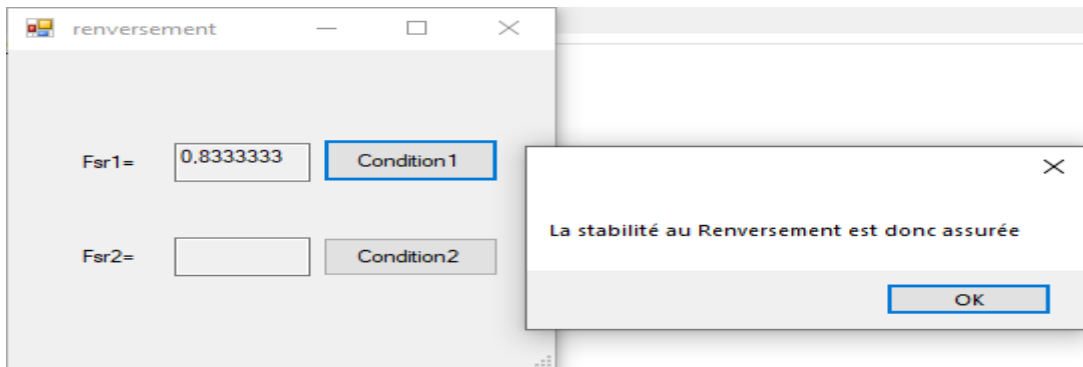
- Les vérifications de stabilité ;

# ANNEXE

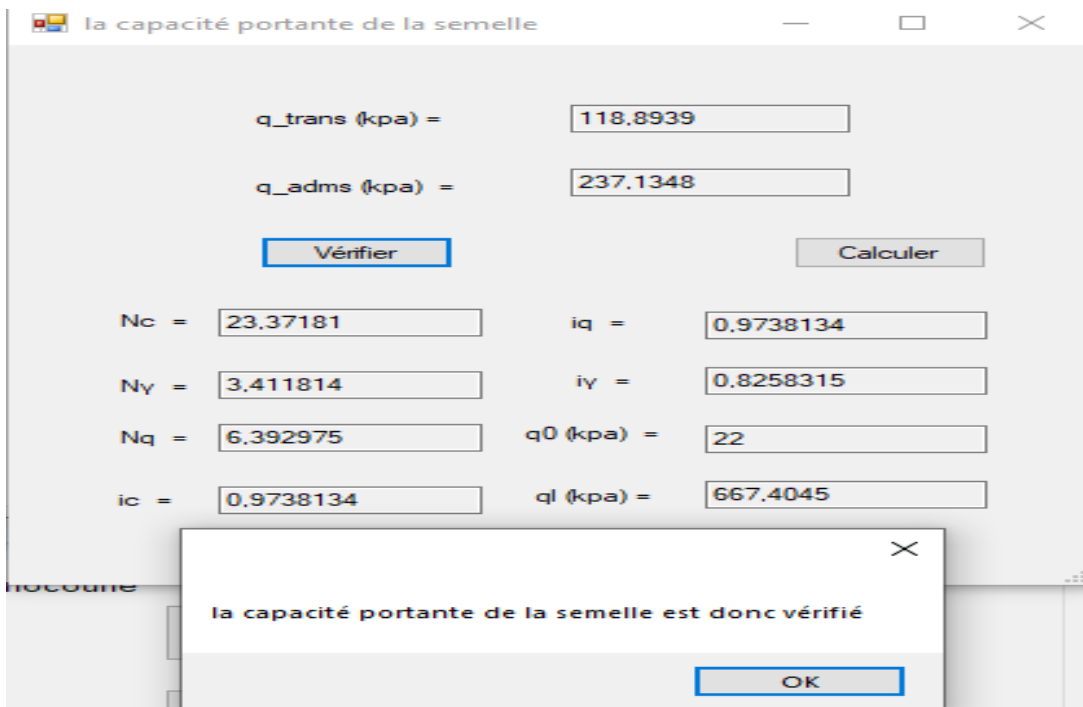
La stabilité au glissement :



La stabilité au renversement :



La stabilité de la capacité portante :



# ANNEXE

## Exemple 2 :

Les fenêtres (projet, norme et matériaux) sont les mêmes que celles utilisé dans l'exemple 1 (voire l'annexe 1).

- La géométrie du mur en suite le calcul de (la surface du mur, leur poids propre, le centre de gravité du mur et le centre de gravité de la semelle :

**Géométrie du mur**

Type 1   
 Type 2   
 Type 3   
 Type 4   
 Type 5   
 Type 6   
 Type 7   
 Type 8   
 Type 9

**Géométrie du mur**

Ht (m) =	5	l (m) =	0,75	Sm(m²) =	5,5
Ls (m) =	4	b (m) =	0,5	V(m)(Kn/m) =	137,5
Ese (m) =	0,5	Ere (m) =	0,5	Xg (m) =	1,971551
Lp (m) =	1,5	Es (m) =	0,5	Xgs (m) =	2,102941
Er (m) =	1	lambda1 (°) =	6,34		
Lt (m) =	1,5	lambda2 (°) =	0		

Activer Window  
Accédez aux paramè

# ANNEXE

- Les caractéristiques du sol monocouche :

**2 couches**

**Couches amont**

**Couche 1**

$\gamma_{sat1}(\text{kn/m}^3) =$    Sol saturé

$\gamma_d(\text{kn/m}^3) =$    $h_1(\text{m}) =$    $\gamma_1(\text{kn/m}^3) =$

$\gamma_w(\text{kn/m}^3) =$    $\phi_1(^{\circ}) =$    Sol sec

**Couche 2**

$\gamma_{sat2}(\text{kn/m}^3) =$    $C_2(\text{Kpa}) =$    Sol saturé

$\gamma_d(\text{kn/m}^3) =$    $h_2(\text{m}) =$    $\gamma_2(\text{kn/m}^3) =$

$\gamma_w(\text{kn/m}^3) =$    $\phi_2(^{\circ}) =$    Sol sec

**La Rugosité du mur**

**Couches amont**

**Couche 1**

Très rugueuse  Lisse

peu rugueuse  Intermédiaire

$\delta_1(^{\circ}) =$    $\delta_2(^{\circ}) =$

**Couche 2**

Très rugueuse  Lisse

peu rugueuse  Intermédiaire

$\delta_1(^{\circ}) =$    $\delta_2(^{\circ}) =$

**Couche aval**

$\gamma_t(\text{kn/m}^3) =$    $C(\text{Kpa}) =$    Sol saturé

$\gamma_d(\text{kn/m}^3) =$    $h(\text{m}) =$    $\gamma(\text{kn/m}^3) =$

$\gamma_w(\text{kn/m}^3) =$    $\phi(^{\circ}) =$    Sol sec

**La couche D'assise**

$\gamma_t(\text{kn/m}^3) =$    $C(\text{Kpa}) =$    Sol saturé

$\gamma_d(\text{kn/m}^3) =$    $h(\text{m}) =$    $\gamma(\text{kn/m}^3) =$

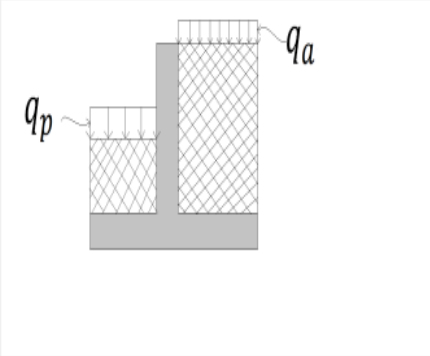
$\gamma_w(\text{kn/m}^3) =$    $\phi(^{\circ}) =$    Sol sec

## ANNEXE

- La déclaration du  $\alpha_1, \alpha_2, q_1$  et  $q_2$  :

chargement

une charge répartie



$\alpha 1 (^{\circ}) =$

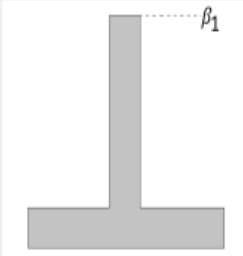
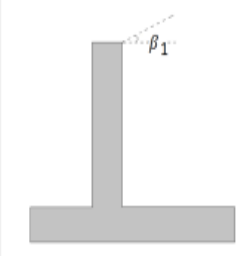
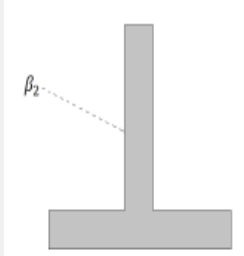
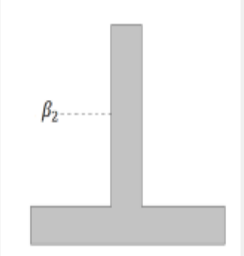
$\alpha 2 (^{\circ}) =$

$q_a$  (Kpa) =

$q_p$  (Kpa) =

- La déclaration des coefficients  $\beta_1, \beta_2$  ensuite le calcul du poids du remblai du sol amont et aval et les points d'applications du remblai du sol amont et aval :

terrain(2 couches)

$\beta_1$

$\beta_1 (^{\circ}) = 0$       $\beta_1 (^{\circ}) > 0$

$\beta_2$

$\beta_2 (^{\circ}) > 0$       $\beta_2 (^{\circ}) = 0$

négliger la butée

$\beta 1 (^{\circ}) =$

$\beta 2 (^{\circ}) =$

$W1a(sol) =$       $X_{ga1}(m) =$

$W2a(sol) =$       $X_{ga2}(m) =$

$Wp(sol) =$       $X_{gp}(m) =$

- La déclaration de la présence d'eau :

2 couches

couche 1

oui     non

couche 2

oui     non

- Le calcul des coefficients et des forces agissant sur le mur avec la présence ou non de système de drainage, et le choix de prendre l'effet de butée en considération ou pas :

# ANNEXE

The screenshot shows a software window titled "force et coheficient (2 couches)". It is divided into several sections for inputting data and selecting options.

**couches amont (poussé)**

**Couche1**

Kay1 =	0,5278072	Fcd1(kn/m)=	64,78416
Kaq1 =	0,402382	Fci1(kn/m)=	26,06798
Fay1(kn/m)=	12,82359	Faq1(kn/m)=	145,748
Faw1(kn/m)=	0		

**Couche2**

Kay2 =	0,4013666	Fcd2 (kn/m)=	0
Kaq2 =	0,2991142	Fci2(kn/m) =	0
Fay2(kn/m) =	16,5066	Faq2(kn/m) =	153,486
Faw2(kn/m)=	0		

**Le système de drainage**

Mur avec système de drainage

Mur sans système de drainage

**L'effet de butée est pris en compte?**

oui et avec système de drainage

oui et sans système de drainage

Non

**Couche aval (la buté)**

Kpy1 =	4,700356	Fpq(kn/ml) =	138,9966
Kpq1 =	3,088814	Fpcd(kn/ml) =	0
Fpy1(kn/ml) =	58,16691	Fpci(kn/ml) =	0
Fpw(mn/ml)=	0		

- La résultante des forces horizontale et vertical :

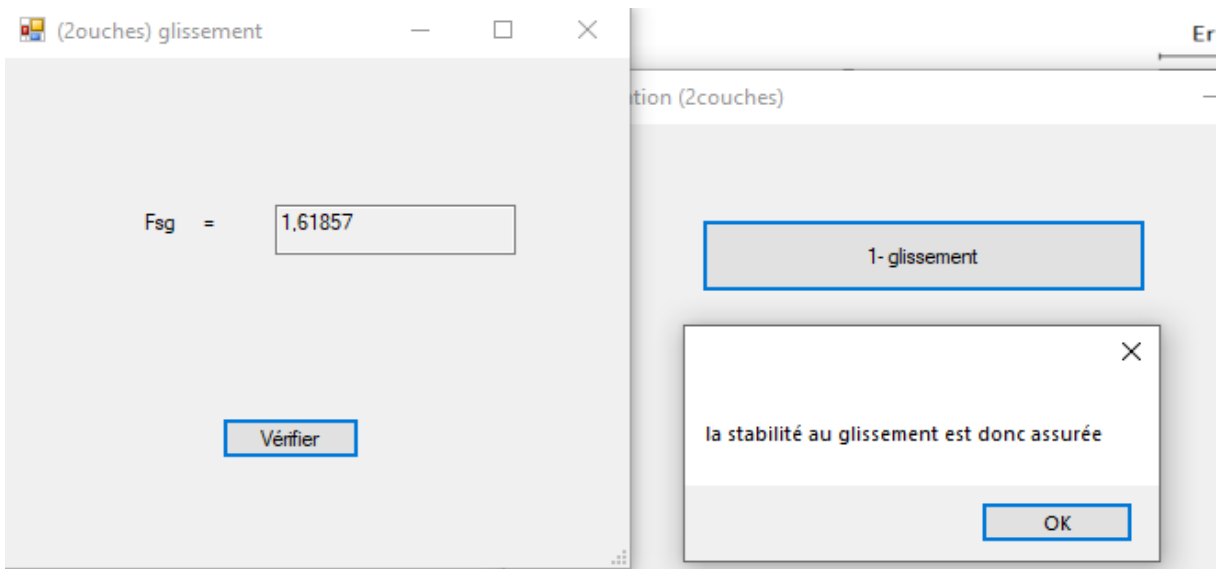
The screenshot shows a software window titled "bilan des efforts (2 couches)". It displays the calculated results for the horizontal and vertical force resultant.

Rh (Kn) =	<b>61,81028</b>
Rv (Kn) =	<b>466,8044</b>
$\theta$ (°) =	7,546568
X(m) =	<b>1,663173</b>
é(m) =	<b>0,4397682</b>
Ls'(m) =	<b>3,120464</b>
M_stabl(Kn)=	<b>1708,96</b>
M_renv(Kn)=	<b>932,5831</b>

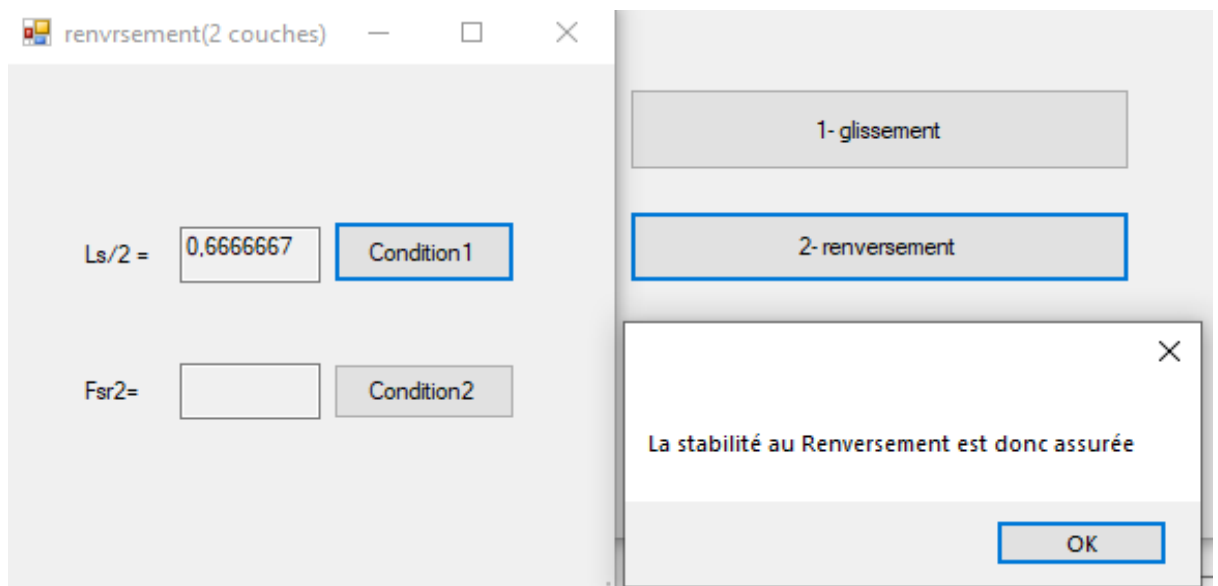
## ANNEXE

- Les vérifications de stabilité ;

La stabilité au glissement :



La stabilité au renversement :



La stabilité de la capacité portante :



# ANNEXE

capacité portante(2 couches)

q<sub>trans</sub> (kpa) = 149,5945

q<sub>adms</sub> (kpa) = 133,4458

Vérifier Calculer

N<sub>c</sub> = 27,75887 iq = 0,8393294

N<sub>y</sub> = 2,872604 iy = 0,0985636

N<sub>q</sub> = 6,392975 q<sub>0</sub> (kpa) = 22

ic = 0,8393294 ql (kpa) = 356,3373

Ere

1- glissement

2- renversement

la capacité portante de la semelle

la capacité portante de la semelle est donc non vérifié

OK

# ANNEXE

## Exemple 3 :

Les fenêtres (projet, norme et matériaux) sont les mêmes que celles utilisé dans l'exemple 1 et l'exemple 2 (voire l'annexe 1).

- La géométrie du mur en suite le calcul de (la surface du mur, leur poids propre, le centre de gravité du mur et le centre de gravité de la semelle :

**Géométrie du mur**

Type 1 
  
 Type 2 
  
 Type 3 
  
 Type 4 
  
 Type 5 
  
 Type 6 
  
 Type 7 
  
 Type 8 
  
 Type 9

**géométrie**

**Géométrie du mur**

Ht (m) =	6.5	l (m) =		Sm (m²) =	11.82536
Ls (m) =	5.18	b (m) =		Wm (Kv/m) =	285.6339
Ese (m) =	0.25	Ese (m) =	0.5	Xg (m) =	2.719774
Lp (m) =	1	Es (m) =	0.5	Xgs (m) =	2.541793
Er (m) =	2.68	lambda (°) =	0		
Lt (m) =	1.5	lambda/2 (°) =	20		

Accédez aux paramètres

# ANNEXE

- Les caractéristiques du sol monocouche :

3 couches

☐
-
☐
X

**Couches amont**

**Couche 1**

$\gamma_{sat1}(\text{kn/m}^3) =$    $C1(\text{Kpa}) =$    Sol saturé

$\gamma_{d1}(\text{kn/m}^3) =$    $h1(\text{m}) =$    $\gamma(\text{kn/m}^3) =$

$\gamma_w(\text{kn/m}^3) =$    $\phi1(^{\circ}) =$    Sol sec

**Couche 2**

$\gamma_{sat2}(\text{kn/m}^3) =$    $C2(\text{Kpa}) =$    Sol saturé

$\gamma_{d2}(\text{kn/m}^3) =$    $h2(\text{m}) =$    $\gamma(\text{kn/m}^3) =$

$\gamma_w(\text{kn/m}^3) =$    $\phi2(^{\circ}) =$    Sol sec

**Couche 3**

$\gamma_{sat3}(\text{kn/m}^3) =$    $C3(\text{kpa}) =$    Sol saturé

$\gamma_{d3}(\text{kn/m}^3) =$    $h3(\text{m}) =$    $\gamma(\text{kn/m}^3) =$

$\gamma_w(\text{kn/m}^3) =$    $\phi3(^{\circ}) =$    Sol sec

**Couches aval**

$\gamma(\text{kn/m}^3) =$    $C(\text{Kpa}) =$    Sol saturé

$\gamma_d(\text{kn/m}^3) =$    $h(\text{m}) =$    $\gamma(\text{kn/m}^3) =$

$\gamma_w(\text{kn/m}^3) =$    $\phi(^{\circ}) =$    Sol sec

**La couche D'assise**

$\gamma(\text{kn/m}^3) =$    $C(\text{Kpa}) =$    Sol saturé

$\gamma_d(\text{kn/m}^3) =$    $h(\text{m}) =$    $\gamma(\text{kn/m}^3) =$

$\gamma_w(\text{kn/m}^3) =$    $\phi(^{\circ}) =$    Sol sec

**La Rugosité du mur**

**Couches amont**

**Couche 1**

Très rugueuse  Lisse  peu rugueuse  Intermédiaire

$\delta1(^{\circ}) =$

**Couche 2**

Très rugueuse  Lisse  peu rugueuse  Intermédiaire

$\delta2(^{\circ}) =$

**Couche 3**

Très rugueuse  Lisse  peu rugueuse  Intermédiaire

$\delta3(^{\circ}) =$

**Couches aval**

**La couche d'assise**

Très rugueuse  Lisse  peu rugueuse  Intermédiaire

$\delta(^{\circ}) =$

**Couche aval**

Très rugueuse  Lisse  peu rugueuse  Intermédiaire

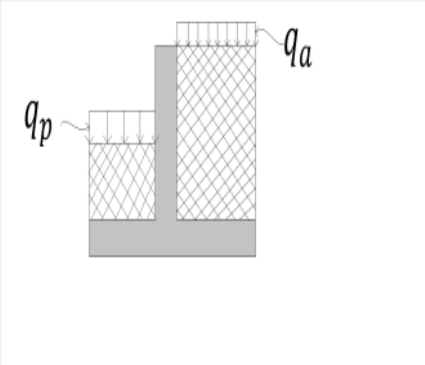
$\delta(^{\circ}) =$

## ANNEXE

- La déclaration du  $\alpha_1, \alpha_2, q_1$  et  $q_2$  :

chargeement

une charge répartie



$\alpha_1 (^{\circ}) =$

$\alpha_2 (^{\circ}) =$

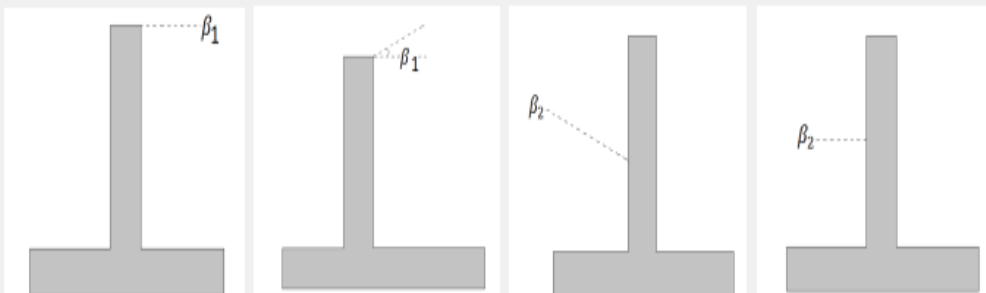
$q_a$  (Kpa) =

$q_p$  (Kpa) =

Activer Windows  
Accédez aux paramètres

- La déclaration des coefficients  $\beta_1, \beta_2$  ensuite le calcul du poids du remblai du sol amont et aval et les points d'applications du remblai du sol amont et aval :

terrain(3 couches)



$\beta_2 (^{\circ}) =$       $\beta_1 (^{\circ}) =$

$W_{1a}(\text{sol}) =$       $X_{ga1}(\text{m}) =$

$W_{2a}(\text{sol}) =$       $X_{ga2}(\text{m}) =$

$W_{3a}(\text{sol}) =$       $X_{ga3}(\text{m}) =$

$W_p(\text{sol}) =$       $X_{gp}(\text{m}) =$

$\beta_1$  (partie amont)  
  $\beta_1 (^{\circ}) = 0$       $\beta_1 (^{\circ}) > 0$

$\beta_2$  (partie aval)  
  $\beta_2 (^{\circ}) > 0$       $\beta_2 (^{\circ}) = 0$   
 négliger la butée

- La déclaration de la présence d'eau :

3 couches

couche1  
 oui     non

couche2  
 oui     non

couche3  
 oui     non

Activer Windows  
Accédez aux paramètres

## ANNEXE

- Le calcul des coefficients et des forces agissant sur le mur avec la présence ou non de système de drainage, et le choix de prendre l'effet de butée en considération ou pas :

force et coefficient(3 couches)

couches amont (poussé)

Couche 1

Kay1 = 0,9715186 Fcd1(kn/m)= 0

Kaq1 = 0,636318 Fci1(kn/m)= 0

Fay1(kn/m)= 43,71833 Faq1(kn/m)= 28,63431

Faw1(kn/m)= 0

Couche 2

Kay2 = 0,5408911 Fcd2 (kn/m)= 65,97578

Kaq2 = 0,405513 Fci2(kn/m) = 26,75404

Fay2(kn/m) = 13,84681 Faq2(kn/m) = 29,19694

Faw2(kn/m)= 0

Couche 3

Kay3 = 0,5408911 Fcd3(kn/m) = 76,97175

Kaq3 = 0,405513 Fci3(kn/m) = 31,21305

Fay3(kn/m) = 10,60147 Faq3(kn/m) = 43,7143

Faw3(kn/m)= 0

L'effet de butée est pris en compte ?

oui et avec système de drainage Calculer

oui et sans système de drainage Calculer

Non Calculer

Le système de drainage

Mur avec système de drainage Calculer

Mur sans système de drainage Calculer

Couche aval (la butée)

Kpy1= 0 Fpq(kn/m) = 0

Kpq1 = 0 Fpcd(kn/m) = 0

Fpy1(kn/m) = 0 Fpci(kn/m) = 0

Fpw(kn/m)= 0

Activer V

- La résultante des forces horizontale et vertical :

Rh (Kn) = **83,56024**

Rv (Kn) = **454,8446**

$\theta$  ( ° )= 10,41511

X(m) = **2,581552**

é(m) = **0,03975892**

Ls'(m) = **5,100482**

M\_stabl(Kn)= **1796,532**

M\_renv(Kn)= **622,3274**

Calculer

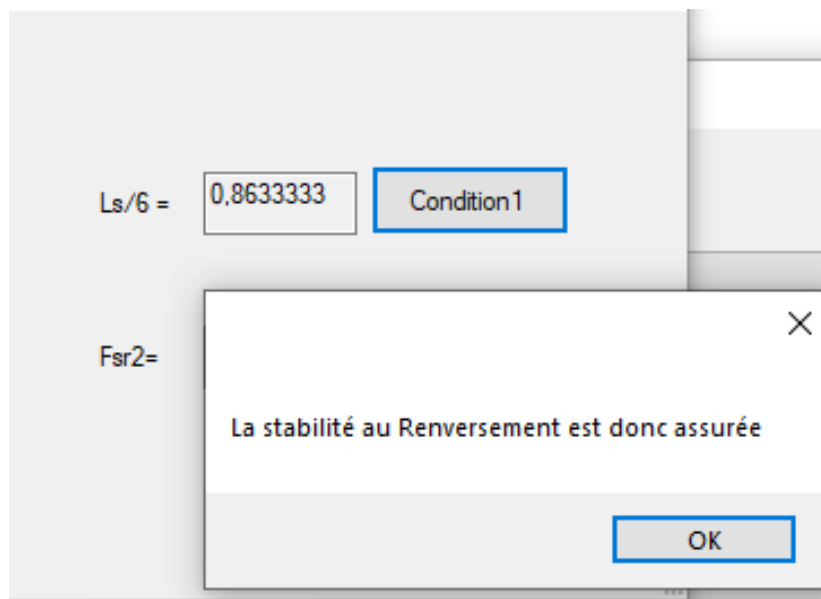
## ANNEXE

- Les vérifications de stabilité ;

La stabilité au glissement :



La stabilité au renversement :



La stabilité de la capacité portante :

## ANNEXE

$q_{trans}$ (kpa) =	<input type="text" value="89,17679"/>		
$q_{adms}$ (kpa) =	<input type="text" value="168,3499"/>		
<input type="button" value="Vérifier"/>	<input type="button" value="Calculer"/>		
$N_c$ =	<input type="text" value="9,346636"/>	$i_q$ =	<input type="text" value="0,781945"/>
$N_\gamma$ =	<input type="text" value="8,53144"/>	$i_\gamma$ =	<input type="text" value="0,4261866"/>
$N_q$ =	<input type="text" value="6,392975"/>	$q_0$ (kpa) =	<input type="text" value="30"/>
$i_c$ =	<input type="text" value="0,781945"/>	$q_l$ (kpa) =	<input type="text" value="445,0497"/>

la capacité portante de la semelle est donc vérifié