Ministère de l'enseignement supérieur

.et de la recherche scientifique

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de technologie

Département de GENIE CIVIL

MEMOIRE Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

FILIERE : Génie Civil **SPECIALITE :** Géotechnique

Par :

SALEM Ameur

THEME

ANALYSE NUMERIQUE DU COMPORTEMENT D'UN MUR DE SOUTENEMENT

Soutenu devant le jury composé de Messieurs :

MENASRI Abderrazak, M.C.A, Université Med Boudiaf - M'sila, Président

RAHMANI Abdallah Yacine, M.C.B, Université Med Boudiaf - M'sila, Examinateur

SEDDIKI Ahmed, M.C.A, Université Med Boudiaf - M'sila, Encadreur

Promotion : 2021/2022

Remerciements

Nous tenons à rendre un grand hommage à nos enseignants qui n'ont jamais cessé de travailler dur pour assurer le bon déroulement de notre formation.

Il s'agit surtout du Docteur Mr. SEDDIKI Ahmed, qui m'a apporté son ferme soutien.

Résumé

Ce travail vise à rassembler une synthèse bibliographie sur les murs de soutènement, les méthodes d'analyse de leur stabilité et à la présentation des outils numériques utilisé.
Elle concernera la vérification de la stabilité externe par modélisation numérique à l'aide du logiciel "Robot expert mur de soutènement", en tenant en compte des D.T.U. 13.12 et de la réglementation parasismique Algérienne en vigueur.
Un calcul en plasticité pour déterminer les déformations, et une vérification de la stabilité de l'ensemble (mur, talus) par l'approche "phi-c reduction" pour la détermination du facteur de sécurité en utilisant le code en éléments finis Plaxis 2D.

Mots clés : mur de soutènement – modélisation numérique –Robot expert – calcul en plasticité – facteur de sécurité.

Abstract

This work aims to gather a synthesis bibliography on the retaining walls, the methods of analysis of their stability and the presentation of the digital tools used.
It will concern the verification of the external stability by numerical modeling using the "Robot expert retaining wall" software, taking into account the D.T.U. 13.12 and the Algerian seismic regulations in force.
A plasticity calculation to determine the deformations, and a verification of the stability of the assembly (wall, embankment) using the "phi-c reduction" approach to determine the safety factor using the Plaxis 2D finite element code.

Keywords. retaining wall – digital modeling – expert robot – plasticity calculation – safety factor.

ملخص

يهدف هذا العمل إلى جمع ببيوغرافيا على **جدران الاسناد** وطرق تحليل ثباتها وعرض الأدوات الرقمية المستخدمة.
يتعلق الأمر بالتحقق من الاستقرار الخارجي عن طريق **النمذجة الرقمية** باستخدام برنامج **"روبو خبير"** خاص بجدران الاسناد، مع مراعاة الوثائق التقنية الموحدة 13.12 واللوائح الجزائرية لرصد الزلازل المعمول بها.
حساب اللدونة لتحديد التشوهات، والتحقق من ثبات التجميع (الجدار، الردم) باستخدام نهج "تقليل خصائص التربة للقص، لتحديد **معامل الأمان** باستخدام برنامج العناصر المحدودة بلاكسيس ثنائي الابعاد.

الكلمات الدالة: جدران الاسناد، النمذجة الرقمية، روبو خبير، حساب اللدونة ـ معامل الأمان.

SOMMAIRE

Introduction Générale 1

Chapitre Premier 3

Revue bibliographique sur les murs de soutènements 3

I.1 Introduction 3

I.2 Définition 3

I.3 Différents types de murs de soutènement 4

I.4 Règlementation 8

I.5 Dimensionnement des murs de soutènement : 9

I.6 Recommandations divers 10

I.7 Dispositifs de drainage et d'évacuation des eaux 10

I.8 Pathologies des murs de soutènement 12

I.9 Conclusion 13

Chapitre Deuxième 14

Calcul de la Stabilité des Murs de Soutènements 14

II.1 Introduction 14

II.2 Classification des murs de soutènement 14

II.3 Dimensionnement des ouvrages de soutènement 16

II.4. Justification de la stabilité 17

II.5 Conclusion 27

Chapitre Troisième 28

Outils Numériques Utilisés 28

III.1. Introduction 28

III.2. Le programme EXPERT Murs de SOUTENEMENT 28

III.3. Présentation du code PLAXIS : 34

III.4. Conclusion : 42

Chapitre quatrième 43

Application au calcul de la stabilité d'un mur de soutènement 43
IV.1 Géométrie et caractéristique des matériaux..... 43
IV.2 Calcul numérique classique « Robot »..... 44
IV.3 Résultats des calculs par le logiciel Expert de murs de soutènement 46
IV.4 Calcul numérique en éléments finis « Plaxis »..... 47
IV.5 Résultats des calculs par le logiciel PLAXIS 2D 48
IV.6 Synthèse 51
Conclusions Générales 52
Références Bibliographique..... 53

Liste des Figures

Figure I.1 Nomenclature des termes usuels 3
Figure I.2 Mur à caissons 4
Figure I.3 Mur gravitaire en maçonnerie 4
Figure I.4 Mur à redans 5
Figure I.5 Mur en « T renversé » classique 5
Figure I.6 Mur de soutènement en béton armé 6
Figure I.7 Mur en terre armée 6
Figure I.8 Mur de soutènement en gabion 7
Figure I.9 Rideaux de palplanches 7
Figure I.10 Autre murs de soutènements 8
Figure I.11 Recommandations pour les joints 10
Figure I.12 Ecran drainant et caniveau 11
Figure II.1. Exemple de mur de soutènement 14
Figure II.2. Mur poids 15
Figure II.3. Mur cantilever 16
Figure II.4. Efforts qui s'appliquent sur un ouvrage 17
Figure II.5. Rupture d'un ouvrage de soutènement 18
Figure II.6. Stabilité d'ensemble 18
Figure II.7. Glissement des ouvrages de soutènement 19
Figure II.8. Renversement d'un ouvrage de soutènement 19
Figure II.9. Drainage des eaux d'infiltration par rabattement de la nappe 20
Figure II.10. Équilibre limite de poussée ou de ou de butée 21
Figure II.11. Etat de contraintes en équilibre limite 21
Figure II.12. Etats limites de poussée et de butée 22
Figure II.13. Équilibre du coin coulomb 23
Figure II.14. Formule de Poncelet 24
Figure II.15. Théorie de Rankine 25
Figure II.16. Equilibre de BOUSSINESQ 26
Figure III.1 L'onglet géométrie du mur 29
Figure III.2 Onglet paramètres de calcul 32
Figure III.4 Système de coordonnées et définition des composantes de contrainte positIIIes 35
Figure III.5 Exemples de problèmes en déformations plane et axisymétrique 36
Figure III.6 Position des nœuds et des points de contrainte dans les éléments de sol 37
Figure III.7 Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire 37
Figure III.8 Fenêtre des paramètres avancés du modèle élastique linéaire 38
Figure III.9 Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb 38

Figure III.10 Pyramide de Mohr-Coulomb tracée pour c=0 39
Figure III.11 Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb 39
Figure III.12 Définition du module à 50% de la rupture 40
Figure III.13 Fenêtre des paramètres avancés du module Mohr-Coulomb 41
Figure IV.1 Mur de soutènements étudié, représenté en 3D 43
Figure IV.2 Profils du mur de soutènements étudié 44
Figure IV.3 Différents niveaux du mur de soutènements étudié par ROBOT Expert 44
Figure IV.4 Profil géométrique du mur de soutènements étudié par ROBOT Expert 45
Figure IV.5 Paramètres de dimensionnement et des calculs de la stabilité 45
Figure IV.6 Poussée sur éléments horizontaux et verticaux et leur résultante 46
Figure IV.7 Vérifications de la stabilité au renversement et au glissement 46
Figure IV.8. Modèle numérique du mur de soutènements étudié par Plaxis 47
Figure IV.9 Maillage déformé 48
Figure IV.10 Tassements verticaux en 10^{-3}m, mode couleurs dégradées 48
Figure IV.11 Tassements verticaux - coupe au niveau du voile du mur de soutènement 49
Figure IV.12 Déplacements totaux représentation mode vecteur 49
Figure IV.13 Déplacements totaux représentation mode couleurs dégradées 50
Figure IV.14 Points plastifiés 50

Introduction Générale

Les ouvrages de soutènement comprennent tous les types de murs et de systèmes de l'appui dans lesquels des éléments de structure sont combinés avec du sol ou du rocher.

Pour le dimensionnement des ouvrages de soutènement, il peut être judicieux de distinguer les trois principaux types d'ouvrages de soutènement suivant :

- Les murs-poids qui sont des murs en pierre, en béton ou en béton armé, ayant une semelle de base horizontale avec ou sans talon, épaulement ou contrefort. Le poids du mur lui-même, qui inclut parfois une masse stabilisatrice de sol ou de rocher joue un rôle important dans le soutènement du matériau retenu (les murs-poids en béton d'épaisseur constante ou variable, les murs en béton armé à semelle, les murs à contreforts) ;
- Les murs encastrés sont des murs relativement minces en acier, en béton armé ou en bois, supportés par des ancrages, des butons et/ou la butée des terres. La résistance à la flexion de ces murs joue un rôle important dans le soutènement du matériau retenu alors que le poids du mur a un rôle insignifiant (les murs cantilevers en palplanches métalliques, les murs ancrés ou boutonnés en palplanches d'acier ou de béton, les murs à diaphragme) ;
- Les ouvrages de soutènement composites sont des murs formés d'éléments appartenant aux deux types précédents. Il existe un très grand nombre de murs de ce type (les batardeaux constitués de deux rideaux de palplanches, les murs en sol renforcé, les ouvrages de soutènement renforcés par des ancrages, des géotextiles ou des injections, les ouvrages comportant des rangées multiples d'ancrages ou de clous) ;

De manière générale, un ouvrage de soutènement est une construction destinée à réaliser une dénivellation localisée de terre (ou de toute autre matière) et à assurer l'équilibre des charges appliquées. On a recours à un soutènement lorsqu'un simple talus naturel n'est pas acceptable ou réalisable (par exemple, en site urbain). Il peut s'agir d'un mur, d'un rideau de palplanches, d'une paroi moulée, etc.

Les murs de soutènement, quel que soit leur type, doivent habituellement être drainés, car la pression de l'eau retenue derrière un mur sans interstices d'évacuation augmente d'autant la poussée sur l'ouvrage et modifie la "consistance" du matériau en le fluidifiant ce qui apporte une transmission de poussée d'une partie plus importante, la friction (phénomène de s'agripper) en résistance au glissement ayant partiellement disparu, la pente naturelle du tas diminue.

L'étude d'un ouvrage de soutènement a pour objet de déterminer des caractéristiques géométriques et mécaniques compatibles avec l'économie et la sécurité au renversement au glissement au poinçonnement ;

Ce mémoire a pour but de faire le pré dimensionnement, et de vérifier la stabilité interne et externe d'un mur de soutènement.

Le présent mémoire est constitué de quatre chapitres présentés comme suit :

- Le premier présentera une synthèse bibliographique sur les ouvrages de soutènement ;
- Le deuxième fera l'objet de dimensionnement des murs de soutènement ;
- Le troisième est consacré à la présentation des outils numériques utilisé dans cette étude ;
- Le quatrième concernera l'étude d'un cas pratique de mur de soutènement.

Finalement, sur la base des résultats obtenus, ce travail sera clôturé par une conclusion.

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MURS DE SOUTENEMENTS

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MURS DE SOUTENEMENTS

I.1 Introduction

Les ouvrages de soutènements sont ceux qui retiennent des terrains (sols, roches ou remblais) et de l'eau. Le matériau est retenu par l'ouvrage s'il est maintenu à une pente plus rapide que celle qu'il adopterait éventuellement si aucun ouvrage n'était présent. Les ouvrages de soutènement comprennent tous les types de murs et de systèmes d'appui dans lesquels des éléments de structure subissent des forces imposées par le matériau soutenu

Un ouvrage de soutènement peut retenir soit des terres en remblai, c'est-à-dire rapportées, soit le terrain en place. On dit, dans ce dernier cas, qu'il s'agit d'un ouvrage de soutènement en déblai.

Le rôle des ouvrages de soutènement est de retenir les massifs de terre.

Il en existe une grande variété se caractérisant par des fonctionnements différents et conduisant à des études de stabilité interne spécifiques.

Tous ces ouvrages ont en commun la force de poussée exercée par le massif de sol retenu. Par contre, c'est principalement la manière dont est reprise cette Force de poussée qui différencie les différents types d'ouvrages.

I.2 Définition

Un mur de soutènement est constitué de deux parties essentielles (figure I.1) : un fut, paroi résistante destinée à retenir les terres situées en arrière, et une semelle de fondation, dans laquelle s'encastre le fut, qui assure la stabilité de l'ouvrage.

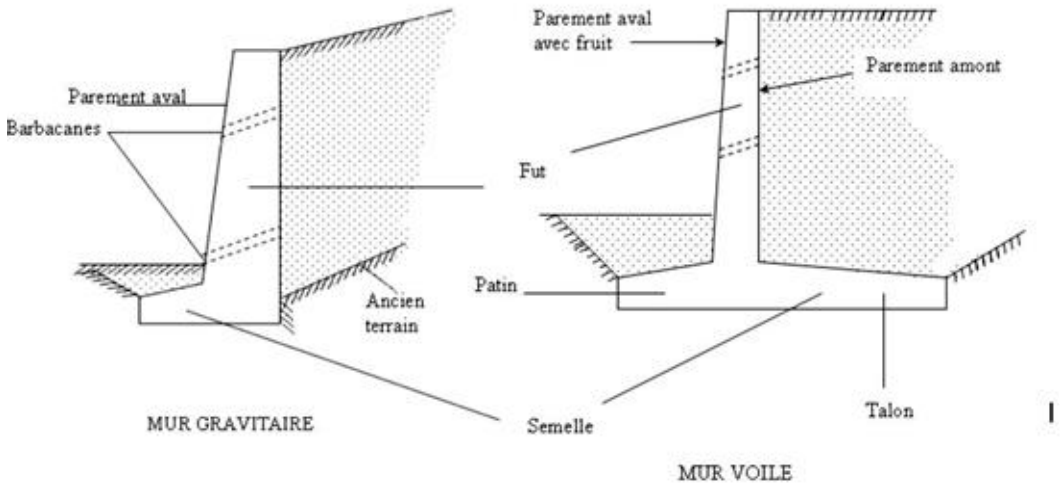


Figure I.1 Nomenclature des termes usuels

I.3 Différents types de murs de soutènement

On classe les murs de soutènement en deux grandes catégories :

- ✓ Les murs gravitaires ou murs-poids.
- ✓ Les murs-voiles.

I.3.1 Murs gravitaires ou murs-poids

Ce sont des ouvrages résistants par leur poids propre à la majeure partie de la poussée des terres. Ces murs sont massifs et réalisés en béton non armé ou en maçonnerie épaisse de pierres ou de briques. Leur parement arrière peut présenter éventuellement des redans.

Quelques exemples sur des murs gravitaires.

a) Mur à caissons : Le mur à caissons (figure I.2) est le plus résistant. Il est constitué d'un ensemble de boites alignées, superposées, ou encore alignées et superposées. Chaque boite ou caisson est remplie de sol, de pierres ou d'un autre matériau de poids volumique élevé.

La stabilité du mur est assurée par la largeur des caissons et le poids du matériau de remplissage.

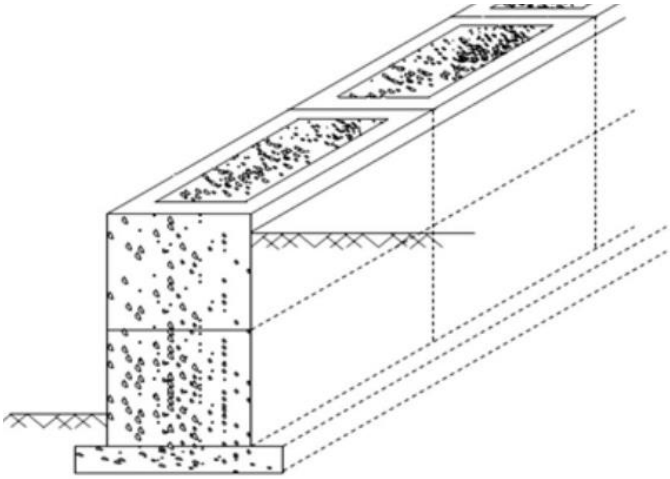


Figure I.2 Mur à caissons

b) **Mur gravitaire en maçonnerie**

Ce sont des murs constitués de pierres, de moellons ou de briques jointoyés (figure I.3).

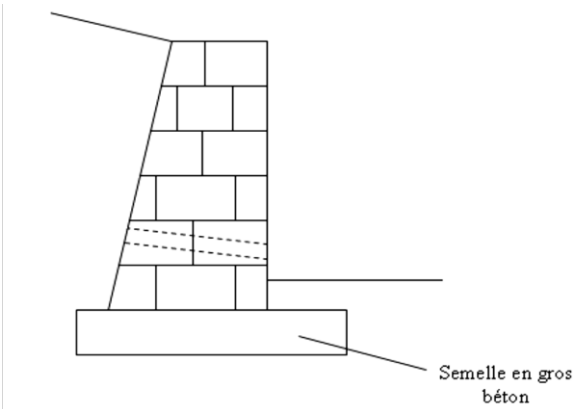


Figure I.3 Mur gravitaire en maçonnerie

c) Mur gravitaire à redans

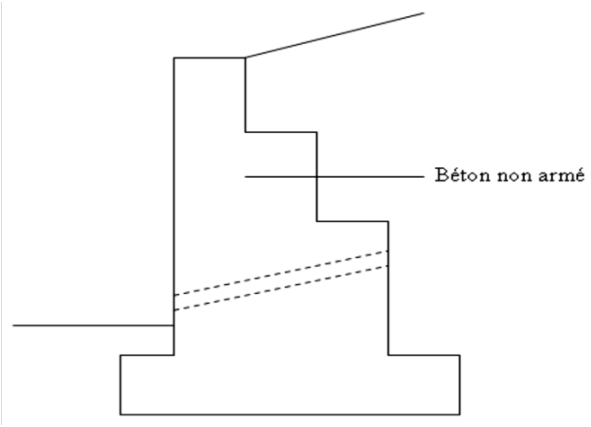


Figure I.4 Mur à redans

I.3.2 Murs-voiles

Ils sont aussi appelés quelquefois murs-chaises ou mur cantilever : ce sont des ouvrages utilisant comme élément de stabilisation le poids des terres soutenues par l'intermédiaire de leur semelle de fondation. De tels murs sont réalisés en voiles minces de béton armé (d'où leur nom) et peuvent avoir des formes plus ou moins compliquées. Les semelles de tels murs comportent un patin ou bec et un talon avec parfois une bêche à l'arrière. Leur fut comporte parfois une chaise de lestage. On rencontre également des murs voiles à contreforts avec radier de lestage.

Quelques exemples sur des murs-voiles.

a) 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 faibles pour une même largeur de semelle.

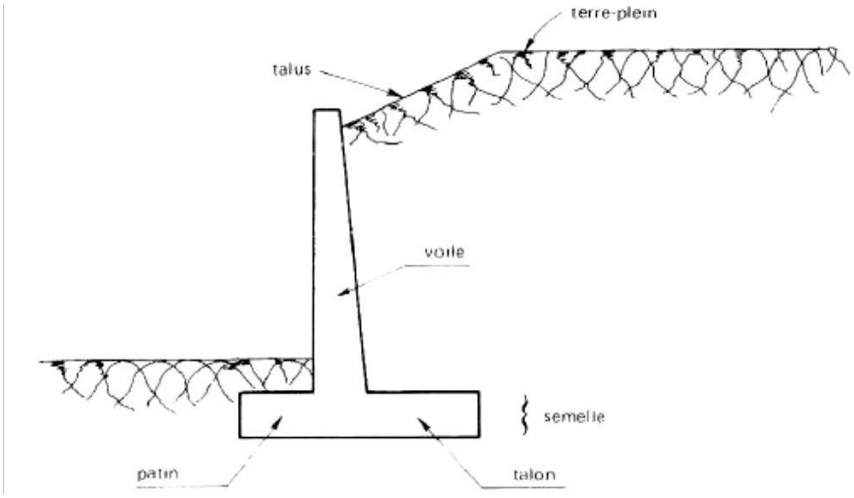


Figure I.5 Mur en « T renversé » classique

b) Mur à contreforts

Lorsque la hauteur du mur devient importante ou que les coefficients de poussée sont élevés, le moment d'encastrement du voile sur la semelle devient grand. Une première solution consiste à disposer des contreforts dont le but est de raidir le voile.



Figure I.6 Mur de soutènement en béton armé

Les écrans de soutènement qui sont constitués uniquement d'une paroi résistante comme les rideaux de palplanches, les parois moulées en béton armé, murs en terre armée avec parement composé d'écailles en béton.



Figure I.7 Mur en terre armée



Figure I.8 Mur de soutènement en gabion

c) Les rideaux de palplanches (figure 1.9)

Les rideaux de palplanches sont des pièces longues à section mince qui, juxtaposées, constituent des parois planes ou cylindriques, appelées rideaux (Bousquet, 1980). 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.



Figure I.9 Rideaux de palplanches

d) Autre murs :

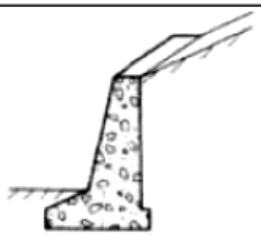
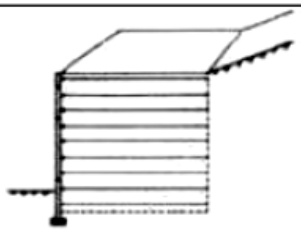
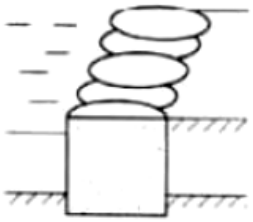
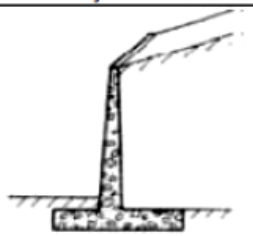
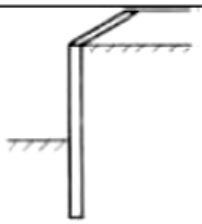
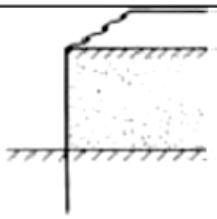
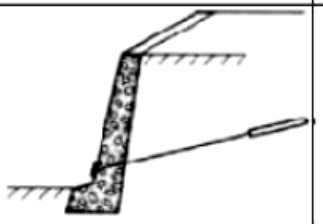
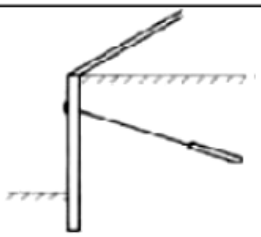
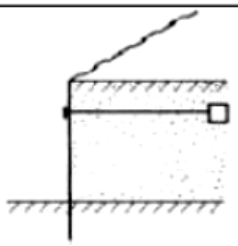
Mode de reprise de la poussée	OUVRAGE DE SOUTENEMENT		
Poids de l'ouvrage	 Mur poids en béton ou maçonnerie	 Mur en Terre Armée	 Ouvrage cellulaire
Encastrement	 Mur cantilever en béton armé	 Paroi moulée	 Rideau de palplanches
Ancrage	 Mur en béton, ancré	 Paroi moulée ancrée	 Rideau ancré

Figure I.10 Autre murs de soutènements

I.4 Règlementation

La conception des ouvrages de fondation, est maintenant couverte par des règles européennes, de conception et de calcul dites Eurocode 7 (Calcul géotechnique).

Le concept semi-probabiliste adopté dans les normes Eurocode, a fait évoluer la prise en compte de la sécurité, notamment pour les ouvrages géotechniques avec l'Eurocode 7. D'une façon générale, le fondement de toute méthode de justification, consiste alors à vérifier que les effets des actions restent inférieurs à la résistance et ce en leur appliquant des coefficients partiels. Son application aux ouvrages de soutènement, soulève certaines difficultés puisque les actions de poussée et les résistances dépendent des paramètres géotechniques (cohésion : c , frottement interne : φ , ...) et le respect du principe de cohérence ne permet pas de les dissocier aisément.

Dès lors il est proposé dans l'Eurocode 7, pour la pondération les différents phénomènes intervenant dans les sols, 3 possibilités :

- les actions en amont, notamment le poids volumique : A ;
- les propriétés mécaniques des matériaux (c, φ) : M ;
- les résistances en aval, par exemple la résistance au poinçonnement, au cisaillement à la base du mur, ...

Cela en association avec 3 approches possibles notées de 1 à 3, qui consistent à appliquer de façon cohérence les coefficients de pondération A, M et R entre eux (Cf. art. 3.8).
L'Eurocode 7 reste néanmoins ouvert sur les applications pratiques, et ce sont ses normes d'application nationale de préciser les possibilités qui conviennent à chaque catégorie d'ouvrage.
Les ouvrages murs de soutènement considérés ici, appartiennent à la catégorie géotechnique 2, à savoir pour les ouvrages de types classiques, les fondations qui ne présentent pas de risque exceptionnel ou les conditions de terrain ou de chargement difficiles. Ils sont couverts principalement par la norme NF P 94-281 et certaines parties de la norme NF P 94-261 qui traite des fondations superficielles. Le choix entre ces deux normes doit s'appuyer sur une analyse du comportement des constructions portées, et notamment sur le niveau de la déformation que ces dernières sont capables de tolérer.
- Si le soutènement ne reprend que la pression des terres y compris celle créée par des charges sur le remblai, le mur est alors justifié à partir des exigences de la norme NF P 94-281.
- Par contre, si l'ouvrage est soumis à la pression des terres et à d'autres efforts, dus par exemple à un tablier d'ouvrage d'art dans le cas d'une culée à mur de front ou à un bâtiment, il est justifié à partir des exigences de la norme NF P 94-261.

I.5 Dimensionnement des murs de soutènement :

Les exigences de l'Eurocode 7 :
La justifiassions des murs de soutènement (murs poids, mur en L ou en T) est abordée dans la section 9 de l'Eurocode 7.
Les états limites à considérer pour la justifiassions d'un mur de soutènement sont décrits dans la section 9.2.

Trois points sont mis en avant :

- ✓ Le défaut de portance du sol sous l'ouvrage ;
- ✓ La rupture par glissement sur la base du mur ;
- ✓ La rupture par renversement.

I.6 Recommandations divers

Joints :

L'absence de coupures dans les murs de soutènement entraîne une fissuration du béton due au retrait gêné, aux variations thermiques et aux tassements différentiels. Pour éviter un développement anarchique de la fissuration inévitable, il est nécessaire d'introduire des coupures volontaires sous forme de joints.

- Cas d'un mur fondé sur une semelle horizontale avec des déplacements prévisibles modérés, prévoir un joint sans épaisseur (papier kraft) collé tous les 6,0 à 8,0 mètres sur le plot coulé en première phase et un joint de 10 à 20 mm d'ouverture toutes les distances de 20,0 à 30,0 mètres selon les conditions climatiques.

-Cas d'un mur fondé sur une semelle en pente ou pour lequel des tassements différentiels notables sont à craindre, prévoir un joint de 10 à 40 mm d'ouverture (polystyrène expansé par exemple) tous les 8,0 à 10,0 mètres.

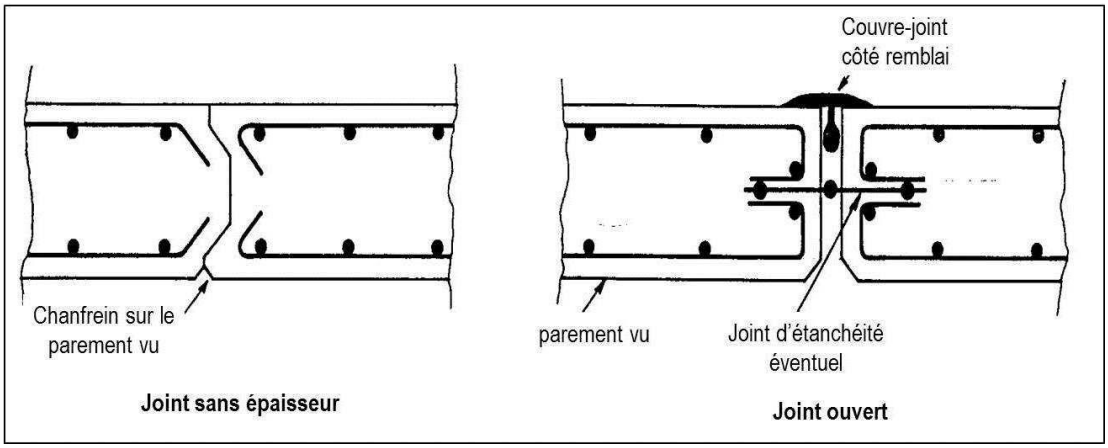


Figure I.11 Recommandations pour les joints

I.7 Dispositifs de drainage et d'évacuation des eaux

Dans les exemples précédents de calcul, nous avons supposé que le mur servait seulement de soutènement aux terres bien qu'un tel ouvrage constitue parfois un véritable barrage aux eaux d'infiltration et à la nappe phréatique. La raison pour laquelle la présence d'eau n'est pas prise en compte tient du fait qu'il est plus économique de mettre en œuvre des moyens efficaces d'évacuation des eaux que de vouloir résister à la poussée hydrostatique. Si aucun dispositif de drainage n'est prévu pour annuler cette poussée, les dimensions de l'ouvrage deviennent alors importantes.

La plupart des sinistres affectant les murs de soutènement, proviennent essentiellement d'une sous-estimation des effets dus à la présence d'eau :

- Phase de conception du mur : oubli à l'élaboration du projet des dispositifs de drainage et d'évacuation ;
- Phase d'exécution du mur : mauvaise réalisation de ces dispositifs.

Dans tous les cas, un mur de soutènement doit être muni de dispositifs de drainage et d'un système d'évacuation des eaux susceptibles de s'accumuler derrière le voile. Ces dispositifs peuvent différer selon la qualité du remblai mis en place derrière le mur. Les remblais argileux doivent absolument être proscrits. Quelques exemples de solutions courantes.

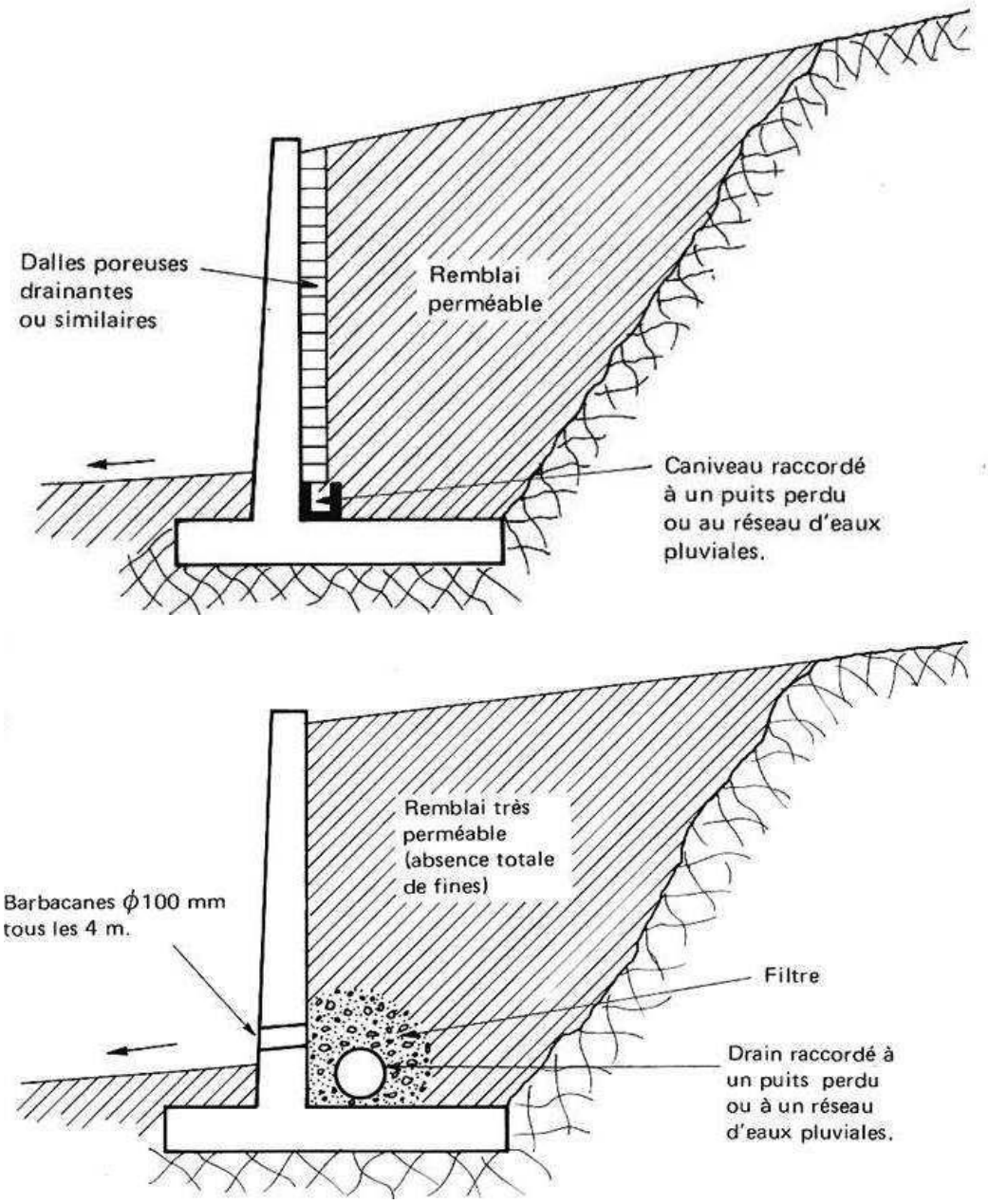


Figure I.12 Ecran drainant et caniveau

Une autre solution acceptable consiste à augmenter le nombre de barbacanes Mais il y a un risque qu'elles peuvent se colmater dans le temps, nécessitant donc un entretien périodique.

De plus cette solution est peu esthétique et il existe toujours des coulures d'eau et de terre sur le parement du mur.

En cas de venue d'eaux de ruissellement importantes, il est conseillé de mettre en oeuvre sur le terre-plein, un dispositif de recueillement et d'évacuation de ces eaux.

Mise en œuvre du remblai

Avant la mise en œuvre du remblai, il convient de s'assurer que ses caractéristiques géotechniques sont conformes à celles prises en compte dans l'élaboration du projet :

- au niveau du calcul des poussées (contrôle de l'angle de frottement interne).
- au niveau des dispositifs de drainage (vérification de leur perméabilité).

Une mauvaise exécution du remblai peut être la cause d'un déplacement important en tête du mur. La mise en œuvre se fait par couches successives n'excédant pas 0,50 m, avec des engins de compactage légers. Le remblaiement en grande masse ou avec un engin de compactage lourd passant près du mur est à proscrire car l'ouvrage serait, dans ce cas, soumis à des conditions plus défavorables que celles pour lesquelles il a été calculé.

I.8 Pathologies des murs de soutènement

Les murs de soutènement sont soumis à de très grande forces de poussée, Pour diverses causes l'ouvrages peut subir des déformations et présenter symptômes qui indique que son état est critique, dans le cas général des murs on observe les cas suivant : Fissures Bombement Glissement Basculement Renversement ...

Pathologie des murs de soutènement en vue de la construction d'une route, d'un bâtiment ou d'un ouvrage d'art. Ils doivent être conçus et dimensionnés de manière à remplir leur fonction d'autres structures ces ouvrages sont sujet de plusieurs pathologies et désordres qui peut rompre et causés des pertes matériels et humain. Mouvements d'ensemble consécutifs à un défaut de stabilité générale ou mixte.

Déplacements, tassements et déformations de tout ou partie de l'ouvrage dégradation du sol d'appui de l'ouvrage par affouillement ou érosion dégradation et altération des matériaux constitutifs.

Principales causes des pathologies

- Absence d'étude
- Fautes de conception
- Erreurs de calculs
- Défaut de drainage

- Erreurs de ferraillage
- Défauts d’exécution
- Modification des données
- Défauts d’entretien et d’exploitation
- Stabilité d’ensemble terrain/mur
- Actions physico-chimiques

I.9 Conclusion

Le géotechnicien doit connaître :

- Les grands types d'ouvrages de soutènement et sommairement leur méthode de réalisation ;
- Le principe des trois méthodes de calcul de poussée-butée et leurs limites ;
- Savoir calculer un mur poids simple ;
- Savoir calculer un rideau de palplanche ancré en tête et simplement buté en pied ;
- Connaître le principe général de fonctionnement d'un ouvrage en sol renforcé ;
- Enfin les ouvrages de soutènements sont inspectés, de manière régulière et méthodique et leurs pathologies doivent être traitées.

Chapitre Deuxième

CALCUL DE LA STABILITE DES MURS DE SOUTENEMENTS

CALCUL DE LA STABILITE DES MURS DE SOUTENEMENTS

II.1 Introduction

Le rôle des ouvrages de soutènement est de retenir les massifs de terre. Ils sont conçus pour créer une dénivelée entre les terres situées à l'amont de l'ouvrage, c'est à dire soutenues par celui-ci, et les terres situées à l'aval. Cette dénivelée peut être réalisée en procédant à la mise en place de remblais derrière l'ouvrage ou par extraction des terres devant celui-ci. En pratique il est assez fréquent que l'on ait à procéder à la fois à un apport de remblai derrière l'ouvrage et a une extraction de terre devant celui-ci.

II.2 Classification des murs de soutènement

Il existe de nombreux types d'ouvrages de soutènement, qui ont été conçus pour répondre aux situations les plus diverses.
Ils se distinguent principalement par leur :

- Morphologie
- Mode de fonctionnement
- Mode d'exécution
- Domaine d'emploi privilégie (urbain, montagneux, aquatique,)
- Et les matériaux qui les constituent

Tous ces ouvrages ont en commun la force de poussée exercée par le massif de sol retenu.



Figure II.1. Exemple de mur de soutènement

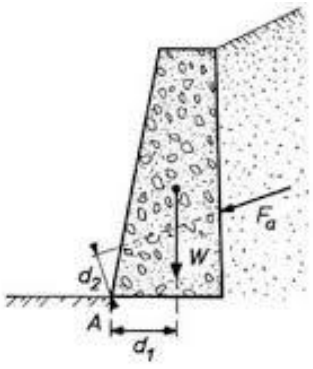
Ainsi, si l'on excepte les techniques de soutènement de type « terre armée » ou parois ancrées, on peut classer les ouvrages de soutènements en deux catégories :

a) **Les ouvrages souples**, pour lesquels la surface de contact est déformable : Les contraintes dépendent non seulement des déplacements de l'écran de soutènement mais aussi de ses déformations propres (interaction sol/structure). L'ouvrage type représentatif de cette catégorie est le rideau de palplanches. Pour ce type de soutènement, la poussée est reprise soit par encastrement de l'ouvrage dans le sol, soit à l'aide d'ancrages.

b) **Les ouvrages rigides**, pour lesquels la surface en contact avec le terrain est indéformable. Les contraintes sont dictées par les déplacements. Les murs de soutènement classiques sont les ouvrages les plus courants de cette catégorie. La poussée est reprise par le poids de l'ouvrage (murs poids) ou par encastrement de l'ouvrage dans le sol (murs en béton armé). Dans ce dernier cas, le poids des terres participe à la stabilité de l'ouvrage par l'intermédiaire de la semelle.

b1) Murs poids

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



A arête extérieure
F_a force de poussée tendant à renverser le mur autour de A
W poids du mur

Figure II.2. Mur poids

b2) Murs en béton armé ou mur cantilever

Les murs en béton arme sont probablement le type d'ouvrage de soutènement le plus couramment employé.

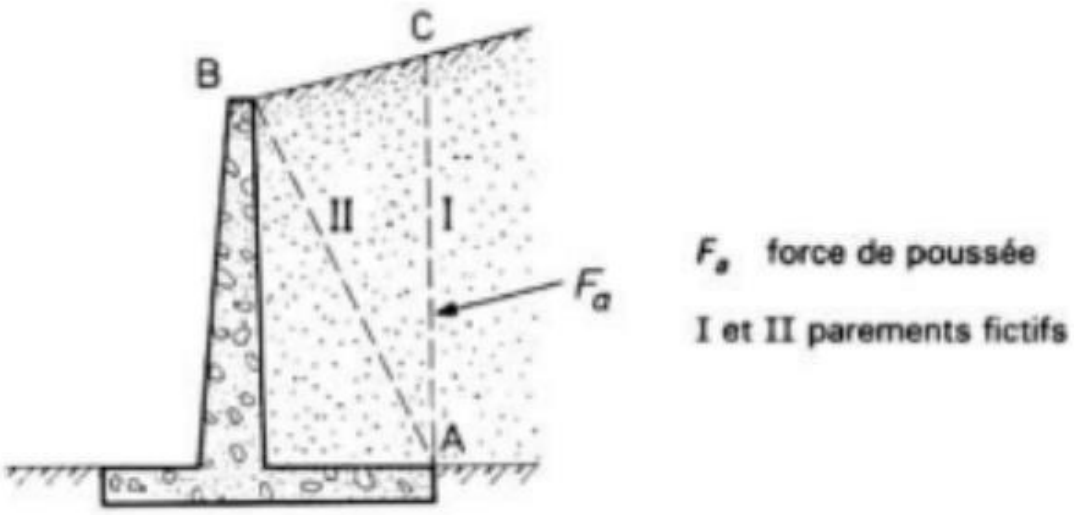


Figure II.3. Mur cantilever

b3) Massifs en sol renforcé

La principale caractéristique de ces ouvrages est que c'est le volume de sol associe aux éléments de renforcement qui participe directement à la stabilité.

Ces ouvrages sont constitués d'un massif de remblai mis en place par couches successives compactées, entre lesquelles sont disposés des éléments de renforcement (ou armatures) souples et résistants (géotextiles par exemple), généralement relies à un parement.

II.3 Dimensionnement des ouvrages de soutènement

Le dimensionnement d'un ouvrage de soutènement consiste à déterminer les éléments géométriques et structuraux afin 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 a la rupture** avec prise en compte de coefficients de sécurité. C'est le cas en particulier pour les ouvrages ≪ rigides ≫ (murs poids, murs en béton arme).

Dans le cas des parois souples (rideaux de palplanches, parois moulées, ...) il est courant de dimensionner l'ouvrage par un calcul en déformation.

Efforts qui s'appliquent sur un ouvrage

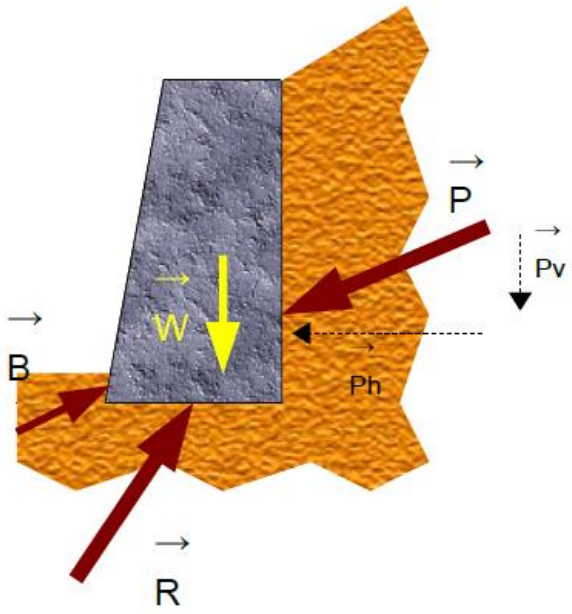


Figure II.4. Efforts qui s'appliquent sur un ouvrage

On raisonne dans le cas général schématisé ci-dessus. Les forces agissant sur le mur sont :

- **W :** poids propre du mur dont le point d'application est le centre de gravité de celui-ci,
- **P :** résultante des forces de poussée des terres
- **B :** résultante des forces de butée cote aval (en général, ce terme est négligé par sécurité)
- **R :** réaction du sol d'assise

A ces forces peuvent également s'ajouter :

- Les résultantes des forces hydrostatiques sur les parements amont et aval et sous la semelle en cas de présence d'une nappe au repos,
- Les résultantes des forces d'écoulement en cas de présence d'une nappe en mouvement,
- Des forces concentrées en certains points (tirants d'ancrage par exemple).

II.4. Justification de la stabilité

La stabilité d'un ouvrage de soutènement doit être étudiée à l'état limite ultime.

Plusieurs modes de rupture doivent être envisages. La vérification doit être conduite pour chacun d'entre eux.

Parmi les modes de rupture possibles, on distingue la stabilité interne (rupture des éléments constitutifs de l'ouvrage sous l'action des forces extérieures) de la stabilité externe (renversement, instabilité d'ensemble, poinçonnement, glissement).

II.4.1. Stabilité interne

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



Figure II.5. Rupture d'un ouvrage de soutènement

II.4.2. Stabilité externe

Stabilité d'ensemble

Il s'agit de la stabilité d'ensemble de l'ouvrage relative à une zone plus étendue de part et d'autre de celui-ci, et susceptible d'entrer en mouvement en l'absence même de toute défaillance de la structure considérée. Celle-ci est, toutefois, la cause initiatrice de ce mouvement d'ensemble, en raison des travaux de déblai ou de remblai qu'impose sa construction. Cette étude relève du domaine de la **stabilité des pentes.**

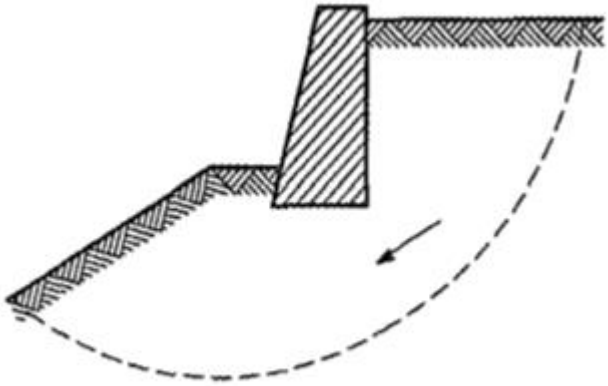


Figure II.6. Stabilité d'ensemble

Stabilité au poinçonnement

La stabilité au poinçonnement 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 que la contrainte normale appliquée au sol de fondation reste inférieure à une fraction de la contrainte de rupture du sol.

Remarque : Cette justification relève du **calcul des fondations**.

Stabilité au glissement

Cette justification consiste à vérifier que l'ouvrage ne glisse pas sur sa base.

On vérifie que le rapport entre les forces résistantes et les forces motrices est supérieur à un coefficient de sécurité généralement pris égal à 1,5.

La nature du matériau en contact avec le sol aura une influence sur le glissement par l'intermédiaire de l'angle de frottement sol-mur.

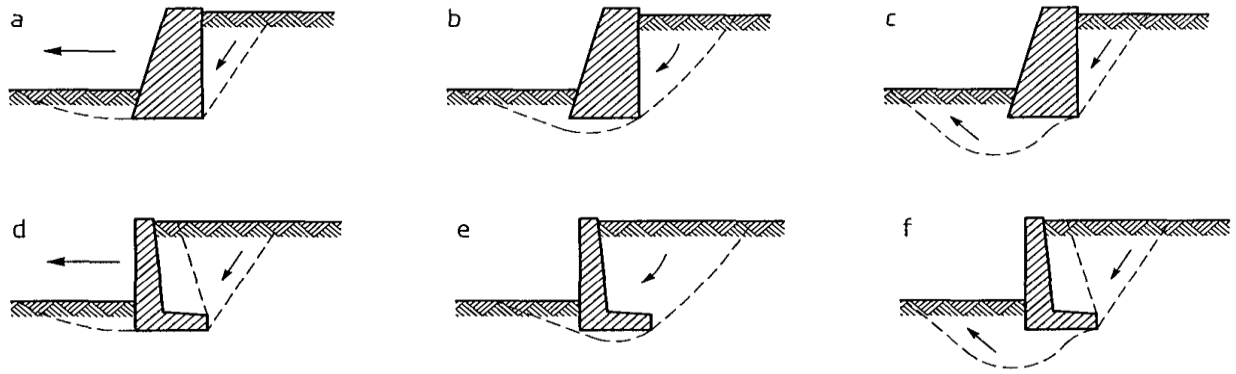


Figure II.7. Glissement des ouvrages de soutènement

Avec les notations précédentes et pour un sol de caractéristiques (c', φ'), la vérification de la résistance au glissement s'écrit : $F = \dfrac{\left[(W + P_v)\tan\delta + cB\right]}{P_h} > 1{,}5$

Où : P_v et P_h composante verticale et horizontale de la poussée

δ : angle de frottement sol-mur (pour un mur en béton on prend généralement $\delta = 2/3.\varphi'$)

B : largeur de la fondation

Stabilité au renversement

Cette justification est basée sur une hypothèse de rupture possible du mur par renversement de celui-ci autour de l'arête inferieure aval de sa fondation.

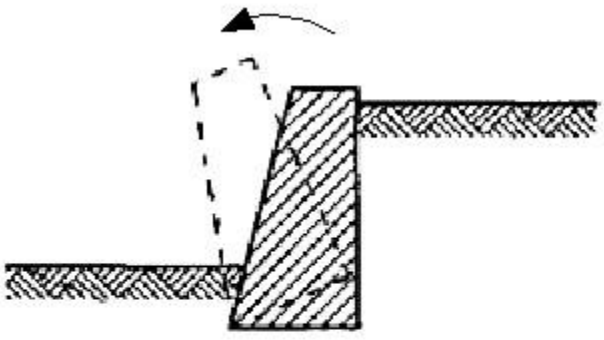


Figure II.8. Renversement d'un ouvrage de soutènement

La justification consiste à s'assurer que :

Somme des moments résistants / somme des moments moteurs > 1,5

● Les moments résistants sont induits par :

L'action du poids propre de l'ouvrage ou éventuellement celle du volume de sol qui charge sa fondation.

L'action de la butée, bien que participant à la résistance au renversement est négligée par sécurité.

● Les moments moteur sont ceux induits par :

La poussée des terres éventuellement l'action de l'eau si celle-ci est retenue par l'ouvrage.

Remarque : pour les murs poids, il existe une règle qui consiste à vérifier que la résultante des efforts reste dans le tiers central, c'est à dire que le sol est entièrement comprimé sous la semelle.

II.4.3. Rôle de l'eau : stabilité à court terme et stabilité à long terme

La présence d'eau dans le sol conduit à envisager deux types de comportement : le comportement à court terme (non draine) et le comportement à long terme (draine).

En présence d'eau, la vérification de la stabilité des ouvrages de soutènement doit donc nécessairement être conduite à la fois à court terme et à long terme.

Plus généralement, la présence d'eau derrière un ouvrage de soutènement, qu'il s'agisse d'eau d'infiltration ou d'une véritable nappe, est pratiquement toujours une situation défavorable. Les pressions hydrostatiques exercées sur la structure sont généralement très pénalisantes vis-à-vis du dimensionnement et presque toujours cause de désordres lorsqu'elles n'ont pas été appréciées correctement.

Pour s'affranchir de ces difficultés, lorsque cela est possible, un système de drainage efficace et pérenne est mis en place derrière l'ouvrage. Il permet de garantir, en particulier, que la situation de ≪ mise en charge≫ de celui-ci ne puisse se produire. Ces dispositions sont à prévoir même en l'absence de nappe derrière l'ouvrage. Dans ce cas, un dispositif constitue simplement de barbacanes peut suffire.

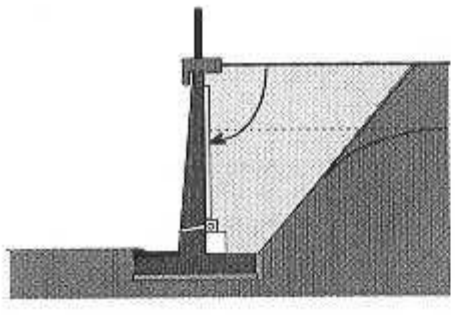


Figure II.9. Drainage des eaux d'infiltration par rabattement de la nappe

II.4.4. Calcul des efforts de poussée-butée

Il existe plusieurs méthodes pour calculer les efforts de Poussée-Butée. Les principales sont présentées dans ce chapitre par ordre chronologique après un rappel de la notion de Poussée -butée.

II.4.4.1 Equilibre de Poussée-butée

Les sollicitations dites de poussée et de butée se rencontrent dans tous les cas où un ouvrage comprend une surface subverticale en contact avec le sol. C'est typiquement le cas des écrans de soutènement par exemple.

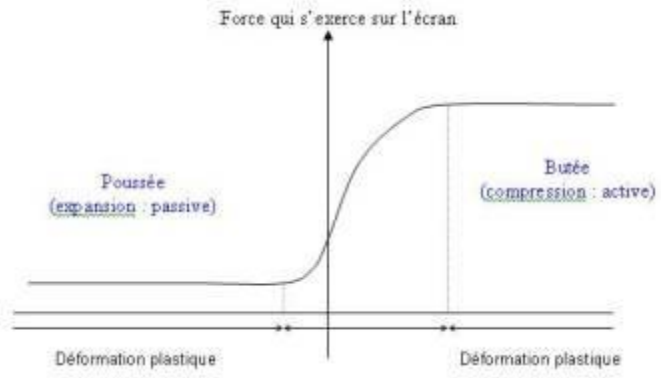


Figure II.10. Équilibre limite de poussée ou de ou de butée

Si l'on déplace un mur par rapport au sol, dans un sens ou dans l'autre, on observe que pour un certain déplacement, le massif va se rompre. Selon le sens de ce déplacement, cet équilibre est différent. On parle alors **d'équilibre limite de poussée ou de butée.**

On dit qu'un milieu semi-infini est en équilibre limite, si en tout point du milieu le cercle de Mohr des contraintes est tangent aux droites de Coulomb, donc si le critère de plasticité est satisfait en tout point du milieu.

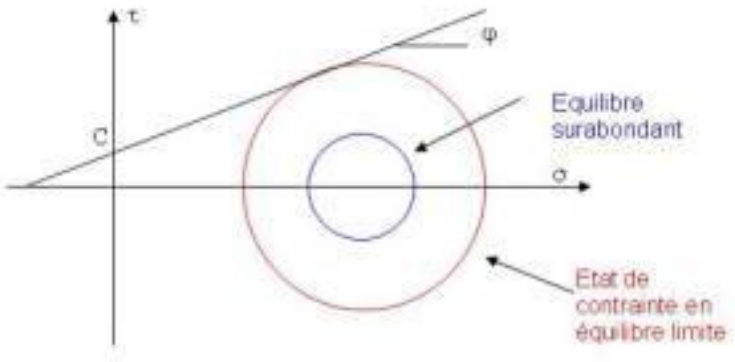


Figure II.11. Etat de contraintes en équilibre limite

Remarque : toute augmentation de la sollicitation entraîne la rupture par écoulement plastique.

Si l'on imagine un déplacement horizontal dans le sens d'une décompression du massif : après un déplacement de l'ordre de h/1000 (h hauteur du mur), le massif va atteindre la rupture. On appelle cette limite : **l'équilibre limite de poussée**.

Si l'on imagine un déplacement horizontal du mur dans le sens d'une compression du massif : après un déplacement de l'ordre de h/100 (soit environ 10 fois plus que dans le cas précèdent), le massif situe à droite du mur va atteindre la rupture. On appelle cette limite : **l'équilibre limite de butée**.

On s'intéresse à présent à l'état de contrainte dans le sol.

- L'état initia l dans le massif est donne par le cercle d'extrémités $(\sigma'_{v0}, \sigma'_{h0})$
- Poussée : à partir de l'état de repos, on diminue σ'_v en imposant une expansion, c'est-à-dire un relâchement du massif jusqu'à ce que le cercle atteigne la courbe intrinsèque.

$$\sigma'_h = K_a \sigma'_v \textbf{ en poussée}$$

- Butée : à partir de l'état de repos, la contrainte horizontale augmente jusqu'à atteindre la valeur limite maximale pour laquelle le cercle de Mohr tangente la droite de rupture.

$$\sigma'_h = K_p \sigma'_v \textbf{ en butée}$$

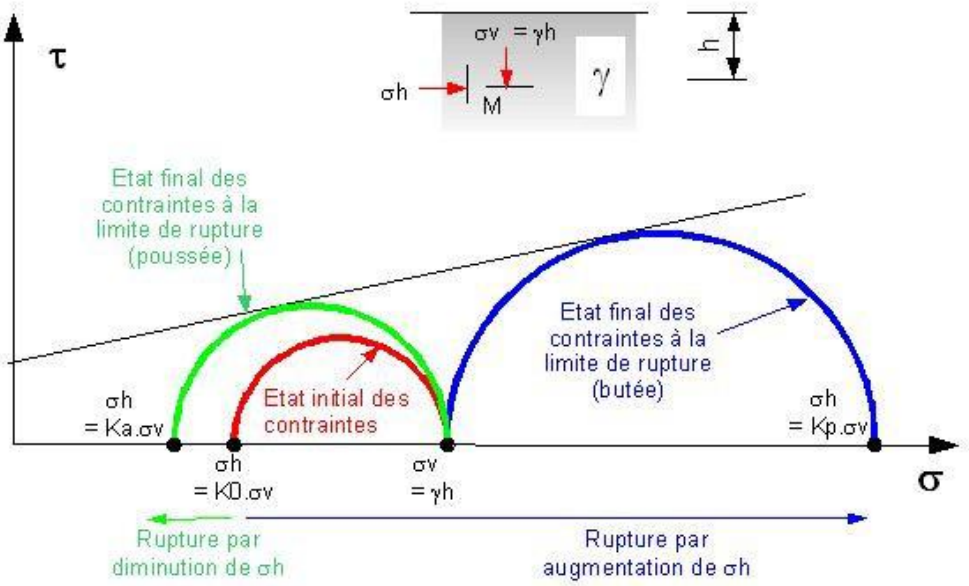


Figure II.12. Etats limites de poussée et de butée

On appelle « a » pour « actif » et « p » pour « passif », ces termes se référant à « l'action » du sol.

Remarque : $K_a . K_p = 1$ si c'=0

D'une manière générale, le calcul de la force de poussée ou de butée doit tenir compte de l'amplitude et de la direction du mouvement relatif de l'ouvrage par rapport au sol

II.4.4.2 Méthode de Coulomb

Charles Augustin Coulomb (1736 - 1806) a été d'abord un ingénieur du génie militaire avant de devenir plus tard un physicien encore plus célèbre par ses mémoires sur l'électricité et le magnétisme entre 1785 et 1791. Son premier ouvrage important fut, en tant que " Lieutenant en Premier du Génie ", la construction de 1764 à 1772 à la Martinique du fort Bourbon. A son retour en métropole en 1773 il publie à l'Académie des Sciences un important mémoire de mécanique appliquée intitule :

Sur une application des règles de Maximis & Minimis à quelques Problèmes de Statique, relatifs à l'Architecture. (Par M. COULOMB, Ingénieur du Roi).

La méthode de coulomb permet de déterminer les forces de poussée et de butée limites s'exerçant derrière un écran ou un mur quelconque sans considérations de l'état de contrainte s'exerçant dans le sol derrière le mur.

Elle repose sur les hypothèses suivantes :

- sol semi-infini, homogène, isotrope,
- condition de déformation plane,
- courbe intrinsèque de MOHR-COULOMB,
- massif a surface libre plane,

COULOMB suppose que la surface de rupture est plane (coin de Coulomb).

Calcul de la force de poussée

Soit un écran vertical de hauteur H soutenant un massif de sol sans cohésion avec un terre-plein horizontal :

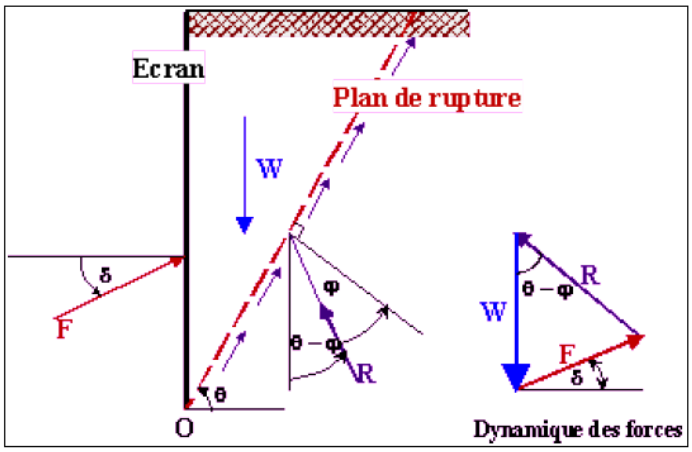


Figure II.13. Équilibre du coin coulomb

- On suppose que la surface de rupture potentielle est un plan (coin de Coulomb) passant par le pied de l'écran et faisant un angle θ avec l'horizontale.

● On fait l'hypothèse que la contrainte de cisaillement $\tau = \sigma' \, tg\varphi$ (sol sans cohésion) est complètement mobilisée le long de ce plan. Le coin de Coulomb se comporte de façon rigide plastique, ce qui n'est pas le cas généralement surtout si l'écran est de grande hauteur.

● La réaction totale du sol **R** sur lequel glisse le coin de Coulomb est incliné de l'angle φ sur la normale au plan de rupture.

● La force F = - P (poussée du sol) est inclinée de δ sur la normale a l'écran.δ est supposée connue.

● Le principe consiste simplement à écrire l'équilibre des forces qui s'appliquent sur le coin de sol (R,W et F = -P);

W est le poids du mur et F est l'opposé de la force de poussée qu'exerce le sol sur le mur.

- On détermine ainsi F en fonction de l'angle θ .
- La méthode de Coulomb consiste à prendre le maximum de F(θ) (Maximis) pour calculer la poussée, ce serait le contraire pour la butée (Minimis).

En application de la méthode de Coulomb, on calcule la poussée en supposant que $\delta = \mathbf{0}$.

Le maximum de F est donne pour $\theta = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}$

$$F_a = \frac{1}{2}.\gamma.h^2.\tan^2(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2})$$

et $K_a = \tan^2(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2})$

Poncelet a généralisé la méthode de Coulomb a un écran incline de λ et à un sol surmonte d'un talus d'angle β . Par la même procédure, on détermine le coefficient de poussée Ka.

Avec δ , λ et β positifs dans le sens trigonométrique.

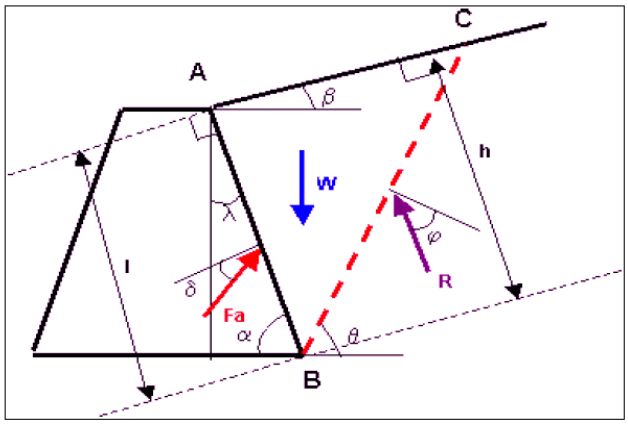


Figure II.14. Formule de Poncelet

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

et $F_a = \frac{1}{2}.K_a.\gamma.l^2$

Remarques :

- La méthode de Coulomb, qui suppose des plans de rupture, n'est pas applicable dans le cas de la butée pour laquelle les surfaces de rupture ne peuvent être assimilées à des plans.
- La méthode de Coulomb donne des résultats acceptables pour le calcul de la poussée de sols sans cohésion, spécialement si δ, λ et β sont positifs. Par contre elle n'indique pas la répartition des contraintes le long de l'écran. La méthode de Coulomb ne permet donc pas de déterminer le point d'application de la force Fa.

II.4.4.3. Méthode de Rankine

Hypothèses

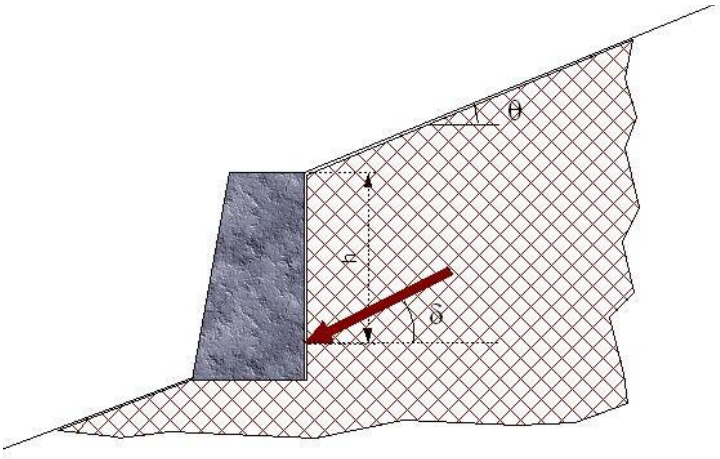


Figure II.15. Théorie de Rankine

La méthode de Rankine consiste à calculer les forces de poussée et de butée à partir d'une approximation de l'état des contraintes dans le sol au contact de l'écran.

La poussée est homogène a une **contrainte**, inclinée de $\delta = \theta$ a une profondeur donnée h sur un écran vertical avec une surface libre du terrain inclinée de θ. Le calcul de la force de poussée ou de butée s'effectue par intégration des contraintes sur la hauteur du mur.

L'inconvénient est que cette méthode on impose la **direction de la contrainte** qui s'exerce sur le mur en tout point du mur et qu'on ne tient pas compte du frottement entre le sol et le mur. Les contraintes de poussée et de butée qui s'exercent sur le mur sont, pour un sol pulvérulent :

$$\sigma_a^{'} = K_a \sigma_v^{'}$$

$$\sigma_p^{'} = K_p \sigma_v^{'}$$

K_a et K_p s'appliquent sur les contraintes effectives.

Ces contraintes sont inclinées de $\delta = \theta$ par rapport à l'horizontale.

Cas particuliers

- Pour un milieu pulvérulent (c'=0, φ'), dans le cas d'une surface libre horizontale :

$\sigma_h^{'} = K_a \sigma_v^{'}$

avec coefficient de poussée : $K_a = \tan^2(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2})$

$\sigma_h^{'} = K_p \sigma_v^{'}$

avec coefficient de butée : $K_p = \tan^2(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2})$

Dans le cas d'un massif incline, on a Ka = f(θ , φ) et Kp = g(θ , φ)

- Prise en compte de la cohésion :

Le théorème des états correspondants permet de prendre en compte la cohésion.

Dans le cas d'un massif à surface horizontale, les contraintes de poussée et de butée sont alors :

$\sigma_a^{'} = K_a . \sigma_v^{'} - 2.c.\sqrt{K_a}$

$\sigma_p^{'} = K_a . \sigma_v^{'} + 2.c.\sqrt{K_p}$

II.4.4.4. Théorie de Boussinesq

La théorie de Rankine ne permet pas de prendre en compte le frottement qui existe entre le sol et le mur.

Ainsi, par exemple dans le cas d'un massif à surface horizontale et d'un mur à paroi verticale, la théorie de Rankine suppose que le frottement entre le mur et le sol est nul, ce qui suppose que le mur est parfaitement lisse.

BOUSSINESQ (1882) a amélioré la théorie de RANKINE en prenant en compte **l'interaction réelle** entre le sol et l'écran, c'est-à-dire en choisissant la valeur de l'angle de frottement δ sol-écran. Les contraintes appliquées sur le mur de soutènement sont donc inclinées d'un angle δ par rapport à la normale à l'écran.

Dans cet équilibre, BOUSSINESQ considère une première zone ou on a l'équilibre de RANKINE se raccordant à une seconde zone où il tient compte des conditions aux limites sur l'écran.

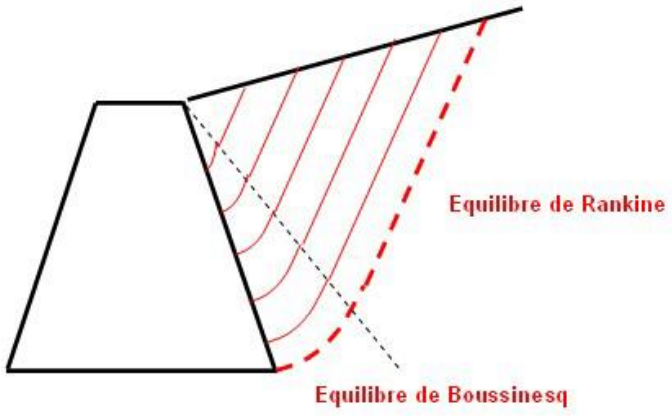


Figure II.16. Equilibre de BOUSSINESQ

Si BOUSSINESQ avait bien pose le problème, il n'a été résolu qu'en 1948 par **CAQUOT** et **KERISEL.**

Les résultats sont fournis dans les **tables de Caquot, Kérisel et Absi** qui donnent les coefficients de poussée et de butée du sol (pesant) *purement frottant* : K_a et K_p

II.4.4.5. Frottement sol-mur

L'angle de frottement δ entre le sol et l'écran dépend pour sa valeur de la rugosité de l'écran par rapport aux particules de sol et pour son signe du sens du déplacement relatif entre le sol et l'écran. En l'absence de déplacement entre le sol et l'écran $\delta = 0$.

Il dépend donc à la fois de la rugosité du parement et de l'angle de frottement interne φ du sol.

En première approximation on peut déterminer cet angle de frottement en fonction de l'état de surface du parement. Dans les cas courants de murs rugueux en béton ou en maçonnerie, la valeur de $\frac{2}{3}\varphi$ est celle à retenir.

II.5 Conclusion

Cette étude nous a permet de rassembler plusieurs connaissances sur les ouvrages de soutènement, leur classification, leur comportement vis à vis des différentes actions et sollicitations et les différentes méthodes de dimensionnement et de justification de la stabilité interne et externe au renversement, glissement, poinçonnement et la stabilité d'ensemble.

OUTILS NUMERIQUES UTILISES

OUTILS NUMERIQUES UTILISES

III.1. Introduction

Le calcul d'un ouvrage de soutènement a longtemps été abordé au point de vue de stabilité à la rupture (interne et externe), en se basant sur une approche dans laquelle le comportement du sol est supposé rigide-plastique (plasticité parfaite : critère de Mohr-Coulomb). Cette approche, validée par son application quotidienne au calcul de stabilité des ouvrages de soutènement, a besoin d'être améliorée par la prise en compte des déformations sous effets de charges gravitaires ainsi que les charges dynamiques.

La recherche de solutions beaucoup plus réaliste et générales a amené à une évolution, développement des méthodes de calcul numérique sur ordinateur (méthode des différences finies et méthode des éléments finies),ce qui a permis de mieux comprendre le comportement de ces ouvrages sous l'effet des charges sus citées.

III.2. Le programme EXPERT Murs de SOUTENEMENT

Ce programme est un outil performant permettant d'effectuer les calculs géotechniques et les calculs de la structure en béton armé (résistance ultime, surface théorique de ferraillage etc.).

Le module permet aussi d'effectuer le pré dimensionnement de la section transversale de l'élément de la structure en béton armé.

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

- Paramètres géotechniques : DTU 13.12 ou Fascicule N° 62 - Titre
- Ferraillage : BAEL 91 ou BAEL 91 mod.99

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

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

- Définition libre d'un nombre quelconque de charges appliquées (sur le talus et/ou sur le mur).
- Calculs des armatures du mur de soutènement pour la flexion et fissuration.
- Sélection et génération des types d'armatures (option disponible dans le cas où ROBOT est installé).

Le dimensionnement du mur de soutènement comprend :

- Vérification des contraintes dans le sol sous la semelle du mur de soutènement
- Définition des tassements moyens et de la différence de tassements ;
- Vérification de la stabilité au renversement et au glissement
- Calcul du déplacement et du renversement du mur
- Définition de la section d'acier théorique dans le voile et la semelle
- Définition des combinaisons dimensionnantes lors de la vérification de la résistance du mur de soutènement.

Pour faciliter l'étude des murs de soutènement, le programme *EXPERT Murs de Soutènement* comprend sept onglets prédéfinis: Géométrie/Sols/Charges/Paramètres de calcul/Paramètres du ferraillage/Résultats/Ferraillage.

III.2.1. Géométrie du mur :

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

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

Général/ Voile/ Semelle/ Tablettes.

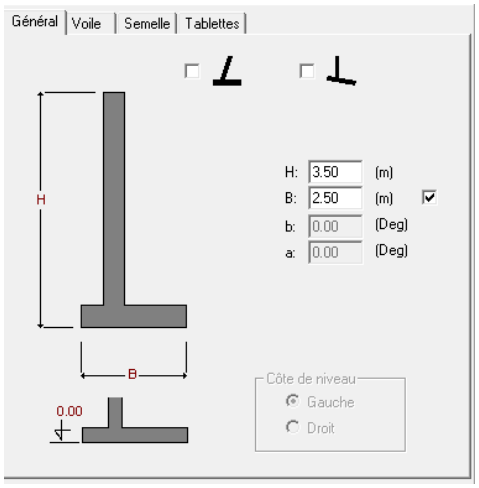


Figure III.1 L'onglet géométrie du mur

III.2.2 Sols :

Les sols qui se trouvent du côté droit/gauche du mur et ceux au-dessous du mur peuvent être définis dans l'onglet *Sols* présenté sur la figure ci-dessous. La définition des sols concerne les sols situés en amont et en aval du mur de soutènement.

L'onglet *Sols* est divisé en trois parties : dessin schématique du mur de soutènement, définition du talus et options permettant de définir le sol en amont/en aval du mur.

Dans le tableau vous pouvez soit définir les paramètres des sols soit consulter les paramètres des sols définis. Pour chaque sol, le tableau affiche les grandeurs suivantes : nom, niveau, densité, contrainte admissible, angle de frottement, cohésion, coefficient de frottement semelle/sol, coefficient de frottement voile/sol (aval et amont). Dans la colonne *Nom*, vous pouvez saisir un nom quelconque ou sélectionner un des sols typiques disponibles dans la liste déroulante. Dans ce deuxième cas, la sélection d'un des sols standard entraîne la prise des valeurs caractéristiques pour ce sol (densité, contrainte admissible, angle de frottement, cohésion et coefficients de frottement).

Dans cette boîte de dialogue vous pouvez définir le type de sol avant, amont et sous le mur de soutènement. Vous pouvez définir les types de sol suivants :

- Homogène
- Stratifié (si la case Sol stratifié est cochée) ; dans ce cas vous pouvez définir le nombre des couches de sol amont, aval et sous la semelle du mur de soutènement.

Dans cette boîte de dialogue vous pouvez définir les grandeurs suivantes :

- Le niveau de la nappe phréatique aval (accessible si la case niveau aval est cochée)
- Le niveau de la nappe phréatique amont (accessible si la case niveau amont est cochée)
- Niveau de référence

Les deux niveaux de la nappe phréatique sont représentés sur le dessin schématique du mur de soutènement (les niveaux seront visibles après un clic sur le bouton Appliquer).

Le niveau de la nappe phréatique est présenté à l'aide d'une ligne bleu affichée sur le schéma du mur. Les calculs ne prennent pas en compte de la pression de l'eau due à la pente hydraulique.

Le site définit la profondeur du mur dans le sol naturel (Stratification primaire). Cela permet, de façon simple, de définir la stratification géotechnique dans un repère global quelconque (p. ex. en mètres au-dessus du niveau de mer) et, ensuite, de remplacer dans le sol avec le repère local 0.00 et de lui référer toutes les grandeurs calculées.

Afin de faciliter la définition des sols amont et aval du voile, il est admis que les sols aval sont définis par rapport au point le plus bas amont, et les sols amont - par rapport au point le plus bas aval. C'est très important pour les voiles à semelle inclinée. Au-dessous de ces points, la stratification est prise conformément à la stratification primaire et le site.

Tous les niveaux sont définis par rapport au niveau de référence p0 que vous pouvez définir dans le champ d'édition prévu à cet effet. L'ordre de définition des niveaux spécifiques est libre car tous les niveaux sont automatiquement redéfinis d'après la nouvelle valeur du niveau de référence.
Note : L'épaisseur de la couche du sol ne peut pas être inférieure à 20 centimètres.

III.2.3 Charges

Les charges appliquées sur le talus ou directement sur le voile du mur de soutènement peuvent être définies dans l'onglet Charges représenté sur la figure ci-dessous.
L'onglet est divisé en trois parties : dessin du mur de soutènement (avec les charges sur le talus et sur le voile), tableaux de chargements dans lequel les charges sont définies et, à droite, le dessin du type de chargement sélectionné.
De plus, la partie droite supérieure de la boîte de dialogue (zone *Schémas de charges*), les options suivantes sont disponibles :

- Ensemble - si vous sélectionnez cette option, toutes les charges définies seront présentées ensemble sur le dessin du mur de soutènement
- Séparément - si vous sélectionnez cette option, le dessin ne présentera que la charge sélectionnée dans le tableau.

Dans la calculette, vous pouvez définir les types de charges suivants :

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

III.2.4 Paramètres de calcul

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

NOTE

Il faut éviter la sélection de normes incompatibles (par exemple, la norme béton armé française et la norme géotechnique polonaise), car cela peut entraîner des erreurs dues aux règlements différents de combinaisons de charges.

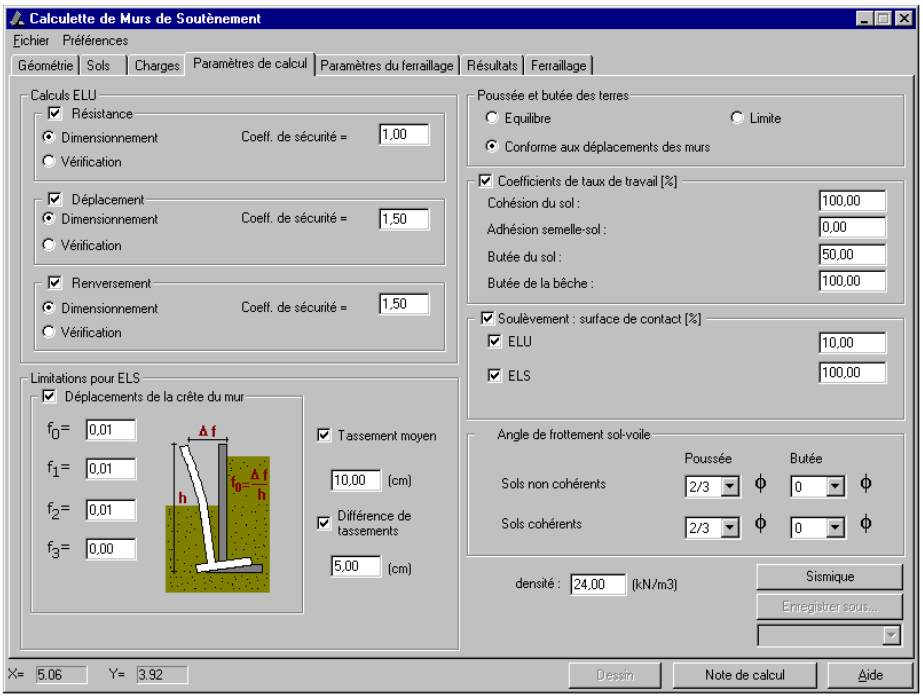


Figure III.2 Onglet paramètres de calcul

Les paramètres géotechniques peuvent être divisés en ceux qui correspondent à l'état limite ultime et à ceux relatifs à l'état limite de service.

Entre les paramètres de l'état limite ultime, on peut classer :

- résistance du sol
- stabilité au glissement
- stabilité au renversement.

Entre les paramètres de l'état limite de service, on peut classer :

- déplacement de la crête du mur
- tassement moyen
- différence de tassements

Pour chaque cas, des règlements de pondérations différents peuvent être définis dans le fichier *.rgl. Il est également possible de limiter la surface de contact du soulèvement de la semelle.

Les calculs des déplacements de la crête du mur sont basés à la définition de la flèche élastique de la console ; ensuite, cette valeur est multipliée par le rapport entre la rigidité élastique et la rigidité BA. Les valeurs des flèches constituent la solution de l'équation différentielle pour la flèche w'' (x) = - 1 / EI * M(x). Dans le calcul, on prend en compte la valeur constante de la rigidité de l'élément EI.

Dans les calculs de la flèche élastique, la valeur du module d'Young E est calculée suivant les principes définis dans la norme BA appropriée à partir de la résistance du béton. Le module

d'inertie est une valeur moyenne calculée à partir de la section supérieure et inférieure du mur ; cela signifie que le résultat obtenu est précis uniquement pour les murs à épaisseur constante.
Dans les calculs des flèches de l'élément BA, la valeur de la rigidité EI est calculée suivant les principes définis dans la norme BA appropriée. Dans les calculs, on admet que toutes les charges sont considérées comme charges de longue durée. Pour les calculs, le logiciel prend la section située le plus bas pour laquelle le moment fléchissant a été défini. La largeur de la section est la largeur du mur dans cette section.

III.2.6 Résultats

Les résultats des calculs effectués pour le mur de soutènement défini sont représentés sur l'onglet Résultats. Les calculs du mur de soutènement comprennent la vérification : de

- la pression sous la semelle du mur (résistance du sol) - vérification de la poussée du mur de soutènement sur le sol ; la poussée doit être limitée pour éviter le poinçonnement et le tassement
- la stabilité au renversement du mur - la vérification est effectuée pour l'état limite ultime, son but est de démontrer si l'inclinaison du mur en dehors de son arête extérieure ne se produit pas. Cela se ramène à vérifier si le moment stabilisateur dû au poids propre du mur et au poids du prisme stabilisateur est supérieur au moment de renversement dû à la poussé active des terres, charges sur le talus et charges agissant directement sur le mur
- la stabilité au glissement du mur - la vérification est effectuée pour l'état limite ultime, son but est de démontrer que le mur de soutènement ne glissera pas dans les plans de l'assise
- la présentation des combinaisons dimensionnantes lors de la vérification de la résistance des murs de soutènement.

Pour les paramètres géotechniques, les résultats peuvent être présentés sous la forme graphique (dans la fenêtre graphique) de même que sous le format texte (dans la note de calcul).
Dans la fenêtre graphique contenant la vue de la section transversale du mur de soutènement, les valeurs suivantes peuvent être affichées :

- résultats pour la poussée des terres
- résultats pour les déplacements.

Dans le programme **EXPERT Murs de soutènement**, les notes de calcul prédéfinies sont accessibles, grâce à ces notes vous pouvez imprimer les résultats du dimensionnement après avoir effectué les calculs de dimensionnement/vérification du mur de soutènement. Les notes de calcul sont générées sous la forme d'un fichier qui peut être édité dans un traitement de texte.

III.3. Présentation du code PLAXIS :

C'est un programme d'éléments finis spécialement conçu pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour différents types d'applications géotechniques. Il simule le comportement des structures en sols, en roches ou autres matériaux qui se plastifient quand leur surface de charge est atteinte. PLAXIS version 8 a été conçu pour opérer un espace bidimensionnel.

Les situations réelles peuvent être représentées par un modèle plan ou axisymétrique. Le programme utilise une interface graphique pratique permettant aux utilisateurs de générer rapidement un modèle géométrique et un maillage d'éléments finis basés sur la coupe verticale de l'ouvrage à étudier.

Inventé par des géotechniciens numériciens, le code éléments finis PLAXIS représente certainement un optimum actuel sur les plans scientifique et pratique en l'analyse pseudo statique en deux dimensions.

Scientifiquement, c'est un outil d'analyse non linéaire en élastoplasticité non standard, avec prise en compte des pressions interstitielles, doté de méthodes de résolution et d'algorithmes robustes, éprouvés, ainsi que de procédures de choix automatique évitant des choix délicats à l'opérateur peu averti.

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

L'ensemble des options par défaut (conditions aux limites) rend la mise en données aisée et rapide.

Enfin, les options simplifiées (initiation des contraintes, pressions interstitielles) permettent de prévoir le comportement d'un ouvrage.

L'utilisation de PLAXIS consiste en quatre sous-programmes (Input, Calculations, Output, Curves) :

-Le programme d'entrée de données (Input)

Le programme contient tout ce qui est nécessaire pour créer et modifier un modèle géométrique, pour générer le maillage d'éléments finis correspondant et pour générer les conditions initiales.

-Le programme de calcul (Calculations)

Ce programme contient tous les éléments pour définir et amorcer un calcul par la méthode des éléments finis. Au début du programme de calcul, l'utilisateur doit choisir le projet pour lequel les calculs vont être définis.

-Le programme de résultats (Output)

Ce programme contient tous les éléments qui permettent de voir les résultats des données générées et des calculs d'éléments finis. Au début du programme de résultats, l'utilisateur doit choisir le modèle et la phase de calcul appropriée ou le numéro du pas pour lequel les résultats seront affichés.

-Le programme courbe (Curves)

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

III.3.1 Conventions de signe :

La génération d'un modèle d'éléments finis à deux dimensions avec PLAXIS est basée sur un modèle géométrique. Ce modèle géométrique est créé dans le plan (x, y) du système de coordonnées global (Figure 6.1), alors que la direction z est perpendiculaire à ce plan. Dans le système de coordonnées global, la direction z positive pointe vers l'utilisateur.

Bien que PLAXIS version 8 soit un programme 2D, les contraintes sont basées sur un système de coordonnées cartésiennes 3D, indiqué sur la figure 6.1. Dans une analyse en déformations planes, σ_{zz} correspond à la contrainte perpendiculaire au plan de la coupe. Dans une analyse axisymétrique, x représente la direction radiale, y la direction axiale et z représente la direction tangentielle. Dans ce cas, σ_{xx} représente la contrainte radiale et σ_{zz} la contrainte circonférentielle.

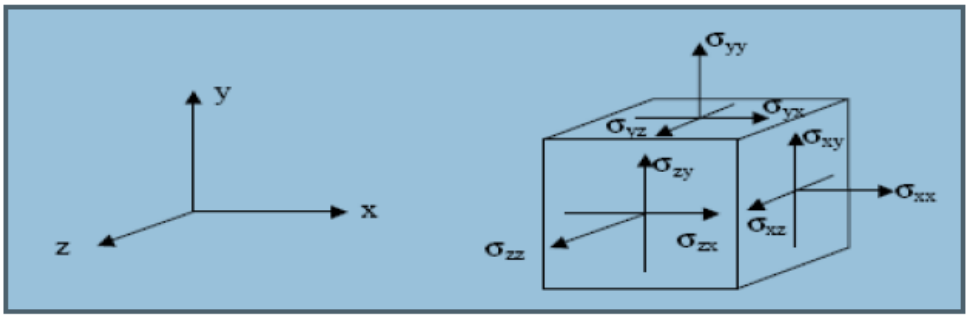


Figure III.4 Système de coordonnées et définition des composantes de contrainte positIIIes

Dans tous les résultats, les contraintes et forces de compression, incluant les pressions interstitielles, sont comptées négativement, alors que les contraintes et efforts de traction sont comptés positivement. La Figure III.4 indique les directions de contrainte positives.

III.3.2 Le type de modèle :

PLAXIS Version 8 peut être utilisé pour réaliser des analyses par éléments finis en deux dimensions. Les modèles d'éléments finis peuvent être soit plans (Plane strain), soit axisymétriques (Axisymmetric). Les modèles en déformations planes (Plane strain) sont utilisés pour des structures ayant une section (plus ou moins) uniforme, et avec un état de contraintes et un schéma de chargement uniformes sur une longueur suffisante perpendiculairement à la section (direction z). Les déplacements perpendiculaires à la section sont considérés comme nuls. Cependant, les contraintes normales dans la direction z sont intégralement prises en compte. Les modèles axisymétriques (Axisymmetric) sont utilisés pour des structures circulaires ayant une section radiale (plus ou moins) uniforme, avec un schéma de chargement réparti autour de l'axe central et des états de contrainte et de déformation identiques selon les directions radiales. A noter que pour les problèmes axisymétriques, la coordonnée x représente le rayon et la coordonnée y correspond à l'axe de symétrie. Pour un modèle d'éléments finis à deux dimensions, le choix de Plane strain ou de Axisymmetry a pour conséquence de ne laisser que deux degrés de liberté en translation par noeud dans les directions x et y.

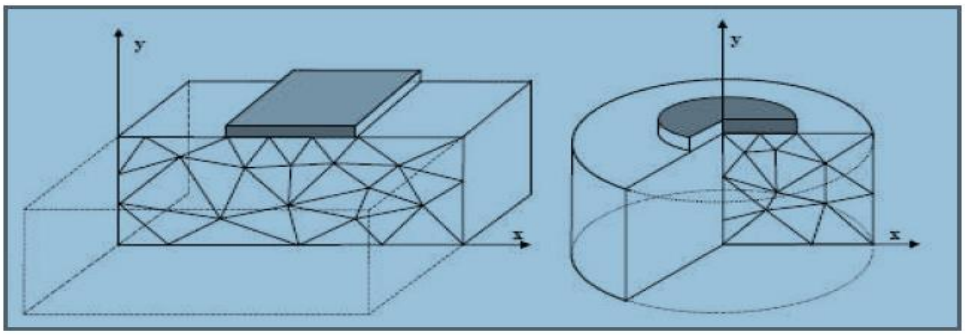


Figure III.5 Exemples de problèmes en déformations plane et axisymétrique

III.3.4 Les éléments :

L'utilisateur doit sélectionner des éléments triangulaires à 6 ou 15 noeuds (Figure 6.3) pour modéliser les couches de sol et autres éléments de volume. L'élément de triangle à 15 nœuds fournit une interpolation du quatrième ordre pour les déplacements et l'intégration numérique se fait sur douze points de Gauss (points de contrainte). Pour le triangle à 6 nœuds, l'interpolation est d'ordre deux et l'intégration numérique se fait sur trois points de Gauss. Le type d'éléments pour les éléments de structure est automatiquement compatible avec le type d'éléments de sol choisi.

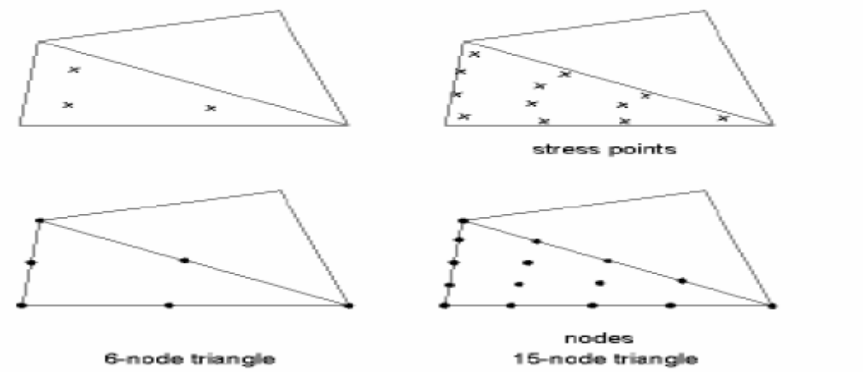


Figure III.6 Position des nœuds et des points de contrainte dans les éléments de sol

III.3.5 Les modèles de comportements utilisés dans PLAXIS

III.3.5.1 Modèle élastique linéaire

Le modèle élastique linéaire utilisé dans PLAXIS est classique. Les tableaux de rentrée des données demandent le module de cisaillement G et le coefficient de Poisson ν. L'avantage de G est d'être indépendant des conditions de drainage du matériau (G_u= G'), ce qui n'est pas le cas des modules d'Young : le module d'Young non drainé est supérieur au module d'Young drainé. Il aurait pu sembler logique, si G est utilisé comme paramètre élastique, d'utiliser K comme second paramètre. D'une part K_u est infinie (correspondant à ν_u= 0.5) et il est moins courant d'emploi. G est en fait le module mesuré dans les essais pressiométriques.

La relation entre le module d'Young E est les autres modules sont données par les équations :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \; ; \qquad K = \frac{E}{3(1+\nu)} \; ; \qquad E_{oed} = \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \; .$$

Le modèle élastique linéaire de PLAXIS peut être employé surtout pour modéliser les éléments de structures béton ou métal en interaction avec le sol. Il peut aussi être intéressant pour certains problèmes de mécanique des roches.

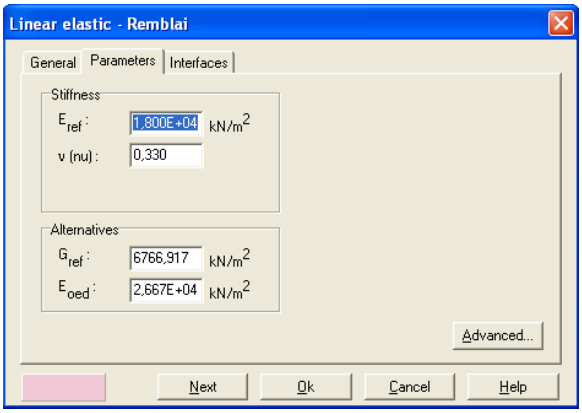


Figure III.7 Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire

Les paramètres sont représentés sur la figure III.7 et les paramètres avancés sur la figure III.8 :

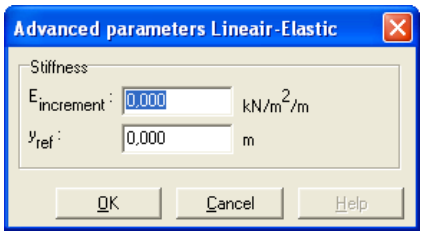


Figure III.8 Fenêtre des paramètres avancés du modèle élastique linéaire

Les paramètres avancés sont reliés par l'équation :

$$E_{actual} = E_{ref} + (y_{ref} - y)E_{increment} \text{ avec } y < y_{ref}$$

$E_{increment}$	: Augmentation de la rigidité	[kN/m^2/m]
y_{ref}	: Unité de profondeur	[m]

III.3.5.2. Modèle de Mohr-Coulomb

Le comportement de Mohr-Coulomb présente un comportement élastique parfaitement plastique sans écrouissage. Il a une grande utilisation dans la géotechnique vu les résultats obtenus dans les calculs.

Dans le plan de Mohr, la droite intrinsèque est représentée par :

$$\tau = \sigma_n \tan\varphi + c \ ;$$

Où σ_n et τ sont respectivement les contraintes normales et de cisaillement, et c et φ respectivement la cohésion et l'angle de frottement du matériau (figure 2.8).

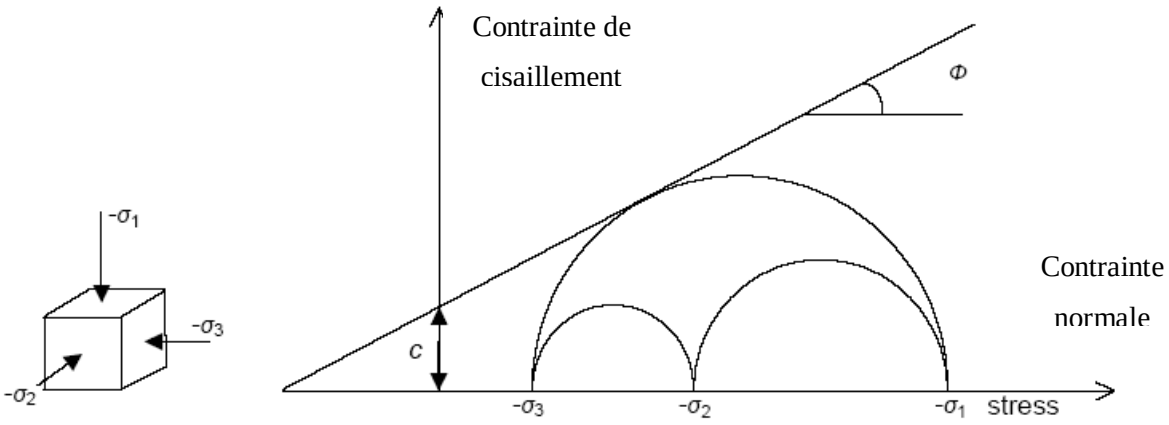


Figure III.9 Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb

Le critère de Coulomb à trois dimensions suppose que la contrainte intermédiaire n'intervient pas. La forme du critère est celle d'une pyramide irrégulière construite autour de la trisectrice (figure III.10) sur l'hexagone irrégulier de Mohr-Coulomb.

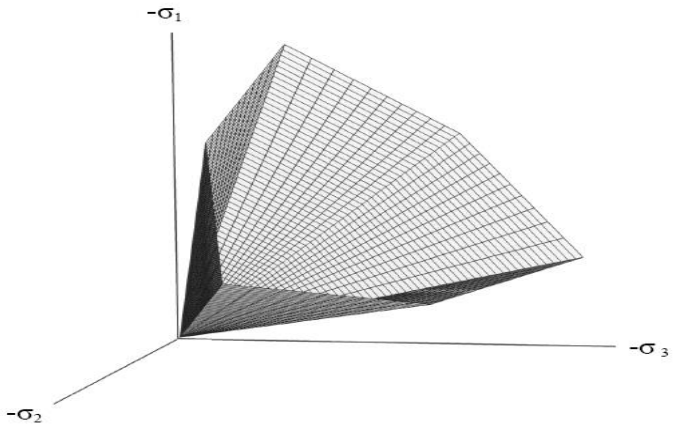


Figure III.10 Pyramide de Mohr-Coulomb tracée pour c=0

Le modèle demande la détermination de cinq paramètres (figure III.11). Les deux premiers sont E et ν (paramètres d'élasticité). Les deux autres sont c et φ, respectivement. Ce sont des paramètres classiques de la géotechnique, certes souvent fournis par des essais de laboratoires, mais nécessaires à des calculs de déformation ou de stabilité.

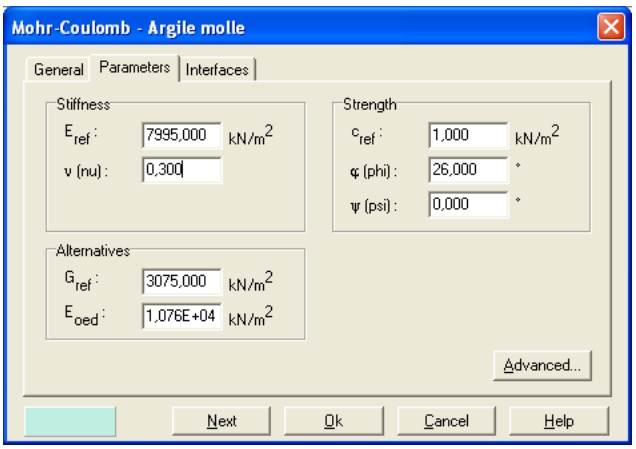


Figure III.11 Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb

Module d'Young :

Le choix d'un module de déformation est un des problèmes les plus difficiles en géotechnique. Le module de déformation varie en fonction de la déformation et en fonction de la contrainte moyenne. Dans le modèle de Mohr-Coulomb, le module est constant. Il parait peu réaliste de considérer un module tangent à l'origine (ce qui correspondait au G_{max} mesuré dans des essais dynamiques ou en très faibles déformations). Ce module nécessite des essais spéciaux. Il est

conseillé de prendre un module moyen, par exemple celui correspondant à un nIIIeau de 50 % du déviateur de rupture (figure III.12).

L'utilisateur doit rester conscient de l'importance du choix du module qu'il prendra en compte. Il n'y a là rien d'étonnant et la même question se retrouve par exemple dans tout calcul classique de fondation, par exemple.

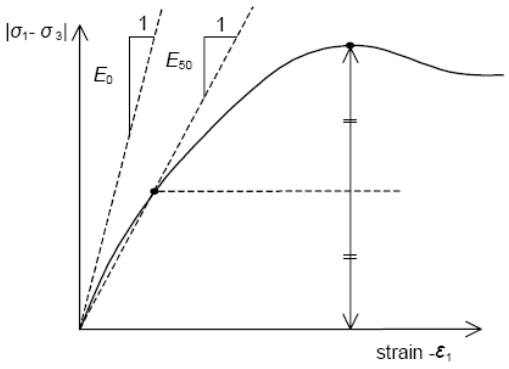


Figure III.12 Définition du module à 50% de la rupture

Dans la boite de dialogue des paramètres avancés, on peut aussi rentrer un gradient donnant la variation du module avec la profondeur.

Coefficient de Poisson : On conseille une valeur de 0,2 à 0,4 pour le coefficient de Poisson. Celle-ci est réaliste pour l'application du poids propre (procédure K_0 ou chargement gravitaires). Pour certains problèmes, notamment en décharge, on peut utiliser des valeurs plus faibles. Pour des sols incompressibles, le coefficient de Poisson s'approche de 0,5 sans que cette valeur soit utilisable.

Angle de frottement : PLAXIS ne prend pas en compte une variation d'angle de frottement avec la contrainte moyenne. L'angle de frottement à introduire est soit l'angle de frottement de pic soit l'angle de frottement de palier. On attire l'attention sur le fait que des angles de frottement supérieurs à 35° peuvent considérablement allonger les temps de calcul. Il peut être avisé de commencer des calculs avec des valeurs raisonnables d'angle de frottement, quitte à les augmenter dans la suite. Cette valeur de 35° est compatible avec les angles de frottement φ_{cv} (à volume constant, au palier).

On peut déterminer l'angle de frottement à partir de la courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb (figure 4.9).

Cohésion : Il peut être utile d'attribuer, même à des matériaux purement frottant, une très faible cohésion (0,2 à 1 kPa) pour des questions numériques. Pour les analyses en non drainé avec φ_u=0,

PLAXIS offre l'option de faire varier la cohésion non drainée avec la profondeur : ceci correspond à la croissance linéaire de la cohésion en fonction de la profondeur observée dans des profils au scissomètre ou en résistance de pointe de pénétromètre. Cette option est réalisée avec le paramètre c- depth. Une valeur nulle donne une cohésion constante. Les unités doivent être homogènes avec ce qui a été choisi dans le problème (typiquement en kPa/m).

Angle de dilatance :

Le dernier paramètre est l'angle de dilatance noté ψ ; c'est le paramètre le moins courant. Il peut cependant être facilement évalué par la règle (grossière) suivante :

$$\psi = \varphi - 30° \quad \text{pour } \varphi > 30°.$$

$$\psi = 0° \quad \text{pour } \varphi < 30°.$$

Le cas où $\psi < 0°$ correspond à des sables très lâches (état souvent dit métastable, ou liquéfaction statique). La valeur $\psi = 0°$ correspond à un matériau élastique parfaitement plastique, ou il n'y a donc pas de dilatance lorsque le matériau atteint la plasticité. C'est souvent le cas pour les argiles ou pour les sables de densité faibles ou moyenne sous contraintes assez fortes.

a) Les contraintes de traction :

La pyramide de Mohr-Coulomb permet des contraintes de traction (figure 4.10). Celles-ci sont souvent peu réalistes pour les sols et il est possible de couper ces contraintes de traction (tension cut-off) ou de les diminuer (Tensilestrength).

b) Les paramètres avancés :

Pour tenir compte des variations avec la profondeur, on utilise les paramètres avancés (figure III.13).

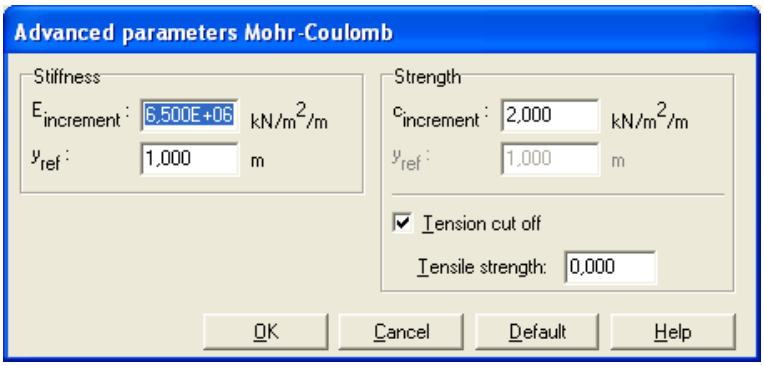


Figure III.13 Fenêtre des paramètres avancés du module Mohr-Coulomb

III.4. Conclusion :

La détermination des paramètres géotechniques à entrer dans PLAXIS n'est pas différente d'un choix de paramètres de calcul manuel ou numérique à l'aide de Robot Expert, pour un calcul de tassement ou de stabilité : à partir d'essais, il est indispensable d'arriver à ce que l'on pourrait appeler un modèle géotechnique de terrain.

Certains de ces paramètres sont différents dans leurs expressions, mais toujours reliés à des paramètres géotechniques classiques. Le paramètre le moins courant est l'angle de dilatance.

Le choix du modèle de comportement dépend en fait du problème posé : soutènement, tassement de remblai, fondation sur sol en pente, tunnel : quel modèle de comportement utiliser, pour quel problème géotechnique ?

Deuxième Partie

SIMULATION NUMERIQUE

APPLICATION AU CALCUL DE LA STABILITE D'UN MUR DE SOUTENEMENT

APPLICATION AU CALCUL DE LA STABILITE D'UN MUR DE SOUTENEMENT

IV.1 Géométrie et caractéristique des matériaux

Caractéristiques géométriques

Les données géométriques et les caractéristiques des sols du mur de soutènement étudié sont extraite d'un exemple téléchargé à partir du lien (https://data.fine.cz/programs-reports/exemple-murs-cantilever.pdf).

C'est un mur en béton armé, en forme de T avec une semelle à bèche, sa hauteur total est de 5,60m, large de 0,20 m en tête, comme schématisé en 3D sur la figure IV.1. Le profil retenu est représenté sur la figure IV.1.

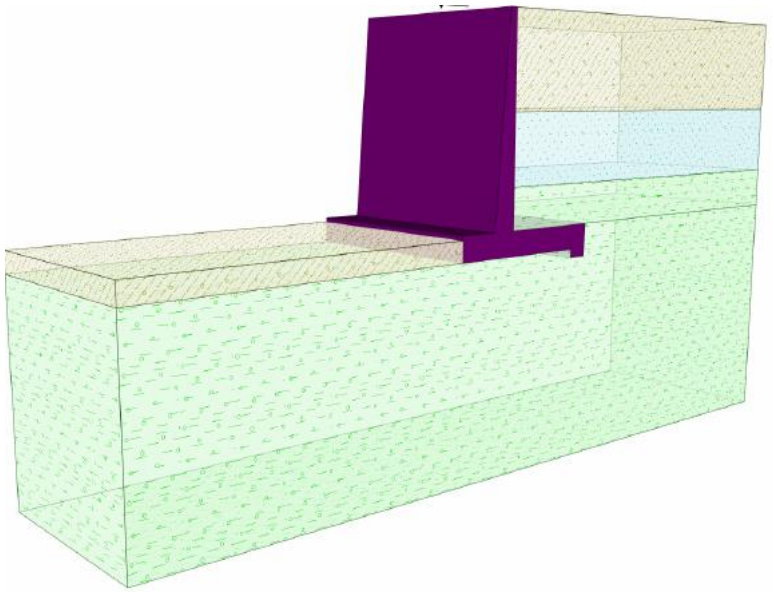


Figure IV.1 Mur de soutènements étudié, représenté en 3D

Caractéristiques des sols

Les caractéristiques de base des trois couches de sols sont encadrées dans le tableau IV.1

Tableau IV.1 Caractéristiques de base des sols

Num.	Nom	Echantillon	φ_{ef} [°]	c_{ef} [kPa]	γ [kN/m^3]	γ_{su} [kN/m^3]	δ [°]
1	Soil No. 1		29,00	10,00	19,00	9,00	15,00
2	Soil No. 2		31,50	0,00	17,50	7,50	15,00
3	Soil No. 3		27,00	10,00	19,50	9,50	15,00

Remarque :

Pour calculer la pression au repos, les sols sont supposé pulvérulents.

Le profil simplifié est représenté sur la figure IV.2.

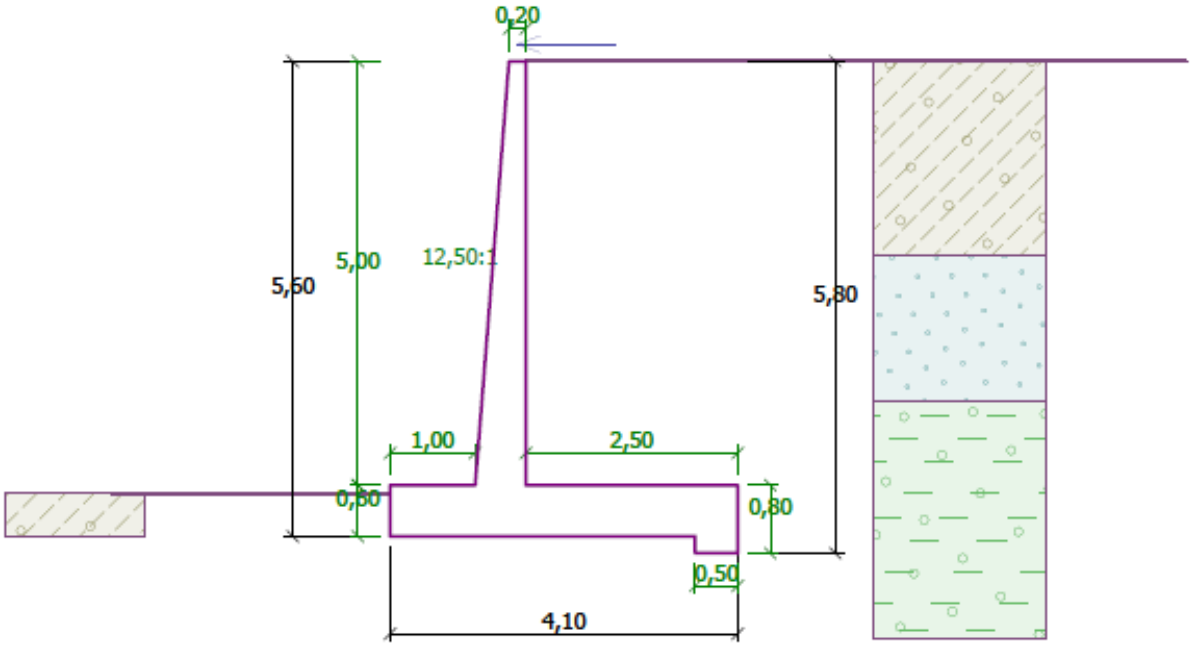


Figure IV.2 Profils du mur de soutènements étudié

IV.2 Calcul numérique classique « Robot »

L'utilisation du logiciel Expert de murs de soutènement incorporé dans Robot Structural 2010, nous permet de modéliser et de d'analyser la stabilité numérique du mur de soutènement. Le profil retenu est schématisé sur les figure IV.3 et IV.4.

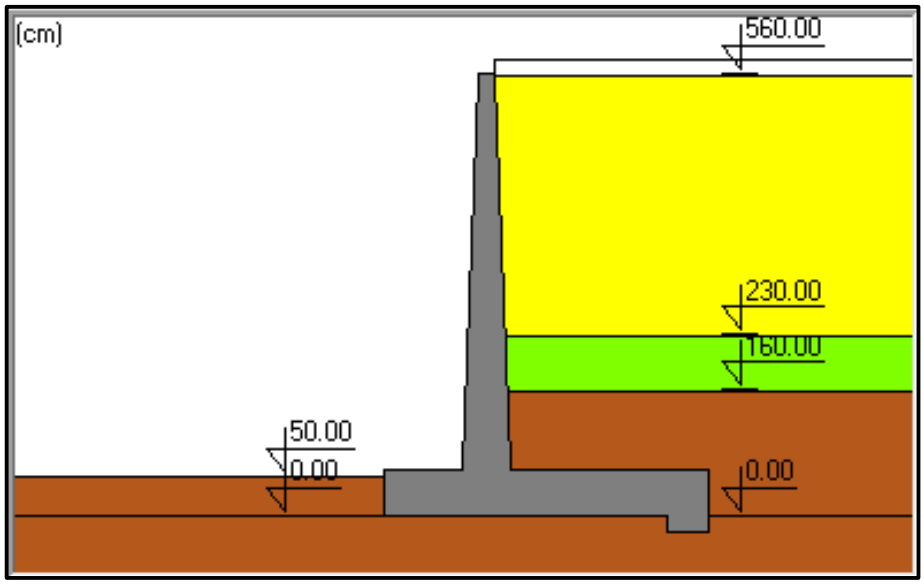


Figure IV.3 Différents niveaux du mur de soutènements étudié par ROBOT Expert

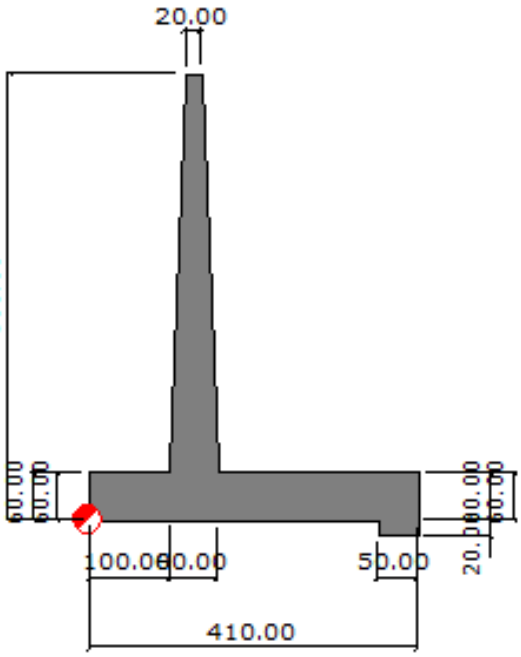


Figure IV.4 Profil géométrique du mur de soutènements étudié par ROBOT Expert

Les paramètres de de dimensionnement et des calculs de la stabilité au renversement, au glissement, au poinçonnement et la vérification de la résistance introduite dans le l'application sont schématisé sur la figure IV.5 et elles sont conforme au DTU 13.12 ou au Fascicule 62 Titre V et au règlement BAEL 91 modifié 99 pour la stabilité interne.

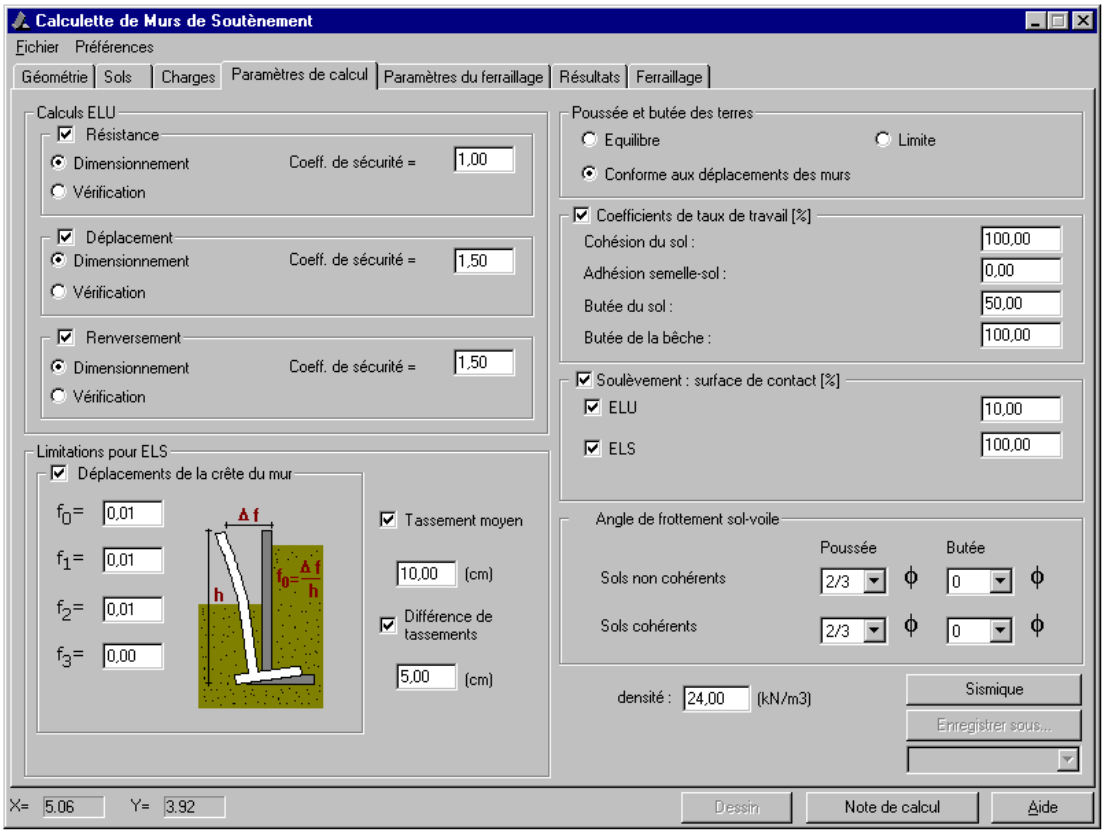


Figure IV.5 Paramètres de dimensionnement et des calculs de la stabilité

IV.3 Résultats des calculs par le logiciel Expert de murs de soutènement

Les résultats de calcul et vérification de la stabilité au renversement, au glissement, au poinçonnement peuvent être affiché sous plusieurs format.

Après la vérification de la stabilité externe, une vérification de la stabilité interne peut être entamé, et un dessin du ferraillage selon la norme choisie sera établi.

Les poussés de terrain seront calculées automatiquement et affichés selon deux mode (figure IV.6)

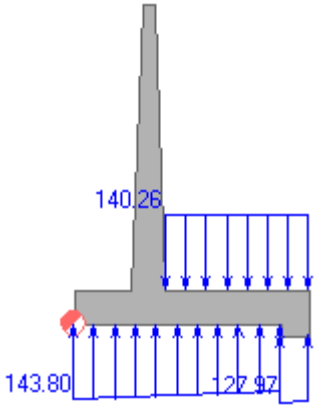
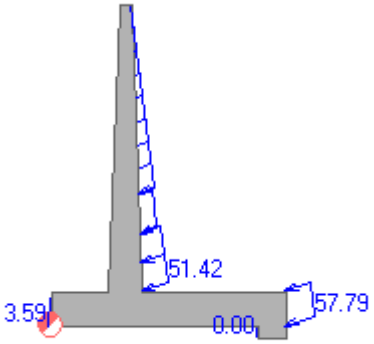
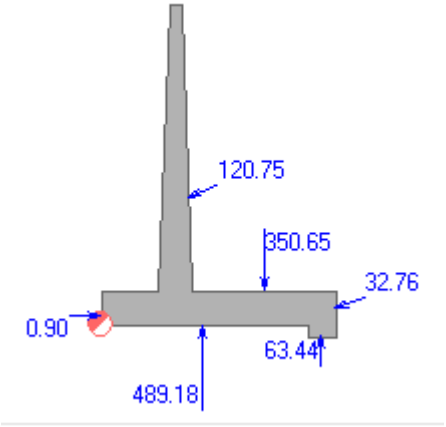
Type de diagramme	Poussée sur éléments horizontaux	Poussée sur éléments verticaux
Continue		
Résultante		

Figure IV.6 Poussée sur éléments horizontaux et verticaux et leur résultante

La stabilité au renversement et au glissement sont vérifiés, comme indiqué sur la figure IV.7.

StabilitÃ© au glissement	1.82617	>	1.5
StabilitÃ© au r	3.47571	>	1.5

Figure IV.7 Vérifications de la stabilité au renversement et au glissement

IV.4 Calcul numérique en éléments finis « Plaxis »

L'utilisation du logiciel Plaxis Version 8.1, nous permet de modéliser et de d'analyser la stabilité du mur de soutènement par calcul contrainte-déformation. Le profil retenu est schématisé sur la figure IV.8.

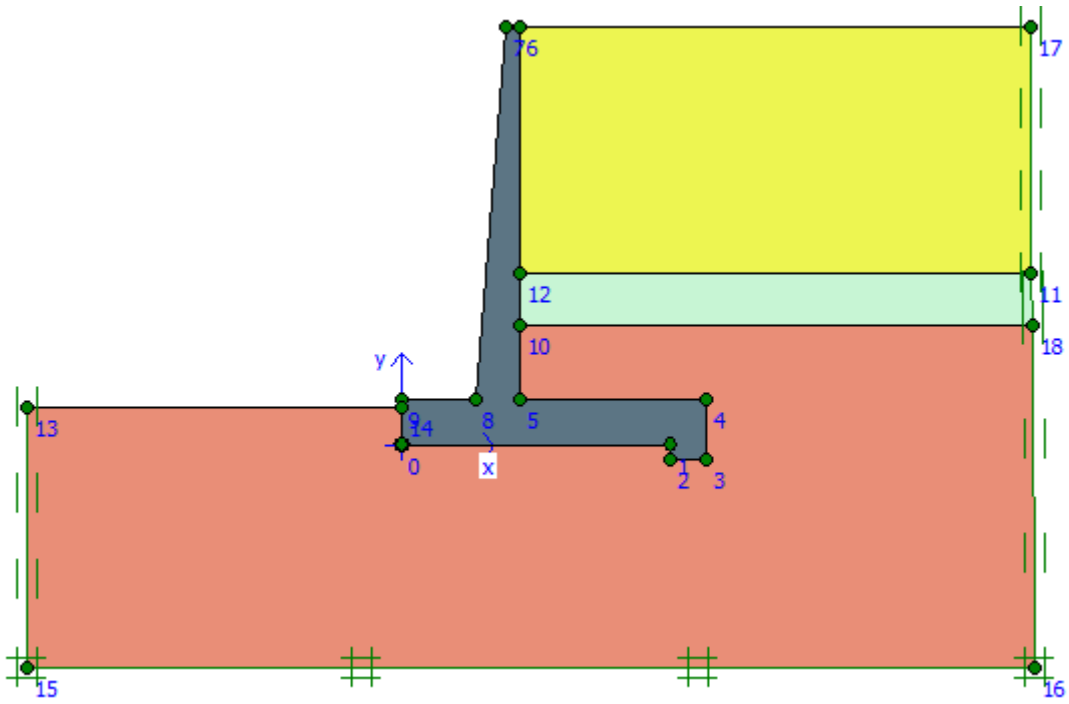


Figure IV.8. Modèle numérique du mur de soutènements étudié par Plaxis

Calculs en contrainte déformation

Dans notre cas, le calcul par Plaxis se fait en trois phases :

- Une phase 0 : imposé par le programme, permet la génération des conditions initiale ;
- Une phase 1 : prend départ à partie de la phase 0 et permet un calcul plastique ;
- Une phase 2 : prend départ à partie de la phase 1 et permet un calcul en « Phi-C reduction», permet le calcul de la stabilité générale de l'ensemble de l'ouvrage sol et mur de soutènements.

IV.5 Résultats des calculs par le logiciel PLAXIS 2D

Phase plastique

Les résultats de calculs de la Phase plastique peuvent être affichés sous forme de tableaux, de diagrammes ou sous forme animés.

On se limite à présenter le maillage déformé sur la figure IV.8, les tassements verticaux en m, en mode dégradés (figure IV.9) et en coupe verticale au niveau du voile du mur de soutènement (figure IV.10).

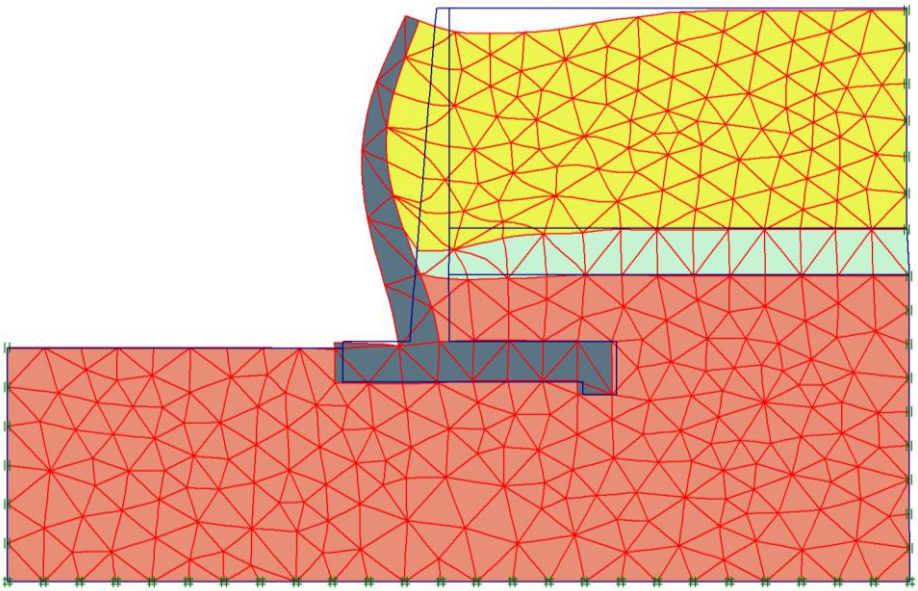


Figure IV.9 Maillage déformé

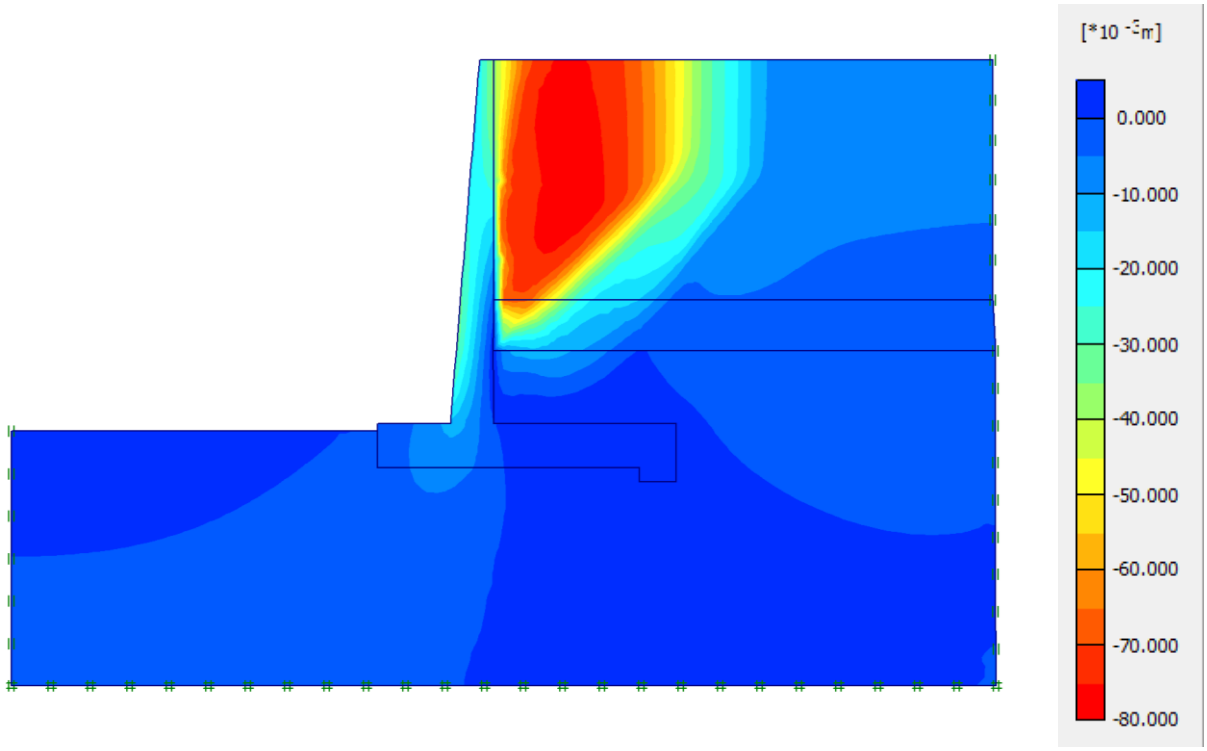


Figure IV.10 Tassements verticaux en 10^{-3}m, mode couleurs dégradées

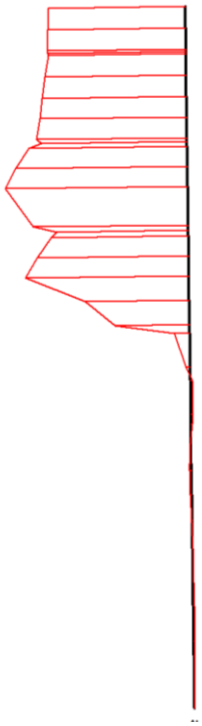


Figure IV.11 Tassements verticaux - coupe au niveau du voile du mur de soutènement

Remarque : Le tassement vertical est admissible car la valeur maximale est de 6cm.

Phase la reduction des caractéristiques de cisaillement φ-c « phi-c reduction »

Les résultats des calculs de la phase réduction des caractéristiques de cisaillement φ-c « phi-c reduction » sont schématisés, les déplacements totaux représentation en mode vecteurs sur la figure IV.12., en mode couleurs dégradées sur la figure IV.13., et les zones des plastifiées sur la figure IV.14.

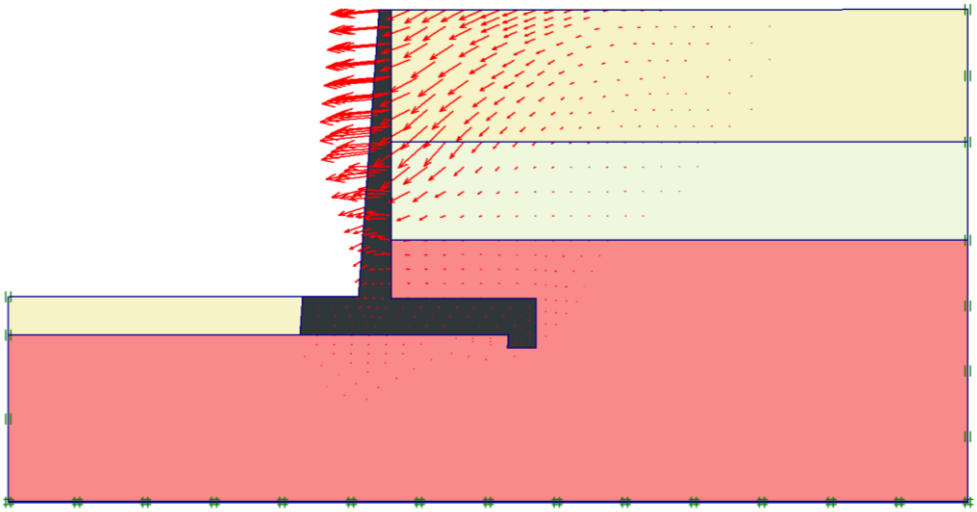


Figure IV.12 Déplacements totaux représentation mode vecteur

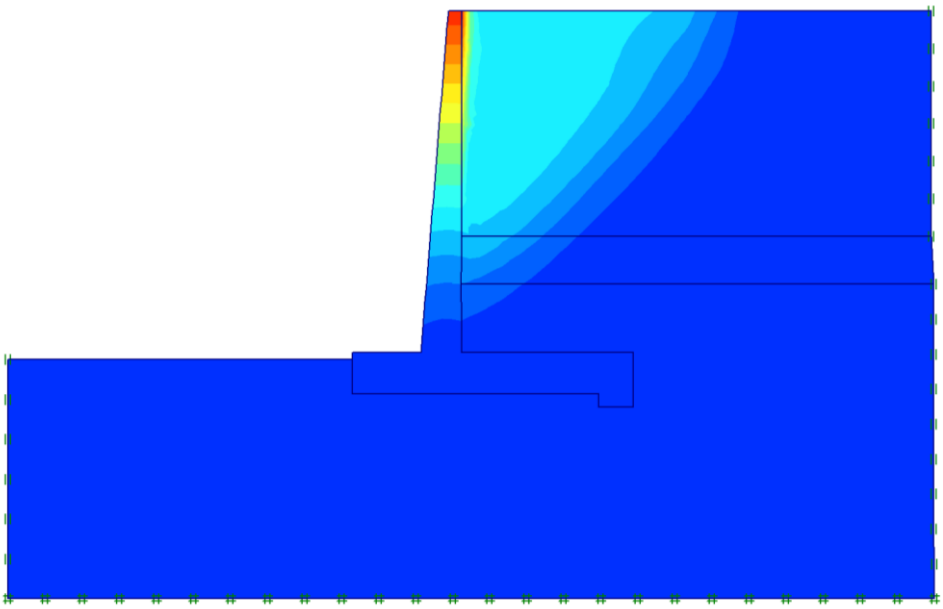


Figure IV.13 Déplacements totaux représentation mode couleurs dégradées

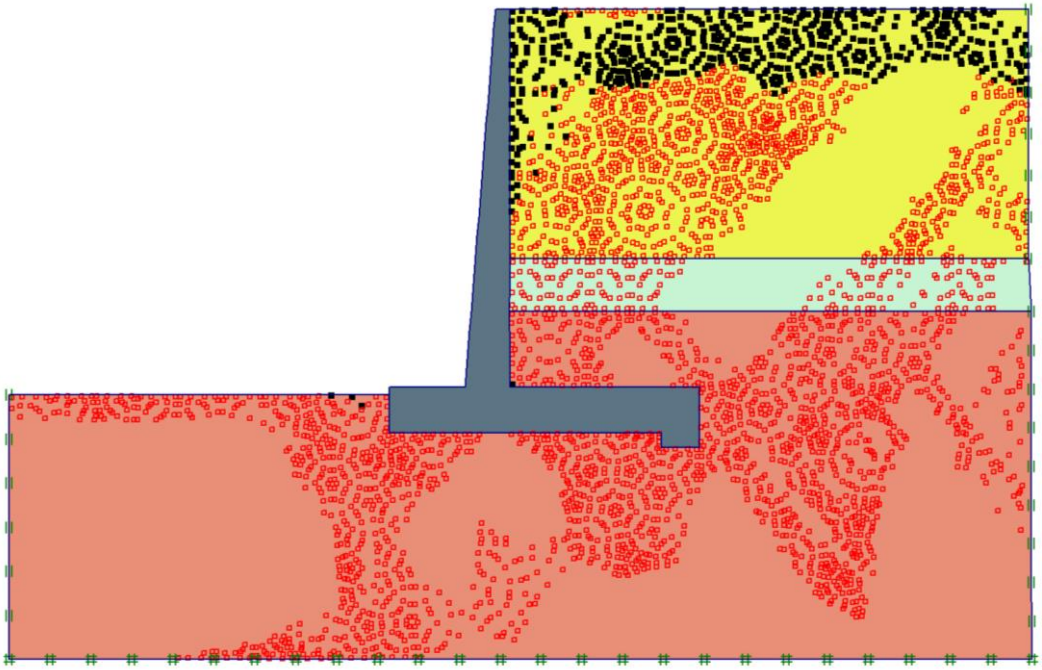


Figure IV.14 Points plastifiés

La stabilité générale de l'ensemble ouvrage et remblai est assurée car le facteur de sécurité est de 1,63 supérieur à la valeur pratique imposé par les DTU qui est de 1,25. Donc le confortement du talus sous chargement gravitaire n'est pas nécessaire.

IV.6 Synthèse

L'utilisation du logiciel Robot Expert permet d'éviter le calcul manuel qui est trop long et sujet d'erreur humaine.

La vérification de la stabilité au renversement, au glissement et le calcul des tassements peuvent être effectuées avec précision avec le logiciel Robot Expert, mais aucune indication sur la stabilité générale n'est donnée.

Le calcul par Plaxis nous a permet de vérifier que la stabilité générale est assurée dans notre car le facteur de sécurité au glissement général est supérieur à la valeur pratique imposée par les règlements en vigueur.

Conclusions Générales

Dans ce travail, notre but a été d'étudier par simulation numérique le comportement d'un mur de soutènement, sous l'effet du chargement gravitaire seul, afin de vérifier sa stabilité externe au renversement, glissement et au poinçonnement, sa stabilité interne et enfin la stabilité de l'ensemble sol mur de soutènement en prenons en compte l'interaction sol structure par le choix d'une rigidité inférieur à l'unité.

A travers cette étude, nous avons réalisé les calculs suivant :

- Une étude de la stabilité externe du mur de soutènement selon les D.T.U. 13.12 nous a permet de faire une vérification au glissement, renversement, au poinçonnement et nous a permet de calculer les tassements à la base de la semelle ainsi que la rotation du mur par rapport à sa base.
- Un calcul numérique des coefficients de sécurité du mur vis-à-vis du glissement, renversement et au poinçonnement par le logiciel Robot expert mur de soutènement.
- Un calcul en plasticité pour déterminer les déformations du mur de soutènement et celle du sol
- Une vérification de l'ensemble (mur, talus) en déterminant la valeur du facteur de sécurité par l'approche dite « phi-c reduction » en utilisant le code PLAXIS 2D.

Les résultats de cette étude ont prouvé la stabilité externe, interne du mur « sujet de notre mémoire » sous l'effet de son poids propre ainsi que la stabilité de l'ensemble a été vérifié ce qui nécessite.

L'étude doit être poussée en introduisant l'effet des surcharges, de la nappe et l'effet probable du séisme et d'améliorer la stabilité du sol par confortement ou redimensionnement du mur.

Références Bibliographique

Ali BOUAFIA « Calcul pratique des fondations et des soutènements » 2éme Edition revue et corrigée /*Office des publications universitaires02-2009.*

Fabrice ROJAT « Cours MDS 2 Ouvrages de soutènement » Ecole de travaux publics de l'état – France- 2011-2012.

François SCHLOSSER « Techniques de l'Ingénieur C244 » Murs de soutènement.

Gérard PHILPPONNAT Préface de Maurice ALBIGÈS « Fondations et ouvrages en terre », deuxième édition EDITIONS EYROLLES 61.

Eurocode 7 « calcul géotechnique » Editée et diffusée par l'Association française de Normalisation (AFNOR) 1996.

Jean PERCHAT Béton armé : Règles BAEL « Ouvrages particuliers ».

M. CAVÉ, M. LEVEILLARD, M. SANDROLINI, M. JALIL, M. PERCHAT et JEAN PERCHAT « Règles BAEL 91 modifiées 99 » Édition 2005.

M. BIETH Emmanuel « Cours de Mécanique des sols appliquée, Murs de soutènement » l'ENTPE 2009-2010.

Mestat P. (2001). Introduction à la Modélisation par éléments finis des ouvrages géotechniques.

RPA 99 Version (2003). Règlement Parasismique Algérien.

Zerguine Nassiba (2016), Modélisation numérique du comportement d'un mur de soutènement sous sollicitations sismiques, application au cas du mur de Boussaâda, Mémoire de Master en géotechnique à l'université de M'sila.

Ministère de l'Equipement, du Transport et du Tourisme, Direction des Routes et de la circulation Routière « Ouvrages de soutènement MUR 73 ».

Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil, Cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés publics de travaux, fascicule 62 tome V.

Règles pour le calcul des fondations superficielles, DTU 13.12

Eurocode 7 - calcul geotechnique

Sites internet

https://data.fine.cz/programs-reports/exemple-murs-cantilever.pdf

https://adets.fr/images/easyblog_articles/44/Chapitre-5---Les-murs-de-soutnement.pdf

http://www.serlienne.com/mur_de_soutenement.php.

https://www.4geniecivil.com/2019/07/etude-dun-mur-de-soutenement-calcul.html