

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJE-BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département Génie Civil

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :

ADJRAD Mahmoud

NAILI DOUAOUA Walid

En vue de l'obtention du diplôme de **Master 02** en :

Filière : **Génie Civil**

Option : **Structures**

Thème :

**Parois2D : Elaboration d'un programme éléments finis pour
modéliser des parois moulées où le sol est considéré comme un
matériau élastique et linéaire**

Devant le jury composé de :

AIT TAHAR Kamel	Professeur	UAMOB	Président
AMAR BOUZID Dj.	Professeur	Université BLIDA	Examineur
MOHAMADI Sadika	M.A.A.	UAMOB	Examineur
BAKHTI Rachid	M.A.B.	UAMOB	Encadreur

REMERCIEMENTS

Avant tout, nous remercions Allah tout puissant de nous avoir aidé et de nous avoir donné la foi et la force pour achever ce modeste travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre directeur de thèse Mr. BAKHTI Rachid maître-assistant à l'université de Bouira, premièrement pour nous avoir proposé ce sujet de recherche puis pour nous avoir guidé pour l'élaboration de ce travail, nous le remercions également pour sa disponibilité, ses conseils et ses encouragements tout au long de la préparation du mémoire.

Nous remercions profondément Mr. AIT TAHAR Kamel professeur à l'université de Bouira pour l'honneur qu'il nous fait en acceptant de présider le jury de soutenance.

Nous adressons également nos remerciements aux membres de jury Mr. AMAR BOUZID Djilali Professeur à l'université de Blida et Mme. MOHAMADI Sadika maître-assistant à l'université de Bouira pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Nous saisissons cette occasion pour exprimer notre profonde gratitude à l'ensemble des enseignants de la faculté des sciences et des sciences appliquées Département Génie Civil - université AKLI MOHAND OULHADJE- BOUIRA.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous ceux qui ont participé de près ou de loin dans l'élaboration de ce travail.

Résumé

Le développement des grands centres urbains nécessite de nos jours la maîtrise des études et réalisation des ouvrages géotechniques nécessaires à la sécurité des chantiers de réalisation et des constructions qui leurs sont proches. La paroi moulée est l'ouvrage le plus utilisé actuellement pour atteindre ce but.

L'étude des parois moulées qui se faisait par les méthodes analytiques a montré ses limites du fait de la complexité et de la proximité des ouvrages, cette proximité engendre un comportement et des déplacements du sol non pris en charge par ces méthodes.

Avec le développement de l'outil informatique et l'avènement de logiciel de programmation puissant et accessible à l'ingénieur, les méthodes numériques basées sur les éléments finis ont vu leur essor s'agrandir et commencent à remplacer carrément les méthodes analytiques.

Sur ce nous avons établi un programme d'éléments finis appelé Parois2D écrit dans VISUAL STUDIO COMMUNITY 2013. La première édition de ce code informatique peut être utilisée pour déterminer les déplacements et les contraintes d'une paroi en console et où le sol et le béton sont considérés comme matériau élastique.

Le présent travail est organisé de la manière suivante :

Une présentation des différentes parois moulées avec la méthode de réalisation de la paroi de soutènement dans le chapitre I, le contexte normatif et réglementaire permettant de calculer les parois moulées dans le chapitres II, la description des méthodes analytiques permettant la détermination des différentes charges auxquelles sont soumises les parois et les méthodes de dimensionnement dans les chapitres III et IV, La description de la méthode numérique avec utilisation des éléments finis dans le chapitre V et la présentation du code numérique plus une application d'un exemple de calcul que nous avons élaboré dans le chapitre VI.

Abstract

Nowadays, the analytical approach can be not used to find a response to the most problems in our field, in fact the new generation of problems in the civil engineering are very complexes in shape and in nature, and thus, on one hand the analytical models shown a weakness for a simple reason; they are provided for modest cases, and on the other hand, we have a possibility to use the power of the new generation of computers and simulate a complex problems to find exact answers, and so, the best way to find answers is the numerical models such as the finite element method. In the present work we provide a finite element program called **Parois2D** written in VISUAL STUDIO COMMUNITY 2013. The first edition of this computer code can be used to analyze a simple diaphragm wall with a simple pattern and where we have the soil and the concrete is considered as an elastic material. The present work is organized in such a way a definition and different way to build a diaphragm wall are presented in section one, different code are presented in section two, Loads applied at the cantilever wall are described in section three, numerical methods are described in section four after that we describe our computer code **Parois2D** in section five then a simple examination of our computer code is presented in section six.

SOMMAIRE

Introduction.....	12
-------------------	----

Chapitre I : Définition et présentation de la réalisation d'une paroi moulée

I.1 - Définition.....	14
I.2 - Procédé de réalisations des parois de soutènement.....	16
I.3 - Stabilité des parois de la tranchée.....	18

Chapitre II : Contexte réglementaire

II.1 - Eurocode 7.....	20
II.1.1 - Base de calcul géotechnique	21
II.1.1.1 - Exigences de calcul	21
II.1.1.2 - Situation de calcul.....	22
II.1.1.3 - Durabilité.....	22
II.1.1.4 - Dimensionnement géotechnique par le calcul.....	22
II.1.2 - Vérification des ouvrages de soutènement.....	23
II.1.2.1 - Etat limite ultime à prendre en considération.....	23
II.1.2.2 - Etat limite de service à prendre en considération.....	25
II.2 - Norme NF P94-282.....	25
II.3 - RPA 2003.....	26
II.4 - CBA 93.....	26

Chapitre III : Détermination des charges agissant sur la paroi moulée

III.1 - Charges provenant du sol.....	28
III.1.1 - Méthodes classiques.....	28
III.1.1.1 - Présentation de la méthode de l'état limite de poussée et de butée.....	30

II.1.1.2 - Sols pulvérulents.....	30
III.1.1.2.1 - Sol avec une loi de comportement élastique.....	31
III.1.1.2.1.1 - Méthode de BOUSSINESQ – FLAMAND.....	31
III.1.1.2.1.2 - Méthode de RESAL.....	32
III.1.1.2.2 - Sol avec une loi de comportement plastique	32
III.1.1.2.2 .1 - Méthode de RANKINE	33
III.1.1.2.2 .2 - Méthode de CAQUOT	34
III.1.1.2.3 - Théories du coin de glissement.....	35
III.1.1.2.3.1 - Méthode de Coulomb (1773).....	36
III.1.1.2 – SOLS COHERENTS.....	36
III.1.1.2.1 - Méthode de RANKINE.....	37
III.1.1.2.2 - Méthode de RESAL – FRONTARD.....	38
III.1.1.2.3 - Méthode de CAQUOT.....	38
III.1.1.2.4 - REMARQUES.....	39
III.1.2 - METHODE AU MODULE DE REACTION.....	40
III.1.2.1 - Formule de Ménard, Bourdon et Haley.....	42
III.1.2.2 - Formule de Schmitt.....	42
III.1.2.3 - Formule de Marche.....	43
III.1.2.4 - Formule de Terzaghi.....	43
III.1.2.5 - Abaque de Chadeisson.....	43
III.1.2.6 - Formule de ROWE.....	43
III.1.2.7 - REMARQUES.....	44
III.2 - DETERMINATION DES POUSSEES DUES AUX SURCHARGES.....	44

III.2.1 - Cas de surcharges réparties.....	44
III.2.2 - Cas de surcharges à une certaine distance de l'écran.....	45
III.3 - DETERMINATION DES POUSSEES DUES A L'EAU.....	45
III.3.1 - Nappe libre au repos.....	46
III.3.2 - Nappe libre en mouvement.....	47
III.3.3 - Phénomène de renard.....	49
III.4 - CALCUL DE LA PRESSION DYNAMIQUE DU SEISME.....	49
III.4.1 - Présentation de la méthode pseudo statique.....	50
III.4.2 - Méthode de Mononobe-Okabe.....	51
III.4.3 - Diagramme de la poussée sismique.....	52

Chapitre IV : Dimensionnement et vérification de la paroi moulée

VI.1 - Mode de comportement des parois moulées.....	55
VI.1.1 - Ecran rigide.....	55
VI.1.2 - Ecran souple.....	56
VI.2 - Méthodes de calcul.....	58
VI.2.1 - Cas d'une paroi encastrée.....	58
VI.2.2 - Cas d'une paroi simplement butée en pied avec un lit d'ancrage (paroi isostatique).....	60
VI.3 - REMARQUES.....	62

Chapitre V : Méthode numérique

V.1 - Introduction.....	64
V.2 - Définition de la méthode des éléments finis.....	64
V.3 - Hypothèses d'application de la méthode des éléments finis.....	65

V.4 - Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis.....	65
V.5 - Exemples traités par la méthode des éléments finis.....	65
V.6 - Problème à deux dimensions 2D.....	66
V.6.1 - Etapes pour la résolution d'un problème 2D.....	66
V.6.1.1 - Discrétisation ou maillage.....	66
V.6.1.1.1 - Type d'éléments.....	67
V.6.1.2 - Transformation géométrique.....	68
V.6.1.3 - Matrice de rigidité élémentaire.....	69
V.6.1.3.1 - Intégration numérique.....	70
V.6.1.4 – Assemblage et résolution du système global.....	70
V.6.2 - Champ de déformations.....	71
V.6.3 - Contraintes.....	71

Chapitre VI : Présentation du programme avec exemple de calcul

VI.1 - Présentation du programme de calcul.....	73
VI.1.1 - Architecture du programme.....	73
VI.1.2 - Maillage adopté.....	74
VI.1.3 - Transformation géométrique.....	75
VI.2 - Manuel d'utilisation du programme.....	76
VI.2.1 - Fenêtre principale du programme.....	76
VI.2.2 - Barre de menu du programme.....	76
VI.3 – Exemple de calcul.....	79
Conclusion	84
Références bibliographiques	85
Annexes	87

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 01 : valeurs de k en fonction de φ par la méthode de BOUSSINESQ – FLAMAND

Tableau 02 : Valeurs de k_a en fonction de φ par la méthode de RESAL

Tableau 03 : valeurs de k_a en fonction de φ par la méthode de RANKINE

Tableau 04 : valeurs de k_p en fonction de φ par la méthode de RANKINE

Tableau 05 : valeurs de k_a en fonction de φ par la méthode de CAQUOT

Tableau 06 : valeurs de k_p en fonction de φ par la méthode de CAQUOT

Tableau 07 : point et coefficient de Gauss

Tableau 08 : Fonctions de formes et leurs dérivées partielles

LISTE DES FIGURES

- Figure 01** : Types des parois de soutènement
- Figure 02** : Paroi de fondation profonde
- Figure 03** : Forage alterné pour la réalisation d'une paroi moulé
- Figure 04** : Etapes de réalisation d'une paroi moulée
- Figure 05** : Insuffisance de la fiche et/ou de la butée
- Figure 06** : Instabilité générale
- Figure 07** : Rupture de tirant ou de buton
- Figure 08** : Défaillance du massif d'ancrage ou du scellement et du terrain associé
- Figure 09** : Insuffisance de capacité portante
- Figure 10** : Etat de contrainte au repos
- Figure 11** : Sol à surface horizontale
- Figure 12** : Sol à surface incliné
- Figure 13** : Schéma de calcul de k_a pour Boussinesq et Flamand
- Figure 14** : Schéma de calcul de k_a pour Résal
- Figure 15** : Fruit vers les terres
- Figure 16** : Fruit en surplomb
- Figure 17** : Schéma de calcul de k_a pour Caquot
- Figure 18** : Théorie du coin de glissement
- Figure 19** : Schéma de calcul de k_a et k_p pour un sol cohérent par la méthode de Rankine
- Figure 20** : Schéma de calcul de k_a et k_p pour un sol cohérent par la méthode de RESAL – FRONTARD
- Figure 21** : Schéma de calcul de k_a et k_p pour un sol cohérent par la méthode de CAQUOT)
- Figure 22** : Schéma de principe de modélisation du sol par la méthode de WINKLER
- Figure 23** : Pression en amont et en aval de la paroi
- Figure 24** : Détermination du coefficient "a"
- Figure 25** : Surcharge répartie
- Figure 26** : Surcharge à une distance de la tête de la paroi [4]
- Figure 27** : Pression hydrostatique
- Figure 28** : Sens d'écoulement d'une nappe libre
- Figure 29** : Schéma d'écoulement d'une goutte d'eau
- Figure 30** : Coins de glissement
- Figure 31** : Coin de glissement méthode de Coulomb
- Figure 32** : Représentation de la pression dynamique horizontale et verticale
- Figure 33** : comportement écran rigide sans ancrage
- Figure 34** : comportement écran rigide sans ancrage
- Figure 35-a** : Réaction élastique du sol
- Figure 35-b** : Encastrement sans Déplacement du pied
- Figure 35-c** : Encastrement complet
- Figure 35-d** : Simplement buté en pied
- Figure 36** : Paramètre à déterminer dans le calcul
- Figure 37** : Schéma de calcul d'une paroi auto stable
- Figure 38** : Schéma de calcul d'une paroi simplement butée en pied
- Figure 39** : Schéma des poutres équivalentes
- Figure 40** : Discrétisation à base d'éléments quadrangulaires
- Figure 41** : Discrétisation à base d'éléments triangulaires

Figure 42 : Les types des éléments triangulaires

Figure 43 : Les types des éléments triangulaires

Figure 44 : Transformations associées aux éléments réels

Figure 45 : Loi de comportement élastique linéaire

Figure 46 : Modèle du maillage adopté

Figure 47 : élément parent iso-paramétriques

Figure 48 : Fenêtre principale du programme

Figure 49 : Barre de menu du programme

Figure 50 : sous menu *Fichier*

Figure 51 : sous menu *Données*

Figure 52 : Boite de dialogue des dimensions

Figure 53 : Boite de dialogue des caractéristiques

Figure 54 : sous menu *Maillage*

Figure 55 : Boite de dialogue élément de référence

Figure 56 : sous menu *Calcul*

Figure 57 : sous menu *Affichage*

Figure 58 : Dimensions conseillées pour la modélisation d'une excavation et écran sans appuis

Figure 60 : Etat de déplacement paroi + sol

Figure 59 : Modèle discrétisé à base d'éléments quadrangulaires

Figure 61 : Etat de contraintes sur le profil de la paroi

INTRODUCTION

INTRODUCTION

La rareté du foncier au niveau des centres urbains, la dégradation des ouvrages de l'ère colonial dont certains ayant atteint leur limite d'âge et nécessitant de ce fait une rénovation, imposent une optimisation d'occupation au sol des parcelles constructibles, des gabarits de grandes hauteurs et une exploitation maximale en sous-sol.

L'intervention dans des sites urbanisés avec une chronologie des travaux impossibles à gérer et l'optimisation précitée nécessitent la maîtrise d'étude et de réalisation des ouvrages géotechniques de soutènement qui seront appelés à être couramment réalisés dans les années à venir.

Sur cette projection dans le temps, le sujet élaboration d'un code numérique pour le calcul d'une paroi moulée nous a été proposée.

Afin de pouvoir élaborer un code numérique il faut d'abord maîtriser les méthodes de calcul des sollicitations imposées aux parois ainsi que les méthodes de dimensionnement et de vérification de tous les paramètres de stabilités, qu'elles soient d'ensemble ou ponctuelles, et tous ceci dans un cadre réglementaire pré déterminé.

Et pour atteindre ce but nous avons procéder de la manière suivante :

- Une définition des parois moulées avec présentation des différents types suivant leur mode de travail et leur rôle et une présentation du procédé de réalisation.
- Présentation du contexte réglementaire régissant ce type d'ouvrage
- Présentation des méthodes classiques et de la méthode au module de réaction avec mise en évidence de leurs avantages et inconvénients
- Méthodes de dimensionnement de la paroi
- Présentation de la méthode numérique avec rappel de notion des éléments finis.
- Présentation du code numérique.

CHAPITRE I

DEFINITION ET PRESENTATION DE LA REALISATION D'UNE PAROI MOULEE

Ce chapitre donne un aperçu sur les différentes parois moulées en fonction de leur fonction principale et la méthode de réalisation de la paroi qui fait soutènement

I.1 – Définition

Une paroi moulée est un écran vertical en béton armé, appelée aussi diaphragme ou saignée, mis en œuvre directement sur des tranchées pré excavées sans aucun coffrage ou blindage, d'épaisseur variable de 0,5 m à 1,50 m et d'une hauteur pouvant atteindre les 100 m.

En fonction du rôle qu'elles doivent accomplir les parois moulées sont de trois types: Paroi d'étanchéité, paroi de soutènement et paroi de fondation profonde [2].

✓ **Paroi d'étanchéité** : dans ce cas seul l'effet écran est recherché, la paroi n'a pas un rôle de soutènement son seul rôle est d'éviter le passage d'eau ou d'autres liquides d'un espace à un autre, elle est aussi de trois types :

- La paroi à bentonite : La tranchée excavée est remplie de boue de bentonite mélangée avec le sol extrait, créant ainsi un écran étanche sans aucune résistance mécanique.
- La paroi en béton plastique : La tranchée est remplie d'un béton plastique et étanche (utilisation d'adjuvant hydrofuge).
- La paroi en coulis auto durcissable : La tranchée est remplie d'un coulis à base de ciment, de bentonite et divers additifs qui se répandent dans les pores des parois de la tranchée augmentant ainsi son imperméabilité.

✓ **Paroi de soutènement** : La paroi joue un rôle de parement vertical soutenant le sol et les surcharges, fixes ou mobiles, qui lui sont appliquées, dans ce cas le sol joue un rôle de point d'appui et de source de chargement pour l'écran.

Une partie du sol est excavé après réalisation de la paroi laissant ainsi le sol appuyé sur le parement.

Les parois de soutènement sont de trois types : Encastrées, butonnées et ancrées

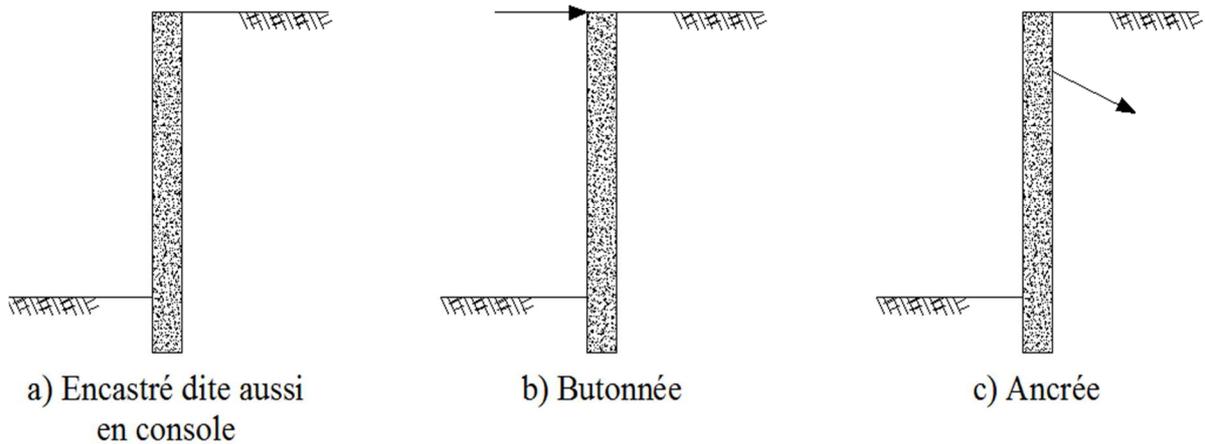


Figure 01 : Types des parois de soutènement

- Paroi encadrée : La stabilité est entièrement assurée par la partie encadrée appelée fiche, la partie au-dessus du niveau de terrassement, appelée fond de fouille est une console libre à son extrémité supérieure d'où l'appellation paroi en console.
 - Paroi butonnée : Le déplacement de l'extrémité supérieure de la console est bloqué par des butons qui sont généralement des poutres.
 - Paroi ancrée : Le déplacement est aussi bloqué sur un ou plusieurs niveaux de la console, ce blocage est réalisé par des nappes de tirants soit précontraints ou passifs
- ✓ **Paroi de fondation profonde** : En plus du rôle de soutènement la paroi peut jouer le rôle de fondation d'un ouvrage, elle transmet de ce fait les charges de l'ouvrage vers un sol en profondeur de meilleur capacité portante, dans ce cas elle est appelée barrette.

Le cas le plus utilisé est le radier posé sur un remblai et supporté à sa périphérie par des parois moulées, le radier travaillera dans ce cas comme dalle sur quatre appuis et les parois transmettent ses charges à un sol meilleur évitant ainsi les remblais (Fig 02).

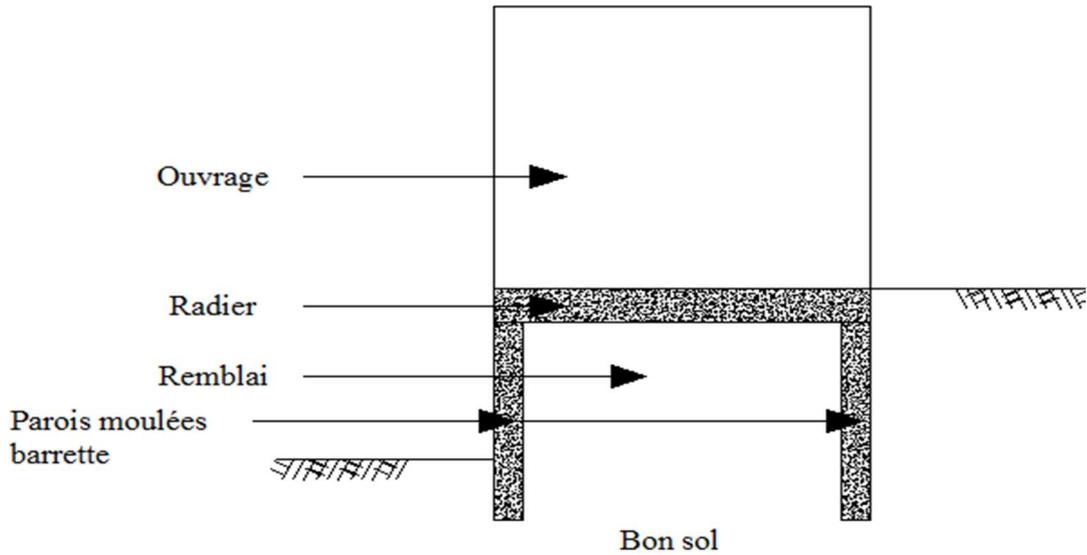


Figure 02 : Paroi de fondation profonde

Dans tout ce qui suit ne nous intéresserons que sur les parois de soutènement qui sont objet de notre sujet de mémoires.

I.2 - Procédé de réalisations des parois de soutènement

Le procédé de réalisation actuel a fait l'objet d'un brevet en 1952 par l'italien Monsieur VEDER [1], il nécessite un matériel très lourd qui pose parfois un grand problème d'organisation de chantier lors de la réalisation des parois en zone fortement urbanisée.

La réalisation se fait par panneaux de 2.50 à 3.00 m et d'une manière alternée afin d'assurer une bonne étanchéité au niveau des jonctions des panneaux.

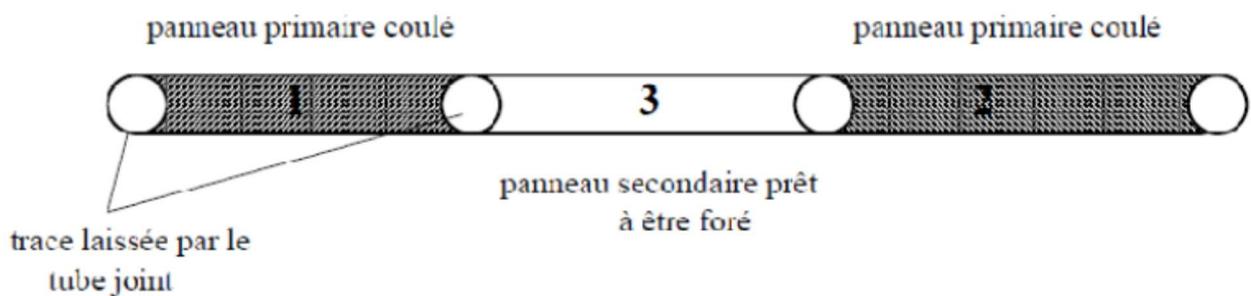


Figure 03 : Forage alterné pour la réalisation d'une paroi moulée

Les étapes de réalisation sont les suivantes :

- Pose de murette guide qui sont deux petits voiles en béton ayant pour rôle de délimiter l'épaisseur de la paroi et de guider la machine d'excavation et la grue de pose de la cage d'armature.
- Excavation de la tranchée avec une benne preneuse dans les terrains meubles ou une hydro fraise dans les sols fermes ou en cas de présence de nappe d'eau.
- Pose de la cage d'acier (armature) avec à ses deux extrémités un coffrage métallique provisoire muni d'une lame d'étanchéité water stop ce coffrage sera décoffré après excavation du panneau secondaire
- Bétonnage du panneau à partir du fond à l'aide de tube plongeur et récupération de la bentonite par pompage
- Terrassement jusqu'au niveau des nappes de tirants après bétonnage de tous les panneaux et fixation des tirants,
- Terrassement jusqu'au niveau fond de fouille et de ce fait la paroi est mise en fonction
- Reçage de la partie supérieure qui est un mélange de béton et de bentonite.

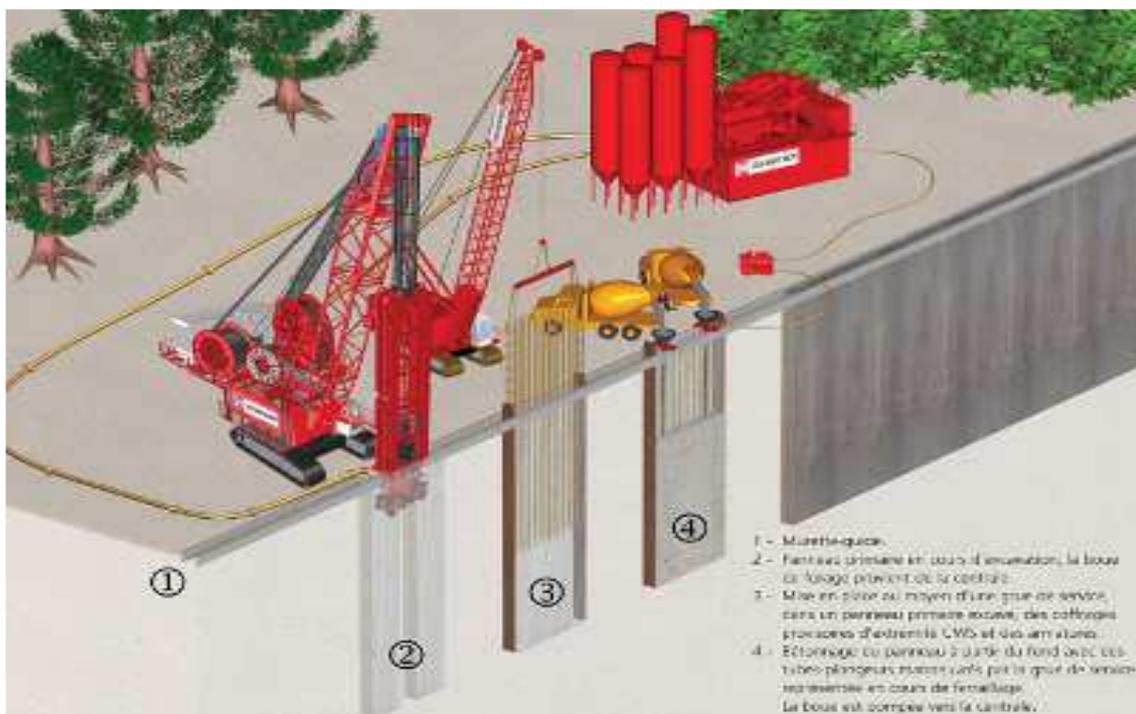


Figure 04 : Etapes de réalisation d'une paroi moulée

I.3 - Stabilité des parois de la tranchée

Lors de l'excavation et surtout dans des terrains pulvérulents la stabilité des parois de la tranchées n'est pas évidente et pour remédier à ce problème une boue dite bentonite est utilisé pour maintenir ces parois verticalement.

La bentonite est une boue thixotropique, appelée aussi boue de forage et eau lourde, est généralement une suspension stable d'argile colloïdale [1]. A son contact avec le sol, elle forme par gélification et filtrage une membrane très peu perméable appelée « cake ». Si le niveau de la boue à l'intérieur de la tranchée est maintenu supérieur au niveau de la nappe phréatique, une force hydrostatique s'exerce sur la membrane étanche formée au contact du terrain et maintient les parois de la tranchée en équilibre [1].

La bentonite a les propriétés de gonfler en présence de l'eau et de se gélifier en position de repos nécessitant ainsi pour son déplacement de grandes contraintes, elle a un comportement réversible ce qui permet sa récupération et sa réutilisation.

CHAPITRE II

CONTEXTE REGLEMENTAIRE

Ce chapitre traite le contexte réglementaire et normatif de l'étude des parois moulées dans ses deux phases :

- Détermination des différentes actions appliquées sur la paroi
- Le dimensionnement et la vérification de la stabilité de la paroi

Tout ouvrage géotechnique ou autre doit être calculé conformément à une réglementation unifiée dans chaque pays, pour notre pays aucun texte réglementaire n'a été promulgué à ce jour pour prendre en charge la conception et la réalisation des parois moulées, de ce fait et conformément aux directives des différents ministères du BTPH qui stipulent qu'en cas d'absence de réglementation nationale, la réglementation européenne et française sont utilisables dans notre pays jusqu'à promulgation de la réglementation nationale, de ce fait les parois moulées objet de notre mémoire seront étudiées avec les réglementations suivantes

- Eurocode 7 : Calcul géotechnique
- Norme française : NF P94-282, norme d'application de l'Eurocode 7 en France intitulée : calcul géotechnique, ouvrages de soutènement, écran
- RPA 2003 : Pour la détermination des efforts sismiques
- CBA 93 : Pour le dimensionnement et la vérification du béton et du ferrailage de la paroi.

II.1 - Eurocode 7

L'*Eurocode 7* stipule que le dimensionnement des parois moulées se fait à l'état limite ultime (Art 8.1), cet état limite est atteint lorsque l'ouvrage se déplace jusqu'à rupture sous l'effet d'un chargement constant appelé chargement limite.

La détermination de ces chargements limites est d'une complexité avérée car l'interaction sol ouvrage dans le cas des ouvrages géotechniques est très importante et très interdépendante, les poussées et butées des terres dépendent de la flexibilité des ouvrages et donc de leurs déplacements, cette complexité est plus accentuée dans le cas d'étude des parois moulées car à l'inverse des murs de soutènement standards (cantilevers ou autres) où le sol n'est que source de chargement, il est pour la paroi moulée un appui et une source de chargement.

L'*Eurocode 7* traite le problème de calcul des ouvrages géotechniques en plusieurs chapitres et qui se résument comme suit :

- ✓ **Base de calcul géotechnique.**
 - Exigence de calcul
 - Situation de calcul
 - Durabilité
 - Dimensionnement géotechnique
 - Les actions dans le calcul géotechnique

- ✓ **Vérification des ouvrages de soutènement.**
 - Etats limites ultimes à prendre en considération
 - Stabilité d'ensemble
 - Rupture rotationnelle
 - Rupture verticale

II.1.1 - Base de calcul géotechnique :

II.1.1.1 - Exigences de calcul :

Les ouvrages géotechniques doivent être conçus et dimensionnés conformément aux principes généraux définis dans l'Eurocode 1 « Base de calcul et actions sur les structures »

L'importance et la qualité des reconnaissances géotechniques qui est la base de calcul des charges du sol sur la paroi est fonction de l'importance de l'ouvrage, de sa complexité et de son impacte sur les biens et les vies se trouvant dans son environnement immédiat.

Pour cela l'Eurocode 7 définit trois types d'ouvrage avec les reconnaissances géotechniques correspondantes.

– Catégorie géotechnique 1

Cette catégorie comprend les ouvrages simples comme les murs de soutènement dont la hauteur ne dépasse pas les 2 m, elle nécessite des reconnaissances géotechniques qualitatives avec un minimum de données sur le sol à savoir sa capacité portante, son angle de frottement et sa cohésion, il est aussi permis pour ce type d'utiliser l'expérience acquise dans la réalisation de ces ouvrages.

– Catégorie géotechnique 2

Cette catégorie comprend la majorité des ouvrages de soutènement y compris les parois moulées et qui ne présente aucun danger pour l'environnement immédiat, elle nécessite une investigation plus approfondie du sol avec des essais in situ et au laboratoire pour déterminer tous les paramètres nécessaires au dimensionnement.

– Catégorie géotechnique 3

Cette catégorie comprend les ouvrages impliquant des risques anormaux ou se trouvant dans des zones de forte sismicité nécessitant des investigations très approfondies et la détermination des paramètres dynamiques du sol.

II.1.1.2 - Situation de calcul

Lors du calcul des ouvrages géotechniques et surtout pour notre cas une paroi moulée, il y a lieu de prendre en considération les données suivantes :

- La convenance générale du terrain recevant l’ouvrage.
- La disposition et la classification du sol et de l’ouvrage objet du calcul.
- Les plans de stratification inclinés.
- Les différents effets qui peuvent remettre en cause la stabilité de l’ouvrage même si le calcul est exacte à savoir : les effets d’affouillement, d’érosion, d’excavation modifiant la géométrie du sol, de la corrosion chimique, du phénomène gel et dégel et tous les paramètres qui remettent en causes les hypothèses de calcul et de dimensionnement de l’ouvrage qui peuvent survenir après sa réalisation.

II.1.1.3 - Durabilité

La durabilité d’une paroi moulée est un paramètre primordial car présentant une console dont une partie est inaccessible et une fiche entièrement enterrée, une attention particulière est exigée dans la connaissance de l’agressivité des eaux interstitielle ainsi que du sol sur le béton, pour cela il y’a lieu de déterminer les conditions d’acidité, de salinité et de présence de sulfate dans le sol.

Une grande attention est aussi exigée sur la fissuration et la porosité du béton qui sont une source d’infiltration des eaux causant ainsi une corrosion des aciers et une perte de résistance à long terme.

II.1.1.4 - Dimensionnement géotechnique par le calcul

En plus des paramètres pré cités qui ont leur importance dans la connaissance du sol, de l’environnement immédiat ainsi que de la gestion dans le temps de l’ouvrage, deux paramètres sont d’une extrême importance dans le dimensionnement géotechnique : le modèle de calcul et l’action à prendre en considération

- Le modèle de calcul : Il doit préciser la loi de comportement du sol et du béton qui est la base de détermination des contraintes et des déplacements.
- Les actions à prendre en considération : Les actions sont de trois types, les actions durables dans le temps qui ont une influence sur les propriétés de drainage et de compressibilité des sols fin(sur consolidation et effet de fluage) , les actions répétitives

d'intensité variables qui peuvent provoquer une liquéfaction ou une perte de raideur du sol et les actions cycliques de haute fréquence qui ont un effet dynamique.

De ces trois types d'action, les efforts à prendre en considération sont les suivantes :

- Les poids du sol
- Les contraintes existant dans le terrain
- Toute forme de pression de l'eau, hydrostatique ou dynamique
- Le poids de la paroi
- Les surcharges fixes ou mobiles
- Les accélérations dues aux tremblements de terre
- Les précontraintes imposées dans les ancrages ou les butons

II.1.2 - Vérification des ouvrages de soutènement

II.1.2.1 - Etat limite ultime à prendre en considération

L'Eurocode 7 préconise la vérification des états limites ultimes suivants :

- Instabilité d'ensemble.
- Rupture d'un élément de l'ouvrage tel que paroi, buton ou tirant.
- Rupture combinée dans le sol et dans les éléments de l'ouvrage.
- Rupture des ouvrages voisins suite au déplacement de la paroi même si ce déplacement ne cause pas la ruine de la paroi.
- Fuites inacceptables à travers ou par-dessus la paroi.
- Transport inacceptables de particules de sol à travers ou par-dessus la paroi (sol pulvérulents).
- Modifications inacceptables de l'écoulement de l'eau souterraine (chargement dynamique).
- Rupture par rotation ou translation de la paroi ou certains de ses éléments.
- Rupture par défaut d'équilibre vertical de la paroi.

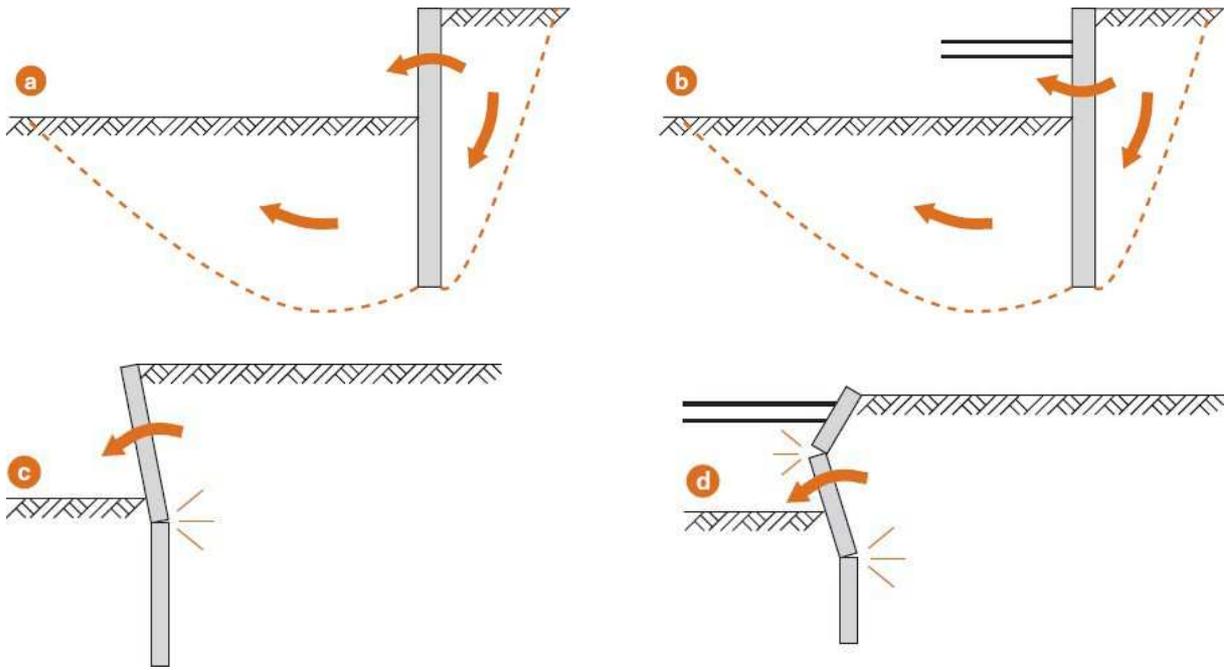


Figure 05 : Insuffisance de la fiche et/ou de la butée

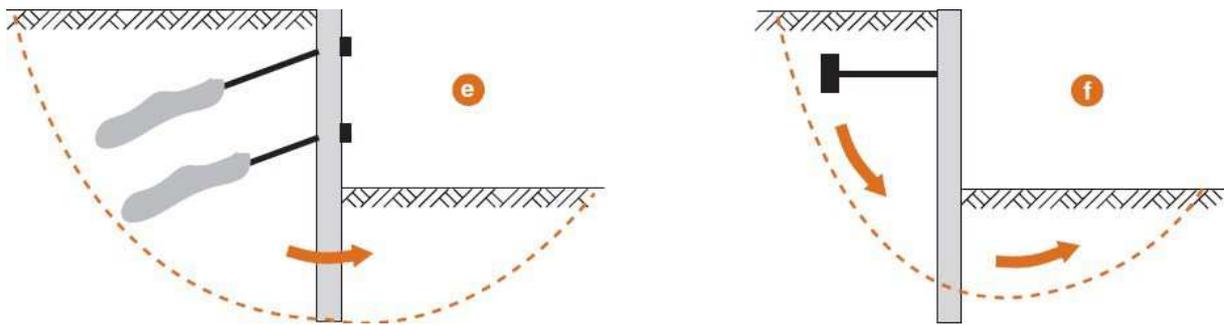


Figure 06 : Instabilité générale

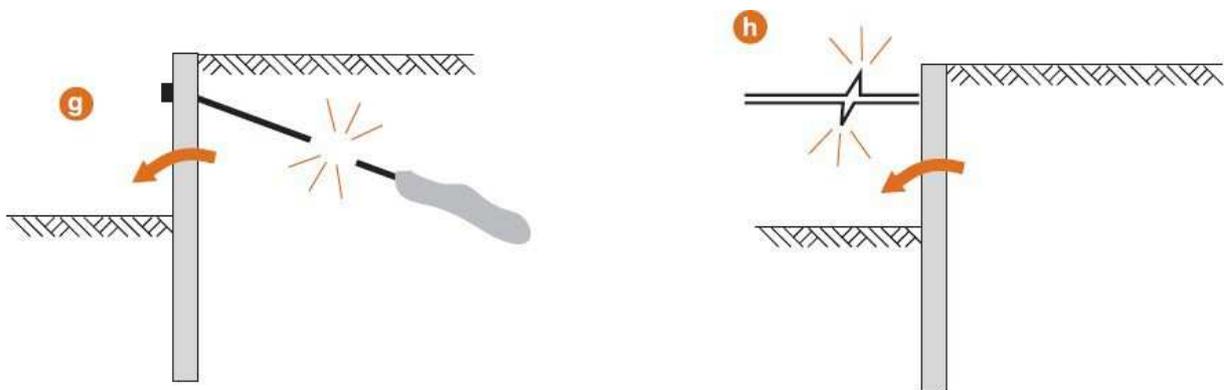


Figure 07 : Rupture de tirant ou de buton

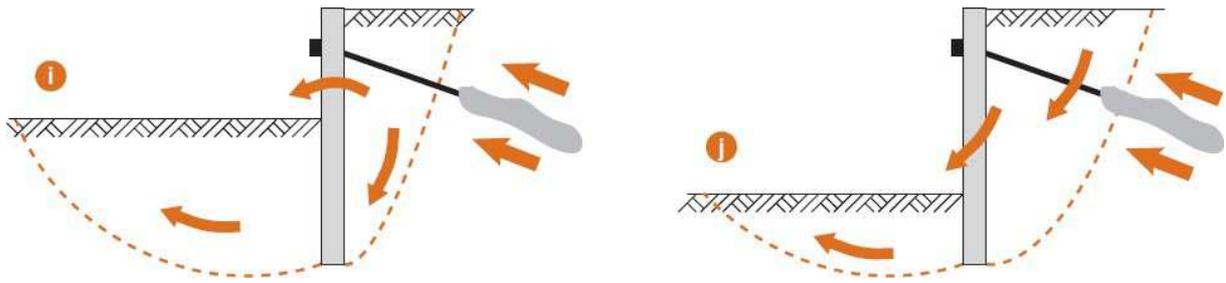


Figure 08 : Défaillance du massif d'ancrage ou du scellement et du terrain associé

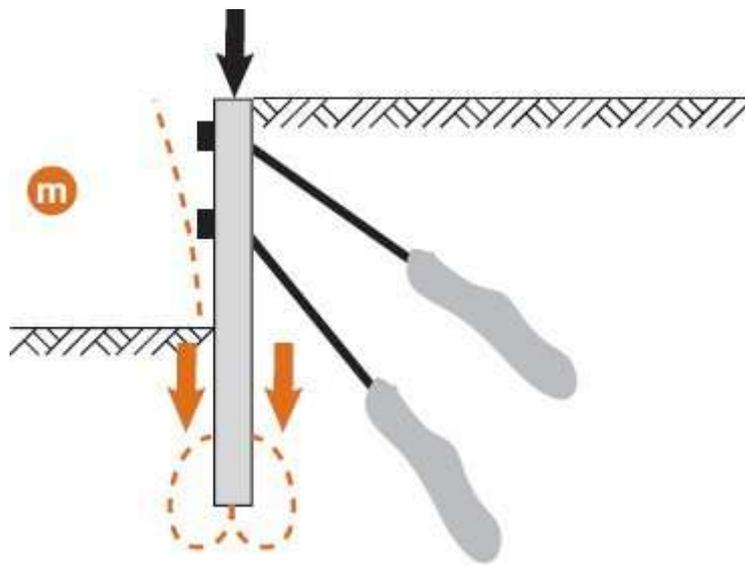


Figure 09 : Insuffisance de capacité portante

II.1.2.2 Etat limite de service à prendre en considération

L'eurocode 7 préconise la vérification des états limites de service suivants :

- Déplacement.
- Durabilité.
- Fluage de l'ancrage.

II.2 - Norme NF P94-282

Cette norme qui a vu le jour en Mars 2009 est la norme française d'application de l'Eurocode7 relative au dimensionnement et à la vérification des écrans de soutènement.

Elle définit les critères de dimensionnement et les méthodes de calcul.

Pour les critères de dimensionnement, la norme préconise trois approches différentes :

- Approche 1 : Pondération des paramètres de résistance ϕ , C, ...etc.
- Approche 2 : Pondération directe des actions et résistances

$$E_d = \gamma_m \cdot E_k$$

E_d : Valeur de calcul

E_k : Valeur caractéristique

γ_m : Pondération

$\gamma_m > 1$ pour les actions (poussées)

$\gamma_m < 1$ Pour les résistances (butées)

- Approche 3 : Pondération des effets des actions (résultats)

Pour les écrans verticaux (parois, palplanches) c'est l'approche 2 qui est utilisée

La norme a arrêté trois méthodes de calcul :

- La méthode aux équilibres limites (MEL) applicable seulement pour les parois encastrées et encastrée avec seulement un niveau d'ancrage
- La méthode avec interaction sol structure et utilisation du coefficient de réaction du sol (MISS K) qui est utilisée seulement pour les parois ancrées
- La méthode avec interaction sol structure et modélisation du sol et de la paroi par la méthode des éléments finis (MISS F) qui est utilisée pour toutes les parois.

II.3 - RPA 2003

Le code parasismique permet de classer l'ouvrage en fonction de son importance et de la classification des ouvrages se trouvant en amont ou projetés en aval de la paroi.

La classification définie beaucoup plus la gestion de la cité en cas de catastrophe sismique, pour cela la paroi est classée dans le groupe d'usage des ouvrages qui lui sont proches.

Généralement les parois du fait de leur coût très important sont classées dans le groupe d'usage 1 B, c'est-à-dire qu'elles peuvent subir des dommages au cours d'un séisme sans aucune ruine et sont récupérables moyennant des travaux de réparation ou de renforcement.

Le groupe d'usage permet aussi de prendre l'accélération préconisée par le code pour le calcul de l'effort sismique par la méthode pseudo statique ou pseudo dynamique.

II.4 - CBA 93

Comme la paroi est généralement considérée comme une poutre en béton armé, le béton et les armatures seront déterminés et vérifiés conformément aux différents articles du règlement algérien relatif au béton armé.

CHAPITRE III

DETERMINATION DES CHARGES AGISSANT SUR LA PAROI MOULEE

Sont déterminés dans ce chapitre les pressions et butées du sol, calculées par la méthode classique et la méthode au coefficient de réaction, Les poussées dues aux surcharges d'exploitation, les poussées dus à l'écoulement de l'eau libre et la poussée provenant de l'effet dynamique du séisme

Une paroi moulée est soumise à plusieurs types de charges de sources différentes, ces sources peuvent se résumer comme suit :

- Le sol
- L'eau
- Surcharges
- Séisme

III.1 - Charges provenant du sol

Les principales méthodes de détermination des charges provenant du sol sont au nombre de quatre

- Méthodes classiques
- Méthodes au coefficient de réaction
- Méthodes empiriques
- Méthode numérique

Nous nous contentons dans ce chapitre aux méthodes classiques et au coefficient de réaction, les méthodes empiriques ne sont pas traités dans ce mémoire et la méthode numérique sera traitée à part dans le chapitre V

III.1.1 Méthodes classiques

Ce sont les premières méthodes utilisées pour la détermination des charges du sol sur un parement de soutènement, elles sont aussi appelées méthodes aux états d'équilibre limites de poussée/butée.

Ces méthodes permettent de déterminer les poussées et les butées du sol avec leurs diagrammes (linéaire courbe ou autres) et le point d'application de leurs résultantes par rapport à la hauteur de l'écran (H).

Un état limite de pression et de butée est fonction de la rigidité de l'écran.

Les écrans dont le déplacement est inférieure à $5 \times 10^{-4} H$ (H= hauteur) [6] ne développent pas un état limite de poussée et de butée et sont dit rigides, l'état de contrainte dans le sol est dit au repos et la relation entre la contrainte verticale et horizontale est exprimée par la formule $\sigma_H = k_0 \sigma_v$ (fig 10)

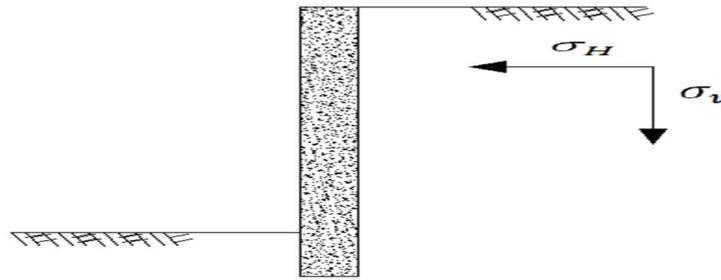


Figure 10 : Etat de contrainte au repos

k_0 : est le coefficient de pression des terres au repos, il est déterminé conformément à l'Eurocode 7 comme suit :

- Pour un sol à surface horizontale (fig 11) : $k_0 = (1 - \sin\varphi) \cdot (R_{oc})^{-2}$
 R_{oc} = Rapport de sur-consolidation
- Pour un sol à surface inclinée vers le haut (fig 12) : $k_{0\beta} = k_0(1 - \sin\beta)$
- Pour les sables $k_0 = (1 - \sin\varphi)$ (formule de Jaky)

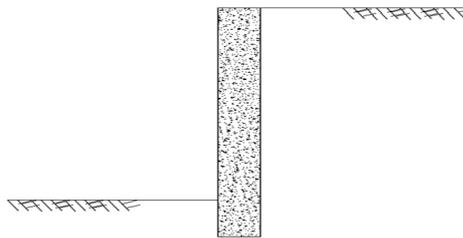


Figure 11 : Sol à surface horizontale

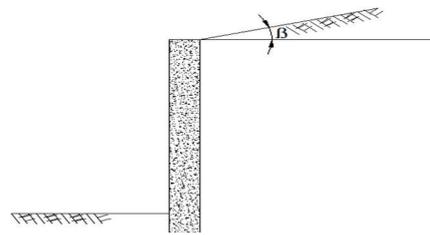


Figure 12 : Sol à surface incliné

Dans un état de contrainte au repos la pression sur l'écran est parfaitement horizontale et perpendiculaire au parement quel que soit l'état de rugosité de celui-ci, elle a pour valeur $P = \sigma h = k_0 \sigma_v$ et un diagramme linéaire (triangulaire).

La résultante $F = \int P dz = \int k_0 \sigma_v dz = \frac{1}{2} k_0 \gamma H^2$ et est appliquée à $1/3$ de H de sa base.

Les écrans dont les mouvements sont de l'ordre de $0.002 H$ pour une rotation du sommet de l'écran, de $0.005 H$ pour une rotation autour du pied de l'écran et de $0.001H$ pour un déplacement en translation [6] sont dits flexibles et développent de ce fait un état limite de poussée et de butée.

Pour ce type d'écran k_0 n'est plus utilisé et la poussée P_a et la butée P_p auront pour valeur $P_a = k_a \sigma_v$ et $P_p = k_p \sigma_v$

Toutes les méthodes et théorie qui seront développées ci-contre permettent de déterminer le coefficient de poussée active k_a et le coefficient de butée passive k_p .

III.1.1.1 - Présentation de la méthode de l'état limite de poussée et de butée

Dès 1867 Maurice Levy avait énoncé que derrière un écran de soutènement une infinité d'états d'équilibres est possible mais seulement deux états sont caractéristiques car ils développent des charges de sol limites (ultimes), qui diminuent avec l'accroissement du déplacement de l'écran.

En d'autres termes, après déplacement de l'écran de l'ordre précité, le sol développent ses plus grandes charges et si l'écran est dimensionné pour reprendre ses charges il reprendra toutes les charges des autres états.

Ces deux états sont communément appelés état d'équilibre limite inférieure pour les charges de poussées et état d'équilibre limite supérieure pour les butées.

La détermination de ces deux états limites est d'une grande complexité car ils se produisent à l'interface écran-sol et dépendent de ce fait des différents paramètres qui déterminent l'interaction sol-mur.

Les paramètres déterminant l'interaction paroi-sol sont de deux types :

- Ceux dépendant de la paroi : Hauteur, rugosité, déformabilité, inclinaison
- Ceux dépendant du sol : Loi de comportement, masse volumique, nature du sol, pulvérulent ou cohérent, angle de frottement interne, présence de nappe, forme du terreplein au sommet de la paroi (horizontal ou incliné), surcharges sur le sol.

Les études qui ont été menées pour la détermination des charges des deux états limites ont été faites sur des sols pulvérulents et sur des sols cohérents

III.1.1.2 - Sols pulvérulents

Plusieurs théories ont été formulées pour le calcul des poussées et butées pour les sols pulvérulents, elles ont été classées en quatre classes selon J. Verdeyen [3] en prenant en considération leurs hypothèses d'élaboration :

- Sols avec une loi de comportement élastique
- Sols avec une loi de comportement plastique
- Théorie du coin de glissement
- Méthodes expérimentales.

III.1.1.2.1 - Sol avec une loi de comportement élastique

Cette méthode considère le sol comme continu, homogène et isotrope donc les équations de l'élasticité de Lamé sont applicables.

III.1.1.2.1.1 - Méthode de BOUSSINESQ – FLAMAND

BOUSSINESQ et FLAMAND ont donnés des valeurs de k_a (coefficient de poussée) valable pour un écran incliné d'un angle α avec la verticale et le terreplein fait un angle i avec l'horizontale (fig13)

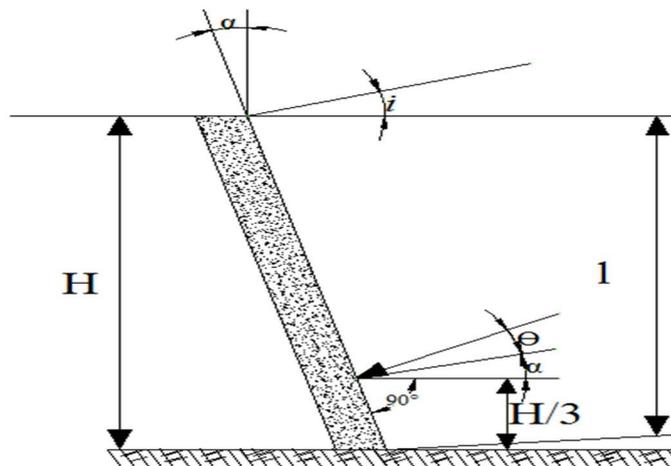


Figure 13 : Schéma de calcul de k_a pour Boussinesq et Flamand

La résultante des poussées fait un angle θ avec la perpendiculaire au mur est a pour valeur :

$P = k\gamma H^2/2$ avec k_a = coefficient de poussée active fonction de l'angle de frottement φ , de α et de i .

BOUSSINESQ et FLAMAND ont donné les valeurs de k pour différentes valeurs de φ , de α et de i [3].

Pour les parois moulées et surtout celle réalisées en zones urbaines α et i sont nuls, les valeurs de k en fonction de φ sont mentionnés ci-dessus :

φ (degré)	21	24	27	30	33	36	39	42	45
k	0.44	0.39	0.35	0.32	0.29	0.26	0.24	0.21	0.19

Tableau 01 : valeurs de k en fonction de φ par la méthode de BOUSSINESQ – FLAMAND

III.1.1.2.1.2 Méthode de RESAL

RESAL considère que la poussée a deux composantes, une horizontale et une verticale (fig 14) :

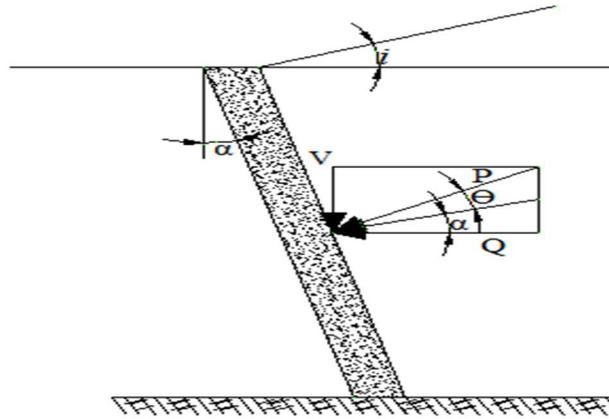


Figure 14 : Schéma de calcul de k_a pour Résal

$$\left. \begin{aligned} \text{Composante horizontale } Q &= k_a \gamma H^2 / 2 \\ \text{Composante verticale } V &= k_b \gamma H^2 / 2 \end{aligned} \right\} k \gamma H^2 / 2$$

$$k_b = k_a \tan(\alpha + \theta) \text{ et } k = (k_a^2 + k_b^2)^{-2}$$

Les valeurs de k_a et k_b sont donnés par les tables de RESAL [3]

Pour α et $i = 0$ RESAL a donné les valeurs suivantes de k en fonction de φ

φ (degré)	20	25	30	35	40	45
k	0.445	0.374	0.312	0.264	0.218	0.184

Tableau 02 : Valeurs de k_a en fonction de φ par la méthode de RESAL

III.1.1.2.2 Sol avec une loi de comportement plastique :

Généralement la loi de comportement du sol pour ces méthodes est la loi élastique parfaitement plastique avec le critère de rupture de Mohr-Coulomb.

III.1.1.2.2.1 Méthode de RANKINE :

RANKINE ne considère pas la rugosité du parement (écran lisse) et suppose que l'état de contrainte dans le sol ne change pas avec le déplacement de l'écran et se définit par les contraintes principales, de ce fait la pression est normale à l'écran et son diagramme est triangulaire.

La méthode de RANKINE n'est valable que pour un terre plein horizontal c'est-à-dire $i = 0$

Pour un écran vertical :

$$P_a = \frac{k_a \gamma H^2}{2} \text{ avec } k_a = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)$$

$$P_p = \frac{k_p \gamma H^2}{2} \text{ avec } k_p = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$$

Pour un parement avec un léger fruit vers les terres (fig15) :

$$k_a = \cos \theta \left[\tan \theta + \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi + \theta}{2} \right) \right]$$

$$k_p = \cos \theta \left[\tan \theta + \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi + \theta}{2} \right) \right]$$

Pour un parement en surplomb (fig16)

$$k_a = (1 - \tan \theta \cdot \tan \varphi) \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)$$

$$k_p = (1 - \tan \theta \cdot \tan \varphi) \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$$

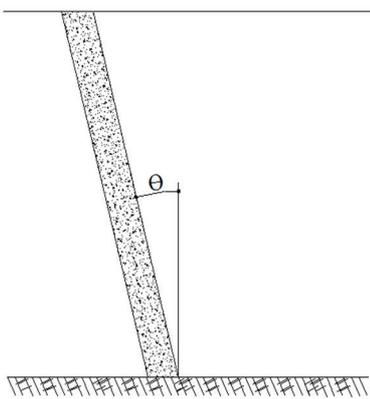


Figure 15 : Fruit vers les terres

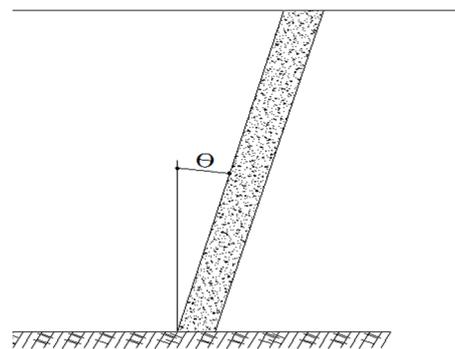


Figure 16 : Fruit en surplomb

Pour un écran vertical et un terre-plein horizontale, les valeurs de k_a en fonction de φ sont les suivantes :

φ (degré)	15	20	25	30	34	40	45
k	0.589	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217	0.172

Tableau 03 : valeurs de k_a en fonction de φ par la méthode de RANKINE

φ (degré)	10	15	20	25	30	35	40
k	1.42	1.74	2.04	2.53	3.00	3.69	4.62

Tableau 04 : valeurs de k_p en fonction de φ par la méthode de RANKINE

III.1.1.2.2.2 - Méthode de CAQUOT :

A l'inverse de RANKINE-CAQUOT prend en considération le frottement des terres sur l'écran (écran non lisse) et de ce fait la poussée n'est pas normale mais inclinée d'un angle α avec la perpendiculaire à l'écran et traite le cas d'un terre plein non horizontal (fig17)

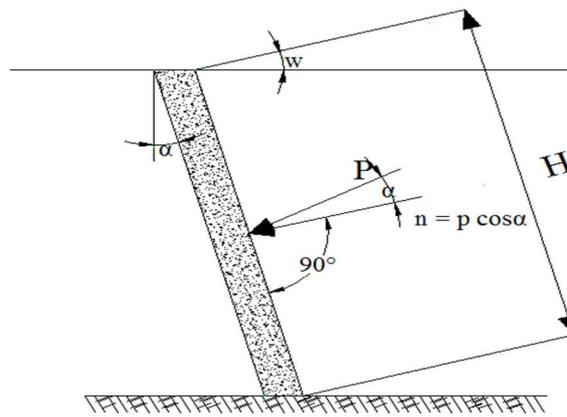


Figure 17 : Schéma de calcul de k_a pour Caquot

$$P = \frac{p\gamma H^2}{2} \quad \text{avec} \quad p = P_1\rho$$

$P_1 =$ poussée de PONCELET

$$P_1 = [\cos^2(\beta - \varphi)/\cos(\beta + \alpha)][1/1 + \sin(\varphi + \alpha) \sin(\varphi - w)/\cos(\beta + \alpha) \cos(\beta - w)]^{-2}$$

$$\log \rho = -((2 - (\tan^2 w + \tan^2 \alpha)/2 \tan^2 \varphi))\sqrt{\sin \varphi} \log [(1 - 0.9\lambda^2 - 0.10\lambda^4)(1 - 0.3\lambda^3)]$$

$$\lambda = \frac{\beta - \beta_0}{\beta + \beta_0 + \pi - 2\varphi} \quad \text{avec} \quad \beta_0 = \text{valeur pour laquelle } \rho = 1$$

$$2\beta_0 = \delta + w - \gamma$$

$$\sin \gamma = \frac{\sin w}{\sin \varphi}$$

$$\tan \left| \frac{\delta}{2} \right| = \frac{|\cot \alpha - \sqrt{\cot^2 \alpha - \cot^2 \varphi}|}{1 + \operatorname{cosec} \varphi}$$

Cette méthode est très complexe mais CAQUOT, KERISEL et ABSI ont donné les valeurs de p et de n pour différentes valeur de φ .

Pour un écran vertical avec un terre plein horizontal, ils ont donné les valeurs suivantes :

φ (degré)	10	15	20	25	30	35	40	45
k_a	0.639	0.513	0.413	0.333	0.267	0.213	0.168	0.131

Tableau 05 : valeurs de k_a en fonction de φ par la méthode de CAQUOT

φ (degré)	10	15	20	25	30	35	40	45
k_p	1.62	2.12	2.83	3.89	3.89	5.56	8.36	13.44

Tableau 06 : valeurs de k_p en fonction de φ par la méthode de CAQUOT

Ces valeurs de k_a et de k_p sont les plus utilisés dans les études

III.1.1.2.3 - Théories du coin de glissement

Ce sont des théories qui ne considèrent pas l'état de contrainte du sol et procèdent par la détermination de l'équilibre des forces au moment de l'amorce du mouvement d'un coin du sol vers l'écran (fig18)

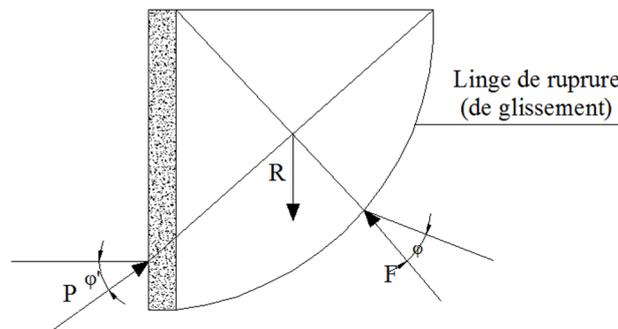


Figure 18 : Théorie du coin de glissement

Le coin du sol est en équilibre si la somme des trois forces qui agissent sur ce coin s'annule

P = Réaction de l'écran sur le coin

R = Résultante du poids du coin

F = Résultante des réactions de la terre sur la ligne de glissement

La ligne de glissement peut être plane, courbe ou autre

III.1.1.2.3.1 - Méthode de Coulomb (1776)

C'est la plus ancienne des méthodes de calcul des coefficients de poussée active, Coulomb a basé sa méthode sur deux hypothèses :

- Le sol se rompt suivant une surface de rupture plane.
- La force agissant sur le mur a une direction connue, en d'autre terme cela signifie que l'angle de frottement δ entre l'écran et le sol est connu.

Coulomb a donné les formules suivantes pour le calcul de K_a et K_p

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

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

φ = Angle de frottement interne

δ = Angle de frottement sol écran

α = Inclinaison de l'écran avec l'horizontale

β = Inclinaison de la surface du sol avec l'horizontale

III.1.1.2 – Sols Cohérents

La cohésion d'un sol est un facteur favorable pour la stabilité d'un écran car elle renforce le coin glissant et réduit de ce fait la poussée, certains auteurs conseillent de la négliger afin de ne pas diminuer la poussée, mais cette façon d'agir est valable pour des écran de faibles hauteurs dont le rapport cout dimension n'est pas très important, par contre pour les écrans de grandes hauteurs, ne pas prendre en considération la cohésion revient à surdimensionner l'ouvrage et à augmenter de ce fait considérablement son cout.

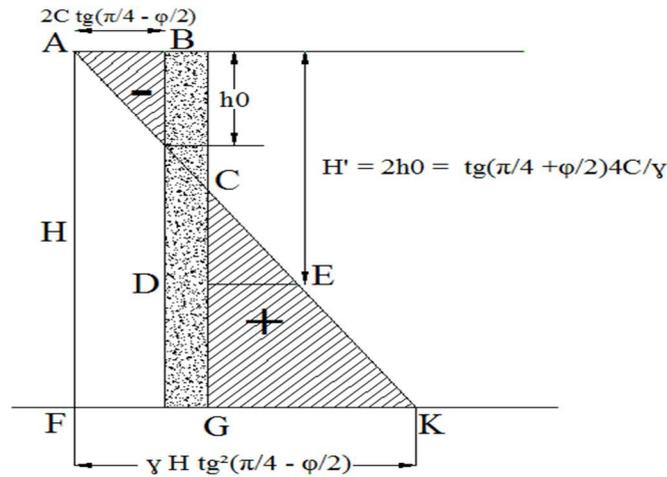
III.1.1.2.1 - Méthode de RANKINE


Figure 19 : Schéma de calcul de k_a et k_p pour un sol cohérent par la méthode de Rankine

A une profondeur h la poussée a pour valeur :

$$P_a = \gamma h \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) - 2C \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)$$

Cette poussée s'annule à une profondeur

$$h_0 = \frac{2C}{\gamma} \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)$$

Deux méthodes sont utilisées pour la détermination de la poussée totale

- La hauteur où p s'annule est prise égale à

$$2h_0 = \frac{4C}{\gamma} \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)$$

La poussée totale

$$P_a = \int_{H'}^H P dh = \frac{1}{2} \gamma \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) H^2 - 2CH \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)$$

La poussée P_a est appliquée au centre de gravité du trapèze (DEGK) (fig19)

En pratique la hauteur où p s'annule est prise égale à

$$h_0 = \frac{2C}{\gamma} \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)$$

La poussée totale P est la surface du triangle CGK

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) H^2 - 2CH \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) + \frac{2C^2}{\gamma}$$

La poussée P_a est appliquée au centre de gravité du triangle (CEF) (fig19)

$$\text{La butée } P_p = \frac{1}{2} \gamma \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) + 2CH \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) + \frac{2C^2}{\gamma}$$

III.1.1.2.2 - Méthode de RESAL - FRONTARD

RESAL et FRONTARD ont simplifié le problème en considérant que la poussée s'annule à une profondeur h qui est fonction de la cohésion, de l'angle de frottement et du poids volumique du sol (fig 20)

$h = \frac{2C}{\gamma} \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$ Les valeurs de h ont été données par RESAL et FRONTARD en fonction de l'angle de frottement et du rapport C/γ [3]

De A à B la poussée est nulle le sol est considéré comme une surcharge dont le poids est égale à γh

De B à C, la cohésion est négligée, le sol est considéré comme pulvérulent, la poussée et la butée sont calculées avec les méthodes pré citées

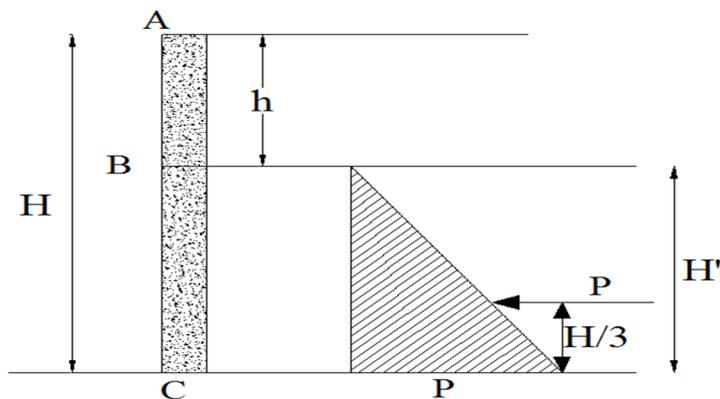


Figure 20 : Schéma de calcul de k_a et k_p pour un sol cohérent par la méthode de RESAL - FRONTARD

III.1.1.2.3 - Méthode de CAQUOT

CAQUOT a utilisé son théorème des états correspondants qui énonce que la poussée d'un sol cohérent est égale à la poussée d'un sol pulvérulent de même angle de frottement moins une pression hydrostatique constante de valeur $C \cot \varphi$ (fig20)

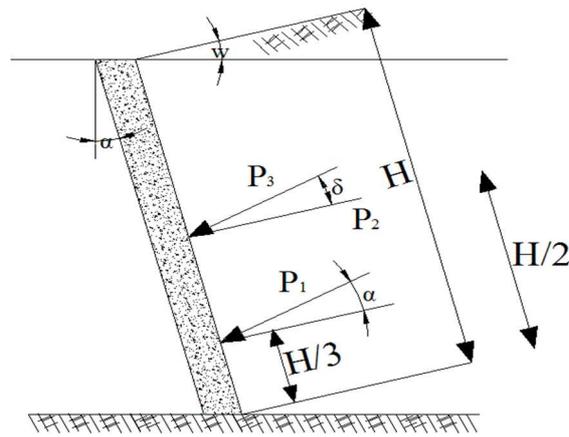


Figure 21 : Schéma de calcul de k_a et k_p pour un sol cohérent
par la méthode de CAQUOT)

La poussée totale est la combinaison des trois poussées :

$$P_1 = \frac{1}{2} p_1 \varphi H^2 \text{ avec } p_1 \text{ poussée de PONCELET}$$

$$P_2 = -CH \cot \varphi$$

$$P_3 = \frac{CH \cot \varphi}{\tan(\pi/4 - \varphi/2)} e^{-2\delta \tan \varphi}$$

$$\text{Avec } \delta = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} + w - \beta$$

La butée totale est la combinaison des trois butées :

$$q_1 = \frac{1}{2} k_{p1} \varphi H^2 \text{ avec } k_{p1} \text{ butée d'un sol pulvérulent équivalent}$$

$$q_2 = CH \cot \varphi \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) e^{2\delta \tan \varphi}$$

$$q_3 = -CH \cot \varphi$$

$$\text{Avec } \delta = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} + w - \beta$$

III.1.1.2.4 - Remarques

La poussée active et les butées passives calculées avec les méthodes aux équilibres limites ont un diagramme linéaire de forme triangulaire et leurs résultantes sont appliquées au centre de gravité du triangle.

Ce diagramme n'est valable réellement que pour un sol uni non stratifié et le point d'application des résultantes peut se trouver d'après les travaux de TERZAGHI au milieu de l'écran.

Pour un sol stratifié le digramme des poussées et butées peut être non linéaire et est fonction de la masse volumique et de l'angle de frottement de chaque strate.

Afin de remédier à ce problème et de se rapprocher le plus possible d'une configuration réelle des diagrammes, la méthode au coefficient de réaction du sol a vu le jour.

III.1.2 - Méthode au module de réaction

Afin de s'approcher le plus possible de la poussée réelle ainsi que de son diagramme et de la position de son impact sur l'écran, la méthode au module de réaction (ou coefficient de réaction) a été élaborée, et n'a connu son essor qu'après le développement de l'outil informatique.

Le principe de la méthode consiste à modéliser le sol en ressort de raideur k_h et d'appliquer l'hypothèse fondamentale de WINKLER dans le domaine des petits déplacements, qui relie la pression du sol à l'interface sol/paroi au déplacement de celle-ci.

Pour un déplacement $u(z)$ de l'écran à une profondeur z la pression aura pour valeur :

$$P(z) = k_h U(z) \quad \text{avec} \quad k_h : \text{coefficient de réaction en } kN/m^3$$

De la formule nous concluons que la pression n'est plus fonction de la profondeur mais elle est proportionnelle au déplacement de la paroi, de ce fait l'interaction sol/paroi est mieux maîtrisée que dans la méthode aux équilibres limites.

Le sol est divisé en couche de profondeur bien choisie de telle manière que k_h puisse être pris comme constant sur toute la profondeur de la couche (fig16).

Cette manière de discrétiser le sol est aussi appelée méthode des sous structures

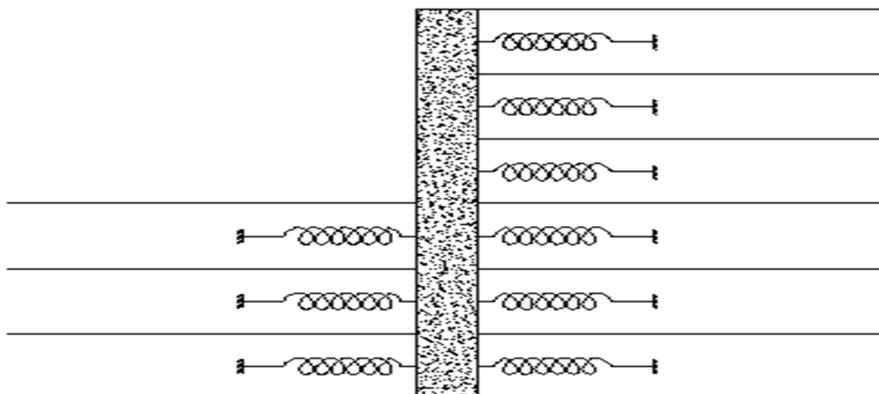


Figure 22 : Schéma de principe de modélisation du sol par la méthode de WINKLER

« L'écran est assimilé à une poutre élastique de largeur unité, dont la déformée est décrite par l'équation classique de déformée d'une poutre » [1] :

$$EI d^4 U(z)/dz^4 + P_1(U; z) + P_2(U; z) + \Delta P_w(z) = EI d^4 U(z)/dz^4 + k_{h1} U(z) + k_{h2} U(z) + \Delta P_w(z) = 0$$

P_1 = Pression à l'amont de l'écran

P_2 = Pression à l'aval de l'écran

ΔP_w = Différence de la pression interstitielle à la profondeur z

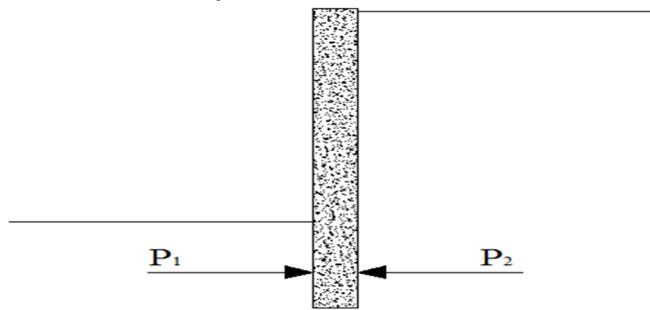


Figure 23 : Pression en amont et en aval de la paroi

L'intégration de cette équation différentielle analytiquement est très complexe et ne peut se faire qu'à l'aide de l'outil informatique avec un processus itératif c'est-à-dire par approximations successives, le coefficient k_{hi} est varié suivant la profondeur de chaque couche et la résolution de l'équation permet de calculer les déformées de l'écran relatives aux différentes profondeurs et la pression est ainsi déduite du produit du coefficient de réaction par la déformée.

Le problème de cette méthode est qu'elle dépend du coefficient de réaction qui n'est pas une caractéristique intrinsèque du sol mais dépendant de la nature du sol, de sa rigidité et des dimensions de l'écran [1].

Le choix de k_h qui est parfois très difficile conditionne toutes les vérifications de dimensionnement et de stabilité de la paroi, de ce fait une grande attention est exigée dans son choix.

Plusieurs auteurs ont proposé des formules de calcul du coefficient de réaction et afin que celui-ci soit le plus juste possible ils ont essayé de trouver une relation entre k_h et une

donnée intrinsèque du sol pouvant être déterminée par des essais in situ ou au laboratoire, nous citons ci-dessus quelques méthodes les plus utilisées par les logiciels de calcul :

III.1.2.1 - Formule de Ménard, Bourdon et Haley

Cette formule met en relation k_h avec le module pressiométrique équivalent E_M^e qui est déterminée par un essai au pressiomètre.

$$k_h = E_M^e / [\alpha a / 2 + 0.133(9a)^\alpha]$$

$\alpha = E_M / E$ Formule de Menard avec E_M module pressiométrique et E module d'élasticité du sol

α : dépend de la nature du sol il peut avoir comme valeur 1/4, 1/3, 1/2 et 2/3 [1]

a : est un paramètre qui dépend de la position par rapport à la paroi ou k_h est calculé (fig24)

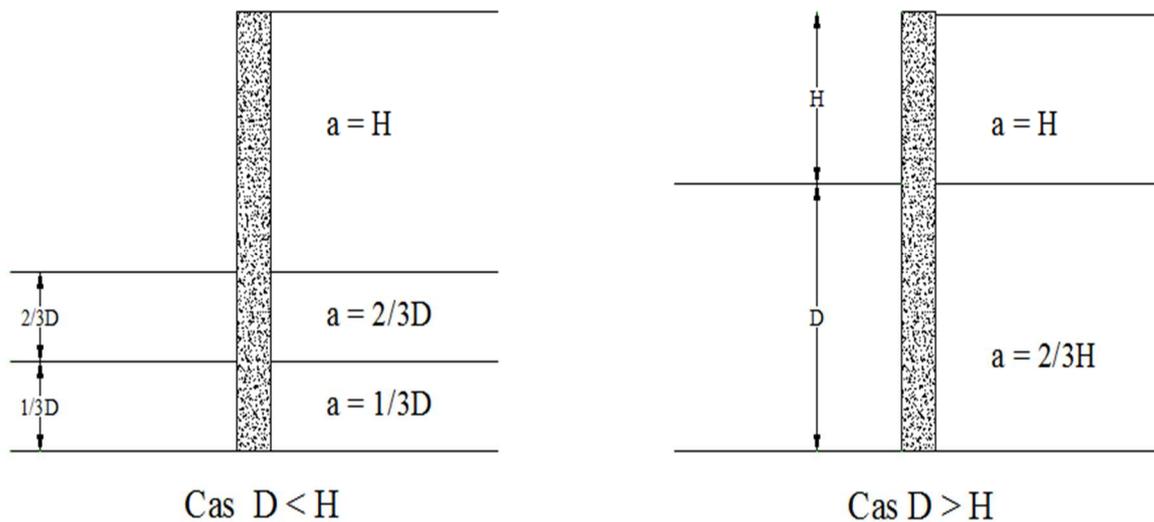


Figure 24 : Détermination du coefficient a

III.1.2.2 - Formule de Schmitt

Schmitt met aussi en relation k_h avec E_M^e

$$k_h = \left[(E_M^e / \alpha)^{4/3} \right] / (EI/B)^{1/3}$$

$\alpha = E_M / E$ formule de Menard

E = Module d'élasticité de l'écran

I = Inertie de l'écran

B = Largeur de la section de l'écran en général = 1.00 m

III.1.2.3 - Formule de Marche

March a proposé une formule de k_h à partir des résistantes de pointe penetrométriques :

$$k_h = 4.5q_c/a$$

q_c = résistance de pointe pénétrométrique

a = Paramètre dimensionnel (vu précédemment)

III.1.2.4 - Formule de Terzaghi

Terzaghi a estimé le coefficient de réaction d'un sol sableux en fonction de sa densité et d'un sol argileux en fonction de sa consistance :

Pour un sable $k_h = I_h z / D$

Pour une argile raide $k_h = k_{h1} / D$

z = niveau considéré de la fiche,

D = la « longueur sollicitante », dépendant de la longueur en fiche de l'ouvrage et du mode de fonctionnement de l'ouvrage.

I_h = une constante caractérisant les sables, compte tenu de leurs états de densité et de la présence d'une nappe d'eau.

k_{h1} = une constante caractérisant les argiles compte tenu de leur consistance [11]

III.1.2.5 - Abaque de Chadeisson

Chadeisson a calculé les coefficients de réaction en fonction de la résistance du sol au cisaillement donc en fonction de la cohésion et de l'angle de frottement et a établi un abaque d'où les valeurs de k_h sont tirés

III.1.2.6 - Formule de ROWE

Rowe a établi la formule de calcul de k_h en fonction de la cohésion non drainé (C_u) et de la longueur de la fiche (D)

$$k_h = 1.33 \frac{C_u}{D}$$

III.1.2.7 - Remarques

La méthode au coefficient de réaction du sol permet de prendre en considération d'une manière plus exacte l'interaction sol structure et à l'inverse de la méthode aux équilibres limites, elle permet de varier la loi de comportement du sol.

Néanmoins son inconvénient est qu'elle repose sur la méthode de Winkler qui n'a pas un fondement théorique avéré et bute aussi sur la difficulté à choisir le coefficient de réaction.

III.2 - Détermination des poussées dues aux surcharges

Le calcul de la pression due à une surcharge dépend de la nature de celle-ci.

Si la surcharge est répartie la méthode des états d'équilibres limites peut être appliquée, dans le cas contraire d'autres méthodes sont applicables

III.2.1 - Cas de surcharges réparties

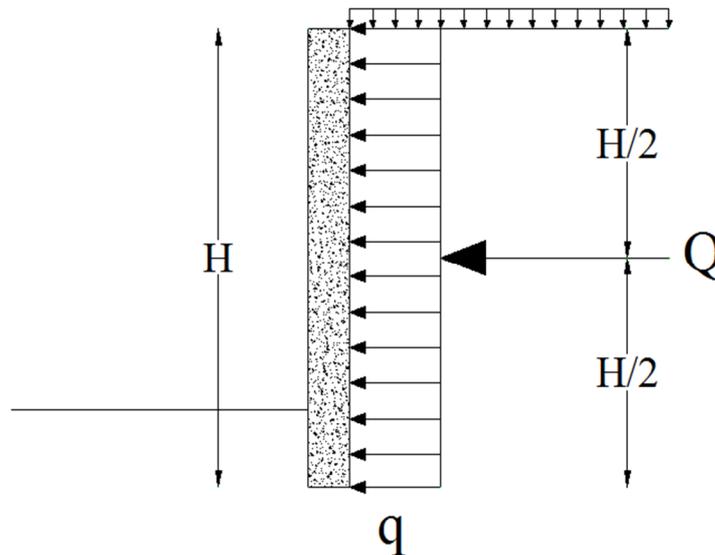


Figure 25 : Surcharge répartie

Le diagramme de la poussée due à la surcharge S est rectangulaire et la résultante est au milieu de H

$$q = k_a S \text{ et } Q = qH = k_a SH$$

k_a est déterminé comme mentionné précédemment

En cas où la surcharge est appliquée dans la zone de butée le coefficient k_a est remplacé par k_p

III.2.2 - Cas de surcharges à une certaine distance de l'écran

Pour ce type de surcharges le calcul de la pression se fait dans le domaine élastique et non plastique car les contraintes de réaction entre la surcharge qui peut provenir d'une construction existante et la paroi devront être élastiques et tout mouvement du sol serait dommageable pour cette construction [2] (fig26).

Pour cela la méthode à utiliser est celle de BOUSSINESQUE

$$\text{Surcharge ponctuelle (concentrée)} : \sigma_h = \frac{3Q}{2\pi} x^2 Z R^{-5}$$

$$\text{Surcharge linéique} : m > 0.4 \quad : \quad \sigma_h = 1.27 \frac{q}{H} \frac{m^2 n}{(m^2 + n^2)^2}$$

$$m < 0.4 \quad : \quad \sigma_h = 0.23 \frac{q}{H} \frac{m}{(0.16 + n^2)^2}$$

$$\text{Surcharge surfacique (linéaire)} : \sigma_h = \frac{2q}{\pi} [(\beta + \sin\beta)\sin^2 \alpha + (\beta - \sin\beta)\cos^2 \alpha]$$

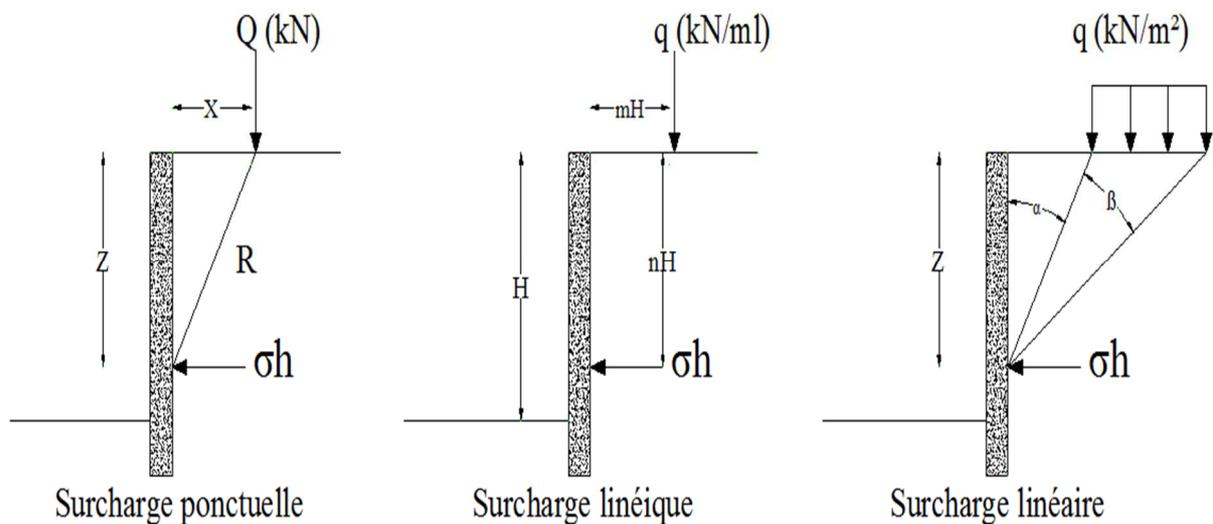


Figure 26 : Surcharge à une distance de la tête de la paroi [4]

III. 3 - Détermination des poussées dues à l'eau

Due fait de sa diversité et son possible changement à tout moment, l'eau est toujours un grand problème pour les ouvrages géotechniques, pour cela une grande attention doit être donnée à la présence d'eau lors du dimensionnement de tout ouvrage en contact avec le sol.

Dans un sol l'eau se présente sous quatre formes :

- Eau de constitution faisant partie intégrante des minéraux des grains
- Eau adsorbée sous forme d'une fine pellicule entourant les grains conférant ainsi une cohésion et un caractère visqueux au sol
- Eau capillaire occupant les vides d'air d'un sol non saturé et au contact de l'air crée des tensions capillaires qui augmentent la cohésion du sol cette cohésion est dite cohésion capillaire
- Eau libre qui remplit tous les vides et forme ainsi une nappe, le sol est ainsi saturé.

De ces quatre types d'eau, l'eau libre est celle qui causent le plus de problèmes aux ouvrages et dont les effets (pressions) doivent être pris en charge dans le dimensionnement de ces ouvrages.

En fonction de leur mouvement les nappes sont de deux types :

- Nappes libres à la partie supérieure avec un sol imperméable à sa partie inférieure (mur de la nappe).
- Nappe entre deux couches imperméable appelée nappe captive.

Dans tous ce qui suit ne nous intéresserons qu'aux nappes libres à la partie supérieure (nappe aquifère).

Les poussées et butées engendrées par les nappes dépendent de l'écoulement des eaux, si l'écoulement est nul c'est-à-dire le niveau de la nappe reste constant sans aucun changement, la nappe dans ce cas est dite nappe libre au repos, par contre si son niveau change par apport, elle est dite nappe libre en mouvement.

III. 3.1 Nappe libre au repos

Dans ce cas la pression interstitielle de l'eau est hydrostatique et normale à l'écran

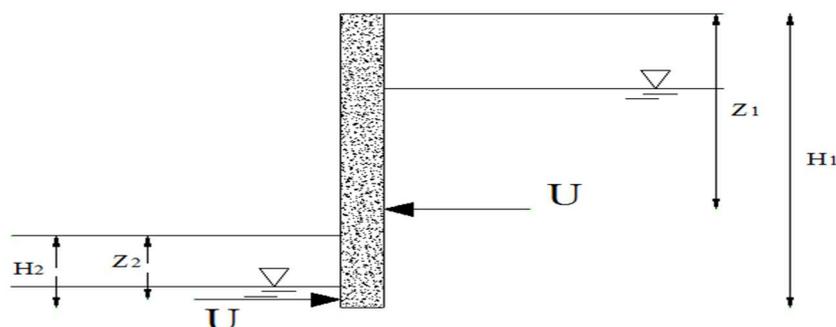


Figure 27 : Pression hydrostatique

Selon le principe de contrainte effective de TERZAGHI la pression à une profondeur z est donnée par la formule :

$$P_z = P'_z + U$$

P'_z : pression effective due aux grains

U : pression interstitielle

Pour le cas où les hauteurs d'eaux sont égales à H_1 et H_2 :

Pression $P_a = 1/2K_a\gamma'H_1^2 + 1/2\gamma_w H_1^2\gamma_w/\gamma_w$: masse volumique de l'eau

Butée $P_p = 1/2K_p\gamma'H_2^2 + 1/2\gamma_w H_2^2$ γ' : masse volumique effective

P_a et P_p sont appliqués à 1/3 de la base de l'écran

III. 3.2 Nappe libre en mouvement

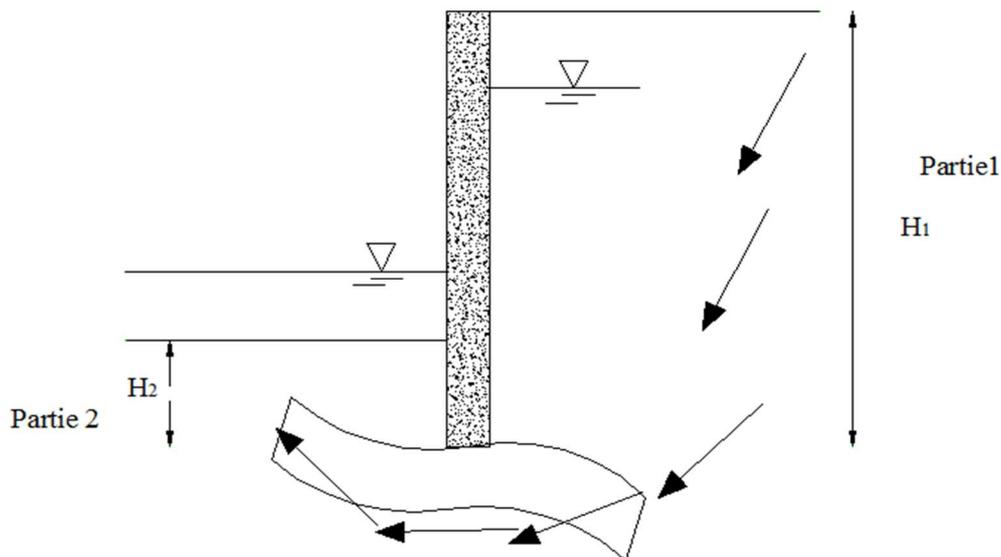


Figure 28 : Sens d'écoulement d'une nappe libre

S'il y a écoulement d'eau de la partie.1 vers la partie.2, la pression effective de la partie.1 augmente et la butée effective de la partie 2 diminue avec possibilité de création d'un chenal sous le pied de la paroi, pouvant créer une rupture par perte de l'équilibre vertical.

Dans ce cas la pression interstitielle n'est plus hydrostatique mais hydrodynamique et il y a lieu de prendre en considération la vitesse d'écoulement qui est la source de l'effet dynamique de la pression.

Le sens d'écoulement est généralement pris comme étant vertical

Selon la loi de DARCY $V = ki = k\Delta h/\Delta l$

Et selon la formule de BERNOULLI : $h = \frac{v^2}{2 \cdot g} + \frac{u}{\gamma_w} + z$

i = perte de charge par unité de longueur d'écoulement de l'eau interstitielle appelé gradient hydraulique (fig29)

K = coefficient de perméabilité caractérisant l'aptitude du sol à faciliter l'écoulement de l'eau, il a l'unité d'une vitesse (cm/s)

h = la charge hydraulique, a la dimension d'une longueur et représente l'énergie mécanique totale de l'eau [1]

u = Pression interstitielle hydrostatique

z = Cote du point considéré

$\frac{u}{\gamma_w}$ = Hauteur piézométrique

En général le rapport $\frac{v^2}{2 \cdot g}$ est négligé du fait que la vitesse d'écoulement qui est au maximum égale à 1 cm/s est négligeable par rapport à la gravitation g de ce fait h s'écrit comme suit :

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + z$$

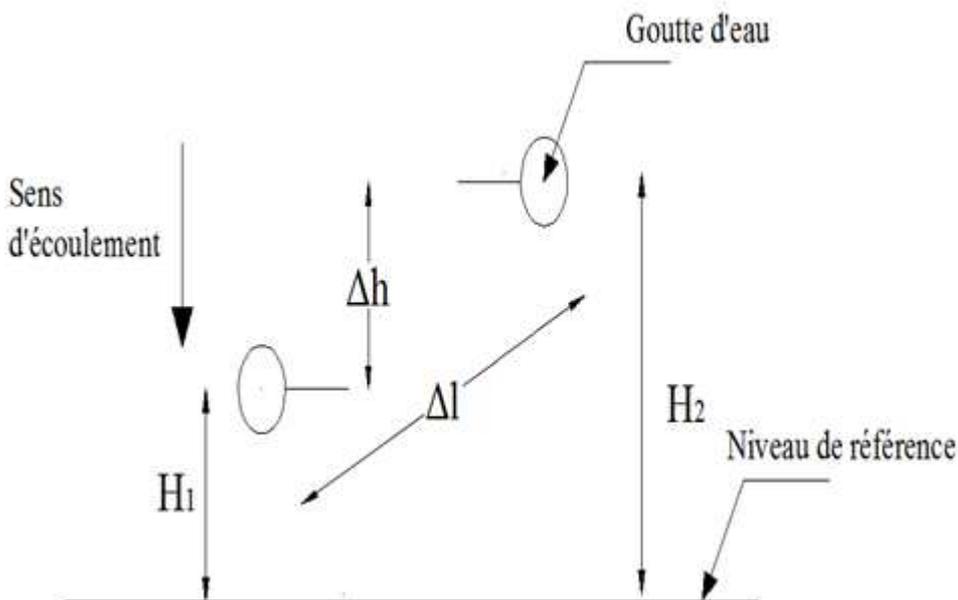


Figure (29) : Schéma d'écoulement d'une goutte d'eau

La poussée d'écoulement appelée aussi force de percolation P_e est égale à :

$$P_e = i \gamma_w v$$

La force de pression totale (sol + écoulement) s'écrit :

Pour la partie.1 écoulement descendant :

$$F_a = 1/2k_a(\gamma' + i\gamma_w)H_1^2$$

Pour la partie.2 écoulement ascendant :

$$F_p = 1/2k_p(\gamma' - i\gamma_w)H_2^2$$

III.3.3 - Phénomène de renard

L'étude des écoulements d'eau dans un sol est d'une nécessité capitale car la valeur du gradient thermique peut engendrer un phénomène appelé phénomène de renard, qui se manifeste quand ce gradient hydraulique est supérieur au gradient hydraulique critique i_c , dans ce cas l'écran sera emporté par l'eau ascendante ce qui entraîne son déséquilibre et une possible ruine.

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w}$$

$i > i_c$ Phénomène de RENARD

III. 4 Calcul de la pression dynamique du séisme

Le calcul de la pression dynamique du sol sur la paroi se fait par trois méthodes différentes :

- ✓ La méthode analytique qui se présente sous deux approches :
 - L'approche pseudo dynamique qui nécessite la connaissance des vitesses de propagation des ondes de volumes (V_s et V_p) chose qui n'est pas toujours disponible
 - La méthode pseudo statique qui remplace l'accélération nominale par deux coefficients sismiques (K_h et K_v), qui ont une relation directe avec la dite accélération
- ✓ La méthode numérique qui est une méthode directe, basée sur la résolution de l'équation d'équilibre dynamique ($m\ddot{u} + c\dot{u} + Ku = p(t)$) avec les éléments finis.
- ✓ La méthode expérimentale qui se fait par simulation sur des modèles vraies grandeurs ou réduits.

Dans notre mémoire nous ne intéresserons que de la méthode pseudo statique qui a été préconisé par le code parasismique algérien (RPA 2003) pour les murs dans la hauteur est inférieur à 6.00 m.

Il est à signaler que les ouvrages géotechniques, comme la paroi moulée, ne sont pas traités par le RPA, mais les données parasismiques nécessaires pour l'évaluation de la poussée ou butée dynamique sont tirées de ce code.

III. 4.1 Présentation de la méthode pseudo statique

La méthode consiste à trouver l'équilibre de la paroi sous sollicitations sismiques pseudo statiques, avec un schéma de rupture en coin et une surface de glissement plane, de part et d'autre de la paroi (fig 30), ces deux coins de rupture sont pris indépendamment et non en même temps selon que l'effort sismique soit en pression active ou en butée passive.

Cette démarche revient à utiliser la théorie du coin de glissement et essentiellement la méthode de coulomb avec un calcul d'équilibre limite à la rupture (fig 31).

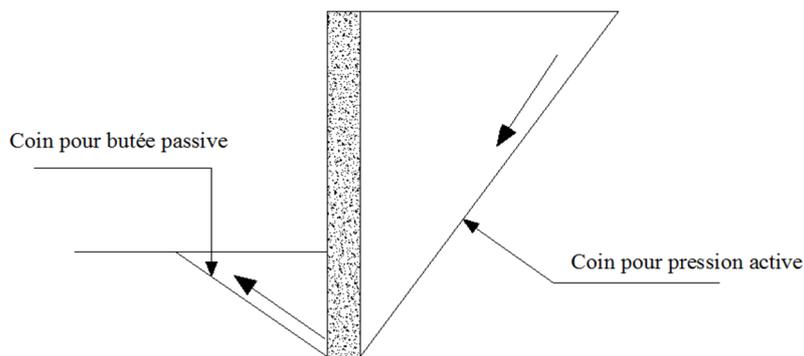


Figure 30 : Coins de glissement

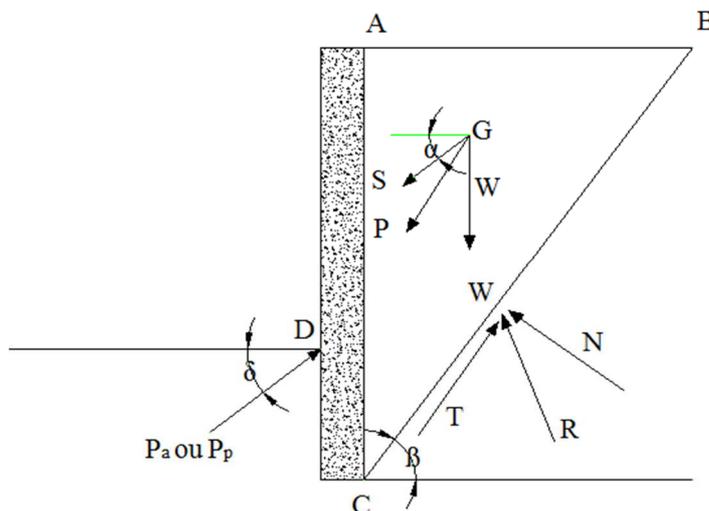


Figure 31 : Coin de glissement méthode de Coulomb

G = centre de gravité du coin

W = Poids du coin y compris surcharges s'il y a lieu

S = Pression ou butée pseudo statique

P = Résultante de W et S

P_a ou P_p = Action de la paroi sur l'écran égales à la poussée active et passive du sol

δ = Angle d'inclinaison de la poussée ou de la butée, fonction de la rugosité de l'écran

R = Réaction du sol au glissement

T = Composante horizontale de R = contrainte de cisaillement

N = Composante verticale de R = contrainte normal

Pour que la paroi soit en équilibre il faut que la somme des forces et la somme des moments par rapport au point C soient nulles.

$$\sum F_i = 0 \quad P + P + P_a(\text{ou } P_p) + T + N = 0 \quad \text{avec } T = N \tan \varphi + C$$

$$\sum M_i = 0 \quad MP_c + MP_{a/p} + MT_c + MN_c = 0$$

La résolution de ce système d'équation pour trouver la pression ou la butée pseudo statique a fait l'objet de plusieurs recherches et celle retenue dans les codes parasismiques algérien et français est la méthode de Mononobe-Okabe.

III. 4.2 Méthode de Mononobe-Okabe

Mononobe et Okabe ont déterminé les deux composantes de l'effort sismique à savoir l'effort horizontal qui est fonction de l'accélération horizontale $a_h = k_h.g$ et l'effort vertical qui est fonction de l'accélération $a_v = k_v.g$ (fig32)

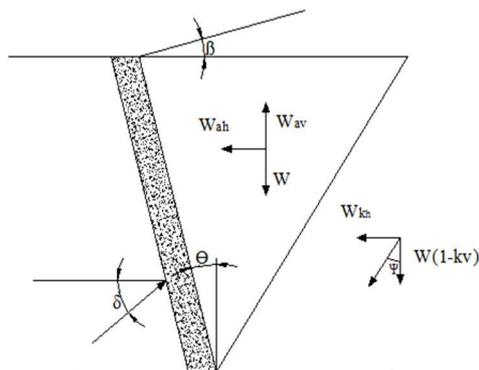


Figure 32 : Représentation de la pression dynamique horizontale et verticale

Les forces sismiques agissant sur la paroi sont :

Horizontalement $F_h = W a_h = a_h W / g = k_h W$

Verticalement $F_v = \pm W a_v = \pm W a_v / g = k_v W$ l'effort peut être ascendant ou descendant

La poussée ou butée due au séisme s'écrit comme suit :

$$P_{aE,pE} = 1/2 K_{aE,pE} \gamma H^2 (1 \pm k_v)$$

$$K_{aE,pE} = \frac{\cos^2 (\varphi \pm \theta - \Psi)}{\cos \Psi \cos^2 \theta \cos(\delta \pm \theta + \Psi) \left[1 \pm \sqrt{\frac{\sin(\delta + \varphi) \sin(\varphi \pm \beta - \Psi)}{\cos(\delta \pm \theta + \Psi) \cos(\beta - \theta)}} \right]^2}$$

γ = Poids spécifique du sol

φ = Angle de frottement interne du sol

δ = Angle de frottement paroi/sol

θ = Inclinaison de la paroi par rapport à la verticale

β = Inclinaison du terre plein par rapport à l'horizontale

H = Hauteur du mur

$K_{aE,pE}$ = Coefficients dynamiques actifs et passifs de l'effort sismique

Pour une paroi moulée, en général $\theta = \beta = 0$

$$K_{aE,pE} = \frac{\cos^2 (\varphi - \Psi)}{\cos \Psi \cos(\delta + \Psi) \left[1 \pm \sqrt{\frac{\sin(\delta + \varphi) \sin(\varphi - \Psi)}{\cos(\delta + \Psi)}} \right]^2}$$

$$\Psi = \arctan \frac{k_h}{1 \pm k_v}$$

III. 4.3 Diagramme de la poussée sismique

Pour Mononobe et Okabe, la pression due au séisme a un diagramme triangulaire et une force appliquée à H/3 de la base de la paroi, par contre le RPA préconise de prendre un schéma linéaire rectangulaire pour la pression et une résultante appliquée au milieu de la paroi

CHAPITRE IV

DIMENSIONNEMENT ET VERIFICATION DE LA PAROI MOULEE

Dans ce chapitre, sont traités le comportement des parois sous sollicitations et les méthodes de dimensionnement

Le dimensionnement d'une paroi moulée se fait par trois méthodes :

- ✓ Méthode classique (aux états d'équilibre limite)
- ✓ Méthode au coefficient de réaction du sol
- ✓ Méthode numérique

Le dimensionnement est très complexe et se fait par approximation successive c'est-à-dire arrêter le type et les dimensions de la paroi puis procéder à la vérification de la stabilité jusqu'à trouver un dimensionnement optimal en matière de stabilité et de coût.

La complexité est le fait aussi de l'interaction sol écran qui dépend de plusieurs paramètres qui sont en général que peu maîtrisés.

Ces paramètres dépendent de plusieurs facteurs dont nous citons les plus importants :

- Des caractéristiques du sol, angle de frottement, cohésion, capacité portante.
- Du coefficient de frottement sol matériau dont la détermination est empirique et conditionne l'angle de la poussée et de la butée avec la normale du mur.
- De la rugosité de la surface de contact (parement/sol) qui est un concept très mal défini et qui a son importance dans la détermination de l'angle d'inclinaison de la poussée (δ) :

« Une surface de contact est dite lisse si elle est caractérisée par l'absence de contraintes de cisaillement et donc par une obliquité nulle ($\delta = 0$) »

« Une surface est dite parfaitement rugueuse si le mur et le sol se comporte au niveau de cette surface comme un seul corps, on dit qu'ils sont parfaitement adhérents » [1] dans ce cas $\delta = \varphi$

La surface de contact acier/sol est considérée comme lisse (cas des palplanches), pour le béton elle est intermédiaire entre lisse et rugueuse, δ est pris forfaitairement dans le dimensionnement égale à $2/3 \varphi$

- De la rigidité et de la flexibilité de l'écran qui détermine la méthode de calcul des poussées et butées du sol (K_0, K_a, K_p, K_h), cette rigidité est fonction de la longueur élastique L_0 de l'écran :

$$L_0 = \sqrt[4]{\frac{E I}{K_h B}}$$

E = Module d'élasticité du béton

I = Inertie de la section de la paroi

K_h = Coefficient de réaction du sol

B = Largeur de la section de la paroi prise égale à 1 m

L'écran est considéré comme souple si sa fiche D est supérieure à $3L_0$

Il est rigide si $D < 1/2 L_0$

Il est semi rigide si la fiche D est entre les deux valeurs précitées.

– Des différentes phases de construction car en cours de réalisation la paroi n'est pas soumise à la même pression du sol :

* A l'entame des terrassements la paroi est soumise à une pression au repos (K_0)

* Après terrassement la paroi est soumise à une pression dépendant de K_a ou K_h

Le mode de fonctionnement et le déplacement de la paroi dépend de la phase de construction, avant la pose du tirant la paroi est considérée en console et après elle est trainée avec un pied en buté

En cas de projection des constructions en amont ou en aval de la paroi, celle-ci doit être dimensionnée avec et sans les surcharges qu'il ya lieu de bien estimées en fonction de la nature de l'ouvrage et du gabarit prévu dans la plan d'occupation au sol de la zone (P O S)

Dans le cas d'une argile le dimensionnement à court terme se fait avec une cohésion non drainée (C_u) et à long terme avec les contraintes effectives.

Ces paramètres cités et d'autres font que le dimensionnement d'une paroi est d'une complexité avérée et les méthodes utilisées dépendent de son mode de comportement et de sa manière de se déplacer et de se déformer.

IV.1 - Mode de comportement des parois moulées.

IV.1.1 - Ecran rigide

- ✓ Ecran rigide non ancré (sans tirant) la rotation se produit au niveau du point O se trouvant dans la fiche D et le sol coté aval développe une buté et une contre butée coté amont (fig33).

- ✓ Ecran rigide avec ancrage, la rotation se produit au niveau de l'ancrage (point A) et le sol ne développe qu'une butée coté aval (fig34).

IV.1.2 - Ecran souple

La flexibilité de l'écran influe beaucoup sur son comportement et rend la distribution des efforts sur la partie en fiche fonction de la valeur de la pression appliquée en amont [4]

Pour de faibles valeurs de P (P_1), le sol se comporte de manière élastique, sa réaction est proportionnelle au déplacement de l'écran (fig35-a).

Pour une pression P_2 , la réaction du sol est une butée et une contre butée sans déplacement du pied de l'écran (fig35-b).

Pour une pression P_3 , le pied se déplace vers l'amont et mobilise la contre butée maximale au-delà de laquelle le sol en amont atteint sa limite de rupture, le moment d'encastrement est alors maximal et la paroi est dite dans un état d'encastrement complet (fig35-c).

Au-delà de la valeur de P_3 , la contre butée diminue et la butée augmente, l'écran est dit partiellement encastré jusqu'à la valeur P_4 ou la contre butée s'annule complètement et la butée atteint sa valeur maximale et est mobilisée sur toute la hauteur en fiche, l'écran est en équilibre limite et est dit simplement buté en pied (fig35-d)

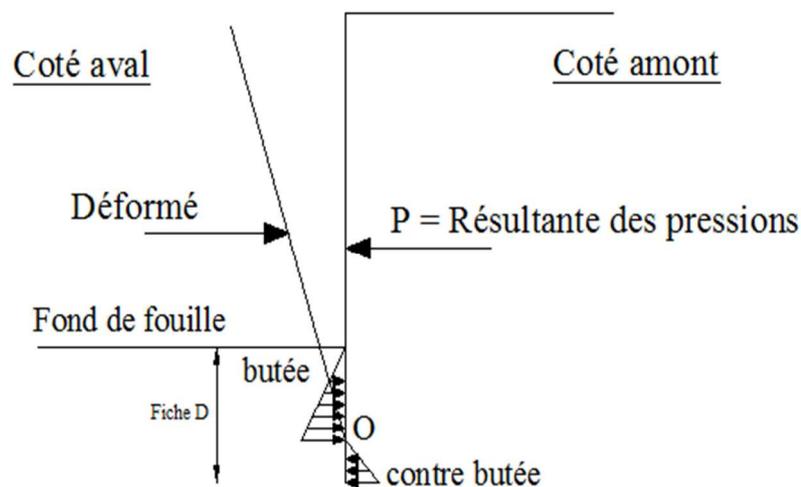


Figure 33 : comportement écran rigide sans ancrage

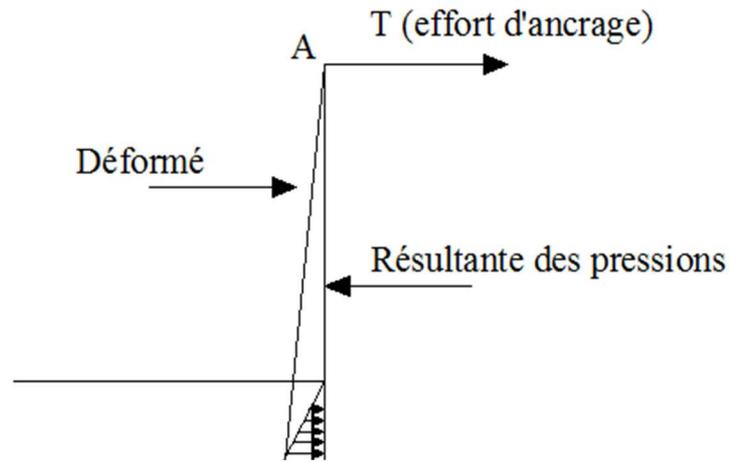


Figure 34 : comportement écran rigide sans ancrage

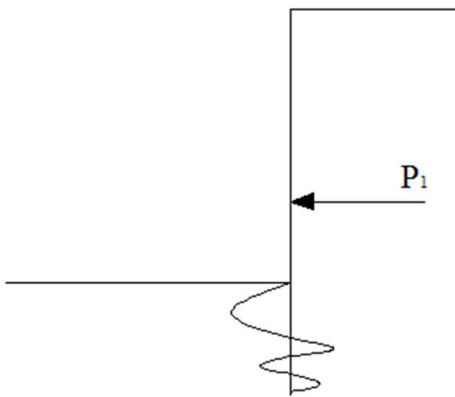


Figure 35-a : Réaction élastique du sol

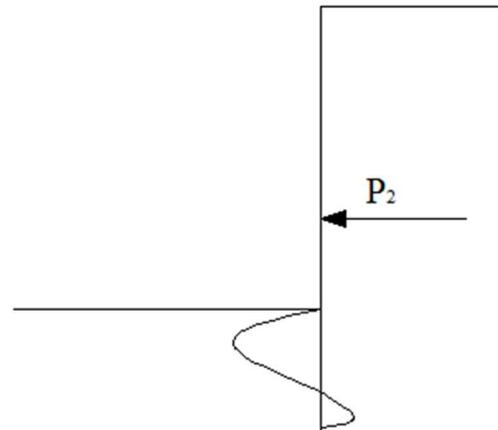


Figure 35-b : Encastrement sans Déplacement du pied

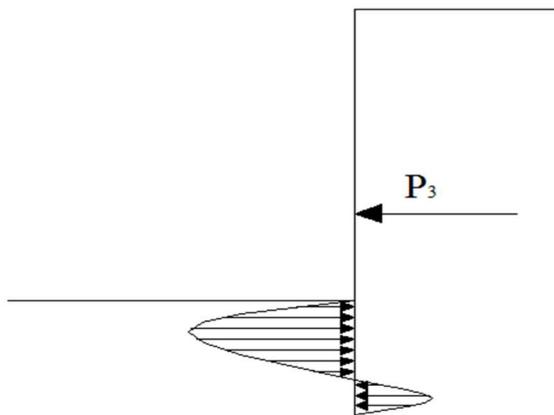


Figure 35-c : Encastrement complet

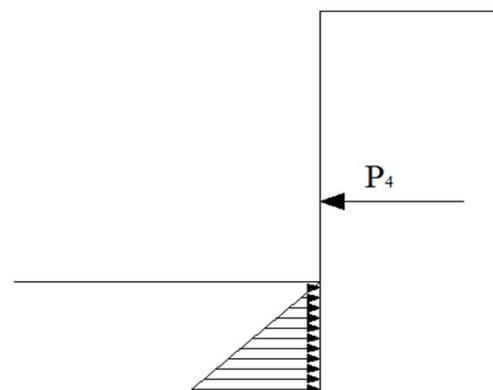


Figure 35-d : Simplement buté en pied

IV.2 Méthodes de calcul

Le dimensionnement consiste à déterminer les paramètres suivants [1] (fig 36) :

- ✓ La fiche minimale D
- ✓ L'effort T_r dans l'ancrage et dimensionnement du tirant d'ancrage (pour les parois ancrées)
- ✓ Les efforts internes dans l'écran (moment fléchissant et effort tranchant)
- ✓ La stabilité au glissement du sol et la paroi, avec détermination du coefficient de sécurité F_s
- ✓ La flèche U (déplacement en tête de l'écran)

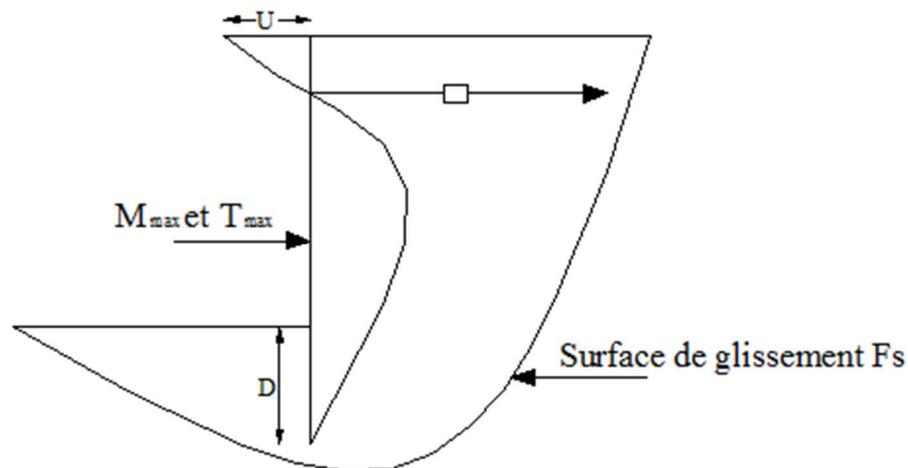


Figure 36 : Paramètre à déterminer dans le calcul

IV.2.1 - Cas d'une paroi encastrée

La paroi encastrée dite aussi paroi auto stable et paroi en console est stabilisée par la longueur de sa fiche, ce type de paroi n'est rentable économiquement que pour de petites longueurs des parties en soutènement.

Ce type de paroi n'est dimensionnée que par les méthodes classiques et numériques, la méthode au coefficient de réaction du sol n'est pas utilisée dans ce cas (NF P94-282)

Le schéma de calcul est celui adopté par Blum et Balay, qui consiste à concentrer l'effort de contre butée au point O de rotation se trouvant dans la fiche, à trouver le point N où la poussée et la butée s'annulent et à remplacer la poussée F_a et la butée F_b par F_a' et F_p' , qui résultent de la différence des pressions actives et passives ($F_a - F_b$)

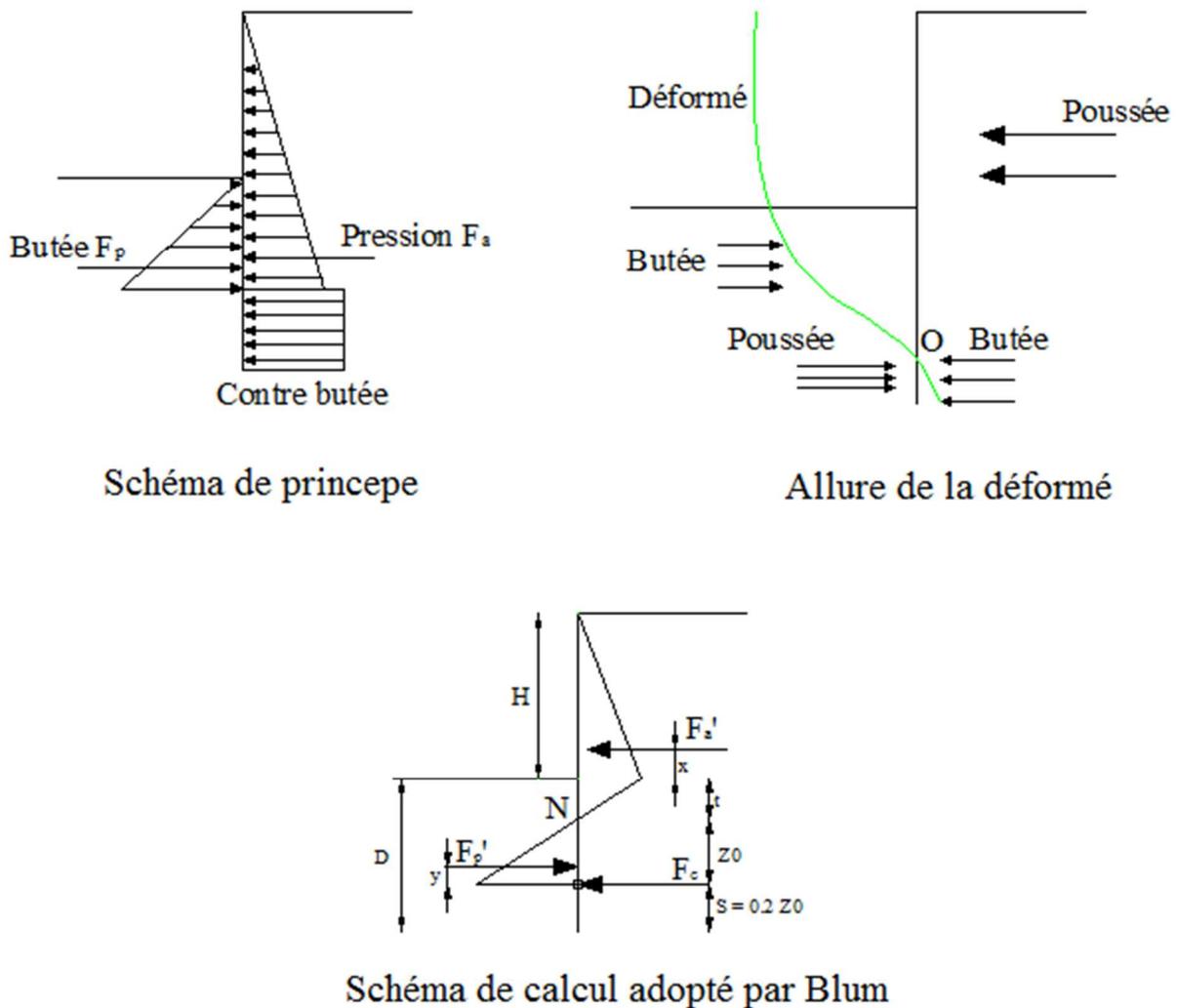


Figure 37 : Schéma de calcul d'une paroi auto stable

Le calcul est basé sur les hypothèses simplificatrices suivantes [4] :

- Au-dessus du point O, le sol en amont et en aval de la paroi est considéré comme étant en équilibre limite
- Le calcul des coefficients de poussée et de butée (k_a et k_p) sont déterminés par la méthode de Rankine
- La résultante de la contre butée F_c est appliquée au niveau du centre de rotation O.
- La hauteur de la contre butée n'est pas calculée mais prise forfaitairement égale à 20% de la hauteur de la butée $S = 0.2 z_0$
- Il existe un autre point N ou la pression active et la butée s'annule, ce point se trouve à une distance t du fond de fouille

Ces hypothèses permettent de réduire à deux les inconnues du problème, la hauteur de la butée z_0 donc la position de son point de rotation et la force de contre butée F_c .

Ces deux inconnues sont déterminées par les équations d'équilibres statiques au point O c'est-à-dire que la paroi ne se déplace que pour mobiliser la poussée et la butée limite et elle est en équilibre au niveau de son point de rotation O.

$$\sum M_{O=0} = 0 \text{ pour trouver } z_0$$

$$\sum F_{i=0} = 0 \text{ pour trouver } F_c$$

$$\sum M_{O=0} = 0 \Rightarrow F_a (x + t + z_0) - F_p (z_0 - y) = 0 \Rightarrow$$

$$\sum F_{i=0} = 0 \Rightarrow F_c = F_a' - F_p'$$

La fiche D est prise égale à : $D = 1.2 z_0 + t$

Le moment fléchissant maximal ainsi que l'effort tranchant sont déterminés par le schéma de calcul (fig37).

Généralement un coefficient de sécurité est utilisé dans cette méthode en divisant le coefficient de poussée passive par 2 ($k_p/2$), de ce fait la butée mobilisée est la moitié de la butée limite

IV.2.2 Cas d'une paroi simplement butée en pied avec un lit d'ancrage (paroi isostatique)

Un écran ancré en tête est dit simplement butée en pied si les conditions suivantes sont vérifiées (fig38) :

- ✓ La fiche est suffisamment courte pour que seule la poussée active se développe sur la face amont de l'écran sans mobilisation de la contre butée.
- ✓ La rotation du mur a lieu au niveau du point d'ancrage (point A)
- ✓ Les déplacements en pied sont suffisants pour mobiliser la butée limite coté aval de l'écran.

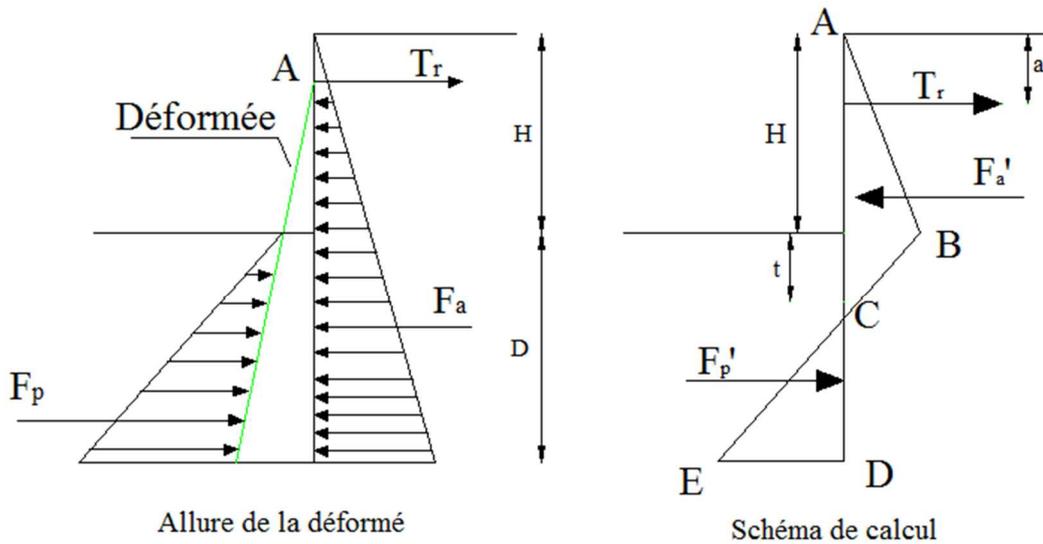


Figure 38 : Schéma de calcul d'une paroi simplement butée en pied

T_r et D sont déterminés par les équations d'équilibre statique, en y ajoutant une hypothèse supplémentaire qui consiste à considérer le moment au point C comme nul, de ce fait sur ce point les pressions actives et passives s'annulent et le moment est aussi nul, cette manière d'agir nous permet, de dissocier la paroi en deux poutres isostatiques sur appui simple, cette méthode est dite méthode de la poutre équivalente.

La paroi est divisée en deux poutres, la poutre FC et la poutre CD (fig38)

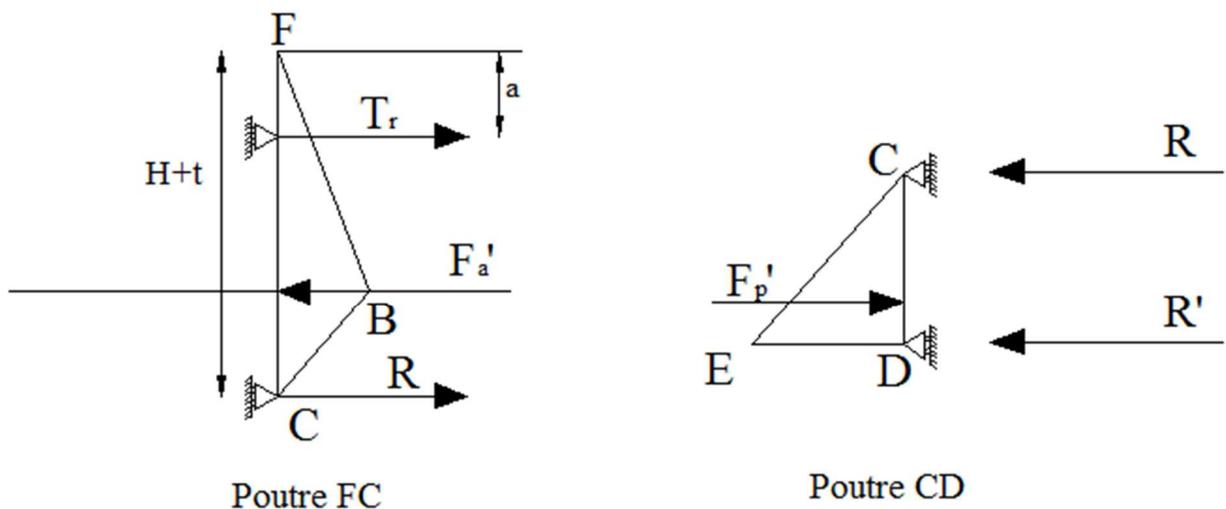


Figure 39 : Schéma des poutres équivalentes

Des équations de l'équilibre statique de la poutre FC sont calculés T_r et R et de la poutre CD R' et D

$$\sum M_A = 0 \text{ et } F'_a = T_r + R$$

$$\sum M_c = 0 \text{ et } F'_p = R + R'$$

IV.3 Remarques

Les deux méthodes exposées ci-dessus pour le dimensionnement des différentes parois moulées ne permettent pas de quantifier et de vérifier les déplacements du sol, ces derniers peuvent avoir une incidence importante sur les constructions se trouvant en amont ou en aval de la paroi.

Le déplacement vers l'aval de la paroi crée un tassement en amont et un soulèvement en aval qui doivent être déterminé pour pouvoir vérifier leur incidence sur les constructions. La seule méthode qui déterminent et le déplacement de la paroi et le déplacement du sol est la méthode numérique.

CHAPITRE V

METHODE NUMERIQUE

Dans ce chapitre on illustre la
méthode des éléments finis
notamment les problèmes plans

V.1 - Introduction.

Les méthodes numériques connaissent depuis quelques années un développement considérable, notamment dans le domaine de la géotechnique. En effet, elles permettent l'analyse du fonctionnement des ouvrages, des structures et des sols, par l'évaluation des champs de déformations et de contraintes sous diverses sollicitations. Plus précisément, elles autorisent la modélisation des aspects essentiels suivants : l'hétérogénéité du comportement des matériaux, la géométrie des ouvrages et de leur environnement, l'interaction entre les sols et les structures et l'analyse d'une méthode de construction dans toutes ses phases [13].

Ces possibilités de modélisation permettent d'utiliser les résultats des calculs à des fins diverses telles que l'étude de faisabilité d'un projet, le choix d'une technique d'exécution, l'optimisation de la géométrie des ouvrages, la prévision des déformations en cours de travaux, l'étude paramétrique d'ouvrages types, en vue de procédures simplifiées de dimensionnement.

Parmi les outils numériques les plus utilisés en ingénierie sont la méthode des éléments finis et la méthode de différences finies, qui peuvent être mises en œuvre grâce à l'utilisation de nombreux codes de calcul. Il est donc naturel, avec l'émergence de l'informatique à partir de la fin des années 1970, que ces méthodes aient suscité un intérêt croissant pour les géotechniciens.

V.2 - Définition de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis revient à remplacer le système continu par un système discret. Le solide est alors divisé en un certain nombre de sous-domaines appelés éléments, dont l'assemblage permet la reconstitution de la géométrie initiale. Chacun des éléments est relié à ces voisins par des nœuds dont les degrés de liberté (DDL) constituent les inconnues du problème.

La méthode consiste le plus souvent à approximer un champ de déplacement sur l'élément au moyen d'une fonction polynomiale formée d'un nombre fini de paramètres et à l'exprimer en fonction des déplacements nodaux (les déplacements associés aux degrés de liberté). On aura donc :

$$X(x, y, z) = \sum_{i=1}^n N_i(x, y, z) \cdot x_i$$

$$Y(x, y, z) = \sum_{i=1}^n N_i(x, y, z) \cdot y_i$$

Où les :

X_i : désignent les inconnues en déplacement associées aux degrés de liberté considérés,

$N_i(x, y, z)$: désignent les fonctions de forme de l'élément permettant d'obtenir les déplacements de celui-ci en n'importe quel point de sa géométrie et ce toujours à partir des déplacements nodaux.

V.3 - Hypothèses d'application de la méthode des éléments finis

Les hypothèses principales sont les suivantes :

- Le milieu est continu;
- La loi de comportement choisie est implicitement la bonne;
- Les essais en laboratoire donnent une image représentative du comportement réel des matériaux dans l'ouvrage et alentour;
- La détermination des paramètres est satisfaisante;
- Les états initiaux mécanique et hydraulique sont bien connus.

V.4 - Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis

Leurs avantages principaux sont les suivants :

- elles permettent de modéliser l'hétérogénéité de comportement des matériaux;
- elles prennent en compte la géométrie exacte des ouvrages et de leur environnement;
- elles considèrent une interaction entre terrain et structure;
- elles autorisent l'analyse d'une méthode de construction dans toutes ses phases;

Leurs principaux inconvénients sont :

- la difficulté de la détermination exacte des paramètres à introduire dans le modèle;
- le temps de calcul croissant avec la taille du maillage et la complexité de la loi considérée.

V.5 - Exemples traités par la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis, permet de modéliser tous les types de géométrie et de chargement. Selon le code de calcul utilisé, par exemple : la stabilité d'un mur de soutènement, la mise en place d'un revêtement de tunnel, influence d'ouvrages anciens sur

une nouvelle construction, intersection de galeries souterraines, montée d'un remblai par couches, simulation des étapes de creusement d'un tunnel, etc.

Cette modélisation peut être du type deux dimensions ou trois dimensions.

V.6 - Problème à deux dimensions 2D

Les éléments plans ou membranes sont destinés à modéliser des structures planes travaillant uniquement dans leur plan. Leurs nœuds possèdent uniquement deux degrés de liberté u et v [20].

V.6.1 - Etapes pour la résolution d'un problème 2D

- 1-Discretisation du milieu continu en sous domaines (éléments)
- 2-Etablir la matrice de rigidité élémentaire $[K_e]$ pour chaque élément
- 3-Assembler les matrices et les vecteurs élémentaires en un système global $[K] \{U\} = \{F\}$
- 5-Prise en compte des conditions aux limites
- 6-Résoudre le système $[K] \{U\} = \{F\}$ et obtenir les déplacements $\{U\}$ aux nœuds
- 7-Calculer les gradients (déformations et contraintes) dans les éléments.

V.6.1.1 - Discrétisation ou maillage

Le principe de discrétisation consiste à diviser un espace continu vers un espace équivalent, avec des petits éléments qui portent le nom élément fini. Les points d'intersection entre les lignes qui séparent les éléments sont appelés nœuds. Une caractéristique de base de la méthode des éléments finis est que les éléments finis sont analysés et traités séparément, un par un. Chaque élément est assigné ses propriétés physiques ou constitutives, et ses propriétés ou l'équation de rigidité sont formulées. Par la suite, les éléments sont assemblés pour obtenir l'équation pour l'ensemble de la structure.

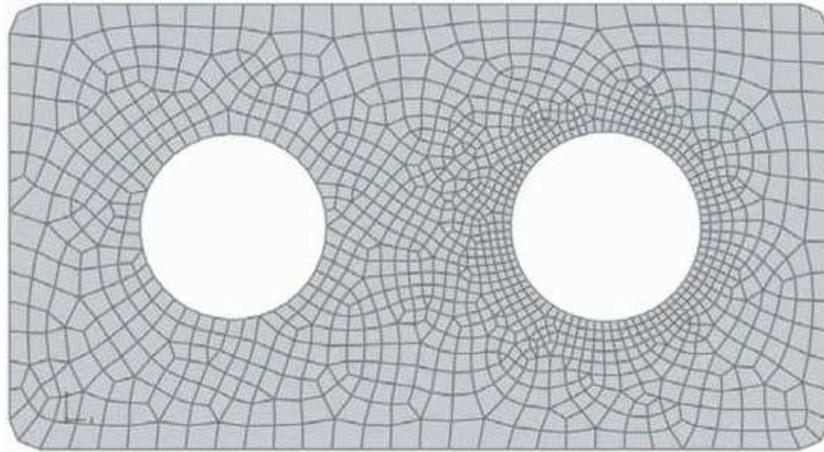


Figure 40 : Discrétisation à base d'éléments quadrangulaires

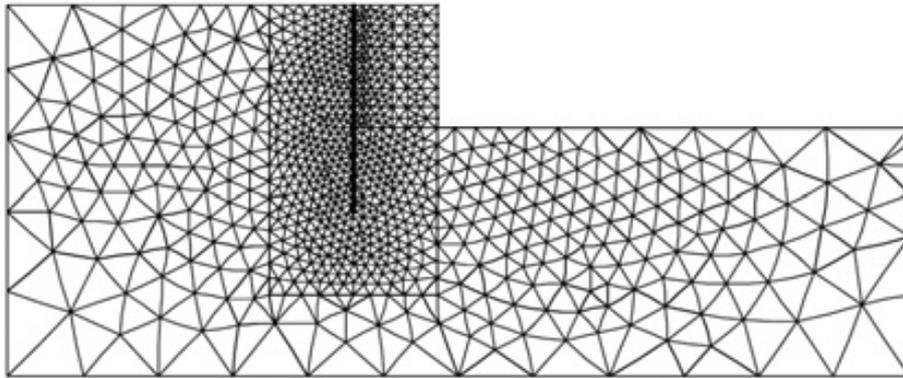
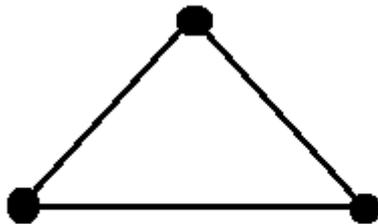


Figure 41 : Discrétisation à base d'éléments triangulaires

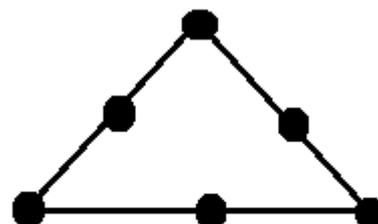
V.6.1.1.1 - Type d'éléments

La discrétisation d'une structure en 2D se fait à la base des éléments triangulaires ou bien quadratiques tel que :

- Les éléments triangulaires sont bien adaptés aux géométries complexes, mais ils sont moins précis que les quadrangles, les plus courants sont les éléments à 3 nœuds et à 6 nœuds [20]



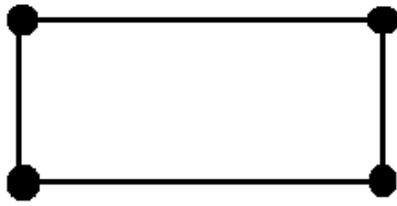
Éléments triangulaire à 3 nœuds



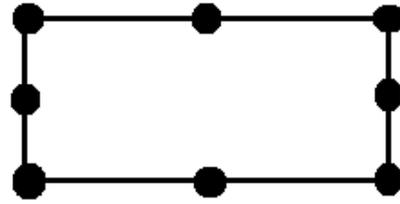
Éléments triangulaire à 6 nœuds

Figure 42 : Les types des éléments triangulaires

- Les éléments quadratiques sont généralement plus précis que les triangles du même ordre d'interpolation. Cette précision est la conséquence de la symétrie géométrique par rapport aux deux axes, ils peuvent être à 4 nœuds ; à 8 nœuds ; ...etc. [20]



Éléments quadrangulaires à 4 nœuds



Éléments quadrangulaires à 8 nœuds

Figure 43 : Les types des éléments triangulaires [18]

V.6.1.2 - Transformation géométrique

Comme le montre les figures (42) et (43), les éléments pouvant être de tailles et de formes quelconques, il n'est pas envisageable, pour établir le calcul pour chaque élément. Les matrices de rigidités variant systématiquement, une méthodologie permettant de calculer ces caractéristiques quelles que soient la géométrie et configuration des éléments, s'avérera beaucoup plus rentable au niveau calcul.

Celle-ci consistera, pour chaque type d'élément, à définir un élément de référence de géométrie conventionnelle (appelé également élément « parent ») de telle manière à obtenir la géométrie de n'importe quel élément réel de forme semblable à partir d'une transformation géométrique [17].

En d'autres termes, pour chacun des points $P'(\xi, \eta)$ de l'élément « parent » défini dans un repère unitaire correspondra, via la transformation T_e , un point et un seul de l'élément réel $P(x, y)$.

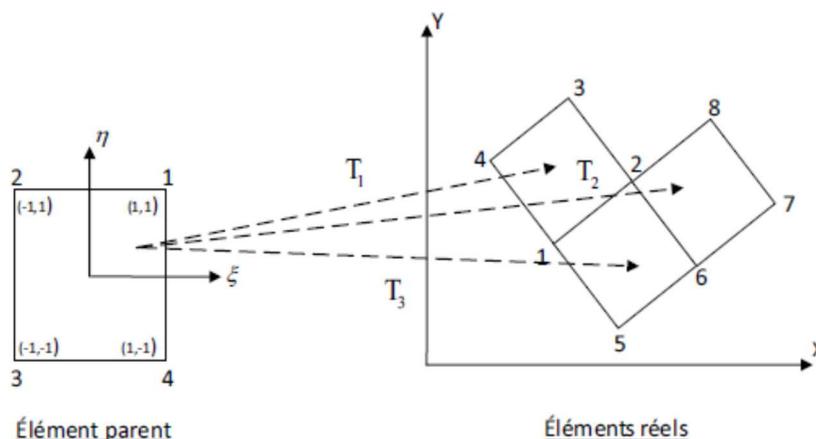


Figure 44 : Transformations associées aux éléments réels

Donc les coordonnées globales de chaque point dans l'élément réel s'expriment sous la forme suivante :

$$X = \sum_{i=1}^n x_i T_i (\xi, \eta)$$

$$Y = \sum_{i=1}^n y_i T_i (\xi, \eta)$$

T_i : fonctions d'interpolation qui sont identique aux fonctions de formes dans le cas d'un élément iso-paramétrique

V.6.1.3 - Matrice de rigidité élémentaire

La matrice de rigidité élémentaire est exprimée comme suit :

$$[K]^e = \iint^e [B]^T [D] [B] dx dy$$

Ou B est la matrice de forme :

$$[B] = [\partial] [N]$$

avec :

$$[\partial] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \text{ Tenseur de Green ou Matrice des dérivés}$$

[N] Matrice des fonctions de formes

Les dérivés de l'élément réel sont exprimés en fonction de l'élément référence comme suit:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{bmatrix} \text{ avec } [J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial \xi} & \frac{\partial Y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial X}{\partial \eta} & \frac{\partial Y}{\partial \eta} \end{bmatrix}, [J] \text{ est la matrice Jacobienne}$$

La matrice de comportement [D] est exprimée comme suit :

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}$$

L'expression de la matrice de rigidité devient dans le repère local :

$$[K]^e = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \det[J] [B]^T [D] [B] d\xi d\eta$$

V.6.1.3.1 - Intégration numérique

Le calcul de la matrice de rigidité élémentaire [K]_e se fait numériquement par l'utilisation de l'intégration de Gauss, donc le calcul mathématique de chaque terme de la matrice de rigidité sera remplacé par une sommation aux niveaux des points de Gauss [16], l'expression de la matrice de rigidité devient :

$$[K]^e = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i w_j \det[J] [B]^T [D][B]$$

n : nombre de point de Gausse

w_i, w_j : Coefficients correspondants aux points de Gausse

n	ξ _i	w _i	Degré maximum du polynôme à intégrer
1	0	2	1
2	$\pm \frac{1}{\sqrt{3}}$	1	3
3	0	$\frac{8}{9}$	5
	$\pm \sqrt{\frac{3}{5}}$	$\frac{5}{9}$	
4	$\pm \sqrt{\frac{3 - 2\sqrt{\frac{6}{5}}}{7}}$	$\frac{1}{2} + \frac{1}{6\sqrt{\frac{6}{5}}}$	7
	$\pm \sqrt{\frac{3 + 2\sqrt{\frac{6}{5}}}{7}}$	$\frac{1}{2} - \frac{1}{6\sqrt{\frac{6}{5}}}$	

Tableau 07 : point et coefficient de Gauss

V.6.1.4 – Assemblage et résolution du système global

Après le calcul de la matrice de rigidité élémentaire aux niveaux de chaque élément, il reste néanmoins à positionner chacun d'entre eux dans une matrice de rigidité globale [K], l'assemblage s'effectuera en positionnant chacune des matrices de rigidité élémentaire [K]_e en fonction des degrés de liberté des nœuds de l'élément considéré.

Après introduction des conditions limites (déplacement nuls ou imposés) on procède à la résolution du système :

$$[K] \{U\} = \{F\}$$

{U} : Champs de déplacement

{F} : Vecteur des forces global, obtenu par l'assemblage des vecteurs des forces nodaux {F_e}

Avec :

$$\{F_e\} = \iiint^e [N]^T \{X_e\} dV_e$$

$\{X_e\} = \{0, \gamma_e\}$ et γ_e est le poids propre d'élément par l'unité de volume, l'intégral redistribue la force verticale nette à tous les nœuds de l'élément.

V.6.2 - Champ de déformations

Une fois les déplacements sont connus, on peut calculer les déformations par la relation reliant le champ de déformation au champ de déplacement, qui est donnée par le tenseur de « Green » comme suit :

$$\{\epsilon\} = [\partial] \{u\} = [\partial] [N] \{u_e\} \Leftrightarrow \{\epsilon\} = [B] \{u_e\}$$

$$\text{avec } [\partial] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \text{ tenseur de Green}$$

V.6.3 - Contraintes

Les contraintes sont liées aux déformations à travers les lois de comportement, pour notre cas on retient la loi de comportement élastique linéaire, qui est caractérisée par une proportionnalité des contraintes avec les déformations, l'expression des contraintes sera comme suit :

$$[\sigma] = [D] \{ \epsilon \}$$

[D] matrice de comportement pour un problème de déformation plane

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}$$

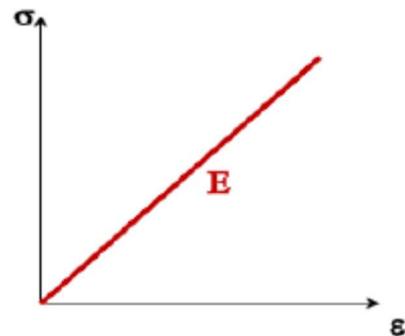


Figure 45 : Loi de comportement élastique linéaire

CHAPITRE VI

PRESENTATION DU PROGRAMME AVEC EXEMPLE DE CALCUL

Dans la première partie de ce chapitre est expliqué le programme élaboré, avec présentation d'un exemple simple de calcul

VI.1 - Présentation du programme de calcul

Pour étudier le comportement d'une paroi moulée et dans le but d'approfondir nos connaissances sur la méthode des éléments finis on va élaborer un programme numérique sous Visual Studio 2013 nommé **Parois2D** qui calcule les déplacements et les contraintes de la paroi, le modèle étudié sera modéliser en un problème 2D tout en supposant que le sol et la paroi ont un comportement élastique linéaire.

VI.1.1 - Architecture du programme

Le programme sera composé de deux sous-couches à savoir :

1. *Interface* : Elle gère les différentes boites de dialogue qui se vent à introduire les données, ainsi que l'interface graphique qui permet l'affichage des résultats
2. *Moteur de calcul* : Il gère le maillage, le calcul des déplacements nodaux et les contraintes et déformations au niveau des points de Gauss

La bibliothèque SFE01 est composée de plusieurs *Subroutines* à savoir :

- Dessiner.parois : elle dessine le sol et la paroi avant déplacement et après déplacement

- Maillage : elle effectue le maillage du sol et de la paroi

- Nature.element : elle identifie la nature de l'élément étant sol ou paroi

- Condition.limite : elle applique les conditions limite

- Modelisation : elle convoque les différentes subroutines pour modéliser le problème

- Triangularisation : Elle résoud le système globale

- Solution : Calcule les déplacements

- FormeD: Elle charge la matrice de comportement [D]

- Fmquad: elle charge les fonctions de formes et leurs dérivées partielles

- FormB : Elle charge la matrice [B]

- Matrice.vecteur.F : elle calcule la matrice de rigidité élémentaire et fait l'assemblage

- ContraiteDeformation : elle calcule les contraintes et les déformations

De plus le programme Parois2D contient des sous-routines et des fonctions qui gèrent l'affichage.

VI.1.2 - Maillage adopté

La modélisation surfacique nécessite une discrétisation fine. En effet et afin de coller au mieux à la géométrie, cette reconstitution requiert surtout au niveau de l'interface paroi-sol, des éléments de petites tailles. Cette opération est prise en charge par un outil appelé *Mailleur* dont le rôle va être d'établir automatiquement, dans le respect de la géométrie étudiée, la forme des éléments, leur connectivité et les coordonnées des nœuds. La taille et la forme des éléments peuvent varier significativement [17].

Pour l'élaboration de notre programme on a adopté une discrétisation à base d'éléments quadrangulaires à 8/ nœuds (Fig 45)

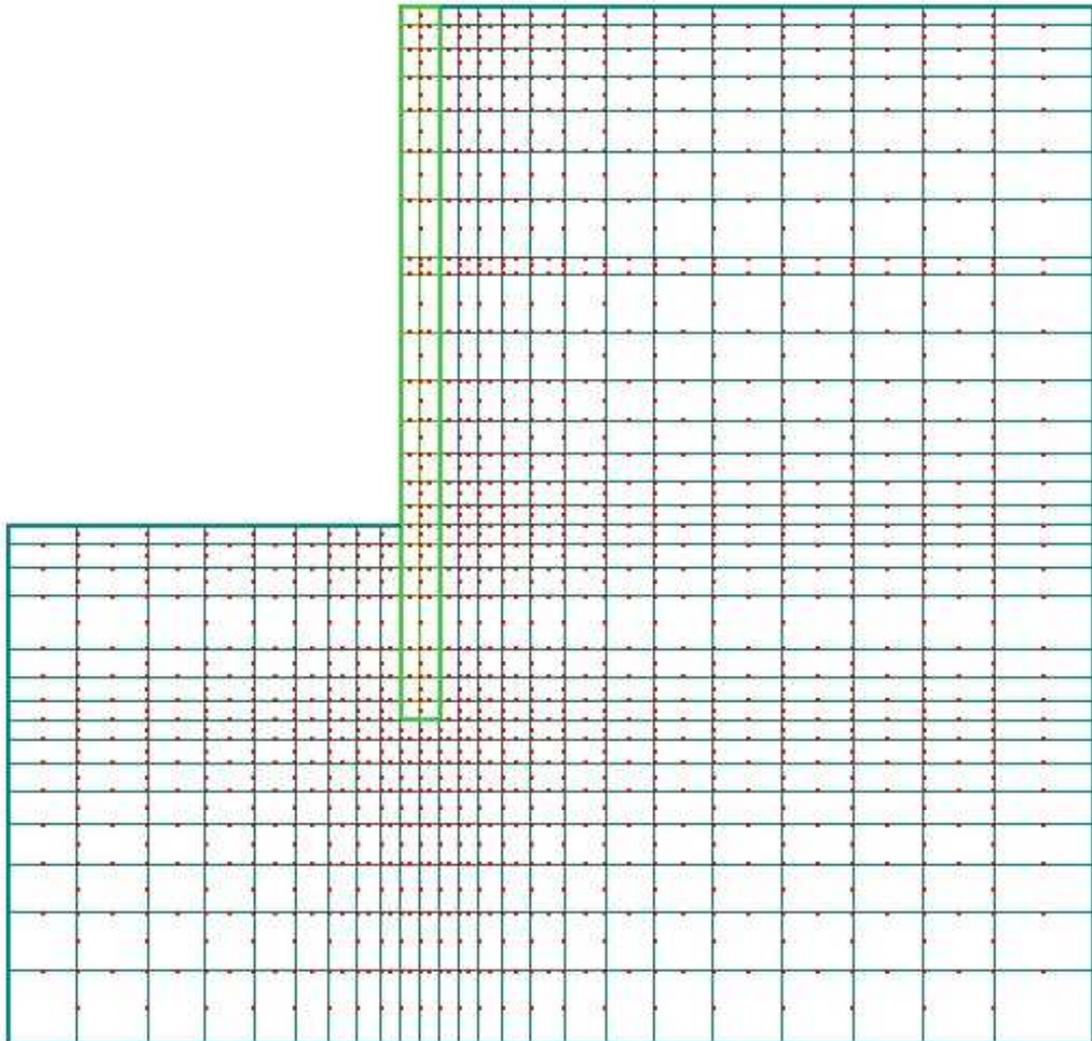


Figure 46 : Modèle du maillage adopté

VI.1.3 - Transformation géométrique

L'élément parent adopté dans l'élaboration de ce programme est un élément quadrangulaire iso-paramétrique à 8 nœuds.

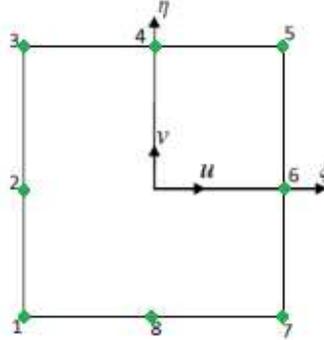


Figure 47 : élément parent iso-paramétriques

Les fonctions de forme et leurs dérivées partielles sont exprimées comme suit :

	$N_i =$	$\frac{\partial N}{\partial \xi}$	$\frac{\partial N}{\partial \eta}$
1	$-\frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta)(1+\xi+\eta)$	$\frac{1}{4}(1-\eta)(2\xi+\eta)$	$-\frac{1}{4}(1-\xi)(\xi+2\eta)$
2	$\frac{1}{2}(1-\xi)(1-\eta^2)$	$-\frac{1}{2}(1-\eta^2)$	$-\eta(1-\xi)$
3	$-\frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta)(1+\xi-\eta)$	$\frac{1}{4}(1+\eta)(2\xi-\eta)$	$-\frac{1}{4}(1-\xi)(\xi-2\eta)$
4	$\frac{1}{2}(1-\xi^2)(1+\eta)$	$-\xi(1+\eta)$	$\frac{1}{2}(1-\xi^2)$
5	$-\frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta)(1-\xi-\eta)$	$\frac{1}{4}(1+\eta)(2\xi+\eta)$	$\frac{1}{4}(1+\xi)(\xi+2\eta)$
6	$\frac{1}{2}(1+\xi)(1-\eta^2)$	$\frac{1}{2}(1-\eta^2)$	$-\eta(1+\xi)$
7	$-\frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta)(1-\xi+\eta)$	$\frac{1}{4}(1-\eta)(2\xi-\eta)$	$-\frac{1}{4}(1+\xi)(\xi-2\eta)$
8	$\frac{1}{2}(1-\xi^2)(1-\eta)$	$-\xi(1-\eta)$	$-\frac{1}{2}(1-\xi^2)$

Tableau 08 : Fonctions de formes et leurs dérivées partielles [17]

VI.2 - Manuel d'utilisation du programme

VI.2.1 - Fenêtre principale du programme

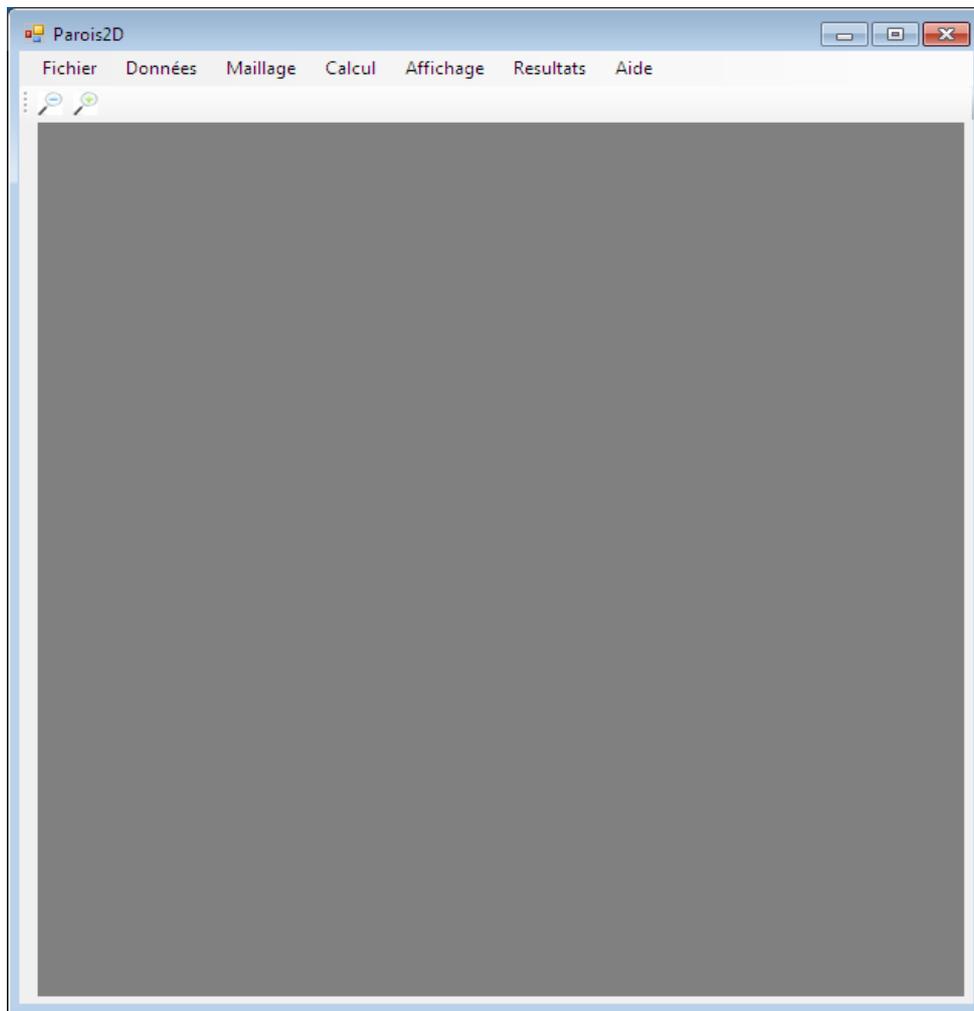


Figure 48 : Fenêtre principale du programme

Dans la fenêtre principale du programme on retrouve :

- La barre de menu du programme.
- La fenêtre d'affichage graphique.

VI.2.2 - Barre de menu du programme

Dans la barre de menu on trouve cinq sous menu :

1. Fichier
- 2- Données
3. Maillage
4. Calcul

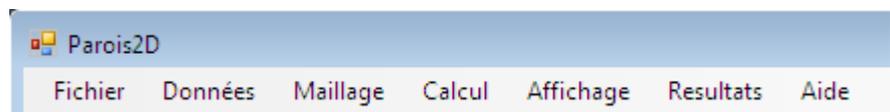


Figure 49 : Barre de menu du programme

5. Affichage
6. Résultats
7. Aide

1/ Dans le sous menu **Fichier** on trouve :

- Nouveau projet : Pour créer un nouveau projet
- Ouvrir un projet : Pour ouvrir un projet existant
- Enregistrer le projet : Pour enregistrée le projet répertoire
- Fermer : Pour fermer le programme

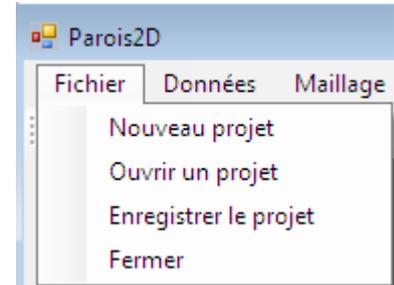


Figure 50 : sous menu **Fichier**

2/ Dans le sous menu **Données** on trouve :

- Géométrie : Afficher la boîte de dialogue (Fig51) pour saisir les dimensions
- Matériaux : Afficher les boîtes de dialogue pour saisir les caractéristiques du sol et de la paroi

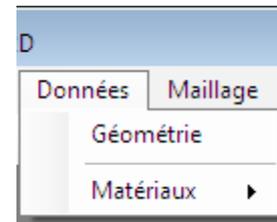


Figure 51 : sous menu **Données**

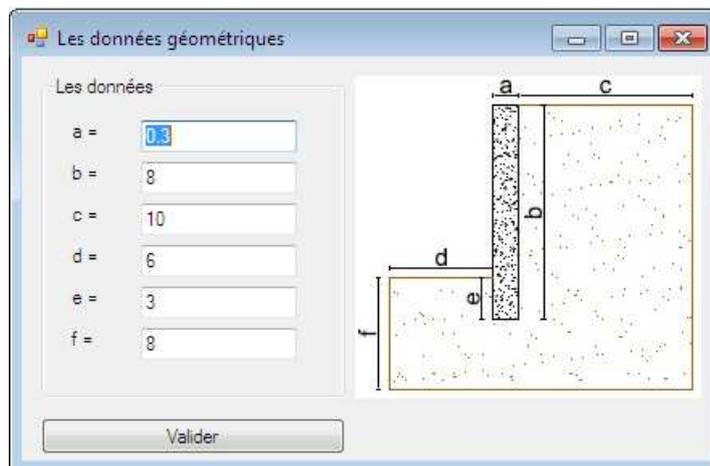


Figure 52 : Boîte de dialogue des dimensions

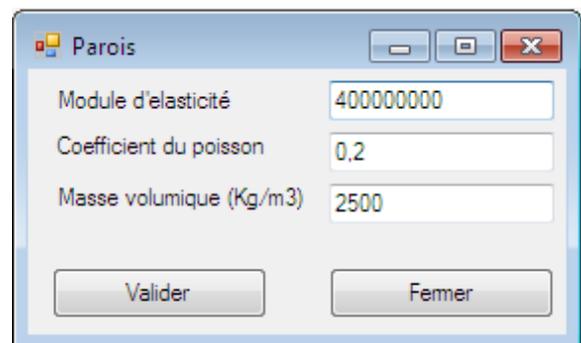
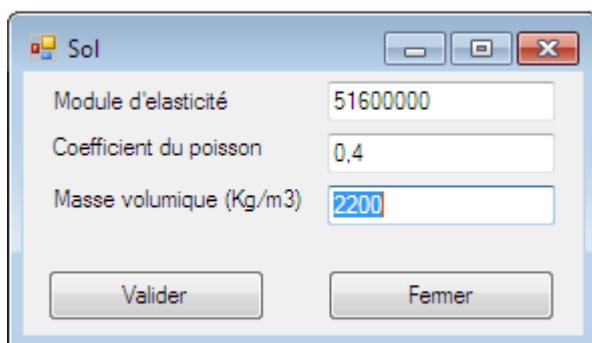


Figure 53 : Boîte de dialogue des caractéristiques

3/ Dans le sous menu **Maillage** on trouve :

- Données de maillage : Afficher la boîte de dialogue (Fig54) pour saisir l'élément de référence utilisé dans la discrétisation
- Créer le maillage : Elle lance le code de maillage et affiche le modèle après discrétisation

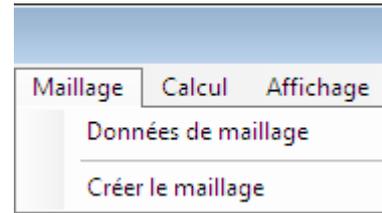


Figure 54 : sous menu **Maillage**

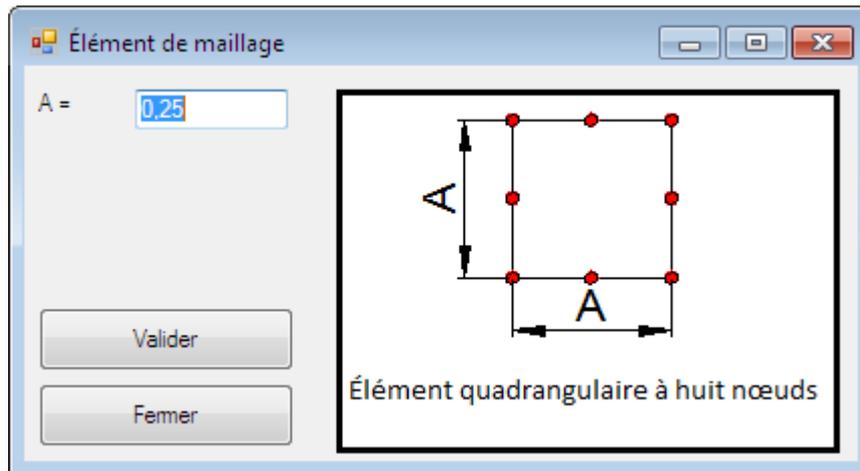


Figure 55 : Boite de dialogue élément de référence

4/ Dans le sous menu **Calcul** on trouve :

- Modélisation : Elle sert à effectuer le calcul et d'afficher les résultats graphiques.

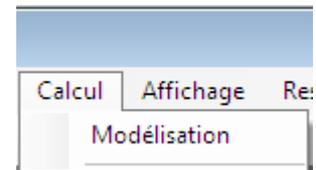


Figure 56 : sous menu **Calcul**

5/ Dans le sous menu **Affichage** on trouve :

- Structure originale : Affichage de la structure sans déplacement.
- Structure déplacée : Affichage de la structure après déplacement
- Nœuds : Affichage des nœuds
- Échelle de déplacement : Elle permet de choisir l'échelle d'affichage des déplacements.
- Contraintes : Affichage du diagramme des contraintes de la paroi

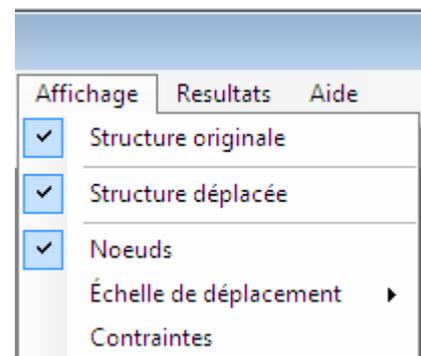


Figure 57 : sous menu **Affichage**

6/ Dans le sous menu **Résultats** on trouve :

- Afficher la boîte de dialogue qui communique les valeurs des déplacements

VI.3 – Exemple de calcul

Considérons une paroi moulée avec les dimensions suivantes :

$b = 08$ m, $e = 03$ m et une épaisseur $a = 70$ cm

Concernant les bords limites du sol par rapport à la paroi à prendre en considération il n'y a pas de règles qui les imposent mais des recommandations d'usage sont fortement recommandées (Fig 57)

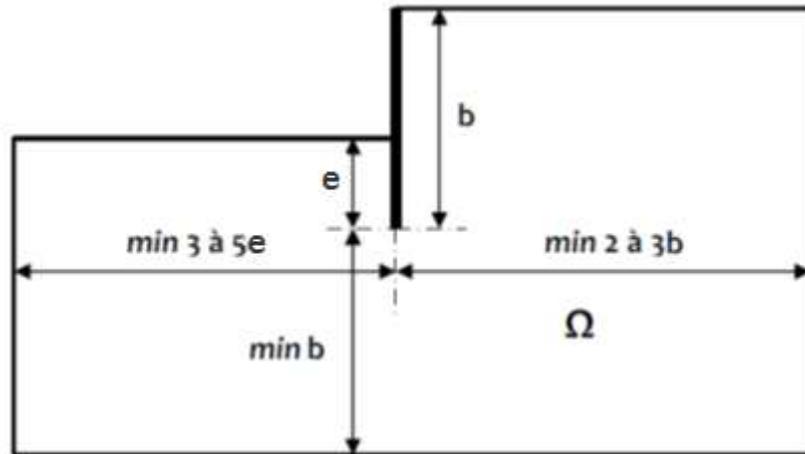


Figure 58 : Dimensions conseillées pour la modélisation d'une excavation et écran sans appuis

Donc on prend :

$$c = 2 * b = 16 \text{ m}$$

$$d = 3 * e = 9 \text{ m}$$

$$f = b + e = 11 \text{ m}$$

Comme on l'a déjà expliqué, on introduit les dimensions et les caractéristiques du sol et de la paroi, et on lance la modélisation, et on obtient :

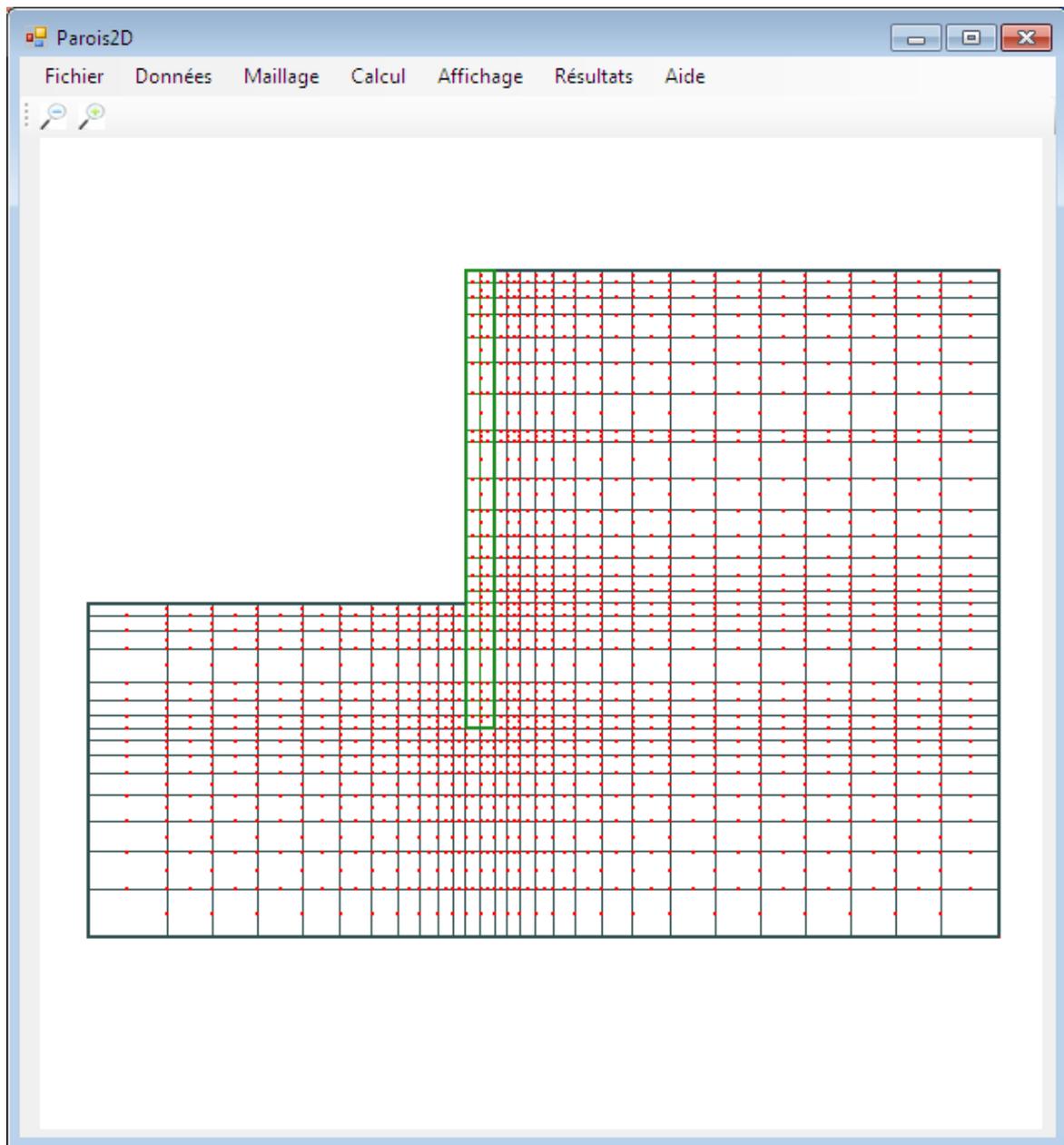


Figure 59 : Modèle discrétisé à base d'éléments quadrangulaires

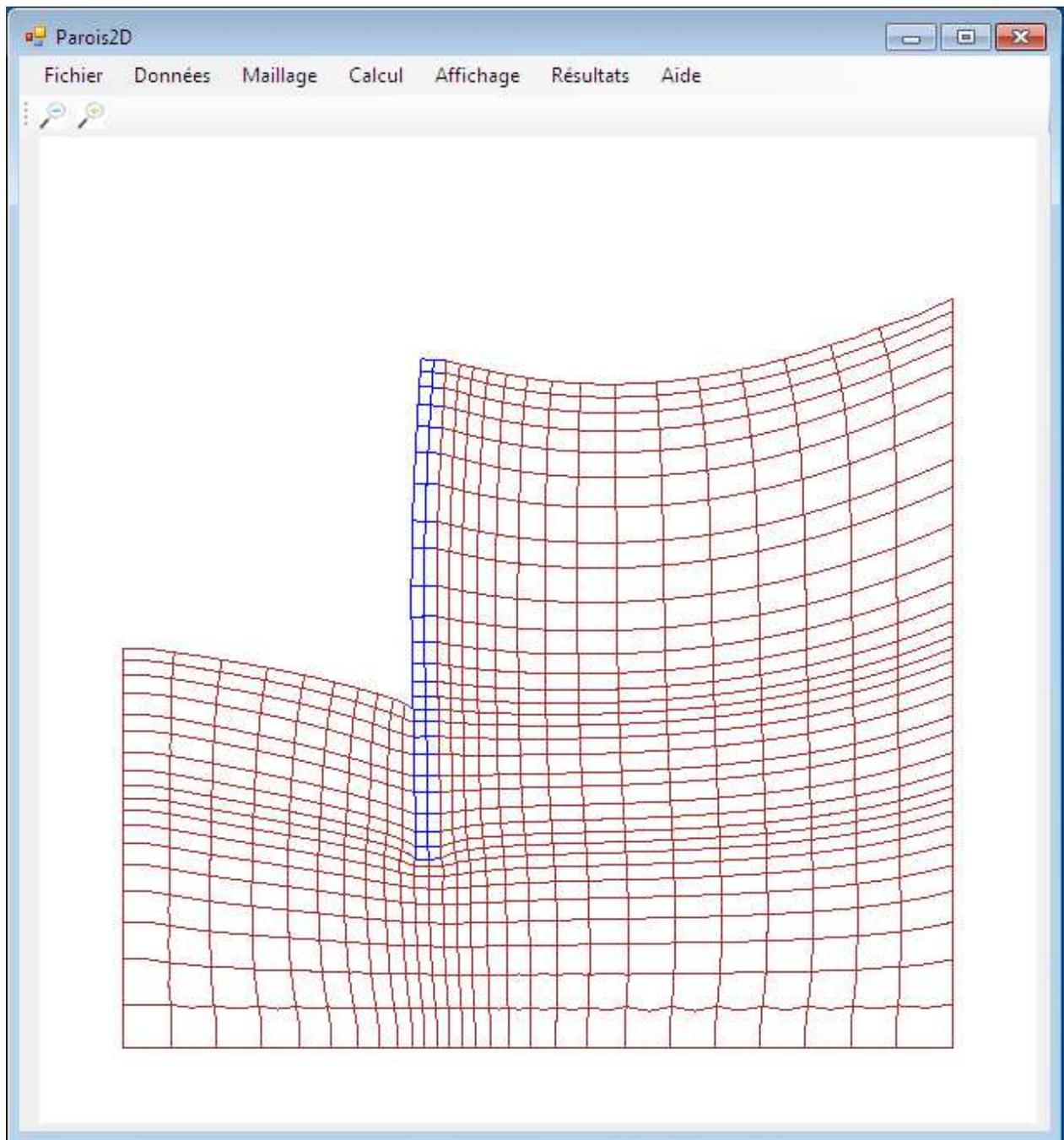


Figure 60 : Etat de déplacement paroi et sol, échelle x100

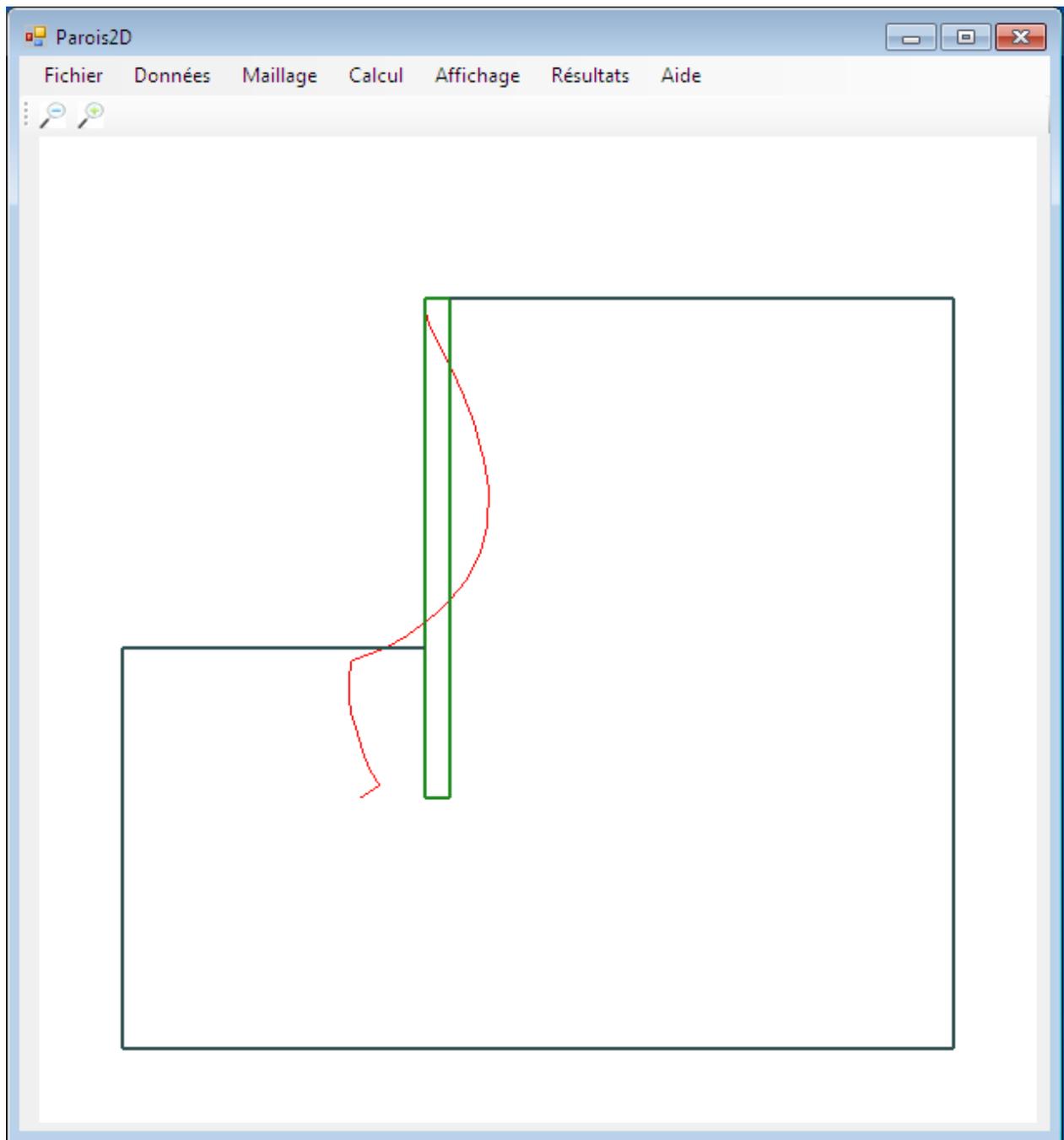


Figure 61 : Etat de contraintes sur le profil de la paroi

CONCLUSION

CONCLUSION GENERALE.

L'étude et le dimensionnement des parois moulées peuvent se faire avec les trois méthodes précitées à savoir, la méthode aux états d'équilibres limites, la méthode au coefficient de réaction du sol et la méthode numérique, mais seule la méthode numérique utilisant les éléments finis peut être utilisée pour tous les types de parois, avec une modélisation globale du sol et de la paroi et une prise en charge de leurs comportements le plus réel possible.

Pour cela la méthode aux états d'équilibres limites est généralement utilisée pour pré dimensionner la paroi au stade de l'avant-projet d'un ouvrage du fait de sa simplicité, par contre au stade du projet d'exécution les deux méthodes au coefficient de réaction du sol et numérique sont utilisées avec une préférence pour la méthode numérique pour les raisons évoquées précédemment.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **BOUAFIA.A (2010)** «Conception et calcul des ouvrages géotechniques», Eurl Pages Bleues Internationales
- [2] **MELBOUCI. BACHIR (2009)** « Méthode de calcul de stabilité des fondations, des talus et des ouvrages de soutènement »
- [3] **A GUERRIN ET R.C. LAVAUUR (1976)** « Traité de béton armé : Murs de soutènement et murs de quai », DUNOD
- [4] **FRONCOIS SCHLOSSER (1991)**, “Murs de soutènement”, Techniques de l’Ingénieur, Traité Construction Volume C 244, Paris
- [5] **RPA 99 / VERSION 2003** « Règles parasismiques algériennes »
- [6] **EUROCODE 7** « Calcul géotechnique »
- [7] **PS 92**« Règles de construction parasismique »
- [8] **Normes NF P94-282** « calcul géotechnique, ouvrages de soutènement, écran »
- [9] **ROUABEH.A (2013)** « Comportement d’un mur de soutènement sous chargement sismique », Thèse de magistère université de Boumerdes
- [10] **SAADI.R** « modélisation numérique d’une paroi de soutènement en zone urbaines (paramètres caractéristiques d’interaction) », Thèse de magistère université de Batna
- [11] **CHOGUEUR.A (2013)** « Modélisation numérique d’un écran de soutènement, cas de l’interaction écran-fondation », Thèse de magistère université de Tlemcen
- [12] **HIRANE.H (2015)** « Evaluation de la pression dynamique active sur les murs de soutènement par approche numérique », Thèse de magistère université de Constantine
- [13] **J-B.KAZMIERCZAK (1996)** « Comportement et dimensionnement des parois moulées dans les argiles raides saturées », Thèse de doctorat université de Lille
- [14] **K-C.Vossoughi (2001)** « Etude numérique du comportement des ouvrages de soutènement à la rupture » Thèse de doctorat école centrale de Paris
- [15] **Bulletin technique de la suisse romande du 11/07/1964**

- [16] **I.M.SMITH AND D.V GRIFFITHS (1982)**, Programming the finite element method,
2eme edition
- [17] **Michel Cazenave (2010)**, Méthode des éléments finis, Approche pratique en mécanique des
structures, DUNOD
- [18] **BAKHTI.R (2014)** « Analyse par éléments finis des pieux isolés sous sollicitations verticales
et horizontales prise en compte de l'interface sol/pieu », Thèse de magistère université
de Médéa
- [19] **KHEBIZI.M (2006)** « Influence des glissements de terrain de la cite Boussouf (Constantine)
sur les constructions », Thèse de magistère université de Biskra
- [20] **A.CHATEAUNEUF (2005)**, « Comprendre les éléments finis », Ellipses

Code numérique du programme Parois 2D

```
Imports OpenTK
Imports OpenTK.Platform
Imports OpenTK.Graphics.OpenGL
Imports System
Imports System.Drawing
Imports System.Drawing.Drawing2D
Imports System.Drawing.Imaging
```

Public Class Parois2DMoteur**Structure Elements**

```
Dim Noeud() As Integer
```

```
Dim nature As String
```

End Structure**Structure Point**

```
Dim coord() As Double
```

End Structure**Structure ligne**

```
Dim DEP As Point
```

```
Dim FIN As Point
```

```
Dim FIX As Double
```

End Structure**Structure ContranGauss**

```
Dim DeformX As Double
```

```
Dim DeformY As Double
```

```
Dim DeformXY As Double
```

```
Dim ContraintX As Double
```

```
Dim ContraintY As Double
```

```
Dim ContraintXY As Double
```

End Structure**Structure contrainteStr**

```
Dim GaussPoint() As ContranGauss
```

End Structure

```
Public a As Double
```

```
Public b As Double
```

```
Public c As Double
```

```
Public d As Double
```

```
Public e As Double
```

```
Public f As Double
```

```
Public Xmin As Double
```

```
Public Xmax As Double
```

```
Public Ymin As Double
```

```
Public Ymax As Double
```

```
Public echelle As Double
```

```
Public MaillageRef As Double
```

```
Public Element() As Elements
```

```
Public Noeud() As Point
```

```
Public watch As New Stopwatch
```

```
Public StructureDeplacee As Boolean
```

```
Public StructureOriginale As Boolean
```

```
Public AffichageNoeuds, CalculContraintDefoemation As Boolean
```

```

Dim NoeudRef As Integer
Public ContraintsDeformations() As constraintStr
Dim Nq, IndexNoued(), VecteurConditionsLimites(), ngp, ProfilParoi() As Integer
Public Deplacement(), Force(), Rigidite(,) As Double
Public Esol, Vsol, RHOSol, Eparois, Vparois, RHOParois, ZoomDeplacement As Double
Dim samp(3, 2), DEE(3, 3), DERIV(2, 8), BEE(3, 16), FUN(8), DER(2, 8), jac(2, 2), jac1(2, 2),
FonctionForm(2, 16) As Double

```

Public Sub Dimension()

```

Xmin = -0.1 * (a + c + d)
Xmax = 1.1 * (a + c + d)
Ymin = -0.1 * (b + f)
Ymax = (b + f) * 1.1

```

End Sub

Private Sub ConfigurationGL(w As Integer, h As Integer)

```

Dim LX, LY As Double
LX = Xmax - Xmin
LY = Ymax - Ymin
echelle = w / LX
If echelle > h / LY Then echelle = h / LY
GL.MatrixMode(MatrixMode.Projection)
GL.Ortho(Xmin, Xmin + w / echelle, Ymin, Ymin + h / echelle, -1, 1)
GL.Viewport(0, 0, w, h)

```

End Sub

Public Sub DessignerParois(Couleur As Color, w As Integer, h As Integer)

```

GL.ClearColor(Color.White)
GL.Clear(ClearBufferMask.ColorBufferBit)
GL.LoadIdentity()
Call ConfigurationGL(w, h)
If StructureDeplacee Then
  GL.PushMatrix()
  Dim u, v As Single
  For l = 0 To longVect(Element)
    If Element(l).nature = "Sol" Then GL.Color3(Color.Brown)
    If Element(l).nature = "Parois" Then GL.Color3(Color.Blue)
    GL.Begin(PrimitiveType.LineLoop)
    For j = 1 To 8
      u = 0
      v = 0
      If IndexNoued(2 * (Element(l).Noeud(j) + 1) - 1) <> -1 Then
        u = Deplacement(IndexNoued(2 * (Element(l).Noeud(j) + 1) - 2))
        v = Deplacement(IndexNoued(2 * (Element(l).Noeud(j) + 1) - 1))
        u = u * ZoomDeplacement
        v = v * ZoomDeplacement
      End If
      GL.Vertex2(Noeud(Element(l).Noeud(j)).coord(1) + u, Noeud(Element(l).Noeud(j)).coord(2) +
v)
    Next
    GL.End()
  Next
  GL.PopMatrix()
End If
If CalculContraintDefoemation Then
  GL.PushMatrix()

```

```

GL.Color3(Color.Red)
GL.Begin(PrimitiveType.LineStrip)
For I = 0 To longVect(ProfilParoi)
    GL.Vertex2((-1 * ContraintsDeformations(ProfilParoi(I)).GaussPoint(1).ContraintX / 1000) + d,
Noeud(Element(ProfilParoi(I)).Noeud(3)).coord(2))
    GL.Vertex2((-1 * ContraintsDeformations(ProfilParoi(I)).GaussPoint(1).ContraintX / 1000) + d,
Noeud(Element(ProfilParoi(I)).Noeud(3)).coord(2))
Next
GL.End()
GL.PopMatrix()
GL.PushMatrix()
GL.LineWidth(2)
GL.Color3(Color.ForestGreen)
'parois
GL.Begin(PrimitiveType.LineLoop)
GL.Vertex2(d, b + f)
GL.Vertex2(d, f - e)
GL.Vertex2(d + a, f - e)
GL.Vertex2(d + a, b + f)
GL.End()
'sol
GL.Color3(Color.DarkSlateGray)
GL.Begin(PrimitiveType.LineStrip)
GL.Vertex2(d, f)
GL.Vertex2(0, f)
GL.Vertex2(0, 0)
GL.Vertex2(d + a + c, 0)
GL.Vertex2(d + a + c, b + f)
GL.Vertex2(d + a, b + f)
GL.End()
GL.LineWidth(1)
GL.PopMatrix()
End If
If StructureOriginale Then
    GL.PushMatrix()
    For I = 0 To longVect(Element)
        If Element(I).nature = "Sol" Then GL.Color3(Color.DarkSlateGray)
        If Element(I).nature = "Parois" Then GL.Color3(Color.ForestGreen)
        GL.Begin(PrimitiveType.LineLoop)
        For j = 1 To 8
            GL.Vertex2(Noeud(Element(I).Noeud(j)).coord(1), Noeud(Element(I).Noeud(j)).coord(2))
        Next
        GL.End()
    Next
    GL.PopMatrix()
    'Noeuds
    If AffichageNoeuds Then
        GL.PushMatrix()
        GL.PointSize(2)
        GL.Color3(Color.Red)
        GL.Begin(PrimitiveType.Points)
        For I = 0 To longVect(Noeud)
            GL.Vertex2(Noeud(I).coord(1), Noeud(I).coord(2))
        Next
    End If
End If

```

```

    GL.End()
    GL.PopMatrix()
End If
' structure globale
GL.PushMatrix()
GL.LineWidth(2)
GL.Color3(Color.ForestGreen)
'parois
GL.Begin(PrimitiveType.LineLoop)
GL.Vertex2(d, b + f)
GL.Vertex2(d, f - e)
GL.Vertex2(d + a, f - e)
GL.Vertex2(d + a, b + f)
GL.End()
'sol
GL.Color3(Color.DarkSlateGray)
GL.Begin(PrimitiveType.LineStrip)
GL.Vertex2(d, f)
GL.Vertex2(0, f)
GL.Vertex2(0, 0)
GL.Vertex2(d + a + c, 0)
GL.Vertex2(d + a + c, b + f)
GL.Vertex2(d + a, b + f)
GL.End()
GL.LineWidth(1)
GL.PopMatrix()
End If
End Sub
Private Sub compariason(ByRef x As Single, y As Single)
    If Math.Abs(x - y) < 0.0001 Then x = y
End Sub
Private Sub classementParOrdre(ByRef vect() As ligne)
    Dim vect2() As ligne
    Dim Vref() As Long
    ReDim Vref(0)
    Dim min(1) As Single
50:
    min(0) = 9999999999.0#
    For i = 0 To longVect(vect)
        For ii = 1 To UBound(Vref)
            If Vref(ii) = i Then GoTo 100
        Next
        If vect(i).FIX < min(0) Then
            min(0) = vect(i).FIX
            min(1) = i
        End If
100:
    Next
    ReDim Preserve vect2(longVect(vect2) + 1)
    vect2(longVect(vect2)) = vect(min(1))
    If longVect(vect2) = longVect(vect) Then GoTo 200
    ReDim Preserve Vref(UBound(Vref) + 1)
    Vref(UBound(Vref)) = min(1)
    GoTo 50

```

```

200:
  For i = 0 To longVect(vect2)
    vect(i) = vect2(i)
  Next
End Sub
Private Sub classementParOrdreVecteur(ByRef vect() As Integer)
  Dim vect2() As Integer
  Dim Vref() As Long
  ReDim Vref(0)
  Dim min(1) As Single
50:
  min(0) = 9999999999.0#
  For i = 0 To longVect(vect)
    For ii = 1 To UBound(Vref)
      If Vref(ii) = i Then GoTo 100
    Next
    If vect(i) < min(0) Then
      min(0) = vect(i)
      min(1) = i
    End If
100:
  Next
  ReDim Preserve vect2(longVect(vect2) + 1)
  vect2(longVect(vect2)) = vect(min(1))
  If longVect(vect2) = longVect(vect) Then GoTo 200
  ReDim Preserve Vref(UBound(Vref) + 1)
  Vref(UBound(Vref)) = min(1)
  GoTo 50
200:
  For i = 0 To longVect(vect2)
    vect(i) = vect2(i)
  Next
End Sub
Public Sub Maillage()
  Call MaillageZone01()
  Call MaillageZone02()
  Nq = 2 * (longVect(Noeud) + 1) - 1
  ReDim IndexNoued(Nq)
  For i = 0 To Nq
    IndexNoued(i) = i
  Next
  ReDim Deplacement(Nq)
  ReDim Force(Nq)
  ReDim Rigidite(Nq, Nq)
End Sub
Private Sub MaillageZone01()
  Dim ligneV() As ligne
  Dim ligneH() As ligne
  Dim V As Single
  Dim H As Single

  V = MaillageRef
  Dim i As Single
  i = d

```

```

Do
  Call compariason(i, 0)
  If i <= 0 Then i = 0
  ReDim Preserve ligneV(longVect(ligneV) + 1)
  ligneV(longVect(ligneV)).FIX = i
  If i <= 0 Then Exit Do
  i = i - V
  If V < 3 * MaillageRef Then V = V * 1.2
  If i < 0.833 * V Then i = 0
Loop
H = MaillageRef
If H = 0 Then H = 1
i = f
Do
  Call compariason(i, f - e / 2)
  ReDim Preserve ligneH(longVect(ligneH) + 1)
  ligneH(longVect(ligneH)).FIX = i
  i = i - H
  If i <= f - e / 2 Then Exit Do
  If H < 3 * MaillageRef Then H = H * 1.2
Loop
H = MaillageRef
If H = 0 Then H = 1
i = f - e + H
H = H * 1.2
Do
  Call compariason(i, f - e / 2)
  ReDim Preserve ligneH(longVect(ligneH) + 1)
  ligneH(longVect(ligneH)).FIX = i
  i = i + H
  If i >= f - e / 2 Then Exit Do
  If H < 3 * MaillageRef Then H = H * 1.2
Loop
H = MaillageRef
If H = 0 Then H = 1
i = f - e
Do
  Call compariason(i, 0)
  If i <= 0 Then i = 0
  ReDim Preserve ligneH(longVect(ligneH) + 1)
  ligneH(longVect(ligneH)).FIX = i
  If i <= 0 Then Exit Do
  i = i - H
  If H < 3 * MaillageRef Then H = H * 1.2
  If i < 0.833 * H Then i = 0
Loop
Call classementParOrdre(ligneV)
Call classementParOrdre(ligneH)
Dim NEX As Integer
Dim NEY As Integer
NEX = longVect(ligneV)
NEY = longVect(ligneH)
Dim j As Integer

```

```

'noeuds
For j = 0 To NEX
  If j = NEX Then
    NoeudRef = longVect(Noeud) + 1
    Exit For
  End If
For k = 0 To NEY
  If j = 0 Or k = 0 Then
    ReDim Preserve VecteurConditionsLimites(longVect(VecteurConditionsLimites) + 1)
    VecteurConditionsLimites(longVect(VecteurConditionsLimites)) = longVect(Noeud) + 1
  End If
  ReDim Preserve Noeud(longVect(Noeud) + 1)
  ReDim Preserve Noeud(longVect(Noeud)).coord(2)
  Noeud(longVect(Noeud)).coord(1) = ligneV(j).FIX
  Noeud(longVect(Noeud)).coord(2) = ligneH(k).FIX
  If k <> NEY Then
    If j = 0 Or k = 0 Then
      ReDim Preserve VecteurConditionsLimites(longVect(VecteurConditionsLimites) + 1)
      VecteurConditionsLimites(longVect(VecteurConditionsLimites)) = longVect(Noeud) + 1
    End If
    ReDim Preserve Noeud(longVect(Noeud) + 1)
    ReDim Preserve Noeud(longVect(Noeud)).coord(2)
    Noeud(longVect(Noeud)).coord(2) = (ligneH(k).FIX + ligneH(k + 1).FIX) / 2
    Noeud(longVect(Noeud)).coord(1) = ligneV(j).FIX
  End If
Next
If j <> NEX Then
  For k = 0 To NEY
    If j = 0 Or k = 0 Then
      ReDim Preserve VecteurConditionsLimites(longVect(VecteurConditionsLimites) + 1)
      VecteurConditionsLimites(longVect(VecteurConditionsLimites)) = longVect(Noeud) + 1
    End If

    ReDim Preserve Noeud(longVect(Noeud) + 1)
    ReDim Preserve Noeud(longVect(Noeud)).coord(2)
    Noeud(longVect(Noeud)).coord(2) = ligneH(k).FIX
    Noeud(longVect(Noeud)).coord(1) = (ligneV(j).FIX + ligneV(j + 1).FIX) / 2
  Next
End If
Next
'les elements
For ip = 1 To NEX
  For iq = 1 To NEY
    ReDim Preserve Element(longVect(Element) + 1)
    ReDim Preserve Element(longVect(Element)).Noeud(8)
    Element(longVect(Element)).Noeud(1) = ip * (3 * NEY + 2) + 2 * iq - 2
    Element(longVect(Element)).Noeud(2) = ip * (3 * NEY + 2) + iq - NEY - 2
    Element(longVect(Element)).Noeud(3) = (ip - 1) * (3 * NEY + 2) + 2 * iq - 2
    Element(longVect(Element)).Noeud(4) = Element(longVect(Element)).Noeud(3) + 1
    Element(longVect(Element)).Noeud(5) = Element(longVect(Element)).Noeud(4) + 1
    Element(longVect(Element)).Noeud(6) = Element(longVect(Element)).Noeud(2) + 1
    Element(longVect(Element)).Noeud(7) = Element(longVect(Element)).Noeud(1) + 2
    Element(longVect(Element)).Noeud(8) = Element(longVect(Element)).Noeud(1) + 1
    Element(longVect(Element)).nature = "Sol"
  Next
Next

```

```

    Next
  Next
End Sub
Private Function NatureElement(el As Integer) As String
  NatureElement = "Parois"
  For i = 1 To 8
    If DansParois(Noeud(Element(el).Noeud(i)).coord(1), Noeud(Element(el).Noeud(i)).coord(2)) =
      False Then GoTo 100
  Next
  Exit Function
100:
  NatureElement = "Sol"
End Function
Private Function DansParois(X As Double, Y As Double) As Boolean
  DansParois = False
  If X > d Or Math.Abs(X - d) < 0.001 Then
    If X < d + a Or Math.Abs(X - d - a) < 0.001 Then
      If Y > f - e Or Math.Abs(Y - f + e) < 0.001 Then
        If Y < f + b Or Math.Abs(Y - f - b) < 0.001 Then
          DansParois = True
        End If
      End If
    End If
  End If
End Function
Private Sub MaillageZone02()
  Dim ligneV() As ligne
  Dim ligneH() As ligne
  Dim V As Single
  Dim VERIFICATION As Boolean
  Dim H As Single
  V = Int(a / MaillageRef)
  V = a / V
  Dim i As Single
  i = d
  VERIFICATION = False
  Do
    Call compariason(i, d + a)
    If i >= d + a Then
      i = d + a
      VERIFICATION = True
    End If
    ReDim Preserve ligneV(longVect(ligneV) + 1)
    ligneV(longVect(ligneV)).FIX = i
    If i >= d + a Or VERIFICATION Then Exit Do
    i = i + V
  Loop
  V = MaillageRef
  i = d + a + V
  Do
    Call compariason(i, d + a + c)
    If i >= d + a + c Then i = d + a + c
    ReDim Preserve ligneV(longVect(ligneV) + 1)
    ligneV(longVect(ligneV)).FIX = i

```

```

If Math.Abs(i - d - a - c) < 0.0001 Then Exit Do
i = i + V
If V < 3 * MaillageRef Then V = V * 1.2
If d + a + c - i < 0.833 * V Then i = d + a + c
Loop
H = MaillageRef
If H = 0 Then H = 1
i = f + b
Do
  Call compariason(i, f + b / 2)
  ReDim Preserve ligneH(longVect(ligneH) + 1)
  ligneH(longVect(ligneH)).FIX = i
  i = i - H
  If i <= f + b / 2 Then Exit Do
  If H < 3 * MaillageRef Then H = H * 1.2
Loop
H = MaillageRef
If H = 0 Then H = 1
i = f + H
H = H * 1.2
Do
  Call compariason(i, f + b / 2)
  ReDim Preserve ligneH(longVect(ligneH) + 1)
  ligneH(longVect(ligneH)).FIX = i
  i = i + H
  If i >= f + b / 2 Then Exit Do
  If H < 3 * MaillageRef Then H = H * 1.2
Loop
H = MaillageRef
If H = 0 Then H = 1
i = f
Do
  Call compariason(i, f - e / 2)
  ReDim Preserve ligneH(longVect(ligneH) + 1)
  ligneH(longVect(ligneH)).FIX = i
  i = i - H
  If i <= f - e / 2 Then Exit Do
  If H < 3 * MaillageRef Then H = H * 1.2
Loop
H = MaillageRef
If H = 0 Then H = 1
i = f - e + H
H = H * 1.2
Do
  Call compariason(i, f - e / 2)
  ReDim Preserve ligneH(longVect(ligneH) + 1)
  ligneH(longVect(ligneH)).FIX = i
  i = i + H
  If i >= f - e / 2 Then Exit Do
  If H < 3 * MaillageRef Then H = H * 1.2
Loop
H = MaillageRef
If H = 0 Then H = 1
i = f - e

```

```

Do
  Call compariason(i, 0)
  If i <= 0 Then i = 0
  ReDim Preserve ligneH(longVect(ligneH) + 1)
  ligneH(longVect(ligneH)).FIX = i
  If i <= 0 Then Exit Do
  i = i - H
  If H < 3 * MaillageRef Then H = H * 1.2
  If i < 0.833 * H Then i = 0
Loop
Call classementParOrdre(ligneV)
Call classementParOrdre(ligneH)
Dim NEX As Integer
Dim NEY As Integer
NEX = longVect(ligneV)
NEY = longVect(ligneH)
Dim j As Integer
'noeuds
For j = 0 To NEX
  For k = 0 To NEY
    If j = NEX Or k = 0 Then
      ReDim Preserve VecteurConditionsLimites(longVect(VecteurConditionsLimites) + 1)
      VecteurConditionsLimites(longVect(VecteurConditionsLimites)) = longVect(Noeud) + 1
    End If
    ReDim Preserve Noeud(longVect(Noeud) + 1)
    ReDim Preserve Noeud(longVect(Noeud)).coord(2)
    Noeud(longVect(Noeud)).coord(1) = ligneV(j).FIX
    Noeud(longVect(Noeud)).coord(2) = ligneH(k).FIX
    If k <> NEY Then
      If j = NEX Or k = 0 Then
        ReDim Preserve VecteurConditionsLimites(longVect(VecteurConditionsLimites) + 1)
        VecteurConditionsLimites(longVect(VecteurConditionsLimites)) = longVect(Noeud) + 1
      End If
      ReDim Preserve Noeud(longVect(Noeud) + 1)
      ReDim Preserve Noeud(longVect(Noeud)).coord(2)
      Noeud(longVect(Noeud)).coord(2) = (ligneH(k).FIX + ligneH(k + 1).FIX) / 2
      Noeud(longVect(Noeud)).coord(1) = ligneV(j).FIX
    End If
  Next
  If j <> NEX Then
    For k = 0 To NEY
      If j = NEX Or k = 0 Then
        ReDim Preserve VecteurConditionsLimites(longVect(VecteurConditionsLimites) + 1)
        VecteurConditionsLimites(longVect(VecteurConditionsLimites)) = longVect(Noeud) + 1
      End If
      ReDim Preserve Noeud(longVect(Noeud) + 1)
      ReDim Preserve Noeud(longVect(Noeud)).coord(2)
      Noeud(longVect(Noeud)).coord(2) = ligneH(k).FIX
      Noeud(longVect(Noeud)).coord(1) = (ligneV(j).FIX + ligneV(j + 1).FIX) / 2
    Next
  End If
Next
Call classementParOrdreVecteur(VecteurConditionsLimites)
'les elements

```

```

For ip = 1 To NEX
  For iq = 1 To NEY
    ReDim Preserve Element(longVect(Element) + 1)
    ReDim Preserve Element(longVect(Element)).Noeud(8)
    Element(longVect(Element)).Noeud(1) = NoeudRef + ip * (3 * NEY + 2) + 2 * iq - 2
    Element(longVect(Element)).Noeud(2) = NoeudRef + ip * (3 * NEY + 2) + iq - NEY - 2
    Element(longVect(Element)).Noeud(3) = NoeudRef + (ip - 1) * (3 * NEY + 2) + 2 * iq - 2
    Element(longVect(Element)).Noeud(4) = Element(longVect(Element)).Noeud(3) + 1
    Element(longVect(Element)).Noeud(5) = Element(longVect(Element)).Noeud(4) + 1
    Element(longVect(Element)).Noeud(6) = Element(longVect(Element)).Noeud(2) + 1
    Element(longVect(Element)).Noeud(7) = Element(longVect(Element)).Noeud(1) + 2
    Element(longVect(Element)).Noeud(8) = Element(longVect(Element)).Noeud(1) + 1
    Element(longVect(Element)).nature = NatureElement(longVect(Element))
    If Element(longVect(Element)).nature = "Parois" And ip = 1 Then
      ReDim Preserve ProfilParoi(longVect(ProfilParoi) + 1)
      ProfilParoi(longVect(ProfilParoi)) = longVect(Element)
    End If
  Next
Next
Next
End Sub
Private Sub conditionlimite()
  Dim i As Integer
  Dim ligne As Integer
  For i = longVect(VecteurConditionsLimites) To 0 Step -1
    ligne = 2 * (VecteurConditionsLimites(i) + 1) - 1
    Call condlim(ligne)
    ligne = 2 * (VecteurConditionsLimites(i) + 1) - 2
    Call condlim(ligne)
  Next
End Sub
Private Sub condlim(ligne As Integer)
  IndexNoued(ligne) = -1
  For i = ligne + 1 To 2 * (longVect(Noeud) + 1) - 1
    If IndexNoued(i) <> -1 Then IndexNoued(i) = IndexNoued(i) - 1
  Next
  Nq = Nq - 1
End Sub
Private Sub gauss(cas As Long)
  Select Case cas
    Case 1
      samp(1, 1) = 0
      samp(1, 2) = 2
    Case 2
      samp(1, 1) = 1 / Math.Sqrt(3)
      samp(2, 1) = -samp(1, 1)
      samp(1, 2) = 1
      samp(2, 2) = 1
    Case 3
      samp(1, 1) = 0.2 * Math.Sqrt(15)
      samp(2, 1) = 0
      samp(3, 1) = -samp(1, 1)
      samp(1, 2) = 5 / 9
      samp(2, 2) = 8 / 9
      samp(3, 2) = samp(1, 2)
  End Select

```

```

End Select
End Sub
Public Sub Modelisation()
  watch.Reset()
  watch.Start()
  Dim i As Integer
  Call conditionlimite()
  ReDim Deplacement(Nq)
  ReDim Force(Nq)
  ReDim Rigidite(Nq, Nq)
  ngp = 2
  Call gauss(ngp)
  ' FORMULATION ET L ASSEMBLAGE DE LA MATRICE DE RIGIDITE ET LE VECTEUR DES FORCES
  For i = 0 To longVect(Element)
    If Element(i).nature = "Parois" Then
      Call MatriceKvecteurF(i, Eparois, Vparois, RHOpairois)
    End If
    If Element(i).nature = "Sol" Then
      Call MatriceKvecteurF(i, Esol, Vsol, RHOsol)
    End If
  Next
  Call déplacements()
  ReDim ContraintsDeformations(longVect(Element))
  For el = 0 To longVect(Element)
    Call ContraiteDeformation(el)
  Next
  CalculContraintDefoemation = True
  watch.Stop()
End Sub
Private Sub ContraiteDeformation(el As Integer)
  Dim ELD(16), X, Det, EPS(3), SIGMA(3) As Double
  Dim kgaus, FF As Integer
  For kk = 1 To 8
    If IndexNoued(2 * (Element(el).Noeud(kk) + 1) - 1) <> -1 Then
      ELD(2 * kk - 1) = Deplacement(IndexNoued(2 * (Element(el).Noeud(kk) + 1) - 2))
      ELD(2 * kk) = Deplacement(IndexNoued(2 * (Element(el).Noeud(kk) + 1) - 1))
    Else
      ELD(2 * kk - 1) = 0
      ELD(2 * kk) = 0
    End If
  Next
  kgaus = 0
  For i = 1 To ngp
    For j = 1 To ngp
      kgaus = kgaus + 1
      Call fmquad(i, j)
      'formulation de la matrice jacobéenne
      For ii = 1 To 2
        For jj = 1 To 2
          X = 0
          For FF = 1 To 8
            X = X + DER(ii, FF) * Noeud(Element(el).Noeud(FF)).coord(jj)
          Next
          jac(ii, jj) = X
        Next
      Next
    Next
  Next

```

```

Next
Next
'Déterminant de la matrice jacobéenne
Det = jac(1, 1) * jac(2, 2) - jac(1, 2) * jac(2, 1)
'matrice inverse de la matrice jacobéenne
jac1(1, 1) = jac(2, 2)
jac1(1, 2) = jac(1, 2)
jac1(2, 1) = jac(2, 1)
jac1(2, 2) = jac(1, 1)
For FF = 1 To 2
  For l = 1 To 2
    jac1(FF, l) = jac1(FF, l) / Det
  Next
Next
Next
For ii = 1 To 2
  For ji = 1 To 8
    X = 0
    For FF = 1 To 2
      X = X + jac1(ii, FF) * DER(FF, ji)
    Next
    DERIV(ii, ji) = X
  Next
Next
Next
' La matrice B
For ij = 1 To 16
  For ii = 1 To 3
    BEE(ii, ij) = 0
  Next
Next
Next
Call FormB()
For ii = 1 To 3
  X = 0
  For ji = 1 To 16
    X = X + BEE(ii, ji) * ELD(ji)
  Next
  EPS(ii) = X
Next
Next
For ii = 1 To 3
  X = 0
  For ji = 1 To 3
    X = X + DEE(ii, ji) * EPS(ji)
  Next
  SIGMA(ii) = X
Next
Next
ReDim Preserve ConstraintsDeformations(el).GaussPoint(kgaus)
ConstraintsDeformations(el).GaussPoint(kgaus).DeformX = EPS(1)
ConstraintsDeformations(el).GaussPoint(kgaus).DeformY = EPS(2)
ConstraintsDeformations(el).GaussPoint(kgaus).DeformXY = EPS(3)
ConstraintsDeformations(el).GaussPoint(kgaus).ConstraintX = SIGMA(1)
ConstraintsDeformations(el).GaussPoint(kgaus).ConstraintY = SIGMA(2)
ConstraintsDeformations(el).GaussPoint(kgaus).ConstraintXY = SIGMA(3)
Next
Next
End Sub

```

Private Sub triangularisation()

```

Dim temporary_1 As Double
Dim multiplier_1 As Double
Dim line_1 As Long
Dim Triangular_A(Nq, Nq + 1) As Double
For i = 0 To Nq
    For j = 0 To Nq
        Triangular_A(i, j) = Rigidite(i, j)
    Next
Next
For n = 0 To Nq
    Triangular_A(n, Nq + 1) = Force(n)
Next n
For Kg = 0 To Nq - 1
    If Triangular_A(Kg, Kg) = 0 Then
        For n = Kg To Nq
            If Triangular_A(n, Kg) <> 0 Then line_1 = n : Exit For 'Finds line_1 with non-zero element
        Next n
        For m1 = Kg To Nq + 1
            temporary_1 = Triangular_A(Kg, m1)
            Triangular_A(Kg, m1) = Triangular_A(line_1, m1)
            Triangular_A(line_1, m1) = temporary_1
        Next m1
    End If
    For n = Kg + 1 To Nq
        If Triangular_A(n, Kg) <> 0 Then 'if it is zero, stays as it is
            multiplier_1 = Triangular_A(n, Kg) / Triangular_A(Kg, Kg)
            For m1 = Kg To Nq + 1
                Triangular_A(n, m1) = Triangular_A(n, m1) - Triangular_A(Kg, m1) * multiplier_1
            Next m1
        End If
    Next n
Next Kg
For n = 0 To Nq
    For m1 = 0 To Nq
        Rigidite(m1, n) = Triangular_A(m1, n)
    Next
Next
For n = 0 To Nq
    Force(n) = Triangular_A(n, Nq + 1)
Next n

```

End Sub**Private Sub displacements()**

```

Call triangularisation()
Call solution()

```

End Sub**Private Sub solution()**

```

Dim i, j As Integer
Dim sum As Double
Displacement(Nq) = Force(Nq) / Rigidite(Nq, Nq)
For i = Nq - 1 To 0 Step -1
    SUM = 0
    For j = Nq To i + 1 Step -1
        SUM = SUM + Rigidite(i, j) * Displacement(j)
    Next

```

```

Next j
  Displacement(i) = (Force(i) - SUM) / Rigidite(i, j)
Next i
End Sub
Private Sub FormD(v As Single, E As Single)
  Dim V1 As Double
  V1 = E * (1 - v) / ((1 + v) * (1 - 2 * v))
  DEE(1, 1) = V1
  DEE(1, 2) = v * V1 / (1 - v)
  DEE(1, 3) = 0
  DEE(2, 1) = DEE(1, 2)
  DEE(2, 2) = V1
  DEE(2, 3) = 0
  DEE(3, 1) = 0
  DEE(3, 2) = 0
  DEE(3, 3) = (1 - 2 * v) * V1 / (2 * (1 - v))
End Sub
Private Sub fmquad(i As Integer, j As Integer)
  Dim eta, xi, etam, etap, xim, xip As Double
  eta = samp(i, 1)
  xi = samp(j, 1)
  etam = 0.25 * (1 - eta)
  etap = 0.25 * (1 + eta)
  xim = 0.25 * (1 - xi)
  xip = 0.25 * (1 + xi)
  FUN(1) = 4 * etam * xim * (-xi - eta - 1)
  FUN(2) = 32 * etam * xim * etap
  FUN(3) = 4 * etap * xim * (-xi + eta - 1)
  FUN(4) = 32 * xim * xip * etap
  FUN(5) = 4 * etap * xip * (xi + eta - 1)
  FUN(6) = 32 * etap * xip * etam
  FUN(7) = 4 * xip * etam * (xi - eta - 1)
  FUN(8) = 32 * xim * xip * etam
  FonctionForm(1, 1) = FUN(1)
  FonctionForm(1, 2) = 0
  FonctionForm(1, 3) = FUN(2)
  FonctionForm(1, 4) = 0
  FonctionForm(1, 5) = FUN(3)
  FonctionForm(1, 6) = 0
  FonctionForm(1, 7) = FUN(4)
  FonctionForm(1, 8) = 0
  FonctionForm(1, 9) = FUN(5)
  FonctionForm(1, 10) = 0
  FonctionForm(1, 11) = FUN(6)
  FonctionForm(1, 12) = 0
  FonctionForm(1, 13) = FUN(7)
  FonctionForm(1, 14) = 0
  FonctionForm(1, 15) = FUN(8)
  FonctionForm(1, 16) = 0
  FonctionForm(2, 1) = 0
  FonctionForm(2, 2) = FUN(1)
  FonctionForm(2, 3) = 0
  FonctionForm(2, 4) = FUN(2)
  FonctionForm(2, 5) = 0

```

```

FonctionForm(2, 6) = FUN(3)
FonctionForm(2, 7) = 0
FonctionForm(2, 8) = FUN(4)
FonctionForm(2, 9) = 0
FonctionForm(2, 10) = FUN(5)
FonctionForm(2, 11) = 0
FonctionForm(2, 12) = FUN(6)
FonctionForm(2, 13) = 0
FonctionForm(2, 14) = FUN(7)
FonctionForm(2, 15) = 0
FonctionForm(2, 16) = FUN(8)
DER(1, 1) = etam * (2 * xi + eta)
DER(1, 2) = -8 * etam * etap
DER(1, 3) = etap * (2 * xi - eta)
DER(1, 4) = -4 * etap * xi
DER(1, 5) = etap * (2 * xi + eta)
DER(1, 6) = 8 * etap * etam
DER(1, 7) = etam * (2 * xi - eta)
DER(1, 8) = -4 * etam * xi
DER(2, 1) = xim * (xi + 2 * eta)
DER(2, 2) = -4 * xim * eta
DER(2, 3) = xim * (2 * eta - xi)
DER(2, 4) = 8 * xim * xip
DER(2, 5) = xip * (xi + 2 * eta)
DER(2, 6) = -4 * xip * eta
DER(2, 7) = xip * (2 * eta - xi)
DER(2, 8) = -8 * xim * xip

```

End Sub

Private Sub FormB()

```

Dim m, K, l As Integer
Dim X, Y As Double
For m = 1 To 8
    K = 2 * m
    l = K - 1
    X = DERIV(1, m)
    BEE(1, l) = X
    BEE(3, K) = X
    Y = DERIV(2, m)
    BEE(2, K) = Y
    BEE(3, l) = Y

```

Next

End Sub

Private Sub MatriceKvecteurF(eI As Integer, E As Double, V As Double, RHO As Single)

```

Dim Ke(16, 16) As Double
Dim Fe(16) As Double
Dim DBEE(6, 24), BT(24, 6), BTDB(24, 24), ecm1(24, 24), X, QUOT, Det, Ftemp(16) As Double
Dim coef(8) As Single
Dim ii, f, jj As Integer
Call FormD(V, E)
'matrice de rigidité
For ie = 1 To ngp
    For je = 1 To ngp
        Call fmquad(ie, je)
        'jacobien matrix

```

```

For ii = 1 To 2
  For ji = 1 To 2
    X = 0
    For f = 1 To 8
      X = X + DER(ii, f) * Noeud(Element(el).Noeud(f)).coord(ji)
    Next
    jac(ii, ji) = X
  Next
Next
'Déterminant de la matrice jacobéenne
Det = jac(1, 1) * jac(2, 2) - jac(1, 2) * jac(2, 1)
'matrice inverse de la matrice jacobéenne
jac1(1, 1) = jac(2, 2)
jac1(2, 2) = jac(1, 1)
jac1(1, 2) = -1 * jac(1, 2)
jac1(2, 1) = -1 * jac(2, 1)
For f = 1 To 2
  For l = 1 To 2
    jac1(f, l) = jac1(f, l) / Det
  Next
Next
For ii = 1 To 2
  For ji = 1 To 8
    X = 0
    For f = 1 To 2
      X = X + jac1(ii, f) * DER(f, ji)
    Next
    DERIV(ii, ji) = X
  Next
Next
For ij = 1 To 16
  For ii = 1 To 3
    BEE(ii, ij) = 0
  Next
Next
Call FormB()
For ii = 1 To 3
  For JJ = 1 To 16
    X = 0
    For kk = 1 To 3
      X = X + DEE(ii, kk) * BEE(kk, JJ)
    Next
    DBEE(ii, JJ) = X
  Next JJ
Next ii
For il = 1 To 3
  For jl = 1 To 16
    BT(jl, il) = BEE(il, jl)
  Next jl
Next il
For im = 1 To 16
  For jm = 1 To 16
    X = 0
    For ki = 1 To 3

```

```

        X = X + BT(im, ki) * DBEE(ki, jm)
    Next ki
    BTDB(im, jm) = X
Next
Next
QUOT = Det * samp(ie, 2) * samp(je, 2)
For id = 1 To 16
    For jd = 1 To 16
        BTDB(id, jd) = BTDB(id, jd) * QUOT
    Next
Next
For ic = 1 To 16
    For jc = 1 To 16
        Ke(ic, jc) = Ke(ic, jc) + BTDB(ic, jc)
    Next
Next
Next

Next
Next
'vecteur des forces
Dim PoidsVolumique(2) As Double
PoidsVolumique(1) = 0
PoidsVolumique(2) = -10 * RHO
For ie = 1 To ngp
    For je = 1 To ngp
        Call fmquad(ie, je)
        'jacobien matrix
        For ii = 1 To 2
            For ji = 1 To 2
                X = 0
                For f = 1 To 8
                    X = X + DER(ii, f) * Noeud(Element(el).Noeud(f)).coord(ji)
                Next
                jac(ii, ji) = X
            Next
        Next
        'Déterminant de la matrice jacobéenne
        Det = jac(1, 1) * jac(2, 2) - jac(1, 2) * jac(2, 1)

        For jj = 1 To 16
            X = 0
            For kk = 1 To 2
                X = X + FonctionForm(kk, jj) * PoidsVolumique(kk)
            Next
            Ftemp(jj) = X
        Next jj
        QUOT = Det * samp(ie, 2) * samp(je, 2)
        For jd = 1 To 16
            Ftemp(jd) = Ftemp(jd) * QUOT
        Next
        For jc = 1 To 16
            Fe(jc) = Fe(jc) + Ftemp(jc)
        Next
    Next
Next

```

```
Next
Dim jp, jq, NI, NJ As Single
For ip = 1 To 16
  For iq = 1 To 16
    jp = ip - 2 * Int(ip / 2)
    jq = iq - 2 * Int(iq / 2)
    If jp = 0 Then jp = 2
    If jq = 0 Then jq = 2
    NI = Int(ip / 2)
    If NI <> ip / 2 Then NI = NI + 1
    NJ = Int(iq / 2)
    If NJ <> iq / 2 Then NJ = NJ + 1
    ii = 2 * Element(el).Noeud(NI) + jp - 1
    jj = 2 * Element(el).Noeud(NJ) + jq - 1
    ii = IndexNoued(ii)
    jj = IndexNoued(jj)
    If ii <> -1 And jj <> -1 Then
      Rigidite(ii, jj) = Rigidite(ii, jj) + Ke(ip, iq)
    End If
  Next
Next
Next
For ip = 1 To 16
  jp = ip - 2 * Int(ip / 2)
  If jp = 0 Then jp = 2
  NI = Int(ip / 2)
  If NI <> ip / 2 Then NI = NI + 1
  ii = 2 * Element(el).Noeud(NI) + jp - 1
  ii = IndexNoued(ii)
  If ii <> -1 Then
    Force(ii) = Force(ii) + Fe(ip)
  End If
Next
End Sub
End Class
```