



Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de Technologie

Département de GENIE CIVIL

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : Géotechnique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

Par: Benhaddad Sameh & Lahmar Bouthaina

THEME

**Évaluation numérique des effets d'une surcharge
en bande sur les pressions actives et passives d'un
mur de soutènement rigide**

Soutenu devant le jury composé de :

.....	Président
.....	Examineur
Dr. TALLAH N	MCA, Université de M'sila	Encadreur
Prof. Meddah A	Prof, Université de M'sila	Co-Encadreur

Promotion : 2023 / 2024

Remerciements

Nous souhaitons exprimer notre gratitude de manière plus formelle :

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers Dieu, le tout puissant, de nous avoir permis de mener à bien ce modeste travail.

En premier lieu, nous souhaitons remercier chaleureusement le Dr. TALLAH NAOUI, et Professeur MEDDAH ABDELAZIZ qui ont proposé le thème de notre mémoire de master. Ses précieuses aides et ses disponibilités tout au long de ce projet ont été d'une grande valeur.

Nous voudrions également exprimer notre reconnaissance envers les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de juger notre travail.

À tous nos enseignants et à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, nous tenons à vous adresser nos sincères remerciements. Votre soutien et votre collaboration ont été inestimables.

Dédicaces

Nous dédions humblement ce travail à :

Toute notre famille, sauvée par Allah Tout-Puissant. Et à tous nos amis de la promotion 2023/2024 du deuxième cycle de géotechnique. Nous avons passé des moments inoubliables ensemble et nous vous remercions.

Nos encadrateurs, le Dr Tallah Naoui et le Professeur Meddah Abdelaziz.

Tous les professeurs de la Faculté de technologie.

La promotion de 2024.

À tous ceux qui nous aiment et que nous aimons.

ملخص

تُعد الضغوط السلبية والإيجابية للأتربة على جدار الدعم العمودي من المعايير الأساسية في الجيوتكنيك لتصميم المنشآت. في هذه الدراسة الرقمية، تم استخدام طريقة العناصر المحدودة باستخدام برنامج OptumG2 باتباع نهج الحد الأعلى من التحليل الحدي لتقييم الضغوط السلبية والإيجابية تحت تأثير الحمولة الشريطية خلف الجدار. تم تحليل تأثير موقع وشدة الحمولة، وزاوية احتكاك التربة، واحتكاك الواجهة. أظهرت النتائج زيادة في الضغوط السلبية والإيجابية مع شدة الحمولة. وأثبتت المقارنة مع الحلول التحليلية صحة الطريقة. كان للمعايير الهندسية والميكانيكية المدروسة تأثير ملحوظ على الضغوط. تقدم هذه الدراسة تقديرًا رقميًا للضغوط بوجود حمولة شريطية لتصميم جدران الدعم. الكلمات المفتاحية: جدران الدعم، الضغط الأرضي النشط، التحليل الحدودي، العناصر المحددة، الحمولة الموزعة. الكلمات المفتاحية: ضغط الأتربة، الضغط النشط، الضغط السلبي، حمولة شريطية، عناصر محدودة، تحليل حدي.

Summary

Passive and active earth pressures on a vertical retaining wall are key parameters in geotechnical engineering for the design of structures. In this numerical study, the finite element method using OptumG2 software with the upper bound approach of limit analysis is used to evaluate active and passive pressures under the effect of a strip load behind the wall. The influence of the load position and intensity, soil friction angle, and interface friction is analyzed. The results show an increase in active and passive pressures with the load intensity. Comparison with analytical solutions validates the method. The studied geometric and mechanical parameters have a notable effect on the pressures. This study provides a numerical estimation of pressures in the presence of a strip load for the design of retaining walls.

Keywords: Earth pressure, active pressure, passive pressure, strip load, finite elements, limit analysis.

Résumé

Les poussées passives et actives des terres sur un mur de soutènement vertical sont des paramètres clés en géotechnique pour le dimensionnement des ouvrages. Dans cette étude numérique, la méthode des éléments finis avec le logiciel OptumG2 en adoptant l'approche de la limite supérieure de l'analyse limite est utilisée pour évaluer les poussées actives et passives sous l'effet d'une surcharge en bande derrière le mur. L'influence de la position et de l'intensité de la surcharge, de l'angle de frottement du sol et du frottement à l'interface est analysée. Les résultats montrent une augmentation des poussées actives et passives avec l'intensité de la surcharge. La comparaison avec des solutions analytiques valide la méthode. Les paramètres géométriques et mécaniques étudiés ont un effet notable sur les poussées. Cette étude fournit une estimation numérique des poussées en présence d'une surcharge en bande pour le dimensionnement des murs de soutènement.

Mots-clés : Poussée des terres, poussée active, poussée passive, surcharge en bande, éléments finis, analyse limite.

Sommaire

Résumé

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Revue de littérature sur le comportement des murs de soutènement	
1. Introduction	4
<u>1.1 Les ouvrages de soutènement peuvent être classés en trois grandes catégories</u>	4
<u>1.2 Définition des ouvrages de soutènement</u>	4
<u>1.3 Différents types des ouvrages de soutènement</u>	5
<u>1.3.1 Murs de soutènement</u>	5
<u>1.3.2 Murs poids</u>	6
<u>1.3.3 Écrans de soutènement</u>	7
<u>1.3.4 Murs en béton armé ou mur cantilever</u>	7
<u>1.3.5 Systèmes de soutènement composites</u>	8
<u>1.3.6 Massifs en sol renforcé</u>	8
<u>1.4 Classement des ouvrages de soutènement</u>	8
<u>1.4.1 Ouvrages Rigides</u>	9
<u>1.4.2 Ouvrages Souples</u>	10
<u>1.5 Fonctionnement des ouvrages de soutènement</u>	12
<u>1.5.1 Stabilité d'un ouvrage de soutènement</u>	12
1.5.1.1 Stabilité interne.....	13
1.5.1.2 Stabilité externe.....	13
1.5.1.3 Stabilité au renversement.....	14
1.5.1.4 Stabilité au glissement.....	14
2. Surcharge	15
2. Surcharge uniforme	15
2. Surcharge linéaire.....	15
2. Surcharge distribuée suivant une bande.....	16
3. Conclusion :	16

Chapitre II : Présentation du logiciel OPTUM G2

1. Caractéristiques de logecaille Optum G2	19
<u>1.1 INFORMATIONS GÉNÉRALES</u>	19
<u>1.1.1 FLUX BC</u>	19
<u>1.1.2 CONSOLIDATION BC</u> :	21
<u>1.1.3 SUPPORT</u> :.....	22

<u>1.1.4 FORCES</u> :	24
<u>1.1.5 TIRANTS</u> :	26
<u>1.1.6 STRUCTURE</u> :	27
<u>1.1.7 MAILLAGE</u> :	29
<u>1.1.8 AUTRE</u> :	30
<u>2. Types d'analyses disponibles dans OPTUMG</u> :	32
<u>2.1 analyse limite</u> :	34
<u>2.1.1 Réglages</u> :	35
<u>2.2. Contraintes initiales</u> :	37
<u>2.3 Analyse élastique</u> :	38
<u>2.4 Réduction de la force</u> :	38
<u>2.5 Elastoplastique</u> :	38
<u>2.6 Elastoplastique multiplicateur</u> :	38
<u>2.7 Consolidation</u> :	39
<u>2.8 Consolidation BC</u> :	39

Chapitre III : Modélisation numérique des pressions actives des terres pour un écran rigide vertical : étude et analyse des résultats

1. Description du problème.....	40
2. Validation du modèle.....	41
3. Résultats de Simulation	42
3.1 Poussée Active	42
3.1.1 Poussée Active avec $b/H=0.2$	42
3.1.2 Poussée Active avec $b/H=0.3$	43
3.1 Poussée Passive	45
3.1.1 Poussée Passive avec $b/H=0.2$	45
3.1.2 Poussée Passive avec $b/H=0.3$	46
<u>Conclusion generale</u>	48
Références.....	49

LISTE DE FIGURE

TITRE *page*

Chapitre I

Figure I.1: Exemples des ouvrages de soutènement.	5
Figure I.2: Exemple de mur poids en béton.	6
Figure I.3: Exemple de mur formé de gabion.	7
Figure I.4: Mur en béton armé.	7
Figure I.5: Exemple de mur renforcée par géosynthétique.	8
Figure I.6: Modes de rupture des ouvrages de soutènement.	13
Figure I.7: Trois types de stabilité externe.	13
Figure I.8: Influence de renversement sur le mur.	14
Figure I.9: Influence de glissement sur le mur.	14
Figure I.10: Mur de soutènement en porte-à-faux avec étagères de soulagement (Bowles, 1997).	15
Figure I.11: Mur de soutènement cantilever avec des étagères de soulagement à Hyderabad, en Inde.	16

Chapitre II

Figure II.1: Caractéristiques du ruban dans OPTUMG2.	19
Figure II.2: Icône flux BC.	19
Figure II.3: Caractéristique de la nappe phréatique utilisée pour définir une hauteur constante le long d'une limite externe (A), a ligne de pression zéro sur un segment (B), une nappe phréatique horizontale standard (C) et un nouveau solide avec Matériau d'eau automatiquement attribué (D).	20
Figure II.4: Icône de consolidation BC.	21
Figure II.5: Distribution de l'excès de pression interstitielle à $t = 1$ jour. Dans la figure du bas, $p_e = 0$ est spécifié le long de la limite inférieure.	22
Figure II.6: Icône de support.	22
Figure II.7: Plaque simplement supportée avec les supports appliqués en coordonnées globales (A) et locales (B) systèmes.	23
Figure II.8: Déplacement fixe en Y égal à -0,1 appliqué à une plaque rigide au-dessus d'un Solide rigide. Les déplacement en X est fixe, c'est-à-dire égal à zéro.	24
Figure II.9: Icône de loads.	24
Figure II.10: Application de charges concentrées (A), Réparties (B)	25

Figure II.11: Tableau du type et de la catégorie de charge et des approches de conception disponible sous Projet. L'ensemble des facteurs partiels appliqués, pour les étapes d'Analyse limite ou de réduction de résistance, dépend de l'Approche de conception choisie à ces étapes.	26
Figure II.12: Icône de Anchors	26
Figure II.13: Connecteur / élément de géogrille pour modéliser une ancre jointoyée (A), un Connecteur précontraint (B)	27
Figure II.14: Icône de Structural.....	27
Figure II.15: Plaques avec interfaces et joints de cisaillement utilisées pour modéliser l'interface entre le sol et la fondation.	28
Figure II.16: Icône de Mesh.....	29
Figure II.17: Spécification de la taille du maillage et de l'éventail du maillage aux coins d'une semelle en bande.....	29
Figure II.18: Spécification des ventilateurs de maillage aux points singuliers (A, B, C) et de la taille du maillage pour le domaine solide mince (D).	30
Figure II.19: Icône de Other.....	30
Figure II.20: Points de résultat (1 et 2) et courbes charge-déplacement produits à l'aide de tracés XY.....	31
Figure II.21: Caractéristique de la section de résultat appliquée à la ligne médiane d'une poutre en porte-à-faux conique (en haut) et répartition du moment de flexion résultant (en bas).....	32
Figure II.22: Optum G2 showing the Stage Manager on the right.	34
Figure II.23: Boutons de contrôle du régisseur.....	34
Figure II.24: Calcul des limites supérieures et inférieures de la charge de rupture	
Figure II.25: Exemples d'analyse limite avec Multiplicateur = Charge (en haut) et Multiplicateur = Gravité (en bas).	37

Chapitre III

Figure III.1: Geometry of a retaining wall–soil system	40
Figure III.2: Le maillage par éléments finis pour un mur de soutènement	40
Figure III.3: Comparison of present solution with 45° distribution approach, Beton Kalendar method, O Farzaneh, Extend Coulomb's approach, and elastic solution for: $\phi = 30^\circ$, $b/H = 0.3$, $\delta/\phi = 2/3$, $q/\gamma H = 1.5$	41
Figure III.4: Diagrammes de poussée active à l'effet simultané du poids du sol et de la surcharge avec : $b/H = 0,2$; (a) $q/\gamma H = 0.25$; (b) $q/\gamma H = 0.50$	43
Figure III.5: Diagrammes de poussée active à l'effet simultané du poids du sol et de la surcharge avec : $b/H = 0,3$; (a) $q/\gamma H = 0.25$; (b) $q/\gamma H = 0.50$	44
Figure III.6: Diagrammes de poussée passive à l'effet simultané du poids du sol et de la surcharge avec : $b/H = 0,2$; (a) $q/\gamma H = 0.25$; (b) $q/\gamma H = 0.50$	46
Figure III.7: Diagrammes de poussée passive à l'effet simultané du poids du sol et de la surcharge avec : $b/H = 0,3$; (a) $q/\gamma H = 0.25$; (b) $q/\gamma H = 0.50$	47

LISTE DE TABLEAU

TITRE ***page***

Chapitre I :

Tableau I.1: Ouvrages de soutènement qui reprend la poussée par leur poids.....9

Tableau I.2: Ouvrages de soutènement qui reprend la poussée par leur encastrement.....10

Tableau I.3: Ouvrages de soutènement reprenant en totalité ou en partie la poussée par leur ancrage dans le massif retenu ou dans le sol de fondation.....11

Chapitre II :

Tableau II.1: État des charges de multiplicateur, des charges fixes et de la gravité en fonction du réglage du multiplicateur.....36

,

Introduction générale

La pression active et passive des terres est un sujet fondamental dans le domaine de la géotechnique, car elle joue un rôle crucial dans la conception et le calcul des ouvrages de soutènement tels que les murs-poids, les écrans minces et les ouvrages en sol renforcé. Les théories classiques de Coulomb (1776) et Rankine (1857) ont été proposées pour analyser la pression des terres. La théorie de Coulomb repose sur la méthode de l'équilibre limite et considère un coin triangulaire de remblai derrière un mur rugueux avec une surface de rupture plane inclinée. Cette théorie est bien adaptée aux sols frottant en état actif, mais moins aux sols cohérents ou aux états passifs. La théorie de Rankine, quant à elle, considère un petit élément de sol en rupture à l'intérieur d'un milieu semi-infini et traite le problème en termes de contraintes. Elle repose sur l'hypothèse que le mur n'a pas d'effet sur les contraintes tangentielles à l'interface sol-mur. En outre, une méthode graphique pratique a été proposée par Cullmann pour analyser la pression des terres.

De nombreux chercheurs ont effectué des travaux expérimentaux, analytiques et numériques sur le problème de la pression des terres. La méthode de l'équilibre limite est couramment utilisée dans l'analyse des problèmes géotechniques (par exemple, [Terzaghi K-Greco VR.]) ; dans cette méthode, une surface de rupture approximative est supposée être un cercle, une ellipse, une log-spirale, ou une combinaison de ces formes et une surface de rupture critique est recherchée. D'autre part, la méthode de l'équilibre limite par tranches, largement utilisée dans l'analyse de la stabilité des pentes, a été employée pour évaluer la pression latérale des terres (par exemple, [Janbu N-Zhu DY, Qian Q.]). La méthode des lignes de glissement est aussi utilisée pour estimer la pression des terres ; dans cette méthode, les équations différentielles de base du réseau des lignes de glissement dérivées à partir de l'équilibre des contraintes et de la condition de plasticité, sont résolues (par exemple, [Sokolovskii VV.-Cheng YM, Hu YY, Wei WB]). La méthode d'analyse limite est une autre approche qui a été développée pour traiter les problèmes de pression des terres ; deux solutions peuvent être généralement fournies par des bornes supérieures et inférieures, qui sont calculées par des solutions cinématiquement et statiquement admissibles, respectivement (par exemple, [Chen WF-Soubra AH, Macuh B] ; [O.Farzaneh]). Des essais expérimentaux ont également été réalisés pour étudier la pression des terres sur un mur de soutènement par plusieurs chercheurs (par exemple, [Rowe PW, Peaker K-Duncan JM, Mokwa RL.]).

Le développement du matériel informatique et des méthodes numériques permet d'étudier le comportement du mur et du massif de sol retenu en tenant compte de leurs déformations. Potts et Fourie ont utilisé la méthode des éléments finis pour étudier l'effet du mode de déplacement du mur sur la génération de la pression des terres. Hazarika et Matsuzawa ont

proposé une méthode numérique pour l'analyse de la pression active contre un mur rigide de soutènement pour différents modes de déplacement, qui est valable pour les conditions de déformation plane. Day et Potts ont examiné les effets des propriétés d'interface sur le comportement du sol retenu autour d'un mur vertical soumis à une translation uniforme. Fenton et al. ont combiné une analyse par éléments finis non linéaire avec une simulation de champ aléatoire pour étudier la question des propriétés du sol échantillonné et de leur capacité à refléter les propriétés effectives de l'ensemble du massif de sol retenu, et l'effet de la variabilité spatiale des propriétés du sol sur la pression active des terres. De plus, Shiau et Smith ont traité l'effet d'une règle d'écoulement associative et d'une règle d'écoulement non associative, ainsi que du frottement sol-mur, sur la pression passive des terres contre un mur en gravité en utilisant la méthode des différences finies explicite de FLAC. Shiau et al. ont étudié l'effet du frottement à l'interface sol-mur, de l'inclinaison du mur, de la configuration de la surface du remblai et du poids du mur, sur la pression passive des terres. Benmadour et al ont utilisé une méthode numérique pour estimer les pressions des terres pour diverses configurations de remblai retenues par un mur rigide vertical. Ils ont utilisé le code FLAC pour effectuer des analyses de déformation et de contrainte sur les modèles numériques. Les auteurs ont également examiné l'effet de divers paramètres, tels que l'inclinaison du remblai et l'angle de frottement de l'interface sol-mur, sur les coefficients de pression des terres.

Nous constatons qu'il existe un vide en matière d'études portant sur l'évaluation des coefficients de pression active et passive résultant d'une surcharge partielle appliquée derrière un mur de soutènement assurant la retenue d'un remblai. À l'exception des méthodes analytiques classiques, il est à noter qu'il est difficile de repérer des recherches numériques abordant cette problématique spécifique.

Dans cette étude, des calculs numériques par éléments finis ont été réalisés en utilisant le logiciel OptumG2, en se concentrant sur l'approche de la limite supérieure de l'analyse limite. L'objectif principal consistait à évaluer les pression active et passive pour différentes positions d'une surcharge partielle caractérisée par une largeur finie. Cette charge est imposée sur un remblai situé derrière un mur de soutènement vertical. Notre étude s'est étendue à la détermination des pression active et passive dans des conditions de surfaces de murs à la fois rugueux et lisses, caractérisées par leur nature rigide.

Un aspect essentiel de notre étude était la juxtaposition systématique des résultats issus de différentes méthodologies analytiques. En effectuant une telle comparaison, nous avons entrepris une exploration approfondie de la crédibilité et de la pertinence inhérentes à ces résultats. Cette démarche ne se limitait pas à de simples considérations théoriques ; elle

englobait plutôt un examen des implications pragmatiques dans le contexte d'applications d'ingénierie réelles.

En essence, cette étude contribue au discours académique existant en fournissant non seulement une évaluation complète des poussées, mais aussi en démontrant l'utilité pratique inhérente à la combinaison de l'analyse par éléments finis et du logiciel OptumG2 avec la méthode d'analyse limite.

Le mémoire, est composée de trois chapitres :

- Le premier chapitre comporte une synthèse bibliographique portant sur les connaissances acquises sur les différentes catégories d'ouvrages de soutènement, leur fonctionnement, leur classification, et les principes de stabilité associés à leur conception et leur construction.

- Le deuxième chapitre de cette étude expose les diverses fonctionnalités du logiciel Optum G2. Il détaille également leur utilisation pour la modélisation et l'analyse des problèmes géotechniques. De plus, il décrit le modèle géométrique utilisé pour représenter le mur de soutènement avec surcharge partielle uniformément répartie étudié dans notre cas.

- Le troisième chapitre présente les résultats de simulation obtenus pour différents scénarios dans le cadre de l'étude. Les simulations sont effectuées en utilisant le logiciel Optum G2 et portent sur la modélisation de la poussée exercée sur un mur de soutènement avec une surcharge partielle uniformément répartie

Une conclusion générale retraçant le bilan des résultats numériques est ensuite donnée.

Chapitre I :

Revue de littérature sur le comportement des
murs de soutènement.

1. Introduction :

Dans le domaine de la géotechnique, on définit comme structure de soutènement tout ouvrage adapté à retenir la poussée du terrain ; elle est liée au sol pour lesquelles l'action de celui-ci intervient doublement. (Baaziz, 2012).

Les ouvrages de soutènement sont réalisés pour soutenir les remblais des chaussées et pour créer des espaces qui sont souvent utilisés comme des parkings de stationnement ou des surfaces commerciales.

Dans ce chapitre présentées Différentes notions de base liées aux structures de soutènement sont discutées et. Ainsi, un aperçu sur les divers types de structures de soutènement est présenté. L'état limite ultime des ouvrages de soutènement de la pression du sol sur un écran de soutènement à l'état passif et l'état actif sont également discutées. (Djireb, 2021).

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

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

1.2 Définition des ouvrages de soutènement :

Le mur de soutènement est un mur vertical ou sub-vertical qui permet de contenir des terres (ou tout autre matériau granulaire ou pulvérulent) sur une surface réduite. La conception de ce type d'ouvrage peut être très variée, allant des murs poids en béton ou en maçonnerie aux parois ancrées, en passant par les murs en sol renforcé la retenue des terres par un mur de soutènement répondent à des besoins multiples : préserver les routes et chemins des éboulements et glissement de terrain. Le choix d'un ouvrage de soutènement dépend notamment de son implantation (en remblai, en déblai), du site (aquatique ou terrestre), du sol de fondation (caractéristiques mécaniques, hydrologie) et des contraintes d'intégration dans l'environnement (nuisance, traitement architectural)

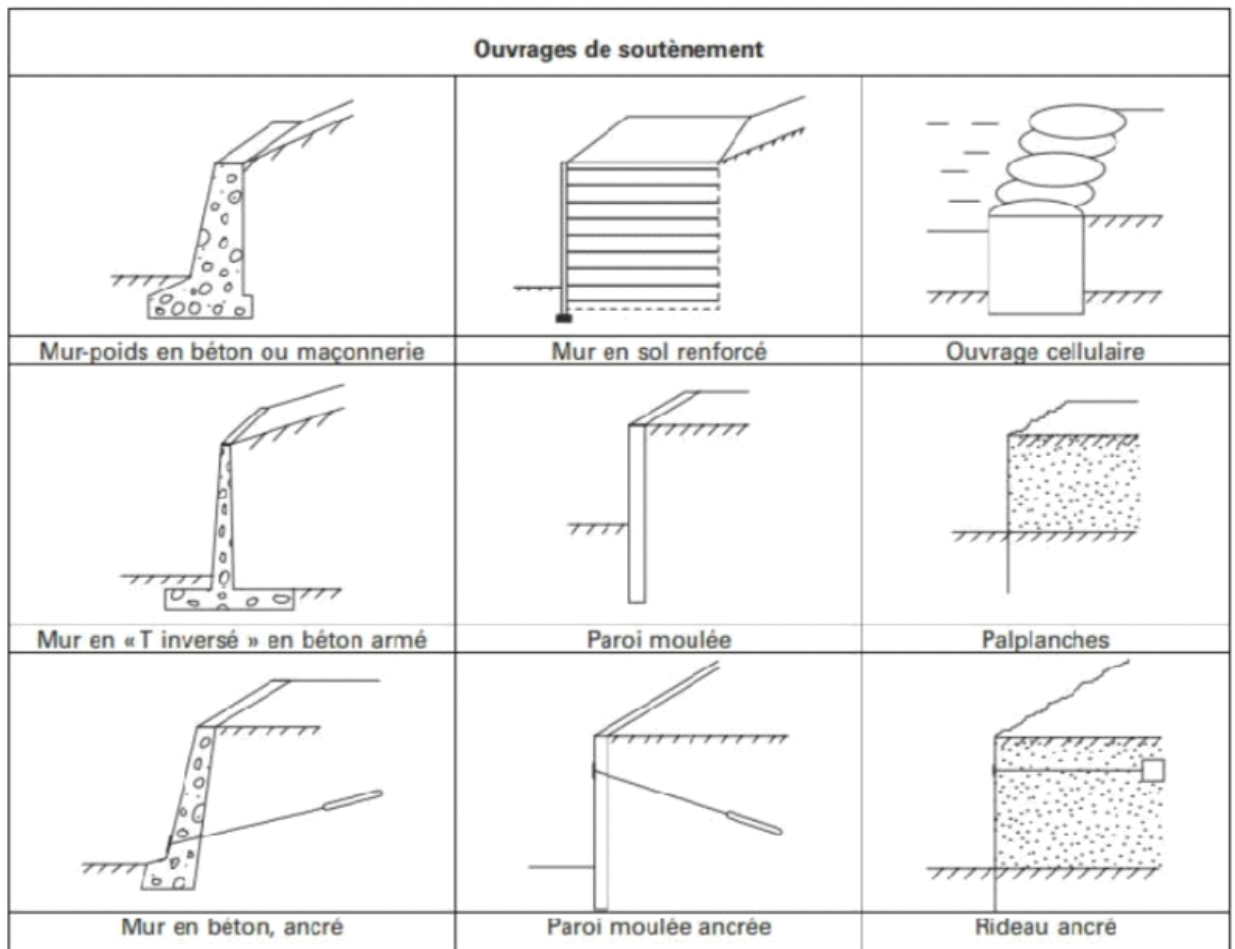


Figure I.1: Exemples des ouvrages de soutènement.

1.3 Différents types des ouvrages de soutènement :

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

1.3.1 Murs de soutènement : Ce sont des ouvrages généralement fonds superficiellement, dont le poids (incluant parfois une partie de la masse de sol retenu) joue un rôle prépondérant. [2]. Qui sont constitués d'une paroi résistante et d'une semelle de fondation, comme les murs en béton armé en (T renversé ou L) ou les murs-poids, qu'ils soient en maçonnerie (briques, pierres,) ou formés d'éléments spéciaux (gabions)

1.3.2 Murs poids :

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



Figure I.2: Exemple de mur poids en béton.

Mur formé de gabions c'est-à-dire de cubes grillagés remplis de blocs de carrière ou de blocs d'alluvions. Ils réalisent un massif de butée auto drainante, en pied de glissement (de même que les massifs de butée en enrochements). A l'origine, le gabion est un cylindre en tressage de branches que l'on remplissait de terre et utilisait dans les fortifications.

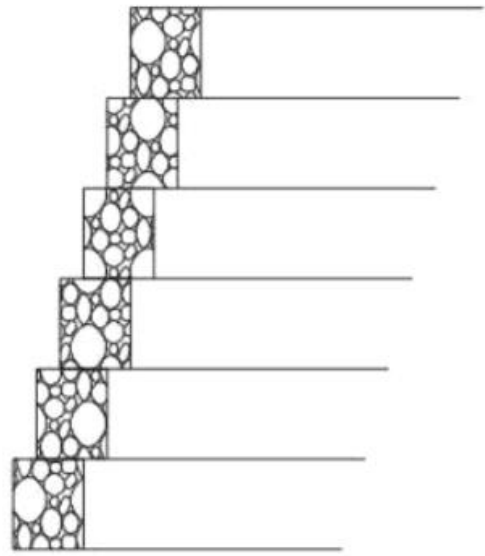


Figure I.3: Exemple de mur formé de gabion.

1.3.3 Écrans de soutènement :

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

1.3.4 Murs en béton armé ou mur cantilever :

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

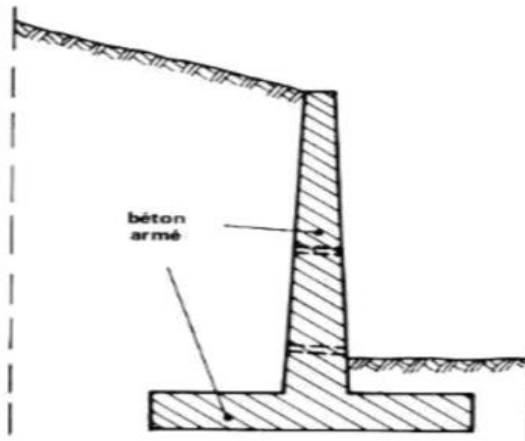


Figure I.4: Mur en béton armé.

1.3.5 Systèmes de soutènement composites :

Ce sont des ouvrages qui comportent des rangées sensiblement horizontales de renforcements, interposés entre des couches successives du remblai au fur et à mesure de la construction de l'ouvrage. [2]. (Batardeaux composés de plusieurs rideaux de palplanches, murs en sol cloué, murs en Terre Armée, murs renforcés par des géotextiles ou des géogrilles, etc.). Si, par leurs dimensions, ces ouvrages se rapprochent des murs-poids, certains sont néanmoins relativement souples et peuvent tolérer des déformations importantes.

1.3.6 Massifs en sol renforcé :

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

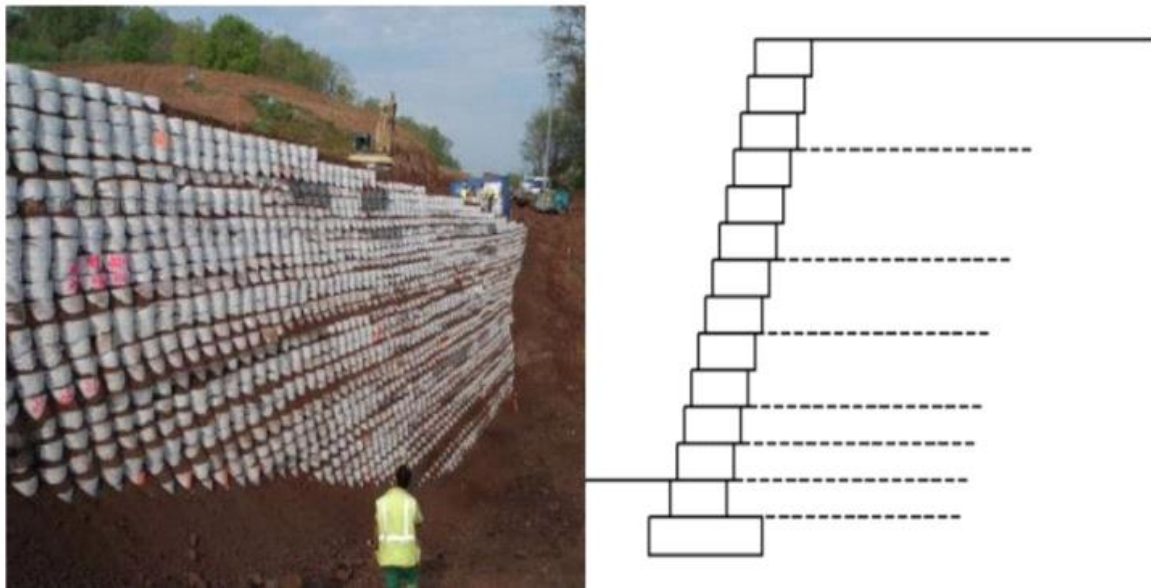


Figure I.5: Exemple de mur renforcée par géosynthétique.

1.4 Classement des ouvrages de soutènement :

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

1.4. 1 Ouvrages Rigides :

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

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

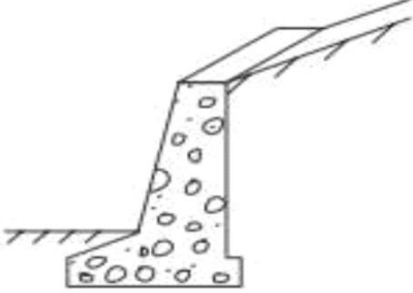
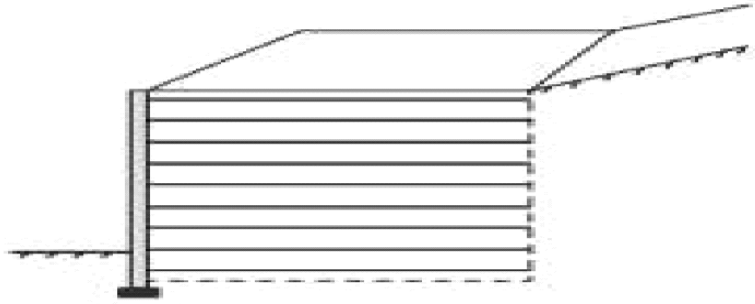
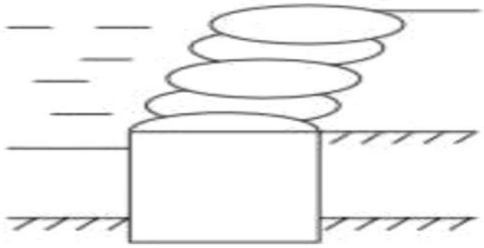
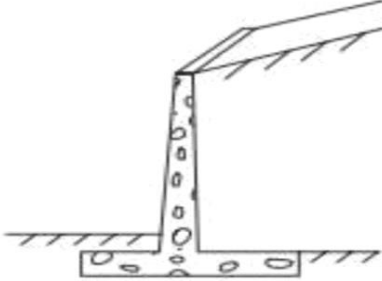
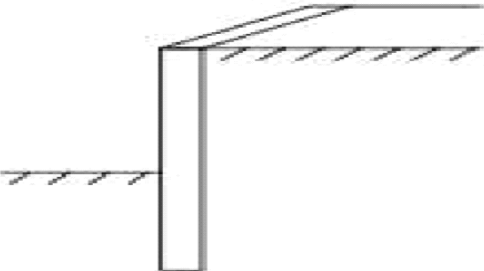
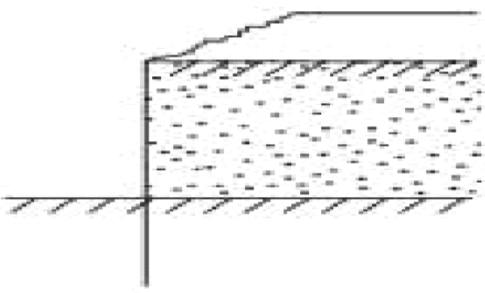
Type d'ouvrage	Caractéristiques de fonctionnement
 <p>Mur-poids en béton ou maçonnerie</p>	<p>Ouvrage rigide qui ne peut supporter sans dommages des tassements différentiels supérieurs à quelques pour mille</p>
 <p>Mur en sol renforcé</p>	<p>Le sol retenu est renforcé par des inclusions souples résistant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

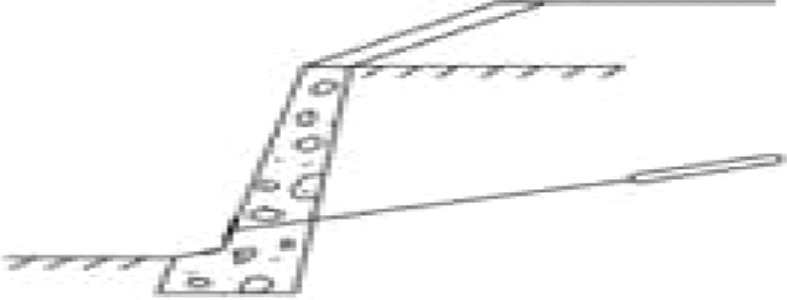
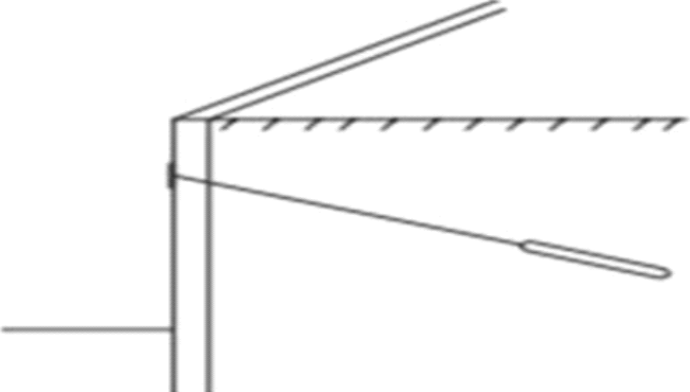
Tableau 1.2 Ouvrages de soutènement qui reprend la poussée par leur encastrement

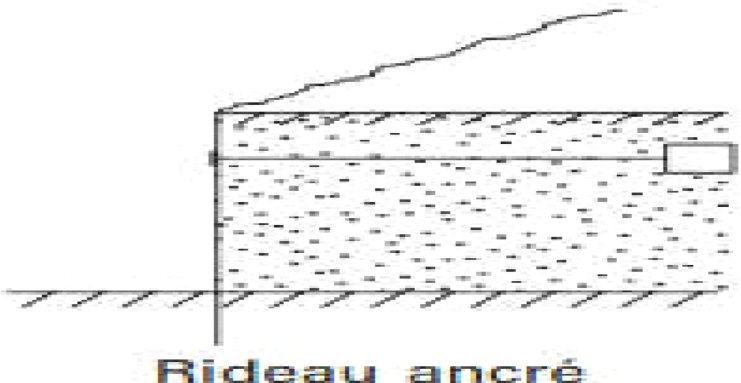
Type d'ouvrage	Caractéristiques de fonctionnement
 <p data-bbox="252 705 917 750">Mur en « T inversé » en béton armé</p>	<p data-bbox="1050 392 1390 808">Ouvrage rigide doté d'une base élargie et encadrée à la partie supérieure du sol de fondation. Il fonctionne en faisant participer à l'action de soutènement une partie du poids du remblai</p>
 <p data-bbox="422 1153 813 1198">Paroi moulée</p>	<p data-bbox="1050 833 1390 1305">Mur construit dans le sol en place, avant toute excavation, par bétonnage d'une tranchée remplie de boue pour en assurer la stabilité. Il fonctionne par encastrement total ou partiel dans le sol de fondation.</p>
 <p data-bbox="391 1680 718 1724">Palplanches</p>	<p data-bbox="1050 1332 1390 1691">Ouvrage flexible pour lequel l'interaction structure-sol retenue a une influence prépondérante sur le comportement de l'ouvrage</p>

1.4. 2 Ouvrages Souples :

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

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

Type d'ouvrage	Caractéristiques de fonctionnement
 <p data-bbox="357 842 938 878">Mur en béton, ancré</p>	<p data-bbox="1152 613 1390 1249">Ouvrage flexible renforcé par une série d'ancrages dans le sol. Les ancres sont des armatures métalliques (câbles ou barres) qui sont attachées d'une part à la paroi (ou rideau) et d'autre part</p>
 <p data-bbox="325 1688 922 1724">Paroi moulée ancrée</p>	<p data-bbox="1152 1276 1390 1581">dans le massif de sol par un corps d'ancrage ou par un scellement avec un coulis d'injection</p>

 <p style="text-align: center;">Rideau ancré</p>	<p>Paroi réalisée à partir de poteaux placés préalablement dans le sol en place. Au fur et à mesure de l'excavation, des éléments préfabriqués (poutres, plaques), ou moulés sur place sont placés entre les poteaux. La poussée des terres est reprise par des ancrages fixés sur les poteaux.</p>
---	---

1.5 Fonctionnement des ouvrages de soutènement :

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

1.5. 1 Stabilité d'un ouvrage de soutènement :

La stabilité d'un ouvrage de soutènement doit être étudiée à l'état limite ultime. Plusieurs modes de rupture doivent être envisagés. La vérification doit être conduite pour chacun d'entre eux.

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

1.5.1.1 Stabilité interne :

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



Figure I.6: Modes de rupture des ouvrages de soutènement.

1.5.1.2 Stabilité externe :

Il existe trois types de stabilité externe :

- La stabilité au renversement.
- La stabilité au glissement.
- La stabilité au poinçonnement.

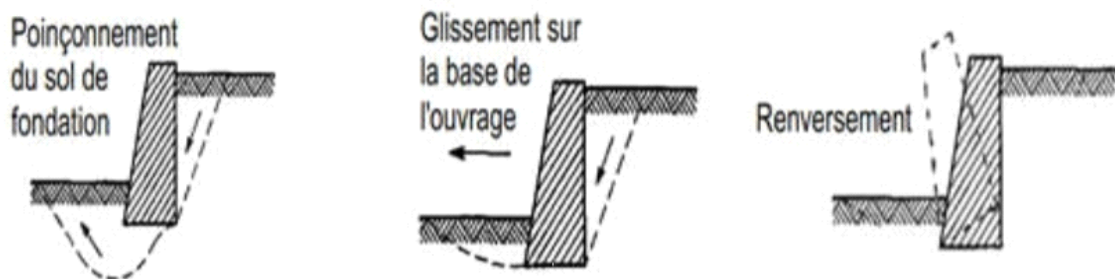


Figure I.7: Trois types de stabilité externe.

1.5.1.3 Stabilité au renversement

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



Figure I.8: Influence de renversement sur le mur.

1.5.1.4 Stabilité au glissement

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

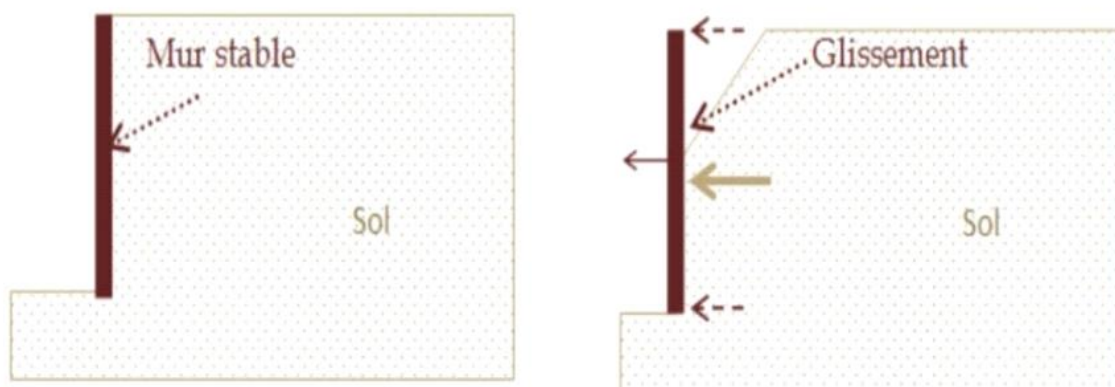


Figure I.9: Influence de glissement sur le mur.

2. Surcharges

Un mur de soutènement est susceptible d'être soumis à des charges supplémentaires, appelées surcharges, qui peuvent s'appliquer soit directement sur le mur lui-même, soit de manière indirecte par l'intermédiaire du remblai de terre retenu. La présence de ces surcharges engendre une augmentation de la pression latérale exercée sur le mur, dont l'ampleur varie en fonction de la nature de la surcharge considérée. On distingue quatre configurations possibles de surcharge :

1. Une surcharge uniforme, répartie de façon homogène sur une surface donnée.
2. Une surcharge linéique, concentrée le long d'une bande ou d'une ligne.
3. Une surcharge ponctuelle, appliquée en un point localisé.
4. Une surcharge avec une distribution surfacique particulière, suivant une bande ou une zone spécifique.

Le dimensionnement du mur de soutènement doit impérativement prendre en compte ces différents cas de figure de surcharges susceptibles d'intervenir, afin d'évaluer correctement les pressions latérales induites et de concevoir une structure capable de résister à ces efforts supplémentaires.

2.1 Surcharge uniforme

Les contraintes de poussée ou de butée dues à cette surcharge sont constantes tout le long de l'écran et leur résultante appliquée au milieu de l'écran.

2.2 Surcharge linéaire

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

Si ($m > 0.4$)

$$\sigma_x = \frac{4 Ql}{\pi H} \frac{m^2 n}{(m^2 + n^2)^2}$$

Si ($m \leq 0.4$)

$$\sigma_x = 0.203 \frac{Ql}{H} \frac{n}{(0.16^2 + n^2)^2}$$

2.3.3 Surcharge distribuée suivant une bande

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

$$\sigma_h = \frac{qb \cos \delta \sin(45^\circ - \varphi/2)}{d \cos \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} - \delta\right)}$$

3. Conclusion :

En conclusion, les ouvrages de soutènement sont des structures essentielles pour retenir les massifs de terre et créer une dénivelée entre les terres situées à l'amont et à l'aval de l'ouvrage. Ils peuvent être classés en trois grandes catégories : les murs de soutènement, les écrans de soutènement et les systèmes de soutènement composites. Chaque type d'ouvrage présente des caractéristiques de fonctionnement spécifiques et nécessite des études de stabilité interne appropriées.

Les murs de soutènement peuvent être des murs-poids en maçonnerie ou béton, des murs en béton armé avec semelle, des murs à contreforts, des murs cellulaires, des murs-caissons, etc. Ils sont conçus pour contenir des terres sur une surface réduite et répondent à différents besoins tels que la prévention des éboulements et glissements de terrain.

Les écrans de soutènement sont des ouvrages minces retenus ou soutenus par des ancrages, des butons ou la butée des terres. Ils sont principalement constitués d'une paroi résistante, telle que des rideaux de palplanches ou des parois moulées en béton armé.

Les systèmes de soutènement composites comprennent des ouvrages qui combinent des renforcements horizontaux, tels que des géotextiles ou des géogrilles, avec des couches successives de remblai. Ils peuvent être relativement souples et tolérer des déformations importantes.

La stabilité des ouvrages de soutènement doit être étudiée à l'état limite ultime, en prenant en compte les modes de rupture possibles tels que la stabilité interne (rupture des éléments constitutifs de l'ouvrage) et la stabilité externe (renversement, glissement, poinçonnement). Des calculs et vérifications appropriés doivent être effectués pour assurer la sécurité et la durabilité de ces structures.

En conclusion, la conception et la réalisation des ouvrages de soutènement demandent un soin particulier depuis leur conception jusqu'à leur mise en place, en prenant en compte des facteurs

tels que l'implantation, le site, le sol de fondation et les contraintes d'intégration dans l'environnement. Ces structures jouent un rôle essentiel dans la préservation des infrastructures et la sécurité des zones environnantes.

Chapitre II:

Présentation du logiciel OPTUM G2

1. Caractéristiques de logiciel OptumG2

1.1 Informations générales

OptumG2 est un logiciel de calcul par éléments finis (en 2D) pour les ouvrages géotechniques, développé par la société Optume G2 en partie fondée par K. Krabbenhøft et A. Lyamin de l'Université de Newcastle (Australie). Sorti en 2013, il s'agit vraisemblablement du premier logiciel mettant en œuvre de manière systématique une approche par éléments finis du calcul à la rupture, pour la statique comme pour la cinématique. En ce qui concerne la procédure d'optimisation, OptumG2 tire avantage des progrès récents dans le domaine de la programmation conique. Plusieurs critères de résistance pour le sol sont disponibles et il offre également la possibilité d'inclure des éléments de barres, de poutres en actions ou d'interfaces. Une procédure de remaillage adaptatif est également disponible afin d'améliorer la qualité des bornes obtenues. (Figure III.1). Enfin, mentionnons qu'OptumG2 permet également de réaliser des analyses élastoplastiques, la particularité étant que la résolution d'un cas de charge incrémental est réalisée par optimisation [Krabbenhøft et al. 2007, Krabbenhøft et al. 2007], de la même manière qu'en calcul à la rupture.

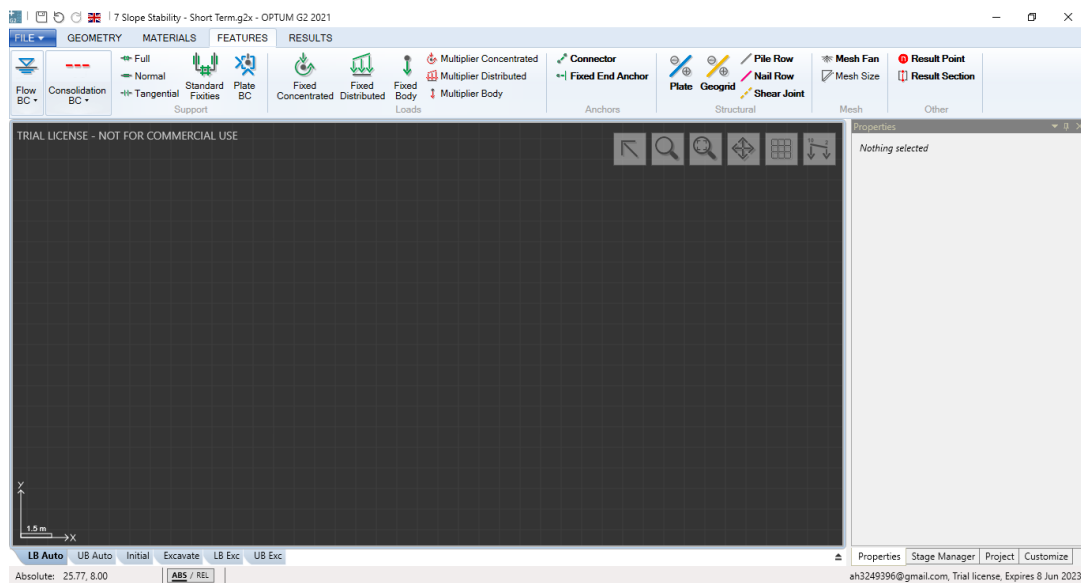


Figure II.1Caractéristiques du ruban dans OPTUMG2.

1.1.1 FLUX BC



Figure II.2: Icône flux BC

La catégorie Flow BC contient quatre caractéristiques :

- Nappe phréatique (outil). Lorsqu'il est utilisé comme outil, une nappe phréatique est automatiquement attribuée comme indiqué par la ligne bleue en pointillés qui apparaît lorsqu'il est activé. Lorsqu'il est utilisé en dehors des domaines solides, des solides supplémentaires affectés à l'eau matérielle par défaut sont créés. Lorsqu'il est utilisé sur une verticale segment qui définit une limite externe, une tête fixe BC correspondant à une hydrostatique la répartition de la pression le long du segment est automatiquement attribuée. Enfin, les nappes phréatiques peuvent être affecté à n'importe quel segment par sélection et affectation (sélectionnez le segment puis l'eau Caractéristique de tableau). Quelques exemples sont présentés à la Figure II.2

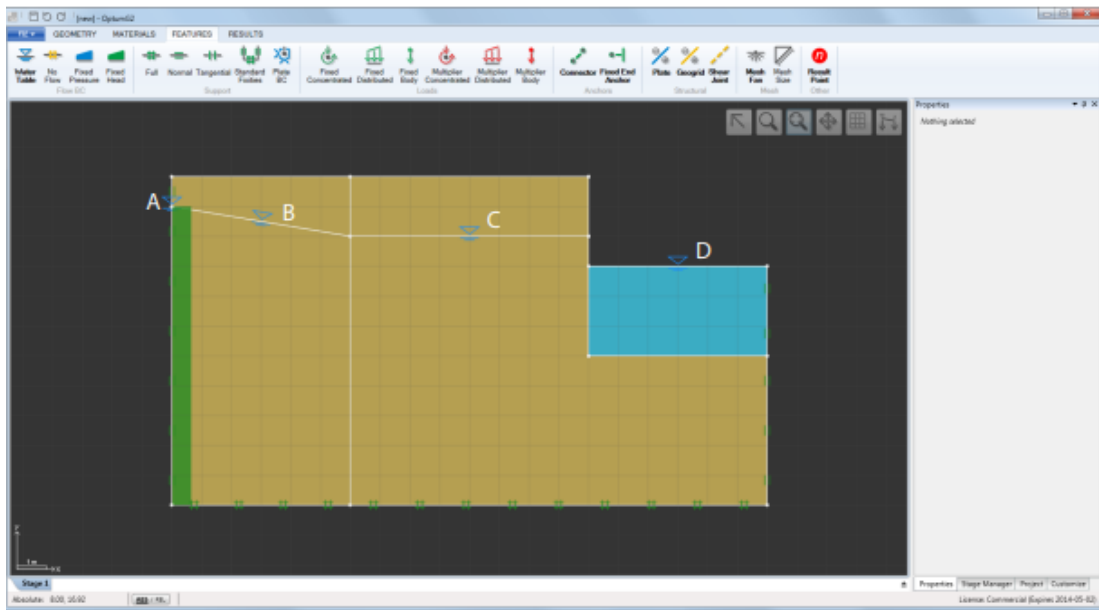


Figure II.3: Caractéristique de la nappe phréatique utilisée pour définir une hauteur constante le long d'une limite externe (A), a ligne de pression zéro sur un segment (B), une nappe phréatique horizontale standard (C) et un nouveau solide avec Matériau d'eau automatiquement attribué (D).

- Pas de flux. Cette fonctionnalité peut être appliquée aux lignes au moyen de la sélection et de l'affectation. Le résultat La ligne agira comme une barrière imperméable.
- Tête Fixe. Cette fonctionnalité peut être appliquée aux lignes au moyen de la sélection et de l'affectation. La valeur au début et à la fin du segment est requise en entrée. En outre, il est nécessaire de sélectionner le côté sur lequel la condition aux limites agit. Ceci est important en relation avec l'affectation aux plaques imperméables et aux limites extérieures.
- Pression fixe. L'équivalent de pression de la tête fixe. Notez que les pressions sont négatives en compression, c'est-à-dire en dessous de la nappe phréatique.
-

Remarques

Tous les supports mécaniques (voir la section suivante) agissent comme des limites sans écoulement.

Les limites externes pour lesquelles aucun BCS d'écoulement n'a été attribué sont supposées être des faces d'infiltration, c'est-à-dire que la pression est nulle alors que le flux sortant peut-être non nul (voir le Manuel théorique).

Les BCS de débit s'appliquent uniquement par rapport aux pressions d'infiltration, p_s

. Pour les conditions également imposées en ce qui concerne les surpressions, voir la section 3

1.1.2 CONSOLIDATION BC :

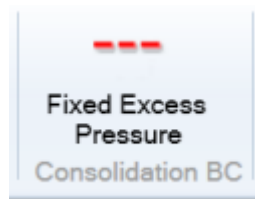


Figure II.4: Icône de consolidation BC

La catégorie Consolidation BC contient une seule caractéristique : la surpression fixe qui fixe l'excès de pression interstitielle à une valeur spécifiée le long d'une ligne. Cette caractéristique n'est pertinente que pour l'analyse de consolidation. Un exemple d'effets de la spécification d'une surpression nulle (correspondant à une surpression libre drainage) est illustré ci-dessous.

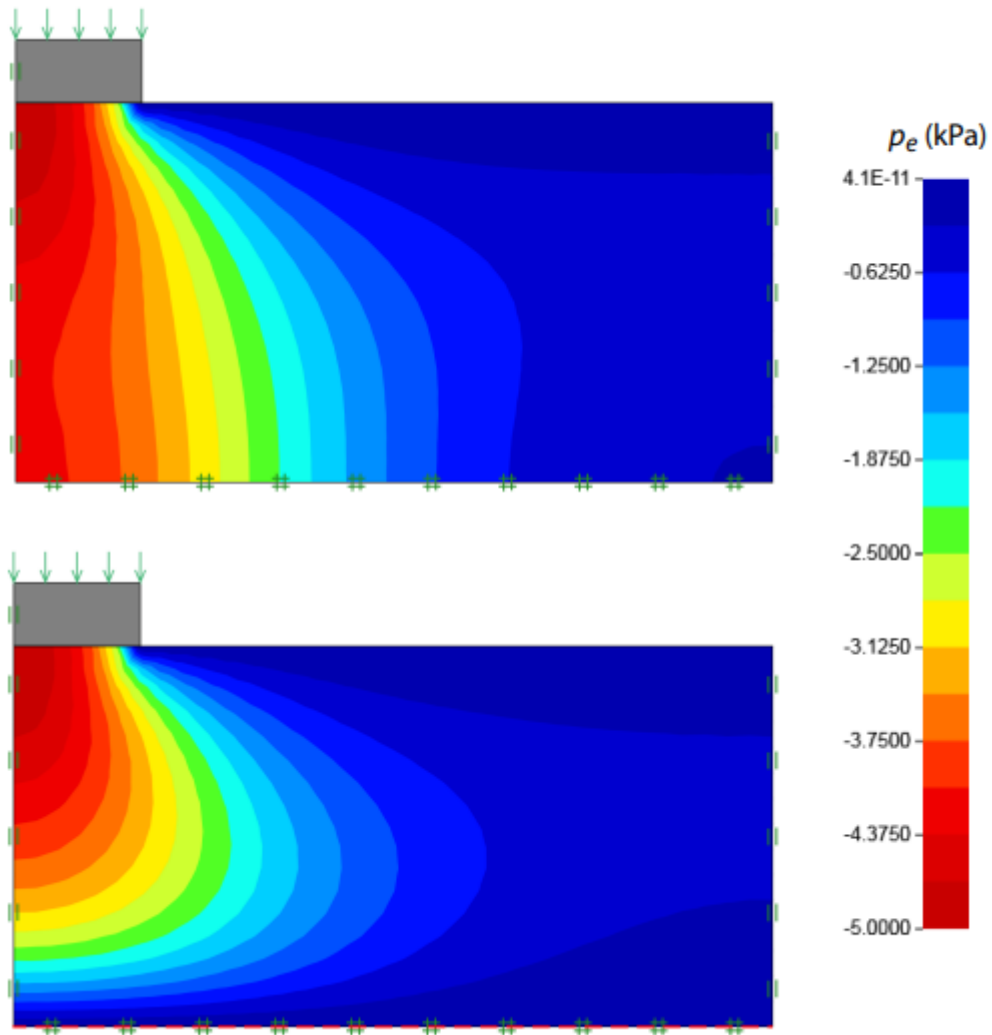


Figure II.5: Distribution de l'excès de pression interstitielle à $t = 1$ jour. Dans la figure du bas, $p_e = 0$ est spécifié le long de la limite inférieure

1.1.3 SUPPORT :

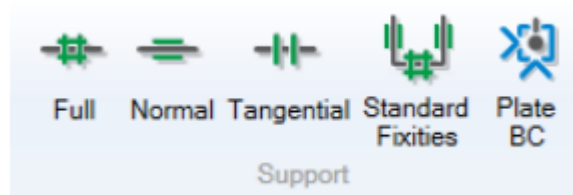


Figure II.6: Icône de support

La catégorie de support contient cinq fonctionnalités :

- Plein. Cette fonctionnalité peut être appliquée aux lignes au moyen de la sélection et de l'affectation. Les déplacements dans toutes les directions le long de la Ligne sont contraints.
- Normale. Cette fonctionnalité peut être appliquée aux lignes au moyen de la sélection et de l'affectation. Les déplacements dans la direction normale à la Ligne sont contraints.

- Tangentielle. Cette fonctionnalité peut être appliquée aux lignes au moyen de la sélection et de l'affectation. Les déplacements dans la direction le long de la Ligne sont contraints.
- Fixités standard. Cette fonctionnalité applique des supports normaux aux lignes verticales et des supports complets aux lignes horizontales qui définissent la limite du domaine.
- Plaque avant JC. Cette fonctionnalité peut être appliquée à des Points faisant partie de Plaques, de géogrilles ou de Connecteurs au moyen de la sélection et de l'affectation. Tout ou partie des trois degrés de liberté (deux déplacements et une rotation) peut être contraint et il est possible d'utiliser un système de coordonnées local comme illustré dans la figure ci-dessous.

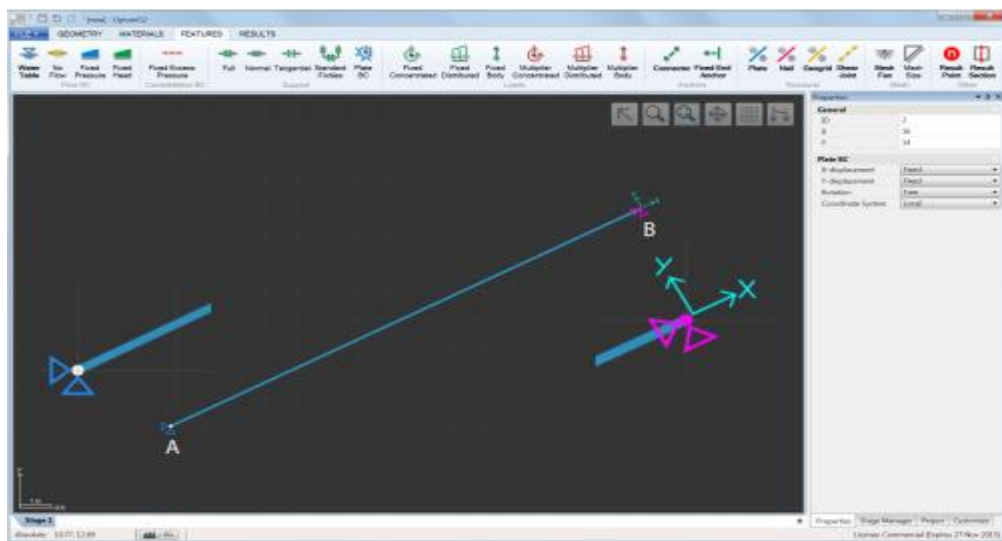


Figure II.7: Plaque simplement supportée avec les supports appliqués en coordonnées globales (A) et locales (B) systèmes.

- de plus, des déplacements fixes peuvent être spécifiés (voir Figure II.7). Ceux-ci ne sont pertinents que pour Analyse élastique, Élastoplastique et de consolidation.

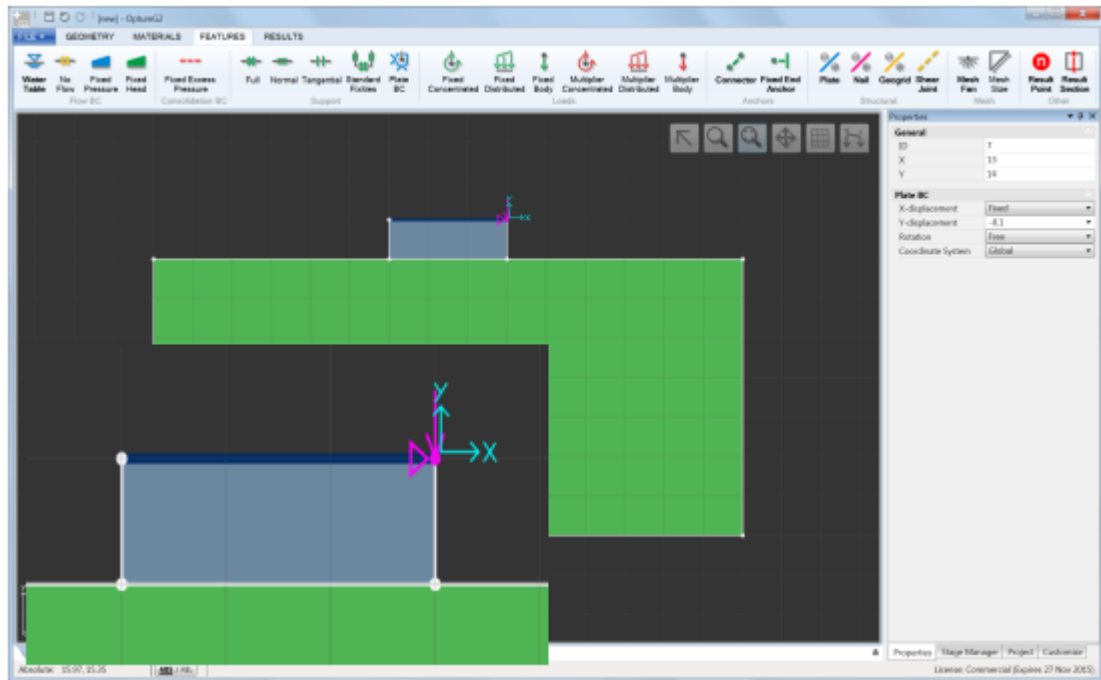


Figure II.8: Déplacement fixe en Y égal à -0,1 appliqué à une plaque rigide au-dessus d'un Solide rigide. Les déplacements en X est fixe, c'est-à-dire égal à zéro.

Remarques

Les supports de ligne (Pleins, Normaux, Tangentiels) agissent également comme des limites sans écoulement.

1.1.4 LOADS :



Figure II.9: Icône de loads

La catégorie Charges BC contient un total de six fonctionnalités différentes qui peuvent être divisées en deux catégories :

Charges fixes et charges multiplicatrices. Les charges fixes apparaissent en vert et restent à leur valeur spécifiée dans une étape donnée. Les charges multiplicatrices apparaissent en rouge et sont, selon le type d'analyse, agrandies pour atteindre une certaine valeur, par exemple la charge limite dans l'Analyse Limite. Dans chaque catégorie, trois différents types de charges sont disponibles :

- Concentré (kN/m). Ces charges s'appliquent uniquement aux nœuds qui font partie de plaques ou de géogrilles.
- Distribué (kN / m²). Ces charges appliquent des lignes.
- Corps (kN/m³). Ces charges s'appliquent aux solides et aux plaques. Ils peuvent être spécifiés soit en unités de force, soit en fraction du poids unitaire du solide ou de la plaque sur laquelle ils sont appliqués.

La figure ci-dessous montre un exemple d'utilisation des trois types de charges.

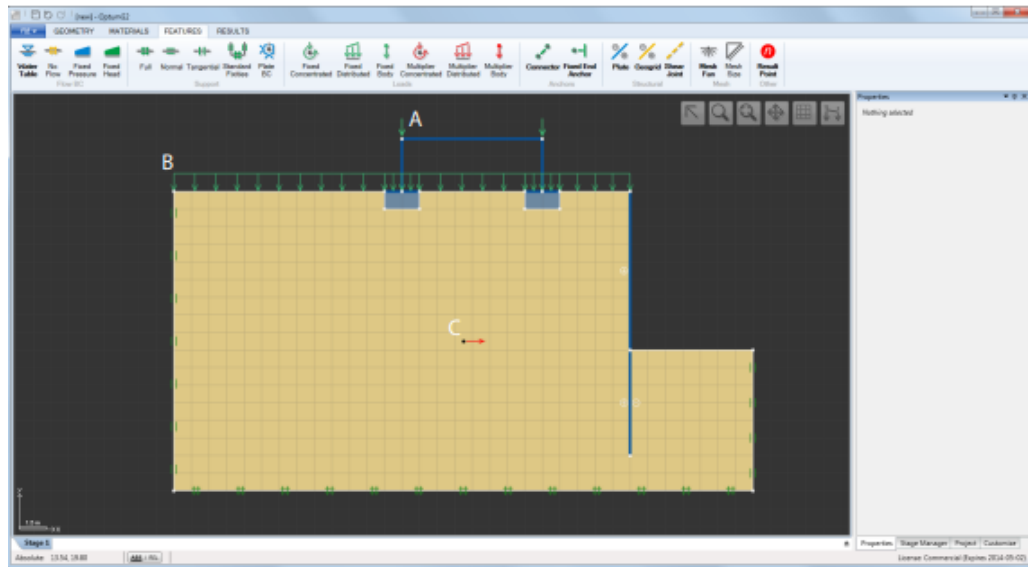


Figure II.10: Application de charges concentrées (A), Réparties (B).

Outre leur amplitude et leur orientation, toutes les charges sont caractérisées par un Type de Charge et une Catégorie de charge. Les réglages précis déterminent les facteurs partiels utilisés dans les Approches de conception disponibles pour l'Analyse limite et la réduction de la résistance (voir Figure II.10).

Design Approaches							
	Unity	DA1/1	DA1/2	User 1	User 2	User 3	User 4
Unit Weight - Unfavourable:							
Permanent	1	1.35	1	1	1	1	1
Unit Weight - Favourable:							
Permanent	1	1	1	1	1	1	1
Loads - Unfavourable:							
Permanent	1	1.35	1	1	1	1	1
Variable	1	1.5	1.3	1	1	1	1
Accidental	1	1	1	1	1	1	1
Loads - Favourable:							
Permanent	1	1	1	1	1	1	1
Variable	1	0	0	1	1	1	1
Accidental	1	0	0	1	1	1	1
Materials:							
c	1	1	1.25	1	1	1	1
ϕ	1	1	1.25	1	1	1	1
c_u (Tresca)	1	1	1.4	1	1	1	1

Figure II.11: Tableau du type et de la catégorie de charge et des approches de conception disponible sous Projet. L'ensemble des facteurs partiels appliqués, pour les étapes d'Analyse limite ou de réduction de résistance, dépend de l'Approche de conception choisie à ces étapes.

Remarques

Dans OPTUMG2, le poids unitaire (spécifié dans les propriétés du matériau) agit toujours vers le bas (à l'opposé de l'axe des ordonnées). En tant que tel, toutes les forces corporelles appliquées s'ajoutent à la force corporelle vers le bas due au poids unitaire.

1.1.5 TIRANTS



Figure II.12: Icône de Anchors

Les ancrages sont des éléments structurels unidimensionnels qui se connectent aux plaques et aux géogrilles. Il existe deux types d'ancrages, qui fonctionnent tous deux comme des outils :

- Connecteurs. Ce sont des éléments en treillis qui se connectent aux plaques et aux géogrilles. Ils n'interagissent pas avec les solides, c'est-à-dire qu'ils peuvent être considérés comme existant dans une couche en dehors de la couche dans laquelle les domaines solides existent. Les connecteurs doivent se voir attribuer un matériau de la catégorie Connecteurs. Cela définit la résistance et la rigidité de l'élément. De plus, il

est possible de prescrire une précontrainte à un Connecteur à un stade donné. La précontrainte est indiquée par le symbole rouge illustré dans la figure ci-dessous.

- Ancrages D'Extrémité Fixes. Ces éléments peuvent être affectés à des nœuds faisant partie de plaques ou de géogrilles. Ils sont équivalents à un connecteur avec un support simple à une extrémité (voir la figure ci-dessous) et nécessitent donc la spécification d'une longueur et d'un angle d'inclinaison équivalents. Précontrainte peut être appliqué de la même manière que pour les connecteurs.

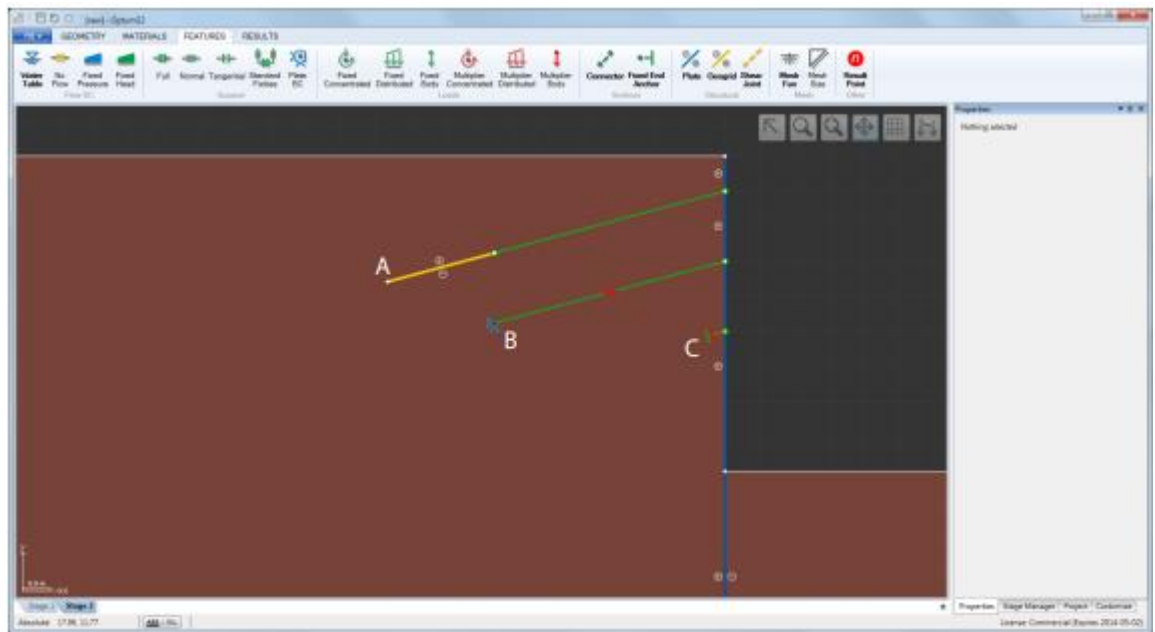


Figure II.13: Connecteur / élément de géogrille pour modéliser une ancre jointoyée (A), un Connecteur précontraint (B).

1.1.6 STRUCTURE



Figure II.14: Icône de Structural

La catégorie Structurelle contient trois fonctionnalités qui fonctionnent toutes comme des outils:

- Assiettes. Ce sont des éléments de poutre utilisés pour modéliser des murs et divers autres éléments minces. Les plaques se voient attribuer un matériau de la catégorie Plaques qui définit ses propriétés de résistance et de rigidité. De plus, les plaques peuvent être soit perméables, soit imperméables.

- Pile Rangées. Ce sont des éléments spéciaux qui n'interagissent que partiellement avec le sol pour expliquer approximativement ce qui est par ailleurs un problème tridimensionnel complexe. Une description complète des rangées de pieux est donnée dans le Manuel des matériaux.
- Rangées d'ongles. Il s'agit d'une spécialisation des rangées de pieux (voir le Manuel des matériaux pour plus de détails).
- Géogrilles. Ce sont des éléments en treillis utilisés pour modéliser des géogrilles et des types similaires de renforcement. Les géogrilles sont également couramment utilisées pour modéliser les ancrages jointoyés (voir l'exemple dans la section précédente et le Manuel des exemples). Les géogrilles se voient attribuer un matériau de la catégorie géogrille qui définit ses propriétés de résistance et de rigidité. En tant que plaques, les géogrilles peuvent être perméables ou imperméables.
- Joints de Cisaillement. Ce sont des éléments d'interface auxquels on peut attribuer n'importe lequel des matériaux de la catégorie des solides. Il est à noter que les interfaces associées aux Plaques et aux géogrilles font partie intégrante de ces éléments et ne doivent pas être définies séparément. En tant que tels, les joints de cisaillement ne doivent être utilisés que pour modéliser les discontinuités internes dans les solides ou les interfaces entre les domaines solides. Quelques exemples sont présentés ci-dessous.

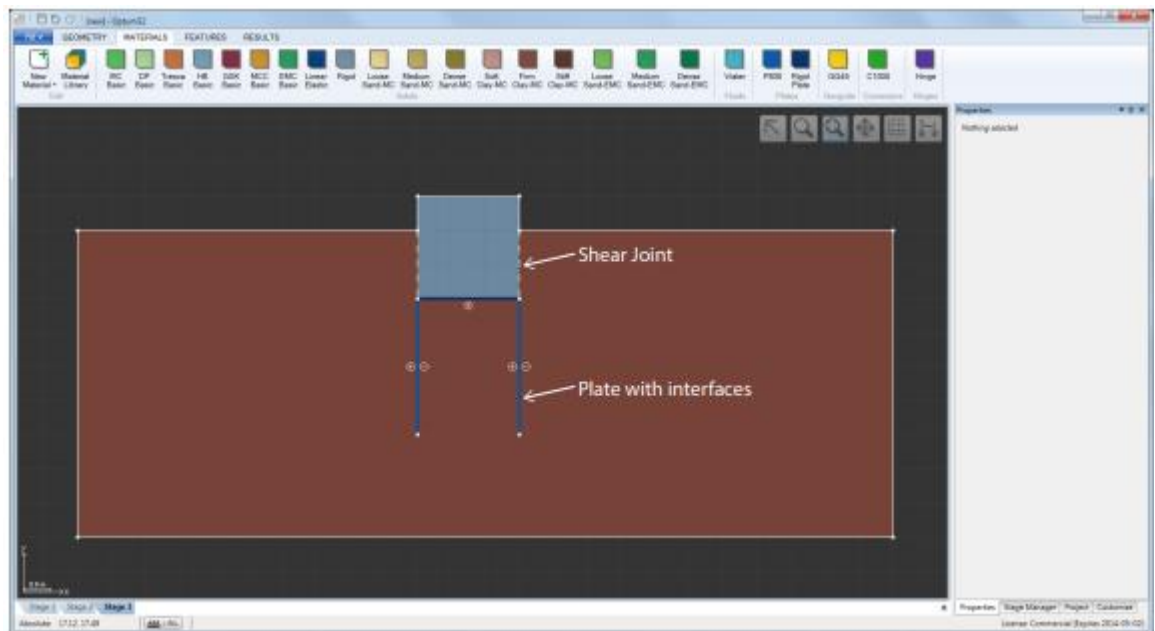


Figure II.15: Plaques avec interfaces et joints de cisaillement utilisées pour modéliser l'interface entre le sol et la fondation.

1.1.7 MAILLAGE :



Figure II.16: Icône de Mesh

La catégorie Mesh contient deux fonctionnalités :

- Ventilateur en Maille. Cette fonctionnalité, qui fonctionne également comme un outil, peut être appliquée à des Points pour créer un "éventail" d'éléments autour d'elle (voir figure ci-dessous). Cette caractéristique est particulièrement utile pour les éléments du type Inférieur en des points où des singularités de l'une ou l'autre nature sont présentes.
- Taille de maille. Ces caractéristiques peuvent être appliquées à des Points, des Lignes et des Surfaces pour spécifier une taille d'élément graphique. Un exemple d'application à un point est présenté ci-dessous.

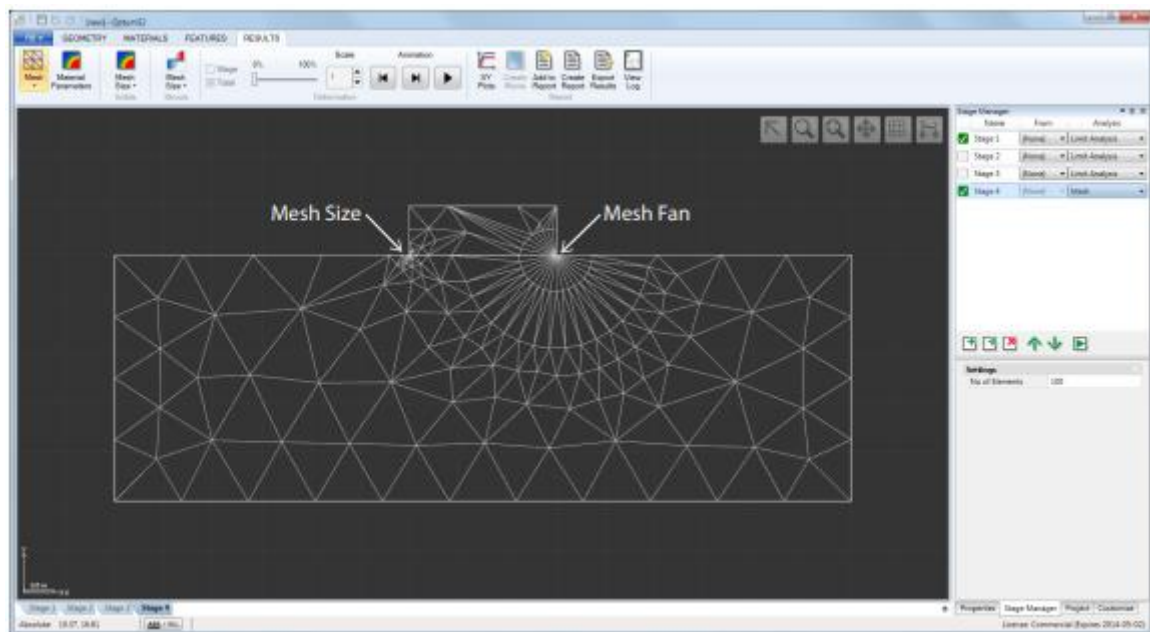


Figure II.17: Spécification de la taille du maillage et de l'éventail du maillage aux coins d'une semelle en bande.

Remarques

Dans la plupart des cas, l'utilisation de l'adaptabilité du maillage placera automatiquement les éléments de manière optimale et il ne devrait généralement pas être nécessaire de spécifier manuellement les tailles de maillage. Cependant, dans certains cas, notamment pour des éléments de type Inférieur, un raffinement manuel et / ou une spécification des Éventails de maillage peuvent être utiles, notamment

pour des domaines solides minces ou autour de singularités du genre de celles illustrées sur la figure ci-dessous.

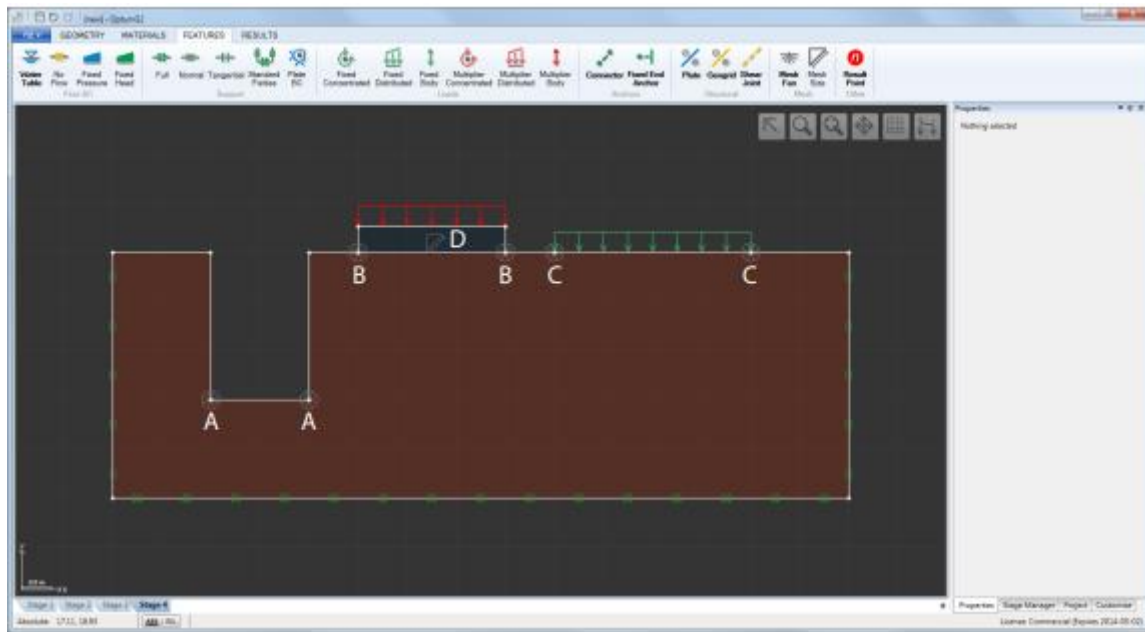


Figure II.18: Spécification des ventilateurs de maillage aux points singuliers (A, B, C) et de la taille du maillage pour le domaine solide mince (D).

1.1.8 AUTRE

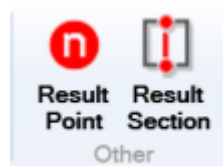


Figure II.19: Icône de Other

L'autre catégorie contient une seule fonctionnalité :

- Point de résultat. Cette fonctionnalité, qui fonctionne également comme un outil, peut être appliquée n'importe où dans le domaine. Les résultats, par exemple d'une analyse élasto-plastique multiplicatrice, sont enregistrés à ces points et peuvent ensuite être tracés à l'aide de l'outil Tracés XY disponible sous le ruban Résultats

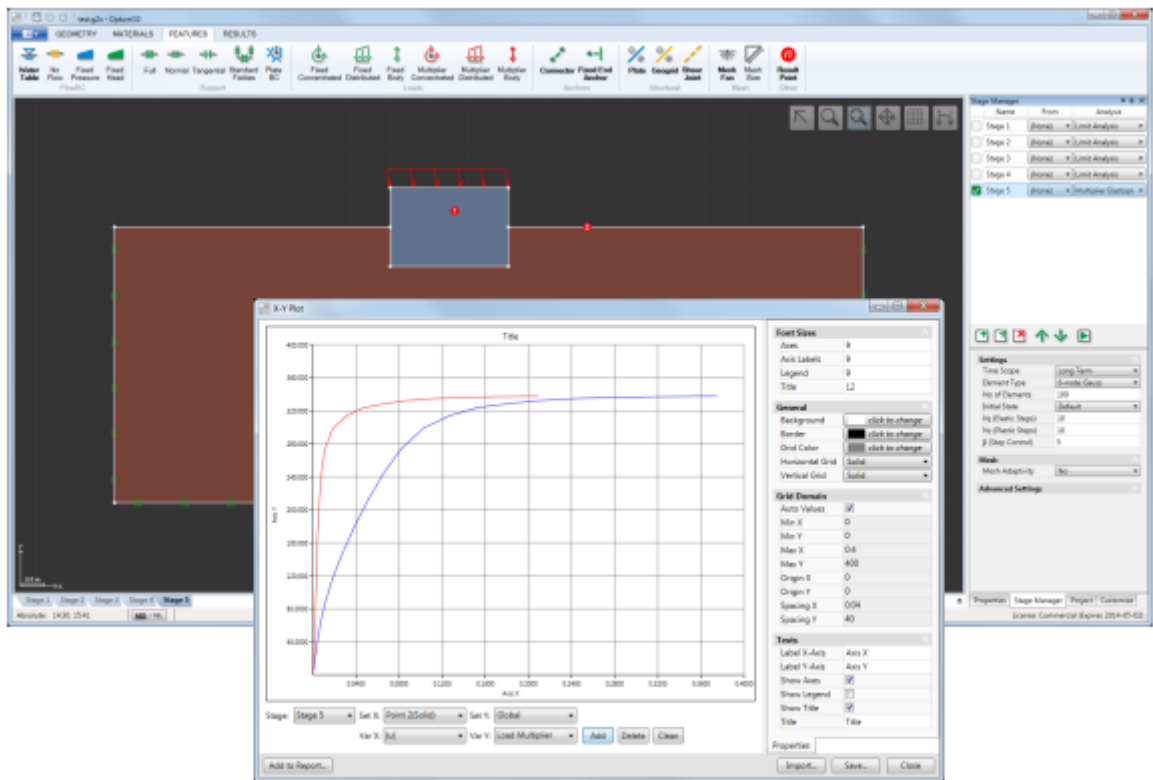
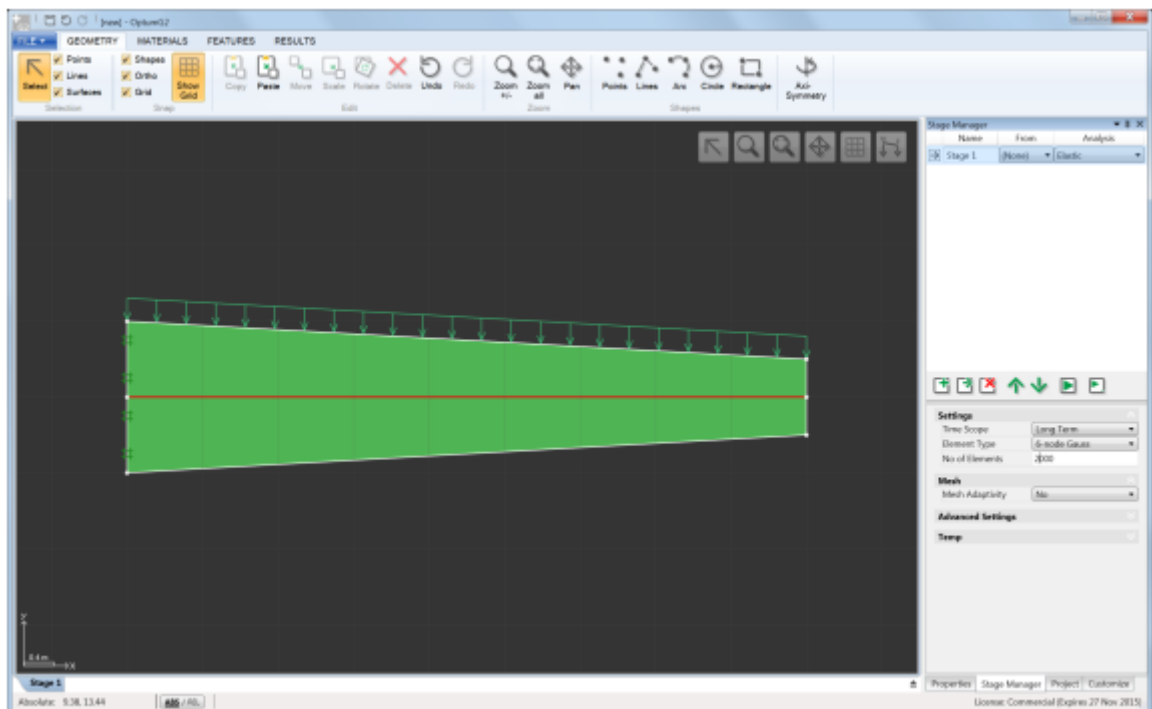


Figure II.20: Points de résultat (1 et 2) et courbes charge-déplacement produits à l'aide de tracés XY.

- Section des résultats. Cette caractéristique agit comme une "plaque virtuelle" dans le sens où les forces de section de la plaque (force normale, moment de flexion, etc.) sont calculées à partir des contraintes dans les éléments environnants. Un exemple est présenté ci-dessous. Voir également le manuel d'exemples pour une description complète et la validation de la fonctionnalité par rapport aux solutions analytiques.



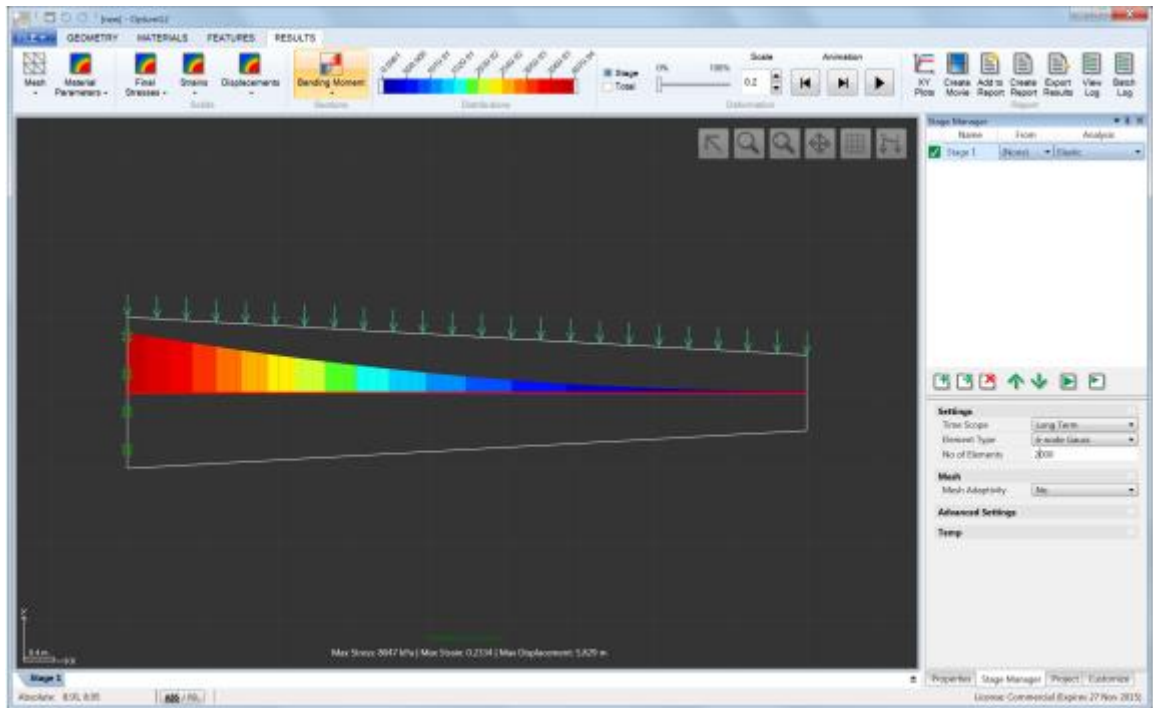


Figure II.21: Caractéristique de la section de résultat appliquée à la ligne médiane d'une poutre en porte-à-faux conique (en haut) et répartition du moment de flexion résultant (en bas).

2. Types d'analyses disponibles dans OPTUMG2

Optum G2 est un programme d'éléments finis pour l'analyse de la résistance et de la déformation des problèmes de valeurs limites géotechniques. Il a un certain nombre de principes généraux en commun avec d'autres programmes disponibles sur le marché, mais diffère aussi fondamentalement sur un certain nombre de points. Par exemple, il est possible de calculez directement les charges limites, ou les capacités portantes, sans avoir à effectuer une analyse élastoplastique traditionnelle étape par étape. De plus, il est possible de calculer des limites supérieures et inférieures rigoureuses à la charge limite, mettant ainsi la solution exacte entre parenthèses à un intervalle généralement assez étroit. Inversement, étant donné un ensemble de charges fixes, il est possible de calculer les limites supérieure et inférieure à la force exacte facteur de réduction, c'est-à-dire le facteur par lequel les résistances du matériau doivent être réduites pour provoquer effondrement. Outre ces caractéristiques uniques, Optum G2 permet également des analyses plus traditionnelles, y compris l'élastoplasticité, l'infiltration et la consolidation étape par étape.

Le type d'analyse à effectuer pour une étape donnée est sélectionné via le régisseur (voir Figure 1.1). La fenêtre du gestionnaire de scène est divisée horizontalement en deux parties. La partie supérieure contient trois colonnes. La première colonne contient le nom de la scène, qui peut être modifié à volonté. Les la deuxième colonne contient un menu déroulant dans lequel l'étape De peut être sélectionnée. Le De la scène précède l'étape actuelle et toutes les variables d'état (contraintes,

déplacements, etc.) sont transférées à l'étape actuelle comme état initial. Les changements de géométrie, de chargement, de matériaux, etc. sont identifiés automatiquement et aucune autre disposition que la sélection de l'étape pertinente ne doit être prise en compte ordre de relier les étapes. Enfin, la dernière colonne contient un menu déroulant pour la sélection de l'analyse pour l'étape actuelle.

La moitié inférieure de la fenêtre du Gestionnaire de scènes contient les différentes options et paramètres pertinents pour le type d'analyse qui est effectué. Ceux-ci sont propres à une étape donnée et peuvent différer d'étape en étape pour le même type d'analyse.

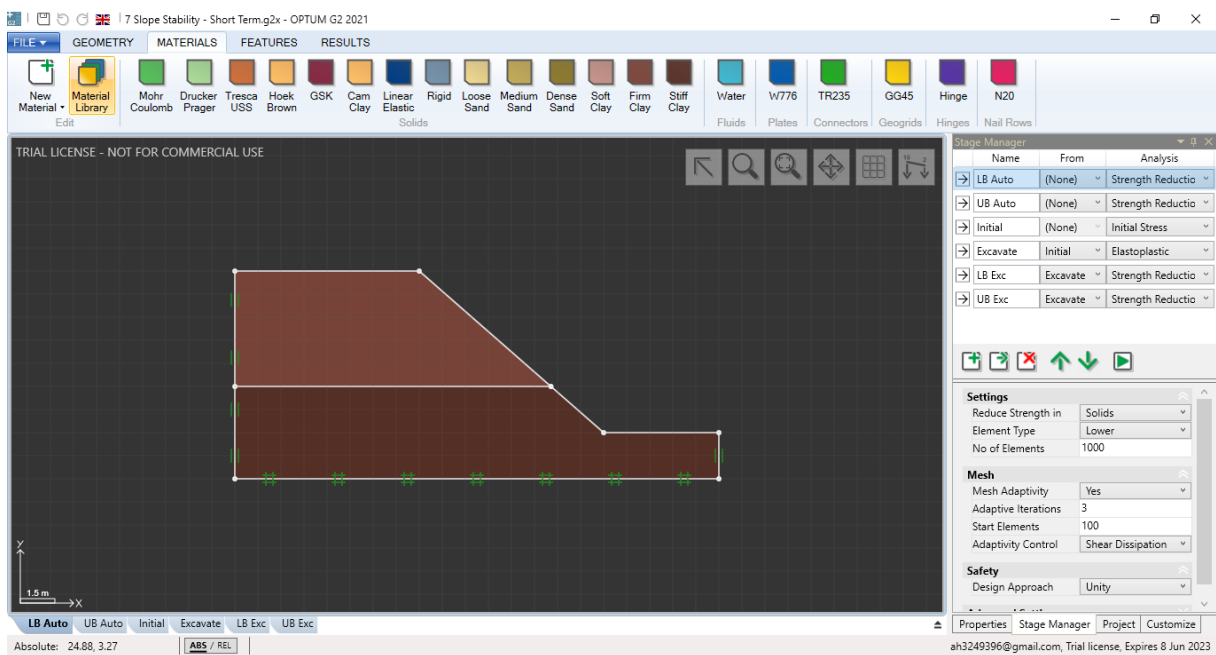


Figure II.22: Optum G2 showing the Stage Manager on the right.

Entre les deux parties de la fenêtre du gestionnaire de scène se trouve une rangée de boutons de commande (Figure II.22). Ces contrôles permettent diverses manipulations : ajout de nouvelles étapes, clonage d'étapes existantes, suppression d'étapes et déplacement d'étapes de haut en bas dans la liste des étapes à traiter. Le dernier bouton exécute les calculs et les étapes sont traitées dans l'ordre dans lequel elles apparaissent dans la liste.

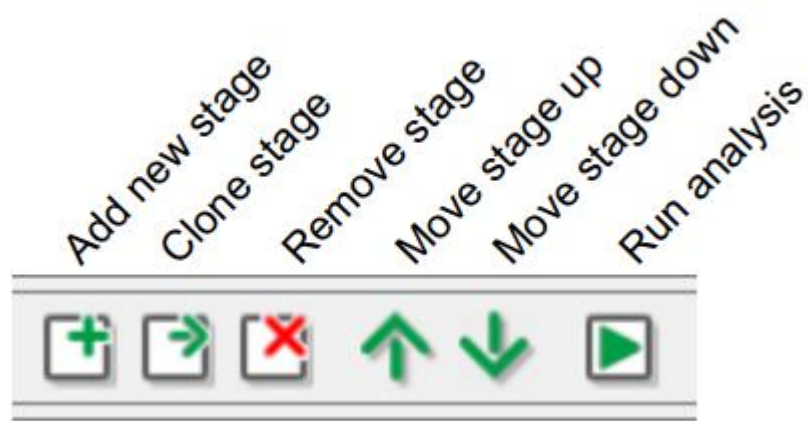


Figure II.23: Boutons de contrôle du régisseur.

Les types d'analyse disponibles dans OptumG2 sont :

- * Maille
- * Infiltration
- * Contraintes initiales
- * Élastique
- * Analyse des Limites
- * Réduction de la Force
- * Élastoplastique
- * Multiplicateur Élastoplastique

Dans ce qui suit, chacun de ces différents types d'analyse est documenté en détail.

2.1 Analyses limite :

L'Analyse Limite permet d'évaluer rapidement la stabilité ou la capacité portante des géostructures sans avoir à effectuer une analyse élastoplastique exhaustive étape par étape.

Les charges fixes et les multiplicateurs sont tous deux applicables. Dans l'Analyse Limite, les premières sont maintenues constantes tandis que les derniers sont amplifiés jusqu'à ce qu'un état de

rupture imminente soit atteint. Le facteur par lequel les charges multiplicatrices doivent être amplifiées pour provoquer la rupture est également appelé le multiplicateur de rupture.

En plus de déterminer le multiplicateur de rupture pour un ensemble de charges externes, il est également possible de calculer le facteur par lequel la gravité doit être amplifiée pour atteindre un état de rupture. Cette fonctionnalité est utile, par exemple, en ce qui concerne la stabilité des pentes.

Une caractéristique unique d'Optum G2 est la capacité à calculer des limites supérieures et inférieures de la charge de rupture. Cela est réalisé simplement en choisissant le type d'élément approprié - supérieur ou inférieur, respectivement.

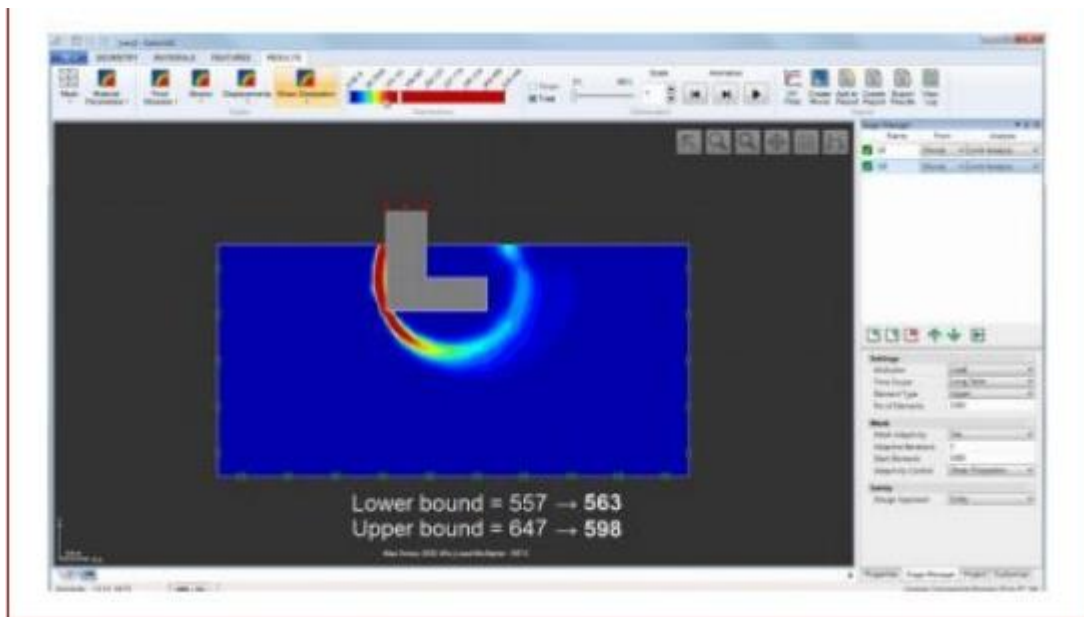


Figure II.24: Calcul des limites supérieures et inférieures de la charge de rupture

2.1.1 Réglages :

Cette catégorie contient quatre champs :

- Multiplicateur (Charge/Gravité).
- Plage de temps (Long terme/Court terme).
- Type d'élément.
- Nombre d'éléments.

Pour Multiplieur = Charge, le multiplicateur d'effondrement amplifie les charges de multiplicateur (indiquées en rouge) tandis que les charges fixes (indiquées en vert) et la gravité sont maintenues constantes à leurs valeurs spécifiées. Pour Multiplieur = Gravité, les charges de multiplicateur sont ignorées, les charges fixes sont maintenues constantes et l'accélération

gravitationnelle est amplifiée jusqu'à ce qu'un état d'effondrement soit atteint. Ces règles sont résumées dans le Tableau 6.1. Quelques exemples sont illustrés dans la Figure II.23

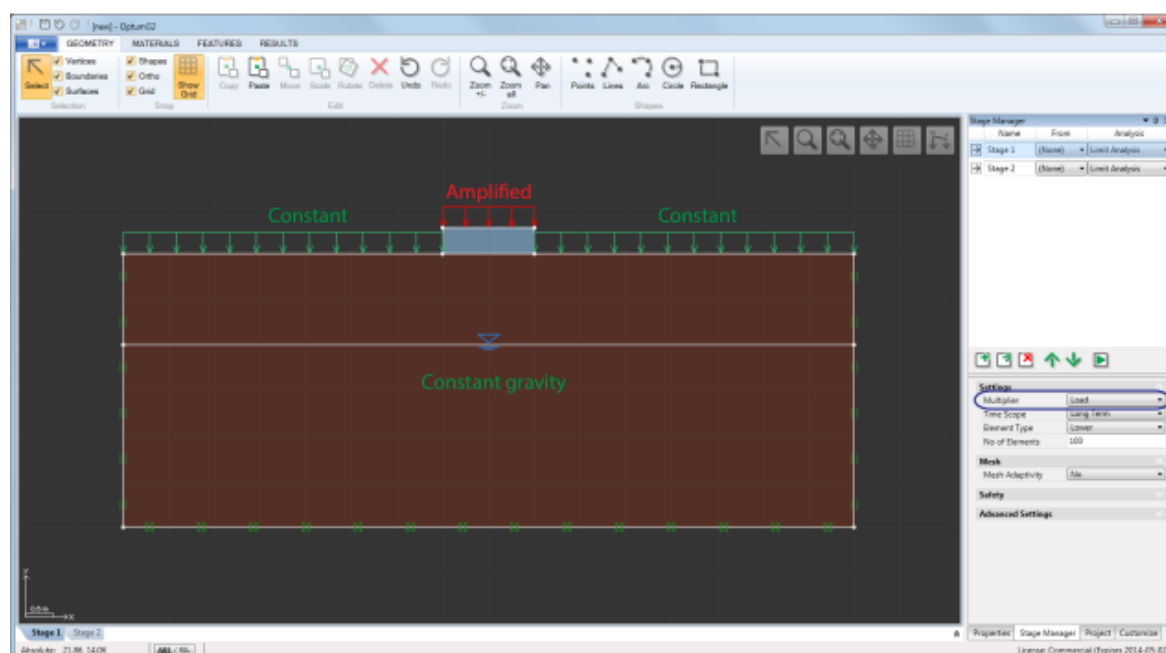
	Multiplier = Charge	Multiplier = Gravité
Charges de multiplicateur	Amplifiées	Ignorées
Charges fixes	Constantes	Constantes
Gravité	Constantes	Amplifiées

Tableau II.1: État des charges de multiplicateur, des charges fixes et de la gravité en fonction du réglage du multiplicateur.

En ce qui concerne le réglage de la Plage de temps, veuillez-vous référer au Manuel des Matériaux.

Pour le Type d'élément = Inférieur, des bornes inférieures rigoureuses sont calculées tandis que les bornes supérieures résultent de Type d'élément = Supérieur.

Le Nombre d'éléments spécifie le nombre d'éléments (et le nombre d'éléments dans le maillage final si l'adaptativité de maillage est utilisée).



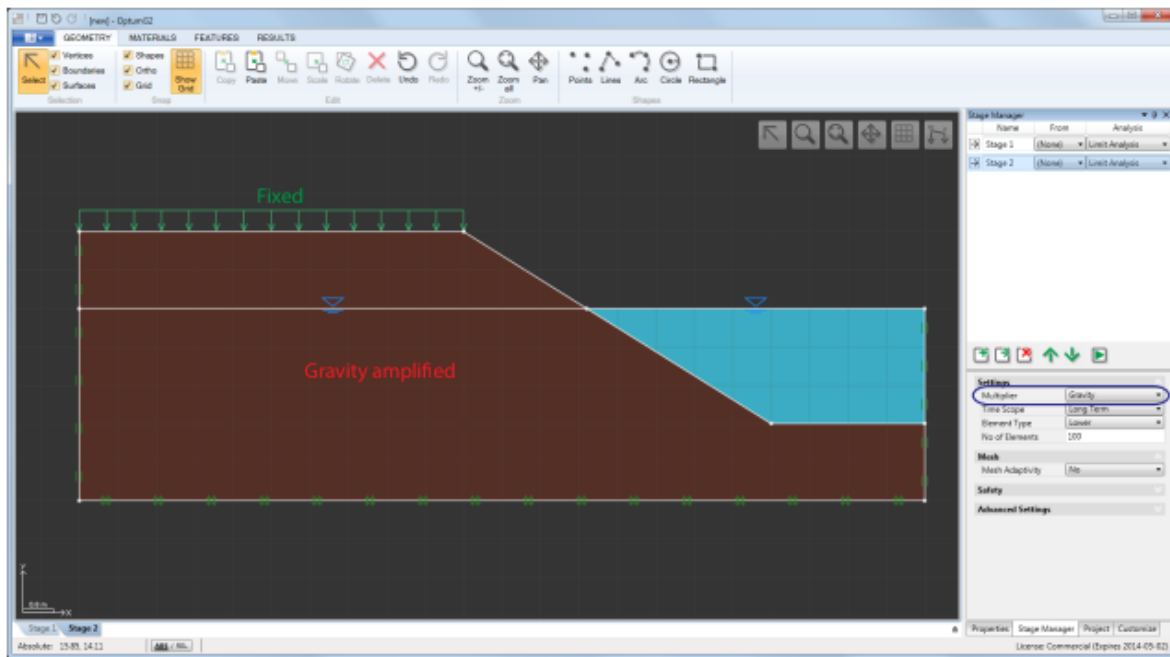


Figure II.25: Exemples d'analyse limite avec Multiplicateur = Charge (en haut) et Multiplicateur = Gravité (en bas).

2.2 Contraintes initiales :

Pour l'analyse de limite dans des conditions où aucune pression interstitielle excessive n'est générée (matériau toujours drainé indépendamment de la portée temporelle ou des matériaux drainés/ non drainés pour la portée temporelle = long terme), la solution est indépendante des contraintes initiales. Il s'agit d'une caractéristique unique de l'analyse de limite.

Pour les cas où des pressions interstitielles excessives sont générées (portée temporelle = court terme pour les matériaux drainés/ non drainés), la solution dépendra des contraintes initiales. Pour une telle analyse, une étape de départ peut être spécifiée dans le gestionnaire d'étapes ou, si aucune étape de départ n'est spécifiée, les contraintes initiales seront calculées automatiquement à l'aide de l'analyse de contrainte initiale décrite dans la Section 4.

Les pressions de suintement sont toujours calculées automatiquement et prises en compte dans l'analyse de limite ultérieure.

2.3 Analyse Elastique :

Le type d'analyse élastique effectue uniquement l'analyse élastique, c'est-à-dire les conditions d'élasticité, les coupures de tension et les caractéristiques similaires qui impliquent une contrainte sur les contraintes sont ignorées. Dans l'analyse élastique uniquement fixe. Les charges sont traitées tandis que les charges multiplicatrices sont ignorées (K Krabbenhoft, et al 2016).

2.4 Réduction de la force :

Alors que l'analyse des limites traite du problème de la détermination de la grandeur ultime d'un ensemble de références charges, l'analyse de la réduction de la résistance traite le problème complémentaire de la détermination force nécessaire pour éviter l'effondrement étant donné un ensemble de charges réelles.

L'analyse de réduction de force dans Optum G2 se déroule en calculant un facteur de réduction de force par dont les paramètres matériels doivent être réduits pour atteindre un état d'effondrement naissant. Un facteur supérieur à 1 implique donc un système stable tandis qu'un facteur inférieur à 1 implique que la force est nécessaire pour empêcher l'effondrement (K Krabbenhoft, et al 2016).

2.5. Elastoplastique

L'analyse élastoplastique est similaire à l'analyse élastique, la différence étant le critère de défaillance pour tous les éléments solides et structurels sont inclus dans l'analyse. Comme dans l'analyse élastique, seules les charges fixes sont traitées alors que les charges de multiplicateur sont ignorées. La gravité est automatiquement incluse (K Krabbenhoft, et al 2016).

2.6. Elastoplastique multiplicateur

L'analyse élastoplastique multiplicateur peut être considérée comme combinant l'analyse limite et élastoplastique types d'analyses. Comme dans l'analyse des limites, les charges du multiplicateur sont amplifiées jusqu'à l'effondrement tandis que les charges fixes et la gravité sont maintenues constantes. Cela se fait de manière élastoplastique étape par étape avec des déformations calculé à chaque étape de chargement.

2.7 Consolidation

L'analyse de consolidation est applicable aux situations où la génération et la dissipation d'un excès les pressions interstitielles avec le temps sont intéressantes. Les exemples incluent les fondations à chargement rapide, les remblais construction, excavations et diverses autres analyses de construction par étapes. Ce n'est pas recommandé pour sonder l'état limite ultime au moyen d'une analyse de consolidation. Pour de telles informations, limiter L'analyse, la réduction de la résistance ou l'analyse élastoplastique par multiplicateur doit être utilisée (K Krabbenhoft, et al2016).

2.8. Consolidation BC :

La catégorie Consolidation BC contient une seule fonction : la pression excessive fixe qui fixe la pression interstitielle excessive à une valeur spécifiée le long d'une ligne. Cette fonctionnalité n'est pertinente que pour l'analyse de consolidation. Un exemple des effets de la spécification d'une surpression nulle (correspondant à un drainagelibre) est présenté ci-dessous (K Krabbenhoft, et al2016).

Chapitre III :

*Modélisation numérique des pressions actives des terres
pour un écran rigide vertical : étude et analyse des
résultats*

1. Description du problème

Le problème de l'étude actuelle concerne un mur de soutènement rigide d'une hauteur $H = 10$ m (très élevée). La géométrie est présentée dans la Figure 1, et le maillage d'éléments finis est montré dans la Figure 2. Des charges permanentes ont été placées à une certaine distance, 'a', derrière le mur, imposant une surcharge sous forme de charge linéique, q . La position de la surcharge linéique par rapport au mur varie de $a/H = 0$ à $a/H = 1$ avec des incréments de 0,1. La valeur de la surcharge linéique prend trois valeurs 50 et 100kN/m² et la largeur de la charge linéique, b , est fixée à $b/H = 0,2$ et $b/H = 0,3$.

Un modèle élastoplastique constitutif est utilisé pour représenter le comportement contrainte-déformation du sol, obéissant aux critères de rupture de Mohr-Coulomb avec la règle de l'écoulement non associative ou l'angle de dilatation : $\psi = 0$. Les propriétés élastiques sont le module d'Young $E = 35$ MPa et le coefficient de Poisson $\nu = 0,3$. La cohésion $c = 0$ et l'angle de frottement interne φ varie de 25° à 35° par incréments de 5° . Le poids volumique du sol est supposé égale à $\gamma = 20$ kN/m³. Un modèle élastique linéaire est utilisé pour simuler le mur de soutènement en béton. Des éléments d'interface sont utilisés pour modéliser l'interaction sol-structure. Les paramètres de l'interface ont les valeurs suivantes : un angle de frottement $\delta = 0, \varphi/3$ et $2\varphi/3$.

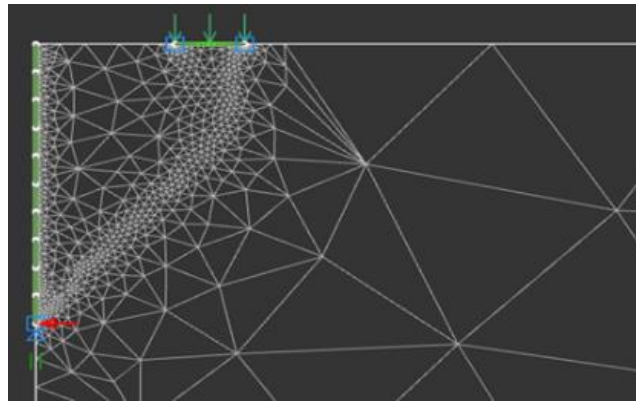


Figure. III.1 Maillage pour un mur de soutènement pour $a/H=0,3$

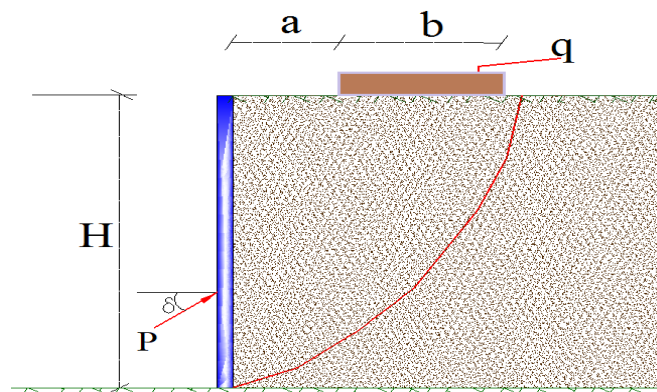


Figure. III.2 Géométrie d'un mur de soutènement – sol

2. Validation du modèle

La procédure de modélisation numérique a été validée en comparant les résultats avec les méthodes existantes de détermination des pressions latérales des terres générées par des surcharges en bandes. La figure 3 présente le rapport P/bq (où P représente la force latérale due au poids du sol et à la charge linéaire) en fonction de a/H pour les méthodes existantes et notre solution.

Pour les charges linéaires situées près du mur ($a/H < 0,1$), notre solution fournit des estimations plus basses que l'approche de distribution à 45° . Cela est dû au fait que cette approche considère la surcharge en bande comme une surcharge étendue agissant sur les profondeurs légères derrière le mur.

Pour $a/H > 0,1$, les approches de distribution à 45° et Beton Kalendar sous-estiment la force latérale du sol par rapport à notre solution. Lorsque $a/H > 0,5$, notre solution prédit des valeurs plus élevées que la solution élastique. À partir de $a/H = 0,9$, la solution élastique devient plus significative, mais une règle empirique indique que la charge linéaire aura un effet négligeable sur la force latérale si elle est à une distance supérieure à la hauteur du mur.

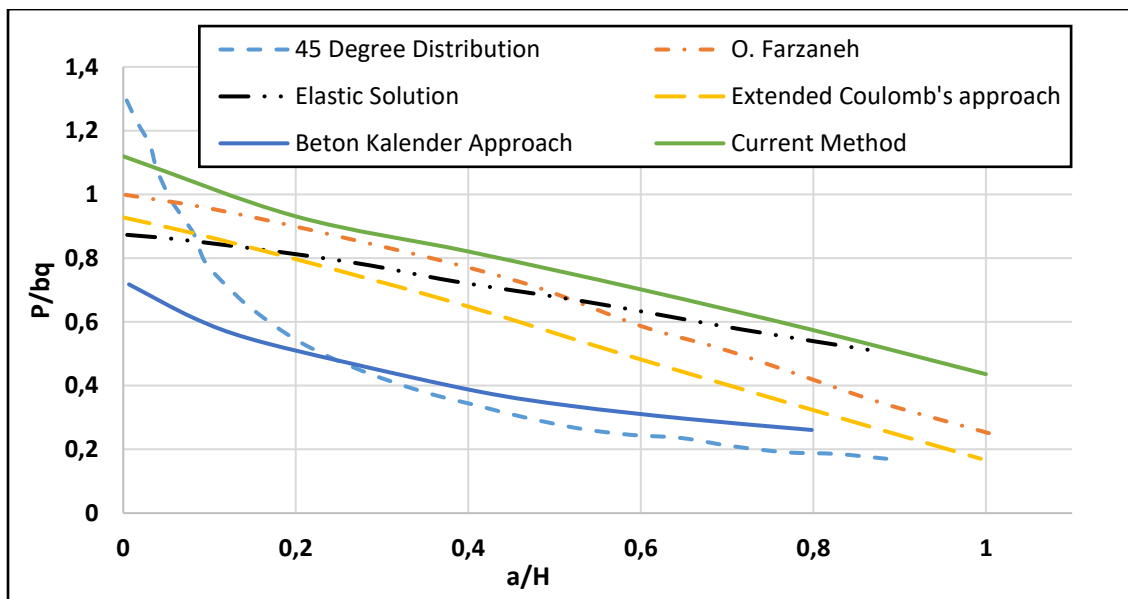


Figure. III.3 Comparison of present solution with 45° distribution approach, Beton Kalendar method, O Farzaneh, Extend Coulomb's approach, and elastic solution for: $\phi = 30^\circ$, $b/H = 0.3$, $\delta/\phi = 2/3$, $q/\gamma H = 1.5$

3. Résultats de Simulation et analyse des résultats

3.1 Poussée Active

Notre étude vise à analyser la poussée latérale totale agissant sur un mur due au poids du sol et à la surcharge q partiellement répartie en utilisant une approche numérique. Les figures de 5 à 8 présentent les rapports de la force latérale totale P à $b \cdot q$ pour diverses configurations du problème. Les paramètres clés pris en compte dans notre analyse comprennent $P/b \cdot q$, $q/y \cdot H$, a/H , b/H , δ/ϕ et ϕ .

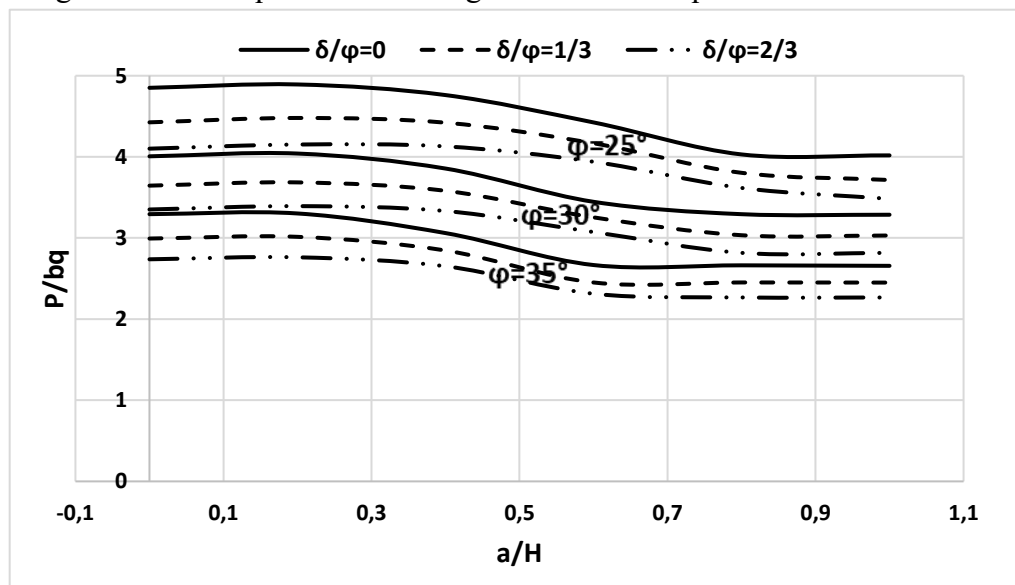
3.1.1 Poussée Active avec $b/H=0.2$

Nous avons calculé le rapport adimensionnel P/qb , qui représente la pression active sur le mur en fonction de l'intensité q de la surcharge et de la largeur b , tout en faisant varier le rapport a/H , qui décrit la distance de la surcharge au mur, et en considérant différentes largeurs de surcharge ($b/H = 0,2$ et $0,3$), trois niveaux d'intensité de surcharge ($q/y \cdot H = 0,25$ et $0,50$), ainsi que quatre angles de frottement interne du sol ($\phi = 25^\circ$, 30° , et 35°). Nous avons également examiné l'angle d'interface ($\delta/\phi = 0$, $1/3$ et $2/3$).

Pour $b/H=0.2$ et $q/y \cdot H = 0,25$, on constate que lorsque a/H augmente de 0 à 1, le rapport P/qb diminue, indiquant une décroissance de la pression active à mesure que la distance entre la surcharge et le mur augmente. En outre, pour des valeurs données de δ/ϕ et a/H , P/qb est plus élevé lorsque ϕ est plus faible, ce qui suggère des pressions actives plus importantes dans les sols moins frottants.

Par exemple, avec $\delta/\phi = 1/3$ et $a/H = 0,2$, P/qb s'établit à 2,737 pour $\phi = 25^\circ$, tandis qu'il est de 2,233 pour $\phi = 30^\circ$, 1,828 pour $\phi = 35^\circ$. À ϕ et a/H constants, P/qb diminue lorsque δ/ϕ augmente, ce qui indique que la pression active diminue pour des interfaces moins frottantes. Avec $\phi = 30^\circ$ et $a/H = 0,4$, P/qb passe de 2,104 pour $\delta/\phi = 0$ à 1,961 pour $\delta/\phi = 1/3$, puis à 1,579 pour $\delta/\phi = 2/3$.

Ces tendances ont été confirmées pour les intensités de surcharge de $q/y \cdot H = 0,25$ et $0,50$. Comme prévu, une augmentation de q entraîne une augmentation de P/qb .



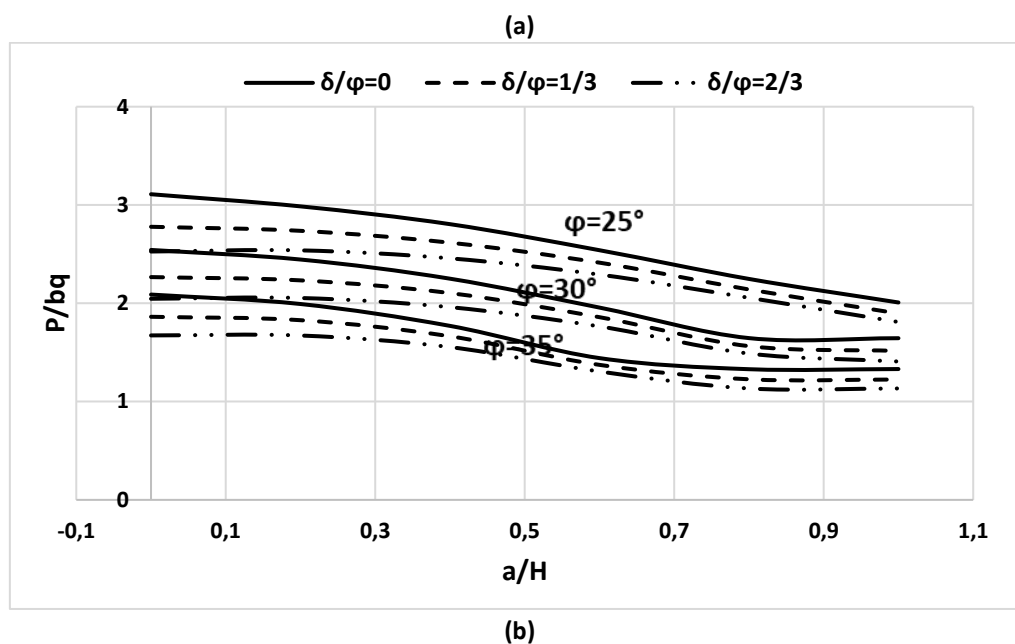


Figure. III.4 Diagrammes de poussée active à l'effet simultané du poids du sol et de la surcharge avec : $b/H = 0,2$; (a) $q/\gamma H = 0.25$; (b) $q/\gamma H = 0.50$

3.1.2 Poussée Active avec $b/H = 0.3$

En augmentant la largeur de la surcharge à $b/H = 0,3$, les mêmes effets sont observés de a/H , φ et δ/φ sur le rapport P/qb . Les valeurs de P/qb étaient globalement plus élevées pour un ensemble donné de paramètres (φ , δ/φ , q , a/H), conformément à nos attentes. Par exemple, avec $\varphi = 30^\circ$, $\delta/\varphi = 1/3$, $q = 50$ kPa et $a/H = 0,2$, P/qb s'établissait à 2,233 pour $b/H = 0,2$, contre 2,621 pour $b/H = 0,3$.

En synthèse, notre étude révèle plusieurs conclusions importantes :

La pression active diminue à mesure que la distance a entre la surcharge et le mur augmente.

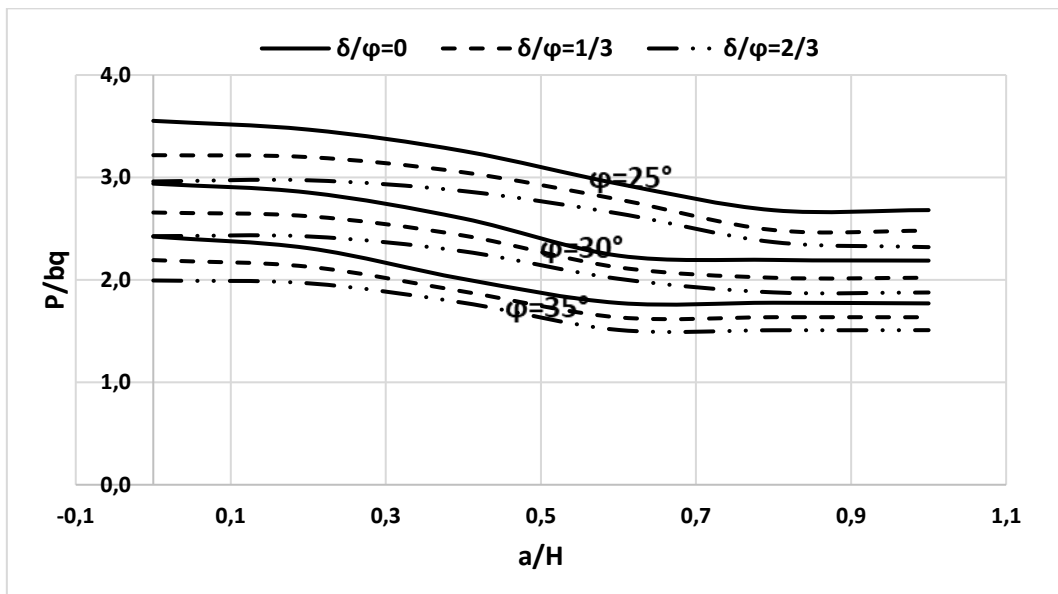
La pression active est plus élevée dans les sols moins frottants.

Elle est également plus élevée lorsque l'interface sol-mur est rugueuse.

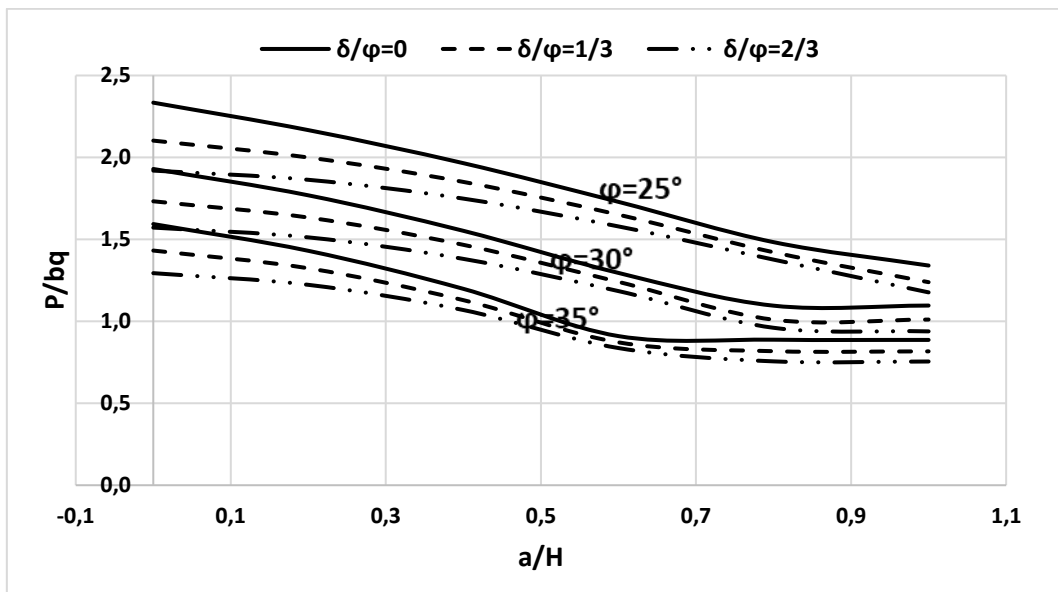
L'augmentation de l'intensité de la surcharge q et de la largeur de la surcharge b entraîne logiquement une augmentation de la pression active.

En outre, nos résultats semblent être en accord avec les méthodes analytiques existantes, notamment la méthode de Steinfeld et Hansen basée sur l'équilibre limite, ainsi que la méthode de Ghanbari et Taheri, qui montre des résultats similaires en termes d'ordre de grandeur et de tendances. La distance d'influence de la charge augmente significativement lorsque φ diminue, et cette distance augmente également avec l'augmentation de la rugosité de l'interface δ/φ .

Les résultats démontrent que notre méthode numérique est cohérente avec les méthodes existantes basées sur l'équilibre limite et le calcul analytique, tout en offrant une analyse plus détaillée des phénomènes étudiés.



(a)



(b)

Figure.III.5 Diagrammes de poussée active à l'effet simultané du poids du sol et de la surcharge avec : $b/H = 0,3$; (a) $q/\gamma H = 0.25$; (b) $q/\gamma H = 0.50$

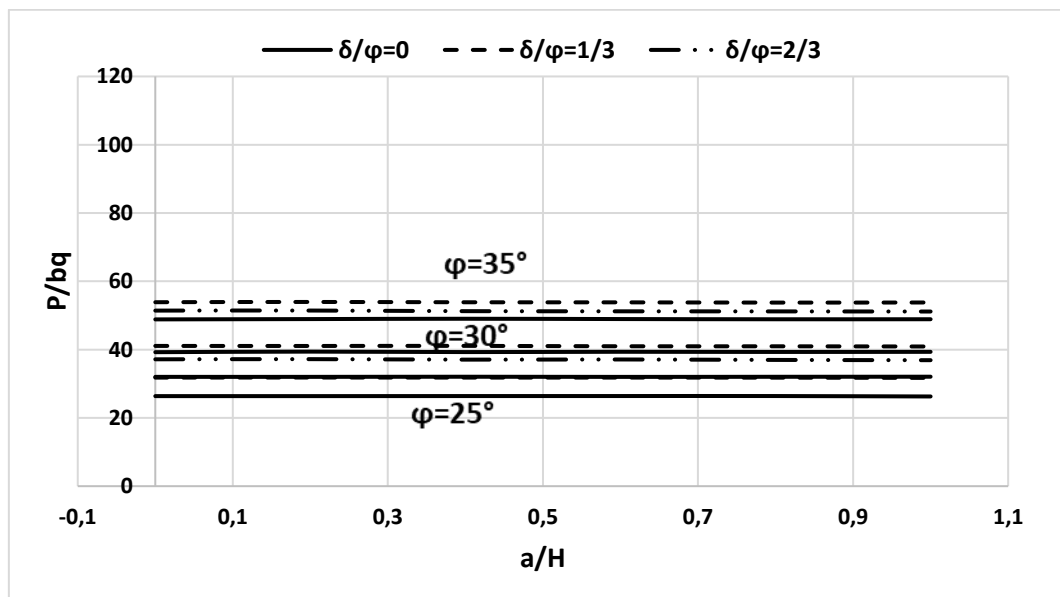
3.2 Poussée Passive (butée)

3.2.1 Poussée Passive avec $b/H = 0.2$

Avec $q/y.H = 0,25$, nous avons constaté que lorsque a/H augmente de 0 à 1, le rapport P/qb diminue globalement, quel que soit φ et δ/φ , indiquant une décroissance de la pression passive à mesure que la distance entre la surcharge et le mur augmente. De plus, pour des valeurs données de δ/φ et a/H , P/qb est plus élevé lorsque φ est plus élevé, montrant des pressions passives plus importantes dans les sols plus frottants.

Par exemple, avec $\delta/\varphi = 1/3$ et $a/H = 0,4$, P/qb s'établit à 31,806 pour $\varphi = 25^\circ$, tandis qu'il atteint 41,198 pour $\varphi = 30^\circ$, 53,864 pour $\varphi = 35^\circ$ et 75,674 pour $\varphi = 40^\circ$. À φ et a/H constants, P/qb augmente lorsque δ/φ augmente, indiquant une diminution de la pression passive lorsque l'interface est plus lisse.

Ces tendances ont été confirmées pour $q/y.H = 0,25$ et $0,50$. Cependant, une augmentation de q a entraîné une diminution de P/qb .



(a)

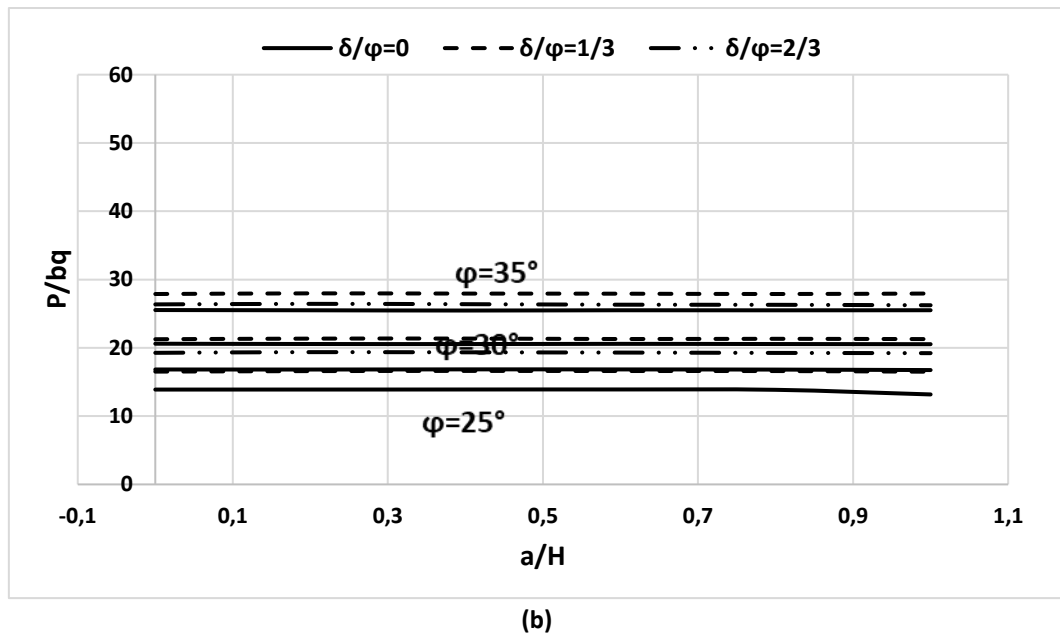


Figure. III.6 Diagrammes de poussée passive à l'effet simultané du poids du sol et de la surcharge avec : $b/H = 0,2$; (a) $q/\gamma H = 0,25$; (b) $q/\gamma H = 0,50$

3.2.2 Poussée Passive avec $b/H = 0,3$

Les mêmes effets de a/H , ϕ et δ/ϕ sur le rapport P/qb ont été observés lorsque nous avons augmenté la largeur de la surcharge à $b/H = 0,3$. Les valeurs de P/qb étaient globalement plus élevées pour un ensemble de paramètres donnés (ϕ , δ/ϕ , q , a/H), comme prévu. Par exemple, avec $\phi = 30^\circ$, $\delta/\phi = 1/3$, $q = 50$ kPa et $a/H = 0,2$, P/qb était de 2,233 pour $b/H = 0,2$, contre 2,621 pour $b/H = 0,3$.

En résumé, nos résultats montrent que la pression passive diminue avec l'augmentation de la distance a entre la charge et le mur, mais elle est plus élevée dans les sols plus frottants avec une interface rugueuse. L'augmentation de q et de b entraîne une diminution de la pression passive. Nos conclusions sont en accord avec les méthodes analytiques existantes.

Les principales conclusions basées sur ces résultats sont les suivantes :

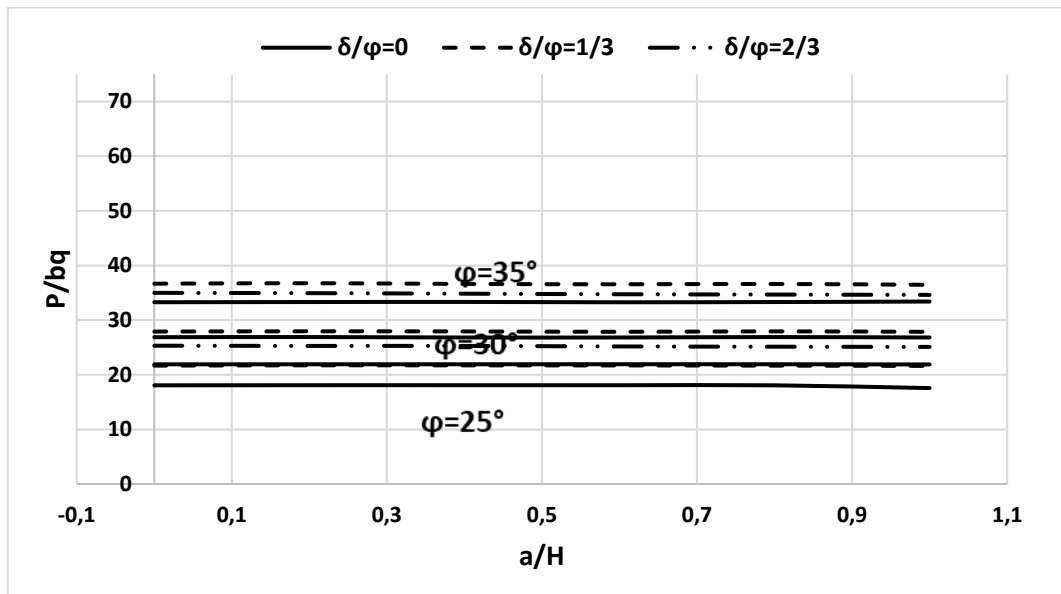
La pression passive diminue à mesure que la distance a entre la charge augmente.

La pression passive est plus élevée dans les sols moins frottants.

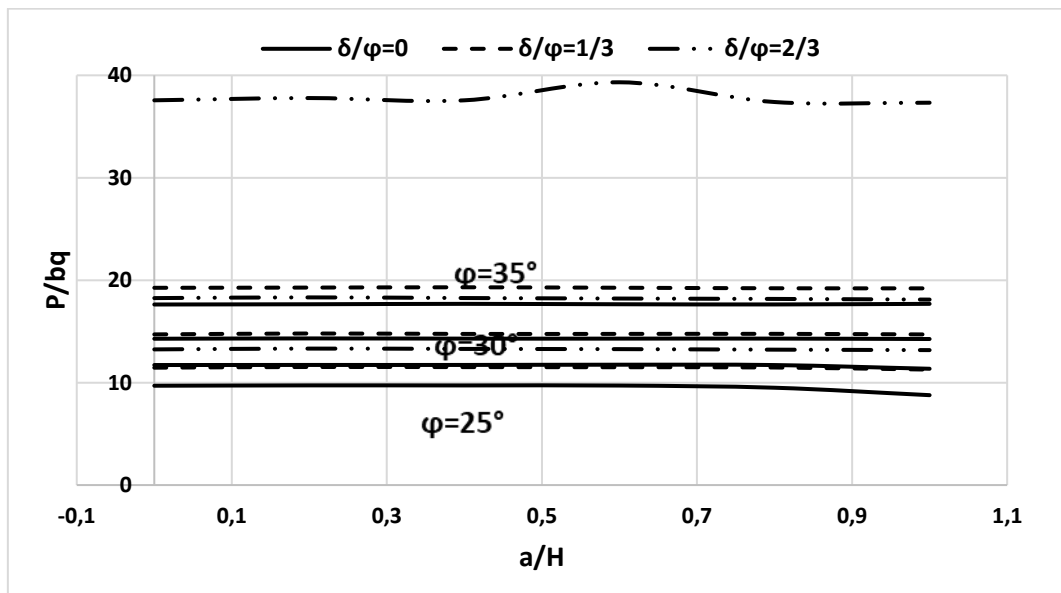
Elle est également plus élevée lorsque l'interface est plus rugueuse.

L'augmentation de q et de b entraîne une diminution de la pression passive.

En fin de compte, nos résultats confirment la validité de notre approche numérique en géotechnique, et ils apportent une contribution précieuse à notre compréhension des mécanismes de poussée des terres.



(a)



(b)

Figure. III.7 Diagrammes de poussée passive à l'effet simultané du poids du sol et de la surcharge avec : $b/H = 0,3$; (a) $q/\gamma H = 0.25$; (b) $q/\gamma H = 0.50$

Conclusion générale

Cette étude a démontré l'efficacité de la modélisation numérique des pressions actives et passives des terres sur un mur de soutènement rigide vertical en utilisant la méthode des éléments finis avec le logiciel OptumG2. En adoptant l'approche de la limite supérieure de l'analyse limite, nous avons pu évaluer avec précision l'influence de divers paramètres géométriques et mécaniques sur les poussées des terres, notamment la position et l'intensité de la surcharge, l'angle de frottement interne du sol, et le frottement à l'interface sol-mur.

Les résultats obtenus montrent que la pression active diminue avec l'augmentation de la distance entre la surcharge et le mur et est plus élevée dans les sols moins frottants et lorsque l'interface sol-mur est rugueuse. À l'inverse, la pression passive augmente dans les sols plus frottants et avec une interface rugueuse, tout en diminuant à mesure que la surcharge s'éloigne du mur.

La validation des résultats par comparaison avec des méthodes analytiques existantes, telles que l'approche de distribution à 45° et la méthode de Beton Kalendar, confirme la fiabilité de notre approche numérique. En outre, l'analyse détaillée fournie par cette méthode offre des insights précieux pour le dimensionnement des murs de soutènement en présence de surcharge, permettant ainsi une meilleure prise en compte des interactions complexes entre le sol et les structures de soutènement.

En conclusion, cette étude enrichit notre compréhension des mécanismes de poussée des terres et propose une méthode robuste pour l'évaluation des pressions actives et passives en géotechnique, contribuant ainsi à la conception plus sûre et plus efficace des ouvrages de soutènement.

Références bibliographiques

- [1] Benmadour, A., Benmebarek, N., et Benmebarek, S. (2018). Numerical evaluation of active and passive earth pressure coefficients for different backfill configurations. *Computers and Geotechnics*, 103, 1-11.
- [2] Cheng YM, Hu YY, Wei WB. Three-dimensional slope failure analysis by the strength reduction technique. *Computers and Geotechnics* 2007 ;34 :70-80.
- [3] Coulomb CA. Sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture. *Mémoires de savants étrangers de l'Académie des Sciences de Paris* 1773 ;7:343–82.
- [4] Day R.A., et Potts D.M. (1994). The influence of wall stiffness upon the behaviour of a propped retaining wall. *Geotechnique*, 44(2), 287–299.
- [5] Duncan JM, Mokwa RL. Passive earth pressures: theories and tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 2001; 127:248-57.
- [6] Farzaneh, O., Askari, F., & Fatemi, J. (2014). Active earth pressure induced by strip loads on a backfill. *Computers and Geotechnics*, 55, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2013.07.015>
- [7] Fenton G.A., Griffiths D.V., McRoberts E.K., et Martin G.R. (2005). Bearing capacity prediction of spatially random $c-\phi$ soils by stochastic and deterministic methods. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(4), 1062–1074.
- [8] Hazarika H., et Matsuzawa H. (1999). Numerical analysis of active earth pressure against rigid retaining wall for different modes of wall movement. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 23(10), 1091–1110.
- [9] Janbu N. Earth pressure and bearing capacity calculations by generalised procedure of slices. In: *Proceedings of 4th international conference on soil mechanics and foundation engineering*, vol. 2, London; 1957. p. 207–12.
- [10] Potts D.M., et Fourie A.B. (1984). The behaviour of a propped retaining wall: results of a numerical experiment. *Geotechnique*, 34(3), 383–404.
- [11] Rankine WJM. On the mathematical theory of the stability of earthwork and masonry. *Proceedings of Royal Society* 1857;8.
- [12] Rowe PW, Peaker K. Passive earth pressure measurements. *Géotechnique* 1965; 15:57-78.
- [13] Sokolovskii VV. *Statics of Granular Media*. Pergamon Press; 1965.
- [14] Soubra AH, Macuh B. Upper- and lower-bound solutions to bearing capacity of foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 1996; 122:547-56.
- [15] Terzaghi K, Greco VR. On the mechanics of landslides. *Application of Geology to Engineering Practice*. Berkey Volume, Geological Society of America, New York; 1966. p. 83-123.

[16] Zhu DY, Qian Q. Determination of passive earth pressure coefficients by the method of triangular