



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة
Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi - Tébessa
معهد المناجم
Institut des mines
قسم المناجم والجيوتكنولوجيا
Département des mines et géotechnologie



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention d'un diplôme de Master académique

Filière : Génie minier

Option : Géotechnique

Caractérisation géotechnique de différentes stériles miniers pour leur usage en remblais

Boutaina TEBIRI

Devant le jury:

	Grade	Etablissement
Président :	MAA	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi - Tébessa
Encadrant :	MCB	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi - Tébessa
Examineurs :	MCB	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi - Tébessa

Promotion 2022-2023

Année universitaire : 2022-2023

Tébessa le : 08/06/2023

Lettre de soutenabilité

Noms et prénoms des étudiants :

1 . Tebiri Boutaina

Niveau : 2^{ème} année Master Option : Géotechnique

Thème : **Caractérisation géotechnique de différentes stériles miniers pour leur usage en remblais**

Nom et prénom de l'encadrant : Benghazi Zied

Chapitres réalisés	Signature de l'encadrant
Chapitre I : Généralités	
Chapitre II : Les remblais	
Chapitre III : Etude expérimentale	
Chapitre IV : Modélisation numérique	

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي: جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة) د. تبسي الصفة: طالب، أستاذ باحث، باحث دائم: ط. أ. د.

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية/ رخصة السياقة رقم: 2024.2.1.675 والصادرة بتاريخ 2018.02.18
المسجل بمعهد الجيوتقنية قسم الجيوتقنية

والمكلف بإنجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها:

Caractérisation géotechnique de différentes Stériles
minier pour leur usage en remblai

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية ومعايير الأخلاقيات المهنية والنزاهة الأكاديمية
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 2023/06/08

إمضاء المعني (ة)

[Signature]





الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة



مقرر رقم : مؤرخ في : 2023/05/29

يتضمن تعيين لجنة مناقشة مذكرة الماستر

إن مدير جامعة العربي التبسي بتبسة،

- بموجب القرار الوزاري رقم 318 و المؤرخ في 05 ماي 2021 المتضمن تعيين السيد "قواسمية عبد الكريم" مديرا لجامعة العربي التبسي - تبسة،

- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم : 12-363 مؤرخ في 8 أكتوبر 2012، يعطل و يتم المرسوم التنفيذي رقم 09-08 المؤرخ في : 04 جانفي 2009 و المتضمن إنشاء جامعة العربي التبسي بتبسة،

- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم 08-265 المؤرخ في 17 شعبان عام 1429 الموافق 19 غشت سنة 2008 الذي يحدد نظام الدراسات للحصول على شهادة الليسانس وشهادة الماستر وشهادة الدكتوراه، لاسيما المادة 9 منه،

- وبموجب القرار رقم 362 المؤرخ في 09 جوان 2014 الذي يحدد كفاءات إعداد ومناقشة مذكرة الماستر، لاسيما المادتان 10 و 11 منه،

- وبموجب القرار رقم 1380 المؤرخ في 09 أوت 2016 والمتضمن مواءمة التكوينات في الماستر بعنوان جامعة تبسة في ميدان "علوم وتكنولوجيا".

- وبموجب القرار رقم 375 المؤرخ في 15 جوان 2020 المعدل للمحق القرار 1080 المؤرخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمن تأهيل ماستر الفروع ذات

تسجيل وطني بجامعة تبسة، اختصاص جيوتقني

- وبعد الاطلاع على محضر المجلس العلمي لمعهد المناجم المؤرخ في

بقرّر ما يأتي:

المادة الأولى: تُعيّن بموجب هذا المقرر لجنة مناقشة مذكرة الماستر المحضّرة من طرف الطالب (ة):

تيرري بئينة، المولود (ة) بتاريخ 2000/11/08 ب عين الصحراء - تقرت ،

والموسومة ب **Caractérisation géotechnique de différents stériles minier pour leur usage en remblais**

والمسجل (ة) بمعهد المناجم

المادة 2: تتشكّل اللجنة المشار إليها في المادة الأولى من الأعضاء الآتي ذكرهم:

رقم	الاسم واللقب	الرتبة	مؤسسة الانتماء	الصّفة
1	حمدان علي	أستاذ مساعد - أ	جامعة العربي التبسي - تبسة	رئيسا
2	زياد بن غازي	أستاذ محاضر - ب	جامعة العربي التبسي - تبسة	مشرفا
3	براح ياسين	أستاذ محاضر - ب	جامعة العربي التبسي - تبسة	ممتحنا

المادة 3: يكلف رئيس قسم المناجم والجيوتكنولوجيا بتنفيذ هذا المقرر الذي يُسلم نسخة عنه إلى كلّ من الطالب المعني والمشرف على المذكرة وأعضاء لجنة المناقشة فور توقيعه.

المادة 4: تحفظ نسخة عن هذا المقرر في الملفّ البيداغوجي للطالب المعني، وينشر في النشرة الرسمية لجامعة العربي التبسي.

حُرّر ب تبسة، في: 2023/05/29

عن المدير، وبتفويض منه

مدير معهد المناجم

عولمي زويبر
مدير معهد المناجم



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة الشهيد الشيخ التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة العربي التبسي - تبسة



مقرر رقم: مؤرخ في: 2023/05/30

يتضمن الترخيص بمناقشة مذكرة الماستر

إن مدير جامعة العربي التبسي بتبسة،

- بموجب القرار الوزاري رقم 318 و المؤرخ في 05 ماي 2021 المتضمن تعيين السيد "قواسمية عبد الكريم" مديرا لجامعة العربي التبسي - تبسة،

- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم: 12-363 مؤرخ في 8 أكتوبر 2012، يعدل و يتم المرسوم التنفيذي رقم 09 - 08 المؤرخ في: 04 جانفي 2009 و المتضمن إنشاء جامعة العربي التبسي بتبسة،

- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم 08-265 المؤرخ في 17 شعبان عام 1429 الموافق 19 غشت سنة 2008 الذي يحدد نظام الدراسات للحصول على شهادة الليسانس وشهادة الماستر وشهادة الدكتوراه، لاسيما المادة 9 منه،

- وبموجب القرار رقم 362 المؤرخ في 09 جوان 2014 الذي يحدد كفايات إعداد ومناقشة مذكرة الماستر، لاسيما المادة 7 منه،

- وبموجب القرار رقم 1080 المؤرخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمن تأهيل ماستر الفروع ذات تسجيل وطني بجامعة تبسة.

- وبموجب القرار رقم 375 المؤرخ في 15 جوان 2020 المعدل الملحق القرار 1080 المؤرخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمن تأهيل ماستر الفروع ذات تسجيل وطني بجامعة تبسة، اختصاص جيوتقني

- وبموجب المقرر رقم المؤرخ في 2023/05/29 والمتضمن تعيين لجنة مناقشة مذكرة الماستر، وبعد الاطلاع على مقرر تعيين لجنة مناقشة مذكرة الماستر المؤرخ في

يقرّر ما يأتي:

المادة الأولى: يُرخصُ للطالب(ة) تيبيري بثينة، المولود (ة) بتاريخ 2000/11/08 ب عين الصحراء - تقرت، بمناقشة مذكرة الماستر والموسومة بـ

Caractérisation géotechnique de différents stériles minier pour leur usage en remblais

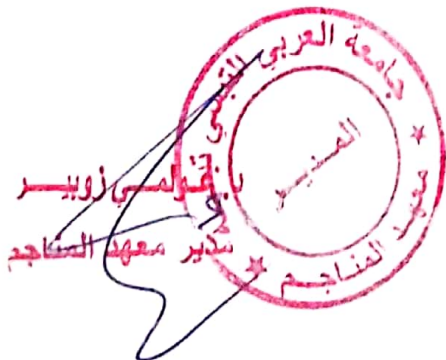
المادة 2: يكلف رئيس قسم المناجم والجيوتكنولوجيا بتنفيذ هذا المقرر الذي يسلم نسخة عنه إلى الطالب المعني بالمناقشة وأعضاء لجنة المناقشة فور توقيعه، وبضمن نشره عبر فضاءات المؤسسة المادية والرقمية.

المادة 3: تُحفظ نسخة عن هذا المقرر ضمن الملف البيداغوجي للطالب المعني وينشر في النشرة الرسمية لجامعة العربي التبسي.

حُزّر ب تبسة، في: 2023/05/30

عن المدير، وبتفويض منه

مدير معهد المناجم



وَأَخِرْدَعَوَاهِرَ الْمَدِينِ الْعَالِيَةِ
@tm3_1

الإهداء

أهدي تخرجي الى من الجنة تحت أقدامها، الحمد لله اليوم سأرفع قلبي وأهدي هذه الكلمات
المعبرة عن حبي وامتناني **لأبي** التي بفضلها وبدعواتها حققت هذا النجاح والتفوق أتمنى لك
طول العمر ودوام الصحة.

الى الركن الأقوى والشخص الأعز إلى قلبي **أبي** أشكرك على الحب الذي تمنحه لي وعلى الدعم
الذي تقدمه في كل لحظة أتمنى لك السعادة والصحة.

إلى إخوتي؛ من كان لهم بالغ الأثر في كثير من العقبات والصعاب أتم الرفقاء في رحلة الحياة، أتم
رمز للتضحية والتعاون، أتمنى لكم السعادة الدائمة وتحقيق كل الأماني والأحلام.

لعائتي وأصدقائي، أتم رمز الدعم والمحبة والتفاهم. شكراً لكم على الوقت الجميل الذي نقضيه سوياً
وعلى الذكريات الثمينة التي بنيناها معاً، أتم جزء لا يتجزأ من حياتي وأتمنى لنا المزيد من اللحظات
المميزة والسعادة المتجددة.

مع خالص الحب،

بثينة...



Remerciement

Tout d'abord, je remercie Allah qui m'a donné la force et la patience nécessaires pour accomplir ce travail.

*J'exprime ma profonde gratitude et sincère remerciement à mon encadreur Dr. **BENGHAZI Zied** pour sa confiance, son appui et compréhension, ses sens d'appréciation scientifique.*

Nos sincères remerciements vont vers les membres du jury de ma soutenance de mémoire :

*- Ms. **HAMDANE Ali**, enseignant à l'université Larbi Tébessi de Tébessa, qui m'a fait le grand honneur d'être le président de jury*

*- Dr. **BERRAH Yacine**, enseignant à l'université Larbi Tébessi de Tébessa, de m'a avoir fait l'honneur d'examiner mon travail de mémoire.*

*Je remercie tous les enseignants de département des Mines et de géotechnologie spécialement ; Dr. **MEBROUK Faouzi** ; Dr. **Brahmi Serhane** et Dr. **DJILALI Adel** ; Mme. **AMRANI Dounia**.*

*Mes remerciements vont également à toute l'équipe de laboratoire chimique **Société des Ciments de Tébessa (S.C.T)**, qui m'ont aidé toute la durée de stage pratique et qui ont tout mis à ma disposition pour me permettre de travailler dans les meilleures conditions.*

J'adresse également des remerciements à tous les enseignants de département des mines, et toute ma gratitude aux personnes qui ont contribués et aidés à la réalisation de ce travail de fin d'étude.

BOUTAINA...



ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة الخصائص الجيوتقنية لنفايات منجمية مختلفة (حالة منجم الحديد الونزة تبسة وحالة منجم الباريت عين ميمون خنشلة) وذلك لاستخدامها في بناء الردم. تطلب هذا برنامجا تجريبيا تم تنفيذه في المختبر وفقا للنتائج التجريبية تم تحديد نوع وجودة النفايات المنجمية المدروسة والتي تبين من خلالها أنها تنتمي إلى صنف التربة الرملية الطينية. وفي الجزء الثاني أجريت دراسة لسلوك لمختلف هذه النفايات وفقا لـ PLAXIS 2DV8.2 وقد تبين أن هذه النفايات صالحة مبدئيا كمواد بناء الردم

الكلمات المفتاحية: النفايات المنجمية، الخصائص الجيوتقنية، الردم، النمذجة الرقمية.

Résumé

Le but de cette étude est d'analyser les caractéristiques géotechniques des déchets miniers provenant de différentes mines (cas de la mine de fer d'Ouenza à Tébessa et de la mine de barytine d'Aïn Mimoun à Khenchela) en vue de les utiliser dans la construction de remblais. Pour cela, un programme expérimental a été réalisé en laboratoire. Les résultats expérimentaux ont permis de déterminer le type et la qualité des déchets miniers étudiés, révélant qu'ils appartiennent à la catégorie des sols sableux argileux. Dans la deuxième partie, une étude du comportement de ces différents déchets a été réalisée à l'aide du logiciel Plaxis 2D.v8.2. Il a été constaté que ces stériles peuvent être considérés comme matériaux potentiels pour la construction des remblais.

Mots-clés : Stériles miniers, caractérisation géotechnique, remblais, modélisation numérique.

Abstract

The aim of this work is to study the geotechnical characteristics of different mining wastes (case of the Ouenza iron mine in Tebessa and the Aïn Mimoun barite mine in Khenchela) for their use in embankment construction. This required an experimental program conducted in the laboratory. Based on the experimental results, the type and quality of the studied mining wastes were determined, revealing that they belong to the category of sandy clayey soils. In the second part, a study was conducted on the behavior of these different wastes using Plaxis 2D.v8.2 software. It was found that these wastes can be considered as potential materials for embankments construction.

Keywords: Mining wastes, Geotechnical characterization, embankments, numerical modeling.

Liste des notations

c	Cohésion du sol
C_C	Coefficient de courbure
C_u	Coefficient d'uniformité
D_{60}	Diamètre des particules correspondant à 60 % du passant
D_{30}	Diamètre des particules correspondant à 30 % du passant
D_{10}	Diamètre des particules correspondant à 10 % du passant
D_{max}	Diamètre maximal
E	Module de Young
E_{Oed}	Module d'Young oedométrique
ES	Equivalente de sable
FS	Coefficient de sécurité
H	Hauteur du remblai
I_c	Indice de consistance
I_p	Indice de plasticité
m_w	Masse d'eau
m_h	Masse de sol humide
m_s	Masse de sol sèche
N_{EDTA}	Normalité du compexant EDTA calculée
VBS	Valeur du bleu de mythilene
V_{EDTA}	Volume d'EDTA
w_l	Limite de liquidité
w_n	Teneur en eau naturelle
w_p	Limite de plasticité
ν	Le coefficient de poisson
ρ	Masse volumique
φ	Angle de frottement
θ	Angle du talu du remblai

Liste des figures

Figure	Page
Figure I.1. Cycle de vie d'un projet minier.	4
Figure I.2. Revégétalisation d'un site minier (Mine Canadian Malartic).	8
Figure I.3. Stockage des résidus miniers sous forme de terril.	9
Figure I.4. Haldes (barrages) à steriles de a mine du Lac Tio, Canada	10
Figure II.1. Types de remblai (ferroviaire, routier)	14
Figure II.2. Extraction en couche	16
Figure II.3. Extraction frontale	16
Figure II.4. Action sur la granularité	17
Figure II.5. Fragmentation complémentaire après extraction	17
Figure II.6. Aération	18
Figure II.7. Humidification	18
Figure II.8. Traitement à la chaux	19
Figure II.9. Traitement réactif	19
Figure II.10. Compactage	20
Figure II.11. Remblai de hauteur moyenne	21
Figure II.12. Etape de construction d'un remblai.	22
Figure II.14. Surcharge temporaire du remblai.	23
Figure II.15. Remblai allégé	23
Figure III.1- Situation géographique du gisement de l'Ouenza	26
Figure III.2. Disposition des gites métallifères de la mine de l'Ouenza	29
Figure III.3- Localisation géographique d'Ain Mimoun (extrait de la carte touristique de l'Algérie).	34
Figure III.4. Le climat en hiver et en printemps	36
Figure III.5. Essai de la masse volumique absolue par pycnomètre	39
Figure III.6. Essai d'équivalent de sable	40
Figure III.7. Essai d'analyse granulométrique par tamisage par voie humide	41
Figure III.8. Mesure des masses des refus	42
Figure III.9. Essai d'analyse granulométrique par sédimentation	43
Figure III.10. Courbe granulométrique du stérile de Sainte Barbe	43
Figure III.11. Courbe granulométrique du stérile de Sud	44

Figure III.12. Courbe de granulométrie du stérile de Ain Mimoun	45
Figure III.13. Type de sol en fonction de la valeur « VBS »	46
Figure III.14. Essai de bleu de méthylène	46
Figure III.15. Classification des matériaux selon leur nature (GTR, 2000)	47
Figure III.16. Opération du séchage	48
Figure III.17. Opération du broyage	48
Figure III.18. Les échantillons après le broyage	49
Figure III.19. Quelques photos des essais chimiques.	51
Figure III.20. Courbe des angles de frottement en fonction des passants	52
Figure IV.1. Géométrie de modèle pour le cas $H = 2$ m	57
Figure IV.2. Géométrie de modèle pour le cas $H = 6$ m.	58
Figure IV.2. Géométrie de modèle pour le cas $H = 6$ m.	58
Figure IV.4. Génération du maillage cas $H = 2$ m	59
Figure IV.5. Génération du maillage cas $H = 4$ m	59
Figure IV.6. Génération du maillage cas $H = 6$ m	60
Figure IV.7. Phases de calcul cas $H = 2$ m.	60
Figure IV.8. Phases de calcul cas $H = 4$ m.	61
Figure IV.9. Phases de calcul cas $H = 6$ m	61
Figure IV.10. Déplacement total Cas $H = 2$ m.	62
Figure IV.11. Déplacement total Cas $H = 4$ m	62
Figure IV.12. Déplacement total Cas $H = 6$ m	63
Figure IV.13. Déplacement total Cas $H = 2$ m	63
Figure IV.14. Déplacement total Cas $H = 4$ m	64
Figure IV.15. Déplacement total Cas $H = 6$ m	64
Figure IV.16. Déplacement total Cas $H = 2$ m	65
Figure IV.17. Déplacement total Cas $H = 4$ m	65
Figure IV.18. Déplacement total Cas $H = 6$ m	66
Figure IV.19. Coefficient de sécurité cas $H = 2$ m	66
Figure IV.20. Coefficient de sécurité cas $H = 4$ m	67
Figure IV.21. Coefficient de sécurité cas $H = 6$ m	67
Figure IV.22. Coefficient de sécurité cas $H = 2$ m	68
Figure IV.23. Coefficient de sécurité cas $H = 4$ m	68
Figure IV.24. Coefficient de sécurité cas $H = 6$ m	69

Figure IV.25. Coefficient de sécurité cas H = 2 m	69
Figure IV.26. Coefficient de sécurité cas H = 4 m	70
Figure IV.27. Coefficient de sécurité cas H = 6 m	70
Figure IV.28. Géométrie de modèle pour le cas H = 2 m	72
Figure IV.29. Géométrie de modèle pour le cas H = 4 m	72
Figure IV.30. Géométrie de modèle pour le cas H = 6 m	73
Figure IV.31. Génération du maillage cas H = 2 m	73
Figure IV.32. Génération du maillage cas H = 4 m	74
Figure IV.33. Génération du maillage cas H = 6 m.	74
Figure IV.34. Phases de calcul cas H = 2 m	75
Figure IV.35. Phases de calcul cas H = 4 m	75
Figure IV.36. Les phases de calcul cas H = 6 m	76
Figure IV.37. Déplacement total Cas H = 2 m	76
Figure IV.38. Déplacement total Cas H = 4 m	77
Figure IV.39. Déplacement total Cas H = 6 m	77
Figure IV.40. Déplacement total Cas H = 2 m	78
Figure IV.41. Déplacement total Cas H = 4 m	78
Figure IV.42. Déplacement total Cas H = 6 m	79
Figure IV.43. Déplacement total Cas H = 2 m	79
Figure IV.44. Déplacement total Cas H = 4 m	80
Figure IV.45. Déplacement total Cas H = 6 m	80

Liste des Tableaux

Tableau	Page
Tableau III.1. Réserves géologiques du Gisement de l'Ouenza (actualisées au 30/06/2022)	30
Tableau III.2. Réserves exploitables du Gisement de l'Ouenza (actualisées au 30/06/2022)	31
Tableau III.3. Cubature annuelle année 2012 (Service géométrie mine de l'Ouenza)	32
Tableau III.4. Cubature annuelle 2013 (Service géométrie mine de l'Ouenza)	33
Tableau III.5. Programme de l'étude expérimentale	37
Tableau III.6. Résultats de l'essai de teneur en eau naturelle	38
Tableau III.7. Etat hydrique des sols selon leur teneur en eau	38
Tableau III.8. Résultats de l'essai de Masse volumique absolue de sol	39
Tableau III.9. Résultats de l'essai d'équivalent de sable	41
Tableau III.10. Résultats de l'essai de valeur de bleu de méthylène	46
Tableau III.11. Composition chimique moyenne des stériles étudiés	51
Tableau III.12. Angle de frottement en fonction du pourcentage des particules $\geq 80 \mu\text{m}$	52
Tableau IV.1. Caractéristiques des matériaux	57
Tableau IV.2. Valeurs des tassements et les coefficients de sécurité pour les remblais	71
Tableau IV.3. Valeurs des tassements pour les remblais des fouilles	81

Sommaire

Titre	Page
Liste des notifications	i
Liste des figures	iii
Liste des tableaux	vi
Sommaire	vii
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités	2
I.1. Introduction	3
I.2. Généralités	3
I.2.1. Définition d'un minerai	3
I.2.2. Définition de gisement	3
I.2.3. Définition d'un stérile	3
I.2.4. Définition d'un rejet minier	3
I.3. Cycle de vie d'un projet minier	4
I.3.1. Exploration et faisabilité	4
I.3.2. Aménagement et construction	4
I.3.3. Exploitation minière	7
I.3.4. Fermeture et restauration	7
I.4. Le stockage et la gestion des rejets solides	8
I.4.1. Caractéristiques des rejets solides miniers	8
I.4.2. Classification des rejets miniers	8
I.4.3. Techniques de stockage	9
I.4.4. Gestion des eaux de drainage	10
I.4.5. Réhabilitation et fermeture des sites miniers	10
I.4.6. Réglementations et normes	11
I.4.7. Suivi et surveillance	11
I.5. Conclusion	11
Chapitre II : Les remblais	12
II.1. Introduction	13
II.2. Définition d'un remblai	13
II.3. Types de remblais	13
II.3.1. Remblai routier	13

II.3.2. Remblai ferroviaire	13
II.4. Matériaux utilisés en remblais	14
II.4.1. Paramètres de nature	14
II.4.2. Paramètres de comportement mécanique	15
II.4.3. Paramètres d'état	15
II.5. Effets des conditions d'utilisation des matériaux en remblais	15
II.5.1. Extraction	15
II.5.1.1. Extraction en couche	15
II.5.1.2. Extraction frontale	16
II.5.2. Action sur la granularité	17
II.5.2.1. Élimination des éléments	17
II.5.2.2. Fragmentations complémentaires après extraction	18
II.5.3. Action sur la teneur en eau	18
II.5.4. Traitement	19
II.5.5. Compactage	20
II.5.6. Hauteur du remblai	20
II.6. Méthodes de construction des remblais	21
II.6.1. Construction par étape	22
II.6.2. Banquette latérale	22
II.6.3. Surcharge Temporaire	23
II.6.4. Remblais allégés	23
II.6.5. Renforcement par géotextiles	24
7. Conclusion	24
Chapitre III : Etude expérimentale	25
III.1. Introduction	26
III.2. Présentation du cas d'étude	26
III.2.1. Mine de l'Ouenza Tébessa	26
III.2.1.1. Situation géographique de Djebel Ouenza	26
III.2.1.2. Historique de la mine de l'Ouenza	27
III.2.1.3. Aperçu Géologique sur les Quartiers de la Mine de l'Ouenza	27
III.2.1.4. Hydrogéologie	29
III.2.1.5. Prospection et états des réserves	30
III.2.1.6. Minéralisation	31

III.2.1.7. Rejet de la mine de l'Ouenza	32
III.2.1.8. Climatologie	33
III.2.2. Djebel Ain Mimoun Khenchela	33
III.2.2.1. Situation géographique de Djebel Ain Mimoun Khenchela	33
III.2.2.2. Historique des travaux de prospection	34
III.2.2.3. Etude géologique sur le gisement d'Ain-Mimoun	35
III.2.2.4. Hydrogéologie de la région	35
III.2.2.5. Etudes minéralogiques	35
III.2.2.6. Climat	36
III.3. Méthodes expérimentales	37
III.3.1. <i>Propriétés physiques</i>	37
III.3.1.1. Teneur en eau (NF P 94-050)	37
III.3.1.2. Masse volumique absolue des grains solides ρ_s (méthode au pycnomètre à eau NF P 94-054)	38
III.3.1.3. Equivalente de sable (P18-598)	40
III.3.1.4. Détermination de la granulométrie par tamisage (NF P 94-056) et sédimentation (NF P 94-057)	41
III.3.1.5. Valeur de bleu de méthylène du sol (NF P 94-068)	45
III.3.2. <i>Propriétés chimiques</i>	48
III.3.2.1. Préparation des échantillons	48
III.3.2.2. Dosage de l'oxyde ferrique (Fe_2O_3)	49
III.3.2.3. Dosage d'alumine (Al_2O_3)	49
III.3.2.4. Dosage de chaux (CaO)	49
III.3.2.5. Dosage de magnésium (MgO)	50
III.3.2.6. Dosage de Silice (SiO_2)	50
III.3.3. Estimation des valeurs de C et ϕ	52
III.3.4. Estimation de valeur E_{Oed}	53
III.4. Conclusion	53
Chapitre IV : Modélisation numérique	54
IV.1. Introduction	55
IV.2. Présentation du logiciel utilisé (PLAXIS 2D V.8.2)	55
IV.3. Définition des paramètres du modèle	56
IV.3.1. Système de coordonnées	56

IV.3.2. Entrée des caractéristiques générales	56
IV.3.3. Les conditions aux limites	56
IV.3.4. Caractéristique des matériaux	56
IV.4. Construction des modèles	57
IV.4.1. Cas des remblais	57
IV.4.1.1. La géométrie des modèles	57
IV.4.1.2. Génération du Maillage	59
IV.4.1.3. Phase de calcul	60
IV.5. Résultats et discussions	61
IV.5.1. Déformation totale (tassement)	61
IV.5.1.1. Stérile de Sainte barbe	61
IV.5.1.2. Stérile du Sud	63
IV.5.1.3. Stérile d'Ain Mimoun	65
IV.5.2. Coefficient de sécurité (Stabilité)	66
IV.5.3. Pour le remblai d'une fouille	71
IV.5.3.1. La géométrie des modèles	71
IV.5.3.2. Génération du Maillage	73
IV.5.3.3. Phase de calcul	74
IV.5.4. Résultats et discussions	76
IV.5.4.1. Stérile de Sainte barbe	76
IV.5.4.2. Stérile du Sud	78
IV.5.4.3. Stérile d'Ain Mimoun	79
IV.6. Conclusion	81
Conclusion générale et perspectives	82
Références bibliographiques	83

Introduction générale

L'exploitation minière a connu ces dernières années un développement considérable, tant en termes de quantité que de qualité. Cependant, ce développement engendre également d'importantes quantités de déchets sans valeur économique, qui peuvent représenter un risque pour l'environnement. Afin de prévenir les problèmes associés aux rejets miniers, il est possible de les utiliser dans les remblais.

Ce mémoire de master vise à étudier la caractérisation géotechnique des différents stériles miniers en vue de leur utilisation en tant que remblai. Pour atteindre cet objectif, le mémoire est structuré en quatre chapitres :

Chapitre 1 : Ce chapitre aborde les définitions relatives aux concepts clés tels que le minerai, le gisement, le stérile et les rejets solides. Il présente également le cycle de vie d'un projet minier ainsi que le stockage, le traitement et la gestion des rejets solides.

Chapitre 2 : Ce chapitre fournit des généralités sur les remblais, leur définition, les différents types de remblai, les propriétés des matériaux utilisés ainsi que les méthodes de construction des remblais.

Chapitre 3 : Ce chapitre est consacré aux études géologiques, hydrogéologiques, minéralogiques des gisements, ainsi qu'à l'étude climatologique de la région. Une caractérisation géotechnique détaillée des sols est également réalisée en laboratoire, comprenant la classification des sols et l'analyse des résultats obtenus.

Chapitre 4 : Ce chapitre introduit une approche numérique permettant de modéliser le tassement et le glissement à l'aide de la méthode des éléments finis, en utilisant le logiciel PALXIS V.8.2. Cette approche vise à confronter les résultats obtenus par le calcul manuel avec ceux du logiciel, afin de valider l'analyse et vérifier les systèmes de renforcement utilisés.

En conclusion, ce mémoire se clôt par une synthèse générale des résultats obtenus, ainsi que des perspectives futures pour approfondir et élargir les connaissances dans ce domaine.

Chapitre I: Généralités

I.1. Introduction

Dans ce chapitre, on va entamer les définitions des termes clés liés à l'exploitation minières, tels que le minerai, le gisement, le stérile et le rejet minier. Ensuite on va discuter le cycle de vie d'un projet minier, et ses différentes étapes, de la découverte à la fermeture de la mine. Enfin, on va parler du stockage et de la gestion des rejets solides, qui jouent un rôle important dans la gestion de l'environnement minier.

I.2. Généralités

I.2.1. Définition d'un minerai

Est une masse rocheuse contenant des minéraux de valeur, en teneur (concentration) et en quantité suffisante pour justifier son exploitation [1].

I.2.2. Définition de gisement

Un gisement ne se définit pas en termes absolus, mais en termes relatifs à un marché économique. En effet, un gisement est une masse minérale, le minerai ayant une concentration en un ou plusieurs éléments métalliques ou non métalliques assez importante pour être exploitable avec profit dans un contexte économique précis [2].

I.2.3. Définition d'un stérile

Un résidu économiquement "stérile" fait référence aux produits sans valeurs marchande issus lors de l'exploitation ou du traitement du minerai. Il peut contenir des concentrations en éléments ou composés chimiques polluants (phases minérales naturelles, réactifs de traitement résiduel) élevées par rapport aux concentrations naturellement présentes dans les sols du site [2].

I.2.4. Définition d'un rejet minier

Le rejet minier ou résidu minier est toute substance issue de l'activité minière soit travaux de recherche, exploitation ou traitement du minerai sans valeur marchande établie qui accompagnent le minerai. Ces résidus peuvent être naturels (stériles francs, minerais non exploités) ou des produits artificiels issus des phases de traitement (rejets de laveries). Elles sont entreposées en surface dans des empilements [2].

I.3. Cycle de vie d'un projet minier

Un projet minier est un projet d'investissement dans la découverte et l'exploration des gisements afin de produire un ou plusieurs produits commercialisables, souvent appelés produits marchands, qui peuvent selon les cas, être un ou plusieurs minéraux, un concentré ou bien un ou plusieurs métaux plus ou moins purs.

L'exploitation d'une mine, qu'elle soit souterraine ou à ciel ouvert, représente un projet de grande envergure. Il n'est donc pas surprenant que la réalisation complète d'un projet minier s'étale sur une période de dix à quinze ans et qu'elle soit sujette à plusieurs décisions importantes.

Dans les faits, l'exploitation d'une mine implique une série d'étapes à franchir, de la découverte du gisement à la fermeture de la mine (figure I.1).

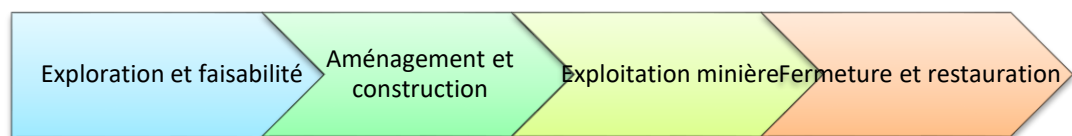


Figure I.1. Cycle de vie d'un projet minier.

I.3.1. Exploration et faisabilité

L'exploration minérale consiste à identifier des sites où les minéraux sont exploitables. Les programmes de forage permettent d'extraire des échantillons et de les analyser pour établir le volume et la teneur du gisement. La réalisation d'analyses de faisabilité technique, financière et environnementale complète cette première étape du cycle minier [3].

I.3.2. Aménagement et construction

L'aménagement et la construction d'une mine, la deuxième étape du cycle minier, ne sont entrepris que si le gisement est suffisamment important pour prouver la rentabilité économique du projet et en justifier l'exploitation [3].

L'aménagement d'une mine nécessite [3]:

- De caractériser la ressource minérale;
- De concevoir le plan de la mine;
- De mener différentes consultations publiques sur le projet;
- D'évaluer les retombées financières et les impacts environnementaux;
- D'obtenir les permis d'implantation nécessaires;
- De réaliser une évaluation finale sur l'exploitation de la mine.

Une fois l'aménagement terminé, la construction de la mine et de ses installations de traitement du minerai peut être envisagée.

L'aménagement et la construction d'une mine peuvent prendre de cinq à dix ans, dont deux à quatre ans sont consacrés à la construction à proprement parler.

a. Planification

Prévoit les différentes installations utiles à l'extraction et au traitement du minerai, les infrastructures associées, tout en respectant l'aspect environnemental et en déterminant le rythme de production et la progression maximale de la mine.

Les aspects environnemental et social ont une part très importante dans cette étape et sont pris très au sérieux.

En effet, un plan environnemental et social est mis en place pour prévoir et anticiper les différents impacts pouvant survenir au cours de l'exploitation, d'assurer la sécurité du personnel et de l'environnement.

Il va également permettre de contrôler le respect des normes de l'étude de faisabilité et d'assurer une intégrité et une insertion sociale optimale (création et maintien de l'emploi par exemple).

b. Construction

Après la planification, la **construction** de la mine peut commencer. L'enjeu principal est de mettre en place le chantier qui donnera un accès direct à la zone minéralisée.

Mais il faut aussi construire des installations de traitement du minerai, des aires de gestion des résidus miniers et de l'infrastructure du site.

L'ampleur et la complexité des ouvrages à réaliser durant cette phase varient énormément d'un projet à l'autre ; certaines activités sont cependant communes à tous les projets de construction de mine.

Par exemple, la **préparation du site** : il faut déboiser et décaper le terrain, en préparation de la construction des diverses installations du site. De préférence, si la qualité des terrains le permet, on le met en réserve pour le réutiliser lors de la remise en état du site [3].

c. Construction de l'infrastructure de la mine

La plupart des installations et des services associés à la mine sont mis en place au cours de la phase de construction. En fonction de divers facteurs (dont l'ampleur de l'exploitation, l'emplacement et les procédés prévus pour l'extraction et le traitement du minerai), l'infrastructure peut inclure les éléments suivants [3]:

- Des installations de transport, dont des voies d'accès au site, des routes de chantier et, dans certains cas, une voie ferrée.
- Des installations de manutention et de traitement du minerai ;
- Des installations d'entreposage des résidus miniers ;
- Des systèmes de gestion des eaux et de traitement des eaux usées ;
- Une infrastructure énergétique, y compris un réseau de distribution d'électricité et une centrale électrique ;
- Des ateliers, des bureaux, des entrepôts et des logements ;
- Des installations d'approvisionnement en carburant et d'entreposage des carburants ;
- Des garages et des installations d'entretien des véhicules ;
- Des installations d'entreposage des explosifs ;
- Un approvisionnement en eau et un système de traitement et de distribution de l'eau potable ;
- Des installations d'élimination des déchets (y compris des incinérateurs, un site d'enfouissement et un système d'épandage).

I.3.3. Exploitation minière

L'exploitation minière, la troisième étape du cycle minier consiste à extraire le minerai d'un gisement et à le traiter pour obtenir un produit minéral de valeur pour la société, comme les métaux.

Le minerai est ensuite acheminé à l'usine de traitement où il est broyé et concassé en fine poudre.

Après, par différents procédés, on extrait les minéraux utiles de la roche stérile. Le minerai ainsi traité est appelé "concentré". Ce concentré est ensuite affiné pour accroître sa pureté.

De tout le minerai extrait, seule une partie contient les minéraux recherchés. Les stériles (ou déchets de roche) sont utilisés pour remplir les zones minées ou excavées du site. Ils peuvent aussi servir, sur le site, à la construction de routes [3].

I.3.4. Fermeture et restauration

L'exploitation d'un gisement minéral a une durée de vie limitée. Les raisons de fermeture d'une mine sont :

- L'épuisement du minerai;
- La faiblesse du prix des métaux qui rend son exploitation non rentable.

Si la fermeture d'une mine est la dernière étape du cycle minier, les activités de restauration du site sont planifiées avant même son ouverture et l'extraction de la première tonne de minerai.

Les choix environnementaux ne sont donc pas laissés au hasard et la fermeture d'une mine anime de nombreux débats auxquels il faut s'intéresser.

Le processus de fermeture se fait de façon ordonnée et respectueuse de l'environnement. Les zones qui ont été transformées par l'exploitation des ressources minérales doivent redevenir des écosystèmes.

C'est pourquoi toute excavation est remplie, tout amoncellement est nivelé et tous lieux sont reboisés. Ainsi, les écosystèmes sont recréés (figure I.2).

En général, la fermeture d'une mine peut prendre jusqu'à dix ans [3].



Figure I.2. Revégétalisation d'un site minier (Mine Canadian Malartic).

I.4. Le stockage et la gestion des rejets solides

Le stockage et la gestion des rejets solides, également connus sous le terme de déchets solides, sont des aspects importants de la gestion environnementale. Il existe des éléments clés à considérer dans le processus de stockage et de gestion des rejets solides [4]:

I.4.1. Caractéristiques des rejets solides miniers

Les rejets solides miniers, également connus sous le nom de stériles ou de déchets miniers, sont générés lors de l'extraction et du traitement des minéraux. Ils peuvent inclure des roches, des sols, des boues, des résidus chimiques et d'autres matériaux indésirables associés à l'activité minière.

I.4.2. Classification des rejets miniers

Les rejets solides miniers peuvent être classés en deux catégories principales : les rejets inertes et les rejets potentiellement dangereux. Les rejets inertes, tels que les roches et les sols non contaminés, peuvent être stockés de manière plus simple et moins coûteuse. Les rejets potentiellement dangereux, tels que les résidus chimiques ou les eaux de drainage acide, nécessitent une gestion plus complexe et un stockage approprié.

I.4.3. Techniques de stockage

Plusieurs techniques de stockage peuvent être utilisées pour les rejets solides miniers. Les deux principales méthodes sont les barrages de retenue (ou barrages de résidus) et les dépôts de stériles en tas (figure I.3). Les barrages de retenue sont des structures construites pour contenir les résidus en utilisant des matériaux de construction appropriés (figure I.4). Les dépôts de stériles en tas consistent à empiler les stériles dans des zones spécifiques et à prendre des mesures pour minimiser les risques de glissements de terrain ou d'érosion [5].



Figure I.3. Stockage des résidus miniers sous forme de terril [6].



Figure I.4. Haldes (barrages) à stériles de a mine du Lac Tio, Canada [7].

I.4.4. Gestion des eaux de drainage

Les eaux de drainage provenant des rejets miniers, également appelées eaux de ruissellement minier ou eaux de mine, peuvent contenir des substances toxiques ou des métaux lourds. Il est essentiel de les collecter et de les traiter de manière appropriée pour prévenir la contamination des eaux de surface et des eaux souterraines [8].

I.4.5. Réhabilitation et fermeture des sites miniers

Lorsque l'exploitation minière prend fin, il est nécessaire de procéder à la réhabilitation et à la fermeture des sites miniers, y compris des installations de stockage des rejets solides. Cela implique généralement la remise en état des zones touchées, la réduction des risques environnementaux et la restauration des habitats naturels [8].

I.4.6. Réglementations et normes

La gestion des rejets solides miniers est réglementée par des lois et des normes environnementales spécifiques dans de nombreux pays. Ces réglementations visent à assurer la protection de l'environnement, la santé publique et la sécurité des communautés environnantes [8].

I.4.7. Suivi et surveillance

La surveillance à long terme des sites de stockage des rejets solides miniers est cruciale pour détecter tout impact potentiel sur l'environnement. Cela comprend le suivi de la qualité des eaux de surface et souterraines, la surveillance géotechnique pour détecter les mouvements de terrain, et la surveillance de la végétation et de la biodiversité pour évaluer la réhabilitation des sites.

Il est important de noter que la gestion des rejets solides miniers peut varier en fonction de facteurs tels que le type de minerai extrait, les méthodes d'exploitation minière utilisées et les réglementations spécifiques du pays ou de la région concernée [8].

I.5. Conclusion

La compréhension du cycle de vie d'un projet minier et la mise en place de mesures appropriées pour le stockage et la gestion des rejets solides sont cruciales pour assurer un aspect durable de l'activité minière qui respecte l'environnement.

Trouver d'autres utilisations pour ces rejets peut participer à garantir la protection de l'environnement.

Chapitre II:

Les remblais

II.1. Introduction

Ce chapitre porte sur les remblais, qui sont des ouvrages en terre utilisés pour relever ou niveler le terrain naturel. La qualité d'un remblai est essentielle pour assurer sa stabilité et sa capacité à supporter différentes charges telles que le trafic routier, les bâtiments et les superstructures. De ce qui suit, on va présenter les remblais, ainsi que les matériaux utilisés et les méthodes de construction. On va aussi aborder les effets des conditions d'utilisation des matériaux en remblais.

II.2. Définition d'un remblai

Un remblai est un ouvrage en terre qui provient de la mise en place de matériaux pour rehausser ou niveler le terrain naturel. Il doit pouvoir supporter les sollicitations ultérieures (trafics routiers ou ferroviaires, bâtiments, superstructures...) sans déformation (tassements, glissements...). La qualité d'un remblai dépend de la nature des matériaux qui le composent et de leur mise en œuvre. Les matériaux, issus des déblais du site ou d'un emprunt, doivent être mis en place à une teneur en eau correcte (pour assurer une portance suffisante) et compactés (pour garantir leur stabilité) [9].

II.3. Types de remblais

Il existe plusieurs types de remblai :

II.3.1. Remblai routier

Un remblai routier est un ouvrage en terre construit pour modéliser la topographie naturelle du terrain de manière à assurer la géométrie imposée à la plate-forme sur laquelle la chaussée sera construite [9].

II.3.2. Remblai ferroviaire

Un remblai ferroviaire est un ouvrage de grande taille. Sa réalisation implique le déplacement de quantités considérables de terre (de bonne qualité) et d'importantes surfaces d'encombrement à la base. Cela entraîne des frais pour la collectivité, liés aux expropriations, mais aussi pour l'impossibilité d'utiliser autrement la surface occupée par ces ouvrages [9].



Figure II.1. Types de remblai (ferroviaire, routier) [9].

II.4. Matériaux utilisés en remblais

La qualité d'un remblai dépend de deux facteurs principaux :

- La composition des matériaux utilisés ;
- Les techniques de mise en œuvre de ces matériaux.

Les matériaux, provenant soit des déblais, soit d'un emprunt, doivent être manipulés avec précaution, en veillant à maintenir un niveau d'humidité adéquat pour assurer une portance suffisante. D'autre part, ces matériaux doivent être compactés soigneusement pour garantir leur stabilité à long terme.

Les propriétés (ou paramètres) de ces matériaux peuvent être groupées en trois catégories [10]:

II.4.1. Paramètres de nature

Ce sont des paramètres qui ne varient pas ou peu ni dans le temps ni au cours des manipulations:

- La granularité : Le diamètre maximal des grains (D_{max}) et le pourcentage des fines inférieures à $80\ \mu\text{m}$;
- L'indice de plasticité (I_p) qui caractérise l'argilosité des sols;

- La valeur au bleu de méthylène (VBS) sur la fraction 0/50 mm. Il s'agit d'un autre paramètre qui caractérise l'argilosité des sols.

II.4.2. Paramètres de comportement mécanique

Les paramètres de comportement mécanique à prendre en compte dans la classification des sols sont la valeur Los Angeles (LA), et la valeur Micro Deval en présence d'eau (MDE), ou la valeur de friabilité des sables (FS) pour les sols sableux.

II.4.3. Paramètres d'état

Il s'agit des paramètres qui ne sont pas propres au sol, mais en fonction de l'environnement dans lequel il se trouve. Pour les sols meubles sensibles à l'eau, le seul paramètre d'état considéré dans la classification est l'état hydrique: son importance est capitale vis-à-vis de tous les problèmes de remblai et de couche de forme.

Les paramètres considérés sont :

- La position de la teneur en eau naturelle (w_n) de la fraction 0/20 du sol par rapport à l'Optimum Proctor Normal (w_{opt}).
- La position de la teneur en eau naturelle (w_n) par rapport aux limites d'Atterberg (w_l et w_p) qui s'exprime par l'indice de consistance (I_c).
- L'indice portant immédiat (IPI) qui exprime la valeur du poinçonnement CBR mesurée sans surcharges ni immersion sur une éprouvette de sol compacté à l'énergie Proctor Normal.

II.5. Effets des conditions d'utilisation des matériaux en remblais

II.5.1. Extraction

Le mode d'extraction des déblais peut interférer sensiblement sur la qualité des remblais.

II.5.1.1. Extraction en couche

L'extraction en couche (épaisseur 0,1 à 0,3 m) permet une bonne fragmentation et un tri relatif des différentes couches de matériaux.



Figure II.2. Extraction en couche [5].

II.5.1.2. Extraction frontale

Pour l'extraction frontale, on observe des effets exactement opposés. Elle offre en plus la possibilité dans des formations stratifiées, de sélectionner le niveau présentant la meilleure portance pour le réserver à la circulation des engins de transport [5].



Figure II.3. Extraction frontale [5].

II.5.2. Action sur la granularité

On distingue deux actions qui permettent d'agir sur la granularité :

II.5.2.1. Élimination des éléments

a) > 800 mm : Cette valeur constitue une limite maximum des blocs admissibles dans le corps d'un remblai compte tenu des performances des compacteurs les plus puissants actuellement.

b) < 250 mm : Cette valeur constitue la dimension maximale des blocs permettant encore un malaxage du sol avec un agent de traitement.



Figure II.4. Action sur la granularité [5].



Figure II.5. Fragmentation complémentaire après extraction [5].

II.5.2.2. Fragmentations complémentaires après extraction

Cette modalité s'applique aux matériaux rocheux évolutifs. Les moyens utilisables pour agir sur la granularité sont variés : pétard âgé, concassage, utilisation d'engins spéciaux.

II.5.3. Action sur la teneur en eau

Il y a deux grands principes:

- L'aération



Figure II.6. Aération [5].

- L'humidification



Figure II.7. Humidification [5].

II.5.4. Traitement

Le traitement s'effectue :

- Avec de la chaux



Figure II.8. Traitement à la chaux [5].

- Avec d'autres réactifs (ciments, cendres volantes, laitières ou autres sous-produits industriels) :



Figure II.9. Traitement réactif [5].

Le traitement d'un sol consiste à mélanger différents produits tels que la chaux (éventuellement sous forme de lait de chaux), des liants hydrauliques (ciment, cendres volantes, laitiers, ...) ou des correcteurs granulométriques, pour conférer aux matériaux des performances mécaniques supérieures à celles qu'ils possèdent à l'état naturel, et

durable tout au long de la vie de l'ouvrage. Dans le cas du traitement avec de la chaux ou des liants hydrauliques, il convient :

- De déterminer par une étude de laboratoire le choix du produit de traitement, les dosages nécessaires, pour atteindre les performances mécaniques recherchées et la plage de teneur en eau du mélange sol-liant.
- De s'assurer de la pérennité des liaisons engendrées par le traitement.
- Les modalités de traitement pour une couche de forme seront beaucoup plus rigoureuses que celles acceptables pour un traitement en remblai.

II.5.5. Compactage

Il s'agit d'une donnée qualitative sur le niveau de compactage requis par les différents matériaux. Trois niveaux d'énergie :

- Faible ;
- Moye ;
- Intense.



Figure II.10. Compactage [5].

II.5.6. Hauteur du remblai

L'utilisation des matériaux est fonction de la hauteur du remblai. On considère les remblais :

- De faibles hauteurs, limitées à 5 m ;
- De hauteur moyenne, limitée à 10 m ;
- De grande hauteur, supérieure à 10m.



Figure II.11. Remblai de hauteur moyenne [5].

II.6. Méthodes de construction des remblais

Il existe cinq méthodes principalement utilisées :

- construction par étapes ;
- banquettes latérales ;
- surcharge temporaire ;
- remblais allégés ;
- renforcement par géotextiles.

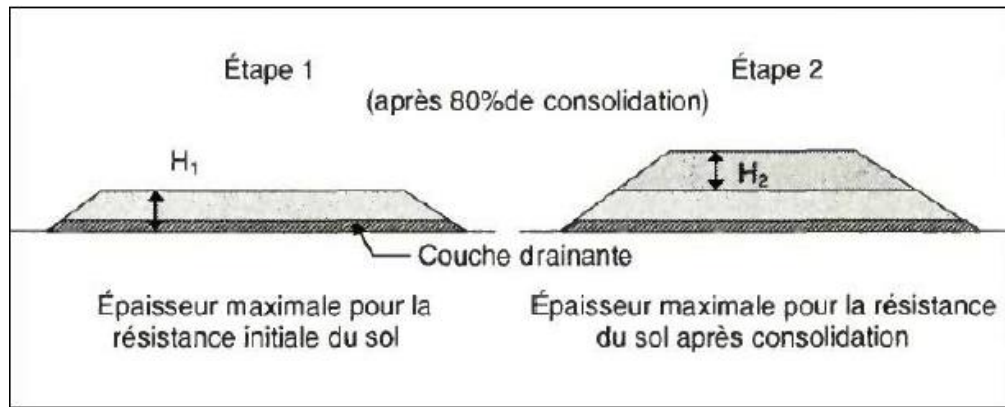


Figure II.12. Etape de construction d'un remblai.

II.6.1. Construction par étape

Le remblai est construit par couches ; l'épaisseur de la couche suivante est déterminée par un calcul de stabilité en fonction de la résistance du sol acquise par consolidation à la fin de l'étape précédente.

II.6.2. Banquette latérale

Ces banquettes servent de contrepoids vis-à-vis de ruptures circulaires et améliorent également la stabilité au poinçonnement.

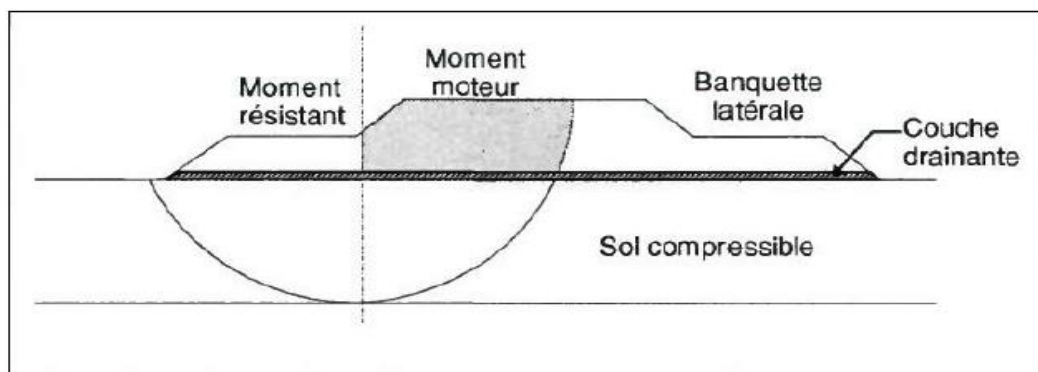


Figure II.13. Banquette du remblai.

II.6.3. Surcharge Temporaire

L'application d'une surcharge temporaire permet de diminuer le tassement postérieur à la mise en service du remblai.

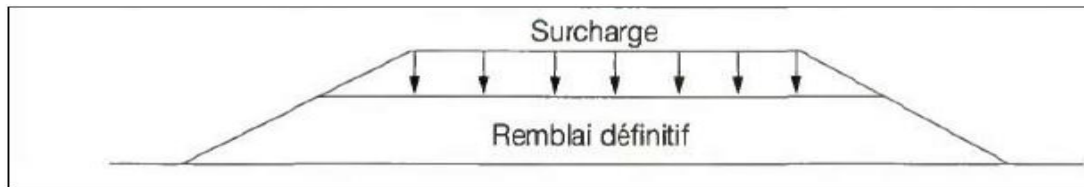


Figure II.14. Surcharge temporaire du remblai.



Figure II.15. Remblai allégé.

II.6.4. Remblais allégés

Réduction du poids du remblai permet de diminuer les tassements et d'améliorer la stabilité. Le choix des matériaux est lié à l'allègement désiré, qui dépend de l'analyse géotechnique du site.

II.6.5. Renforcement par géotextiles

La mise en place d'une ou plusieurs nappes de géotextiles ou de géogrilles à la base du remblai permet d'augmenter sa résistance à la traction et d'améliorer sa stabilité vis-à-vis de ruptures circulaires [9].

7. Conclusion

La qualité d'un remblai dépend de la nature des matériaux utilisés et de leur mise en œuvre, notamment en termes de teneur en eau et de compactage. Les matériaux utilisés en remblais peuvent être classés en fonction de leurs paramètres de nature, de leur comportement mécanique et de leur état hydrique. De plus, les conditions d'utilisation des matériaux, telles que l'extraction, l'action sur la granularité, l'humidification, le traitement et le compactage, ont un impact significatif sur la qualité et la stabilité des remblais. Enfin, des méthodes de construction spécifiques, telles que la construction par étapes, l'utilisation de banquettes latérales, les surcharges temporaires, les remblais allégés et le renforcement par géotextiles, peuvent être mises en œuvre pour garantir la stabilité et la durabilité des remblais.

Chapitre III:

Etude experimentale

III.1. Introduction

Le présent chapitre se concentre sur la présentation d'un cas d'étude spécifique, à savoir l'utilisation des stériles provenant de la Mine de l'Ouenza à Tébessa et de la Mine de Ain Mimoun à Khenchela comme matériau de remblai. Différents essais ont été effectués afin de déterminer les propriétés physiques et chimiques de ces stériles.

III.2. Présentation du cas d'étude

Dans ce cas d'étude, on va étudier la possibilité d'utiliser les stériles de la Mine de l'Ouenza (Tébessa) et la Mine de Ain Mimoun (Khenchela) comme un matériau de remblai.



Figure III.1- Situation géographique du gisement de l'Ouenza [11].

III.2.1. Mine de l'Ouenza Tébessa

III.2.1.1. Situation géographique de Djebel Ouenza

La région de Djebel Ouenza est située au Nord-Est de l'Algérie. Il se trouve à 120 km au Sud de la ville d'Annaba, à 90 km au Nord de la ville de Tébessa et à 15 km de la frontière Algéro-Tunisienne, sur la route nationale n°82 qui relie Tébessa à Souk-Ahras. Le massif de Djebel Ouenza est situé dans la région des monts de Mellègue, qui fait partie du diapirisme triasique de l'Atlas Saharien oriental, formé dans son ensemble par une structure anticlinale

orientée Sud-Ouest Nord-Est. Cette structure est formée par les sédiments du Mésozoïque du Tertiaire et du Quaternaire (figure III.1) [12].

III.2.1.2. Historique de la mine de l'Ouenza

Le Gisement de fer de l'Ouenza entre dans l'histoire vers la fin du 19^{ème} siècle avec l'exploitation du Cuivre au niveau des quartiers Douamis et Hallatif, comme l'attestent les vestiges encore existants sous forme de puits et de galeries. En effet, c'est vers 1875 que l'ingénieur des mines « J. Tissot » signale l'importance des affleurements du minerai de fer.

Le premier permis de recherche du fer du djebel Ouenza a été octroyé en 1878. Il s'en est suivi l'obtention par le prospecteur « F.R. Pascal » d'une concession minière en 1901. Ce n'est qu'aux environs de 1913 que la Société de l'Ouenza fut créée. Elle a débuté l'exploitation de la mine au début des années vingt (1921).

Le début de la modernisation de la mine remonte à 1939 avec l'électrification de la voie ferrée.

L'après-indépendance a connu une mutation très importante, plusieurs évènements se succèdent :

- En 1966, il y avait la nationalisation des mines ;
- En 1967, c'est le début d'aménagement des installations ;
- En 1983, c'était la restructuration de la SONAREM et la création de l'entreprise de recherche ;

Par contre l'évènement le plus important d'eux est celui du partenariat avec le Groupe LNG « ISPAT » en 2001, devenu « Arcelor Mittal » en 2006 [13].

III.2.1.3. Aperçu Géologique sur les Quartiers de la Mine de l'Ouenza

Le Djebel Ouenza fait partie des zones diapirique de la région de l'Atlas saharien oriental. Il est situé dans la région des monts de Mellegue, formant un anticlinal orienté Nord Est-Sud Est. Selon la structure et la nature des roches, le gisement est divisé en sept (07) gîtes (quartiers) principaux dont Chagoura Sud-PIC, Chagoura Nord, Sainte Barbe (Ilot), conglomérat, Hallatif, Douamis et Zerga.

a) Quartier Chagoura Sud-PIC

Ce gisement se trouve dans une structure anticlinale très fracturée. Il renferme deux types de minerai affleurant le long du quartier suivant deux filons (couches). Le premier est

souvent riche et friable, le deuxième de couleur brune et extrêmement dur. Ce dernier a une grande importance de par sa qualité et sa quantité.

- Réserves Géologiques : 20904798 tonnes avec une teneur de 49.8% en fer.
- Réserves Exploitables : 11167936 tonnes avec une teneur de 50.85% en fer.

Remarque : Réserves arrêtées au 31/12/2011.

b) Quartier Chagoura Nord

D'une allure relativement apparente au niveau 1055/1070 avec un rétrécissement en profondeur, le corps principal s'étend sur 500m de long. Le minerai est localisé dans la partie sud du quartier, il est différencié par sa teneur en fer en deux types : riche et pauvre. Ce quartier dispose des réserves suivantes :

- Réserves géologiques : 20787996 tonnes avec une teneur de 48.9% en fer ;
- Réserves exploitables : 10230351 tonnes avec une teneur de 49.7% en fer.

c) Quartier Sainte Barbe

Elle représente le prolongement des formations de Chagoura Sud décalée vers le Nord par un décrochement.

- Réserves géologiques : 13047075 tonnes avec une teneur de 47.7% en fer ;
- Réserves exploitables : 4826560 tonnes avec une teneur de 48.4% en fer.

d) Quartier Conglomérat

Ce quartier représente de rares affleurements se rapportant au trias qui recouvre au NW et au SW l'aptien minéralisé d'où les réserves sont:

- Réserves géologiques : 6011290 tonnes avec une teneur de 47.4% en fer ;
- Réserves exploitables : 376686 tonnes avec une teneur de 46.6% en fer.

e) Quartier Hallatif et Douamis

Ces deux gisements se prolongent vers le NE de la région du Conglomérat jusqu'aux collines calcaires non minéralisées en surface de Douamis.

1. Hallatif :

- Réserves géologiques : 4931028 tonnes avec une teneur de 51.0% en fer ;

2. Douamis :

- Réserves géologiques : 11419058 tonnes avec une teneur de 53.0% en fer ;
- Réserves exploitables : 8516889 tonnes avec une teneur de 53.9% en fer.

f) Quartier Zerga :

Fait partie du gisement de l'Ouenza, se trouve sous forme d'une colline dénommée Koudiatez

Zerga. Située à l'Est du PIC, il est constitué de calcaire récifaux aptiens. Cette structure est le fait du diapirisme triasique. [3]



Figure III.2. Disposition des gites métallifères de la mine de l'Ouenza [11].

III.2.1.4. Hydrogéologie

Le réseau hydrographique est peu abondant en ressources aquifères, les principaux cours d'eau sont : Oued Mellague et Oued El Kseub dont les débits sont irréguliers et varient selon la saison et la quantité de précipitation (Pluviométrie).

Le comportement hydrogéologique des terrains existants à Ouenza se résume comme suit :

Du fait de leur hétérogénéité, les terrains triasiques contenant du gypse et du sel sont perméables et dans lesquels les eaux s'infiltrent et y circulent pour devenir saumâtres et ne peuvent convenir qu'à l'emploi industriel. Les calcaires, s'ils sont fissurés, permettent l'infiltration des eaux et même leur circulation.

Les marnes qui forment la plus grande surface affleurant dans la région sont imperméables, et toutes les eaux de pluie ruissellent ou s'évaporent. Les terrains quaternaires n'ont pas une importance hydrogéologique.

En général toutes les roches de la mine sont fracturées et l'eau de pluie qui y tombe s'infiltré à travers les fissures.

La couverture végétale est pauvre et représentée essentiellement par des petites forêts de pins d'Alep. A ce titre la population de la région vit généralement de l'activité minière et l'élevage d'ovins et de caprins [14].

III.2.1.5. Prospection et états des réserves

Les travaux de prospection effectués par la mine de l'Ouenza s'étalent sur une période de 50 ans ; en plusieurs campagnes avec des moyens et approches différentes ; ce qui a permis de délimiter la minimalisation ferrifère et dévaluer son importance.

Le gisement de l'Ouenza a été prospecté essentiellement par des ouvrages miniers et sondages (verticaux, inclinés et horizontaux) selon un réseau de maille variât d'un gîte à l'outre ; allant de (50x50m) et peut être resserre jusqu'au (25x25m) et encore moins dans certains gîtes.

Le volume des travaux réalisés ; a permit d'évaluer les différents sites potentiels de la mine qui sont en phase d'exploitation ; et de délimiter la minéralisation pour les sites vierges aux abords immédiats de la mine tels que: Kahkouh et Souda [15].

Tableau III.1. Réserves géologiques du Gisement de l'Ouenza (actualisées au 30/06/2022) [12].

Quartiers	Minerai de Fer (tonnes)	Fe(%)
Chagoura sud-pic	19 119351	50
Chagoura Nord	20 025 562	48,9
Sainte Barbe	12 813 168	47,8
Conglomérat	6 011 290	47,4
Hallatif	4 931 028	51
Douamis	11 327 458	53
Zerga	3 196 457	42,7
TOTAL	77424314	49,3

Tableau III.2. Réserves exploitables du Gisement de l'Ouenza (actualisées au 30/06/2022)
[12].

Quartiers	Minerai (tonnes)	Fe (%)	stérile (tonnes)	TD
Chagoura Pic	6636049	53,5	26 066 705	4
Chagoura Sud	3 102 139	48,2	6881972	2.2
Chagoura Nord	947 306	49,7	18 117 869	1.9
Sainte Barbe	4602653	48,4	19 129 288	4.2
Conglomérat	376686	46,6	1779731	4.7
Douamis	8425289	53,9	42070918	5
Zerga	2350266	42,7	2862127	1.2
TOTAL	34 967 388	50,5	116908610	3.3

III.2.1.6. Minéralisation

Les minerais sont constitués essentiellement d'hématite qui résulte de l'oxydation des amas de sidérose et de pyrite. Le carbonate provient lui-même de la métasomatose des calcaires récifaux de l'aptien par des venues minéralisantes sulfureuses.

Les hydroxydes de fer sont le résultat de la désagrégation de l'hématite.

Une série d'intermédiaires entre le minerai primaire et le secondaire constitue une part importante dans les réserves de la mine.

Outre le minerai de fer, il faut signaler une très faible présence de minéralisation polymétallique (Pb, Cu...), le long de la faille du pic.

Notons enfin que le patrimoine minéralogique de la région de l'Ouenza est très riche et varié :

Gypse (saccharoïde et fer-de-lance), barytine (feuilletée et massive) quartz (parfois d'une pureté exceptionnelle et offrant des cristaux d'une rare régularité), pyrite, fluorine (en cristaux blancs ou violets) calcite et aragonite sous diverses formes et particulièrement en stalagmite), azurite, malachite.

Cette liste ne pourrait pas être exhaustive et une étude microscopique généralisée sur tout le gisement pourrait en déceler d'autres [15].

III.2.1.7. Rejet de la mine de l'Ouenza

Les rejets de la mine de Ouenza sont représentés par des marnes jaune, grise, calcaire qui sont déposées au niveau des décharges suivant le cartier d'extraction on retrouve au niveau de la mine 15 décharges qui sont réparties entre celles qui sont actives ou inactives.

La quantité de rejet et de minerai extraie dans l'année 2012 et 2013 (Tableau III.1et III.2) montre que l'extraction de la matière première génère des déblais énormes de rejet (essentiellement calcaire et marne) qui dépasse les 60% pour atteindre une quantité de minerai qui n'excède pas les 30%.

Suivant cette théorie la mine de l'Ouenza se dirige vers l'exploitation souterraine. De plus à l'heure actuelle aucune méthode de valorisation de ces rejets n'est envisagée.

Tableau III.3. Cubature annuelle année 2012 (Service géométrie mine de l'Ouenza) [16].

Mois	Total minerai(Tonne)	Total stérile(Tonne)
Janvier	128347,20	125435,00
Février	94104,18	195301,25
Mars	134230,75	264364,00
Avril	107212,95	297177,50
Mai	52295,42	141797,00
Juin	91028,34	122948,00
Juillet	97625,75	132671,75
Aout	59440,80	84565,25
Septembre	47477,34	121349,00
Octobre	77009,79	175588,75
Novembre	64261,62	251918,00
Décembre	111574,91	311713,75
Total général	1064609,04	2224829,25
Total mine	3289438,29	

- Quantité totale de minerai : 27,23 %.
- Quantité totale de rejet : 72,77%.

Tableau III.4. Cubature annuelle 2013(Service géométrie mine de l'Ouenza) [16].

Mois	Total minerais(Tonne)	Total stérile(Tonne)
Janvier	8704,18	261293,15
Février	82220,13	242638,25
Mars	107728,38	369106,00
Avril	56534,22	205887,00
Mai	69114,87	169963,00
Juin	56265,03	74188,75
Juillet	2033,75	30935,00
Aout	19973,25	8110,00
Septembre	37833,75	20719,00
Octobre	7460,53	53017,50
Novembre	26267,49	114776,25
Décembre	48186,90	103907,00
Total général	619425,13	1654540,90
Total mine	2273966,03	

III.2.1.8. Climatologie

La région d'Ouenza est située dans l'étage bioclimatique semi-aride à faible pluviométrie. Un climat caractérisé par une période humide et très froide de l'automne à l'hiver et une période sèche et très chaude qui s'étend du printemps à l'été [11].

III.2.2. Djebel Ain Mimoun Khenchela

III.2.2.1. Situation géographique de Djebel Ain Mimoun Khenchela

Le gisement de barytine d'Ain Mimoun est situé sur le territoire de la wilaya de Khenchela, à 28 km à l'ouest de chef-lieu. Les filons n° 3, 7, 8, 9 et 15 sont situés respectivement de 6 à 18 km à l'Est de l'usine. Le filon n°4 est situé à 11 km au Sud Est de l'usine.

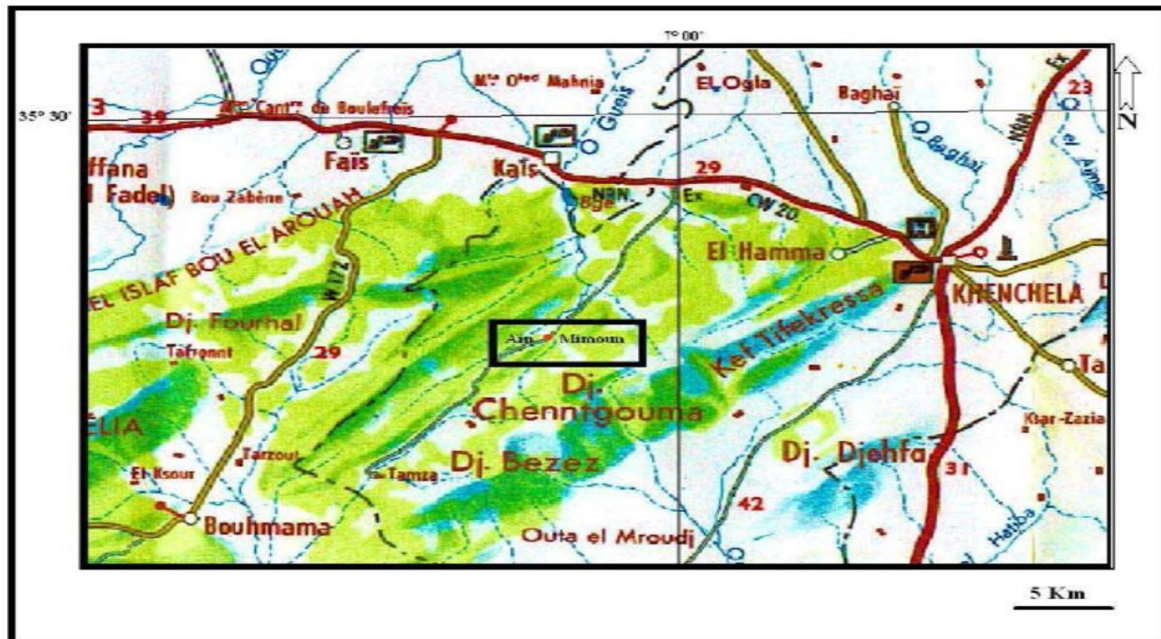


Figure III.3- Localisation géographique d'Ain Mimoun (extrait de la carte touristique de l'Algérie). [17]

III.2.2.2. Historique des travaux de prospection

Les premières lignes directrices de la géologie des Aurès ont été définies par Balbaye : Officier de l'état-major français en 1840. Où il a pu signaler l'existence de calcaire à nummulites.

- ✓ En 1859 furent découverts les premiers indices de blende, galène cinabre à Taghit par Bacrie.
- ✓ En 1860 Coquand parcourut le Sud de la province constantinoise et le massif de l'Aurès. Tissot en tant qu'ingénieur des mines établit les levés géologiques au 1/800.000 eme.
- ✓ En 1939, R.Laffite publia sa thèse sur le massif de l'Aurès.
- ✓ En 1968 Chadrin et Jarrikov menèrent des travaux de prospection dans la région des Aurès.
- ✓ En 1977 J.M.Villa publia les cartes géologiques au 1/50 000 de Khenchela, Dala, Tazoult et Touffana.
- ✓ En 1986, D. Bureau. Publia sa thèse sur l'évolution du mésozoïque et son orogénèse dans les monts de Belezma et proposa un nouveau modèle tectono-sédimentaire [18].

III.2.2.3. Etude géologique sur le gisement d'Ain-Mimoun

La région du gisement se trouve dans la partie orientale du massif montagneux des Aurès qui s'étend à la direction Nord-Est les flancs Septentrionaux de l'anticlinal de Khenchela qui se caractérise par un relief montagneux typique.

Les sommets dépassent 2000 m, le massif est divisé par les vallées profondes transversales, les versants des vallées sont raides, les dénivellations relatives atteignent souvent 500-700 m le gisement est représenté par un faisceau des filons affleurant à la surface avec un fort pendage (30° - 90°) et avec une puissance de 0,5 à 3 m. L'étendue la plus importante des filons céleste à 1 km et les dimensions suivant le pendage 150 - 200 m.

La hauteur la plus élevée du gîte filonien (filon n°11) fait en 1950 ; la moindre hauteur (filon n°1) est égale à 1250 m, les filons sont à distances de la plateforme industrielle de la mine sur un rayon de 6 à 12,5 km [17].

III.2.2.4. Hydrogéologie de la région

Les conditions hydrogéologiques du gisement d'Ain Mimoun sont assez simples, on distingue:

- Les eaux de fissures bancs dans les dépôts carbonatés.
- Les eaux dans de fissures filons dans les accidents techniques.
- Les eaux de fissures sol.
- L'afflux d'eau maximal dans les galeries et de l'ordre de $100\text{ m}^3/\text{jour}$ à $270\text{ m}^3/\text{jour}$, lors des pluies torrentielles.[18]

III.2.2.5. Etudes minéralogiques

Outre les filons de baryte, on rencontre plusieurs indices comme la minéralisation de cuivre, de plomb, de quartz, de calcite, etc.

- **La baryte (BaSO_4)**

Est enfermée de deux espèces, l'un à cristaux grisèrent donne des émanations allongées et à agrégats d'une structure fibreuse, l'autre à cristaux fins forma de grains isométriques.

- **Le quartz(SiO_2)**

Est en deux générations grés en forme de séparation allotriomorphe se développent en cristaux prismatiques.

- **Le diopside ($CuSiO_3, H_2O$)**
(Cuivre gris) se présente sous l'aspect de grains arrondis et angulaires disséminés dans la baryte.
- **La chalcopryrite ($CuFeS_2$)**
Se rencontre en forme de séparation irrégulière le long des fissures dans la baryte.
- **La sphalérite (ZnS)**
Se présente sous forme de grains arrondis.
- **Le cinabre (HgS)**
Est représentée en dissémination dans la pana base.
- **La calcite ($CaCO_3$)**
Donne des séparations à contact irréguliers.
- **Les hydroxydes de fer (Fe_2O_3, H_2O)**
Sont disposés irrégulièrement dans le contact le long des fissures.
- **La malachite et l'azurite ($Cu_2CO_3(OH)_2$)**
Se rencontrent en forme de séparation et nids isolés. Tous ces indices métallifères sont en quantités négligeables et ne présentent aucun intérêt économique [17].

III.2.2.6. Climat

Le climat de la région est de type continental : sec en été avec des températures élevées et froid en hiver avec des chutes de neiges assez fréquentes.



Figure III.4. Le climat en hiver et en printemps [19].

III.3. Méthodes expérimentales

Afin d'étudier l'efficacité des différents stériles miniers (cas de la mine de l'Ouenza, Tébéssa et la mine de Ain Mimoun, Khenechla) pour leur usage en remblais, on a mis en œuvre des méthodes expérimentales basées sur une série d'essais géotechniques en laboratoire. Les essais géotechniques ont été effectués au sein du laboratoire des mines de l'université.

Tableau III.5. Programme de l'étude expérimentale.

Essais géotechniques	Propriétés géotechniques	Notation (unité)
Propriétés physiques	Teneur en eau Natural	(%)
	Masse volumique absolue	(g /cm ³)
	Equivalent de sable	(%)
	Analyse granulométrique humide+ Sédimentométrie	(%)
	Bleu de méthylène	(%)
Propriétés chimiques	Dosage en Fe_2O_3	(%)
	Dosage en Al_2O_3	(%)
	Dosage en CaO	(%)
	Dosage en MgO	(%)
	Dosage en SiO_2	(%)

III.3.1. Propriétés physiques

III.3.1.1. Teneur en eau (NF P 94-050)

La teneur en eau est un paramètre d'états qui renseigne à la fois sur la compacité et la consistance d'un sol fin. Elle constitue une propriété de base des sols. La teneur en eau d'un sol est déterminée par séchage en étuve. Elle représente le rapport entre la masse d'eau (différence entre la masse humide et la masse sèche) et la masse des particules solides du sol (masse sèche).

La formule utilisée pour calculer la Teneur en eau est :

$$W(\%) = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100 = \frac{m_w}{m_s} \cdot 100 \quad (01)$$

Avec

$$m_w = m_h - m_s \quad (02)$$

Tableau III.6. Résultats de l'essai de teneur en eau naturelle.

	Sainte barbe	Sud	Ain Mimoun
Masse de sol humide (g)	345,1	665,2	551
Masse de sol sec (g)	321,4	656,6	531
Masse d'eau (g)	23,7	8,6	20
Teneur en eau (%)	7,3	1,3	3,7

Tableau III.7. Etat hydrique des sols selon leur teneur en eau [10].

Teneur en eau (%)	Etat
01-25 %	Légèrement humide
25-50 %	Humide
50-75 %	Mouillé
75-90 %	Détrempé
100 %	Saturé

A partir de ces résultats les sols étudiés sont des sols légèrement humides.

III.3.1.2. Masse volumique absolue des grains solides ρ_s (méthode au pycnomètre à eau NF P 94-054)

La norme (NF P 94-054) s'applique à tout échantillon de sol intact ou remanié dont la dimension des plus gros éléments est inférieure à 2 mm. L'essai a pour but de déterminer la masse volumique absolue d'un échantillon composé de particules, parfois de nature

différente. La masse volumique absolue des particules solides d'un sol est utilisée pour connaître l'indice des vides, le degré de saturation et la porosité.

La formule utilisée pour calculer la Masse volumique et poids volumique est :

$$\rho_s = [(M_1 - M_0) * \rho_{eau}] / (M_3 + M_1 - M_0 - M_2) \quad (03)$$

$$\gamma_s = \rho_s \times g \quad (04)$$



Figure III.5. Essai de la masse volumique absolue par pycnomètre.

Tableau III.8. Résultats de l'essai de Masse volumique absolue de sol.

Essais	Résultat		
	Sainte barbe	Sud	Ain Mimoun
Masse de pycnomètre M_0 (g)	152	153	152
Masse du pycnomètre et l'échantillon M_1 (g)	212	190	233
Masse du pycnomètre et l'échantillon et l'eau M_2 (g)	688	674	704
Masse du pycnomètre et l'eau M_3 (g)	649	649	650
Masse volumique de l'eau M_{eau} (Kg/m ³)	1000		
Masse volumique (Kg/m ³)	2850	3080	3000
La force gravitationnelle de la Terre (m/s ²)	9.81	9.81	9.81
Poids volumique (KN/m ³)	2795	3021	2943

III.3.1.3. Equivalente de sable (P18-598)

L'essai consiste à séparer le sable des particules très fines qui remontent par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette où l'on a effectué le lavage.

L'essai est fait uniquement sur la fraction de sable 0/2 mm

$$E_s = \frac{h_2}{h_1} * 100 \quad (05)$$

Avec :

h1 : sable propre + élément fines.

h2 : sable propre seulement.

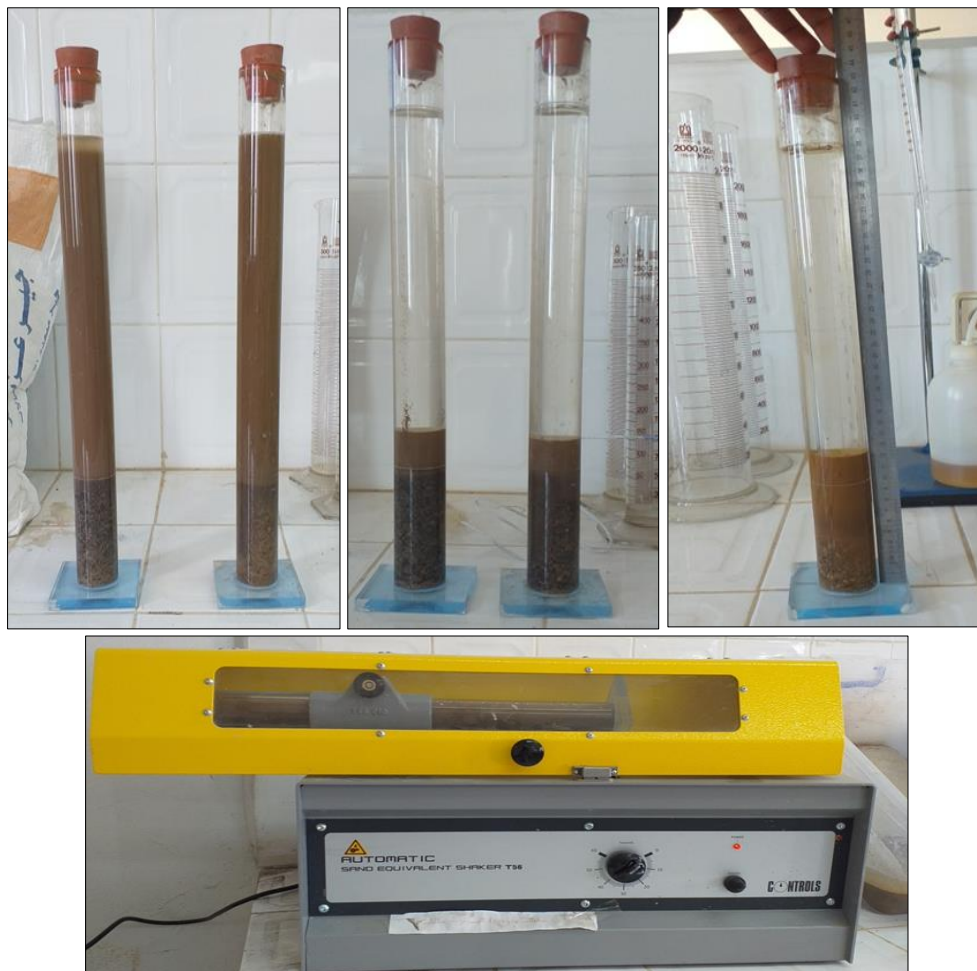


Figure III.6. Essai d'équivalent de sable.

Tableau III.9. Résultats de l'essai d'équivalent de sable.

	Sainte barbe	Sud	Ain Mimoun
h_1 (cm)	12,9	12,9	12,4
h_2 (cm)	9	8	5,2
Es_p (%)	69,77	62,02	41,93

III.3.1.4. Détermination de la granulométrie par tamisage (NF P 94-056) et sédimentation (NF P 94-057)

L'analyse granulométrique par tamisage par voie humide qui fournit la répartition des grains qui ont un diamètre supérieur à 80 μm .

La granulométrie par sédimentation est une technique permettant une mesure de la distribution des tailles des particules par le calcul des diamètres et de pourcentage des particules en classes de taille. C'est une technique de mesure indirecte couramment utilisée et donne accès à la mesure de tailles généralement inférieurs à 80 μm .

**Figure III.7.** Essai d'analyse granulométrique par tamisage par voie humide.

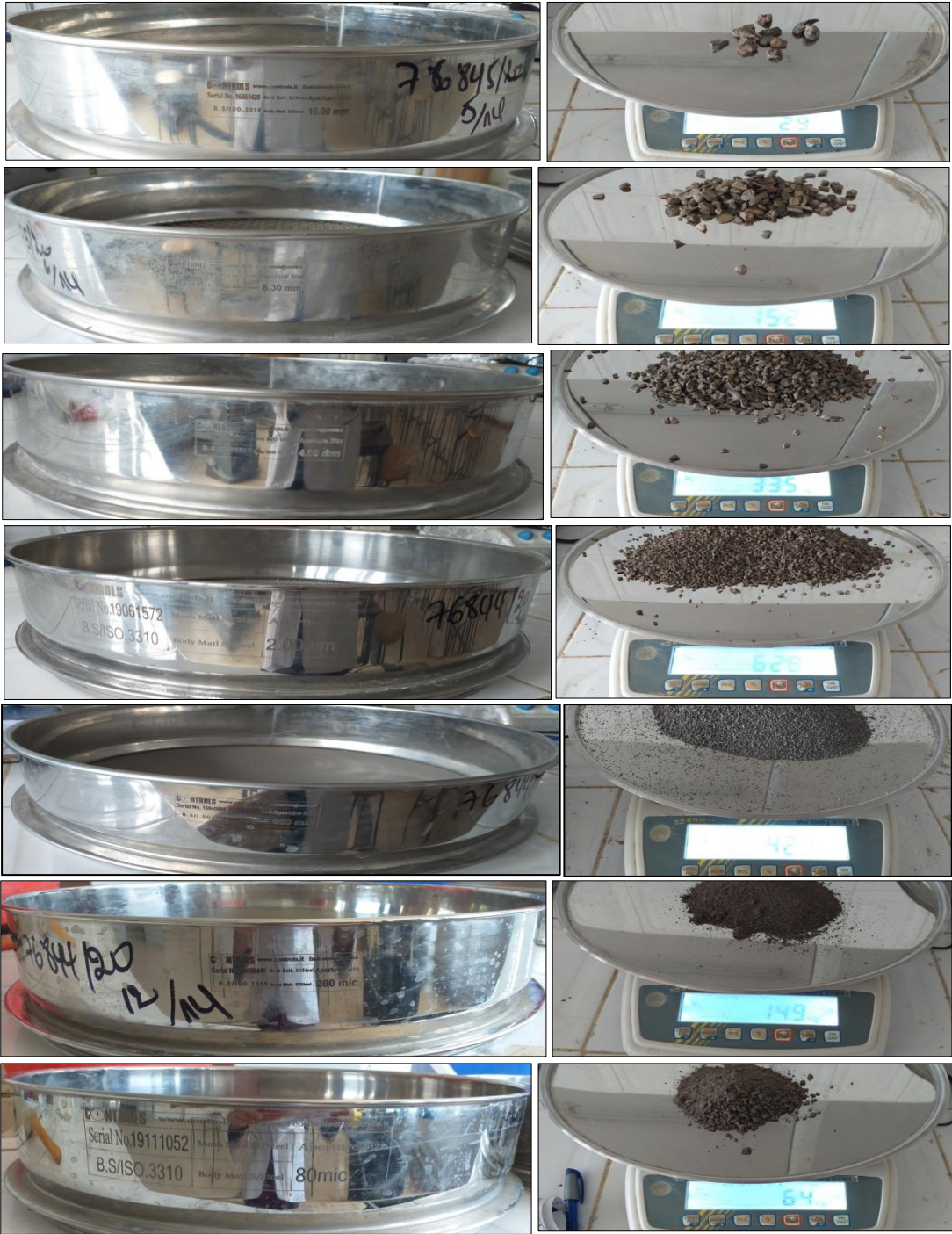


Figure III.8. Mesure des masses des refus.



Figure III.9. Essai d'analyse granulométrique par sédimentation.

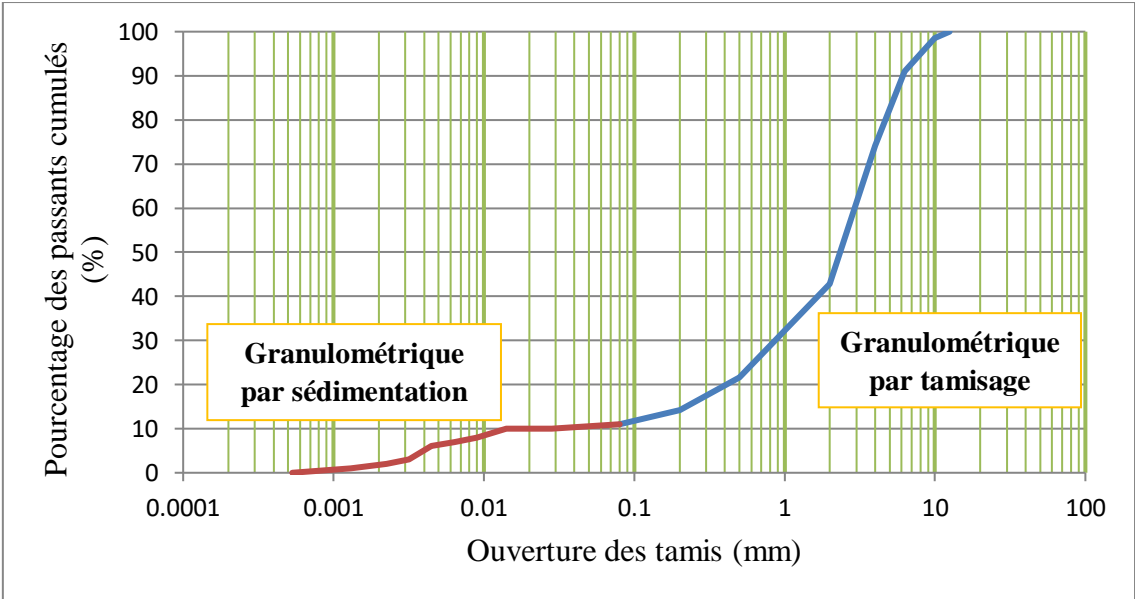


Figure III.10. Courbe granulométrique du stérile de Sainte Barbe.

Avec D_{60} le diamètre des particules correspondant à 60 % du passant, D_{30} le diamètre des particules correspondant à 30 % du passant et D_{10} le diamètre des particules correspondant à 10 % du passant. Le coefficient d'uniformité C_u de courbure C_c est calculé comme suit :

$$C_u = D_{60}/D_{10} \quad (06)$$

$$C_c = (D_{30} \times D_{30}) / (D_{10} \times D_{60}) \quad (07)$$

Le coefficient d'uniformité C_u de stérile de sainte barbe est de 37,5, et le coefficient de courbure C_c de 2,67, Donc le sol étudié à une granulométrie de continuité bien répartie et étalée.

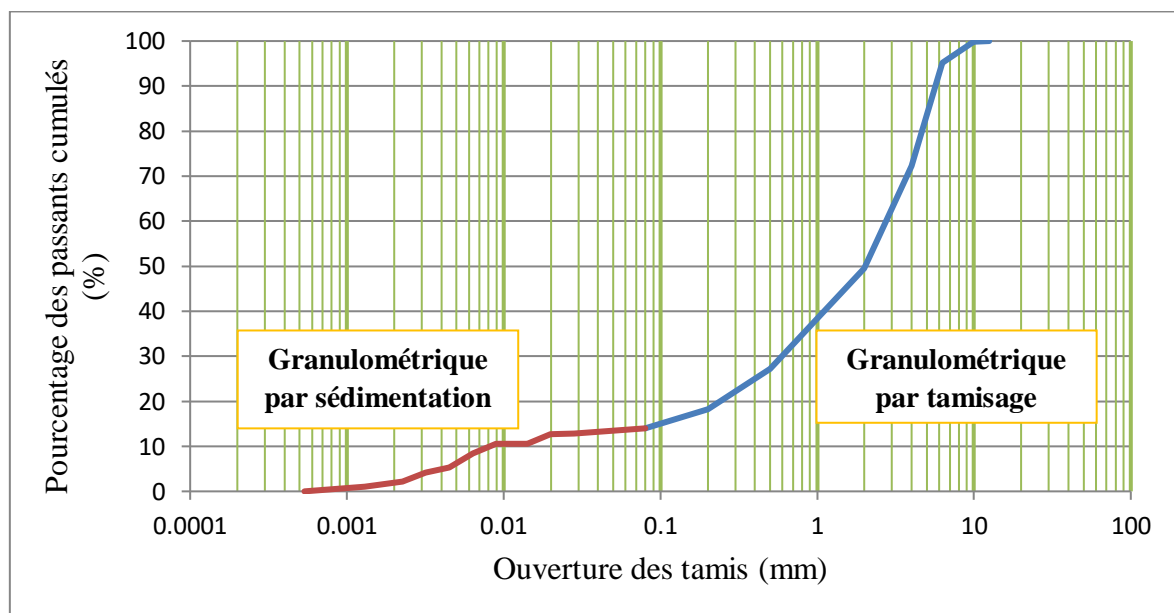


Figure III.11. Courbe granulométrique du stérile de Sud.

Le coefficient d'uniformité C_u de stérile de Sud est de 200, et le coefficient de courbure C_c de 8, Donc le sol étudié à une granulométrie très étalée et bien graduée.

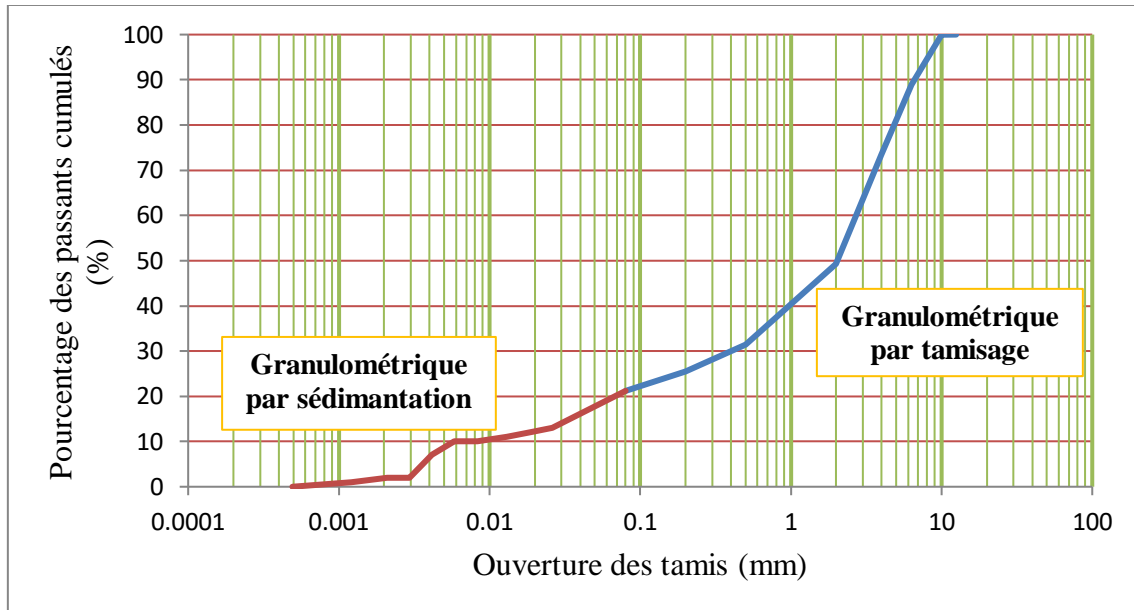


Figure III.12. Courbe de granulométrie du stérile de Ain Mimoun.

Le coefficient d'uniformité C_u de stérile de Ain Mimoun est de 300, et le coefficient de courbure C_c de 10,08, Donc le sol étudié à une granulométrie très étalée et bien graduée.

III.3.1.5. Valeur de bleu de méthylène du sol (NF P 94-068)

L'essai au bleu de méthylène, également appelé « essai au bleu », est un essai utilisé en géotechnique pour déterminer la propreté d'un sable, d'un granulat et plus généralement d'un sol, et les différents types d'argiles qu'il contient. Le bleu de méthylène est en effet adsorbé préférentiellement par les argiles du type montmorillonites (argiles gonflantes) et les matières organiques. Les autres argiles (Illites et Kaolinites) sont peu sensibles au bleu.

Il consiste à introduire dans un échantillon des quantités croissantes de bleu de méthylène, par doses successives jusqu'à ce que les particules argileuses en soient saturées. Le sol adsorbera d'autant plus de bleu de méthylène que :

- la quantité d'argile qu'il contient est importante ;
- Cette argile est active, c'est-à-dire qu'elle développe une surface spécifique élevée et qu'elle est abondamment chargée.

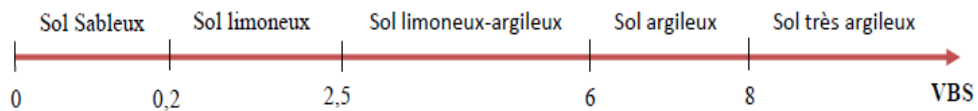


Figure III.13. Type de sol en fonction de la valeur « VBS » [11].



Figure III.14. Essai de bleu de méthylène.

Tableau III.10. Résultats de l'essai de valeur de bleu de méthylène.

	Sterile d'Ain Mimoun	Sterile sud	Sterile Sainte Barbe
VBS (%)	0,6	0,5	0,33
Catégorie de sol	seuil distinguant les sols sablo-limoneux		

- **Classification des sols selon GTR 2000 (NF P 11-300)**

Le guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme (GTR) a été utilisé pour tester et classer les échantillons du sol support où les essais sont : fraction des particules inférieure de 0,080 mm ; teneur en eau ; densité sèche, limites Atterberg ; valeurs du bleu de méthylène et la teneur en carbonate (GTR, 2000).

✓ Selon la granularité (NF P 94-056)

La granularité est la détermination de la dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le sol. Ce paramètre est déterminant pour préjuger les ateliers de terrassements utilisables et notamment pour évaluer l'épaisseur des couches élémentaires et les conditions de malaxage éventuel avec un liant. C'est également un paramètre important à connaître pour apprécier la représentativité des essais de laboratoire. Toutefois la détermination de ce paramètre peut tolérer une certaine imprécision et en règle générale une estimation visuelle est suffisante.

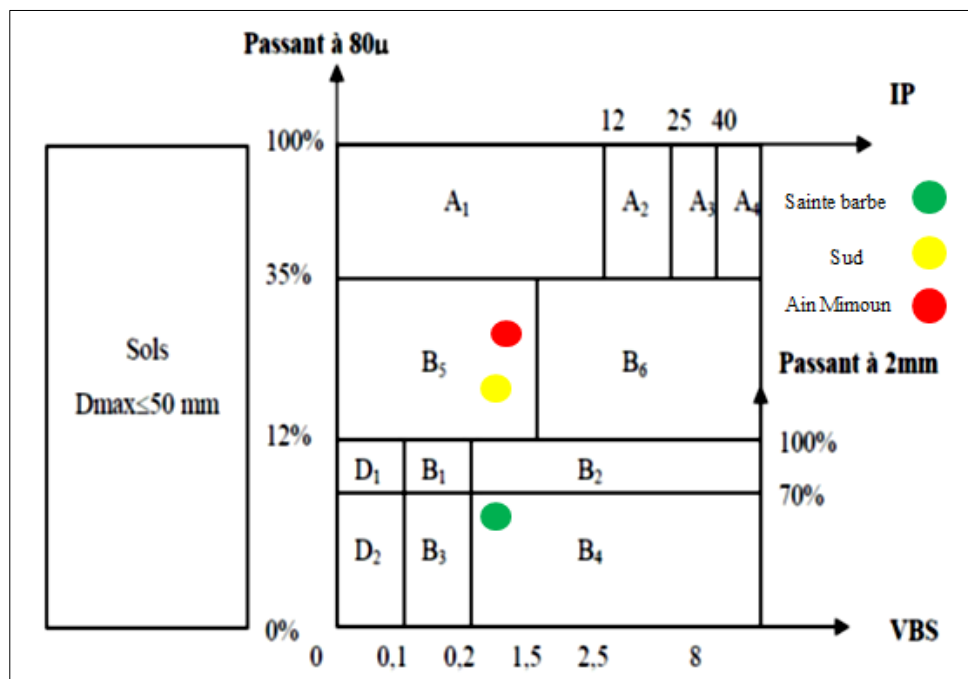


Figure III.15. Classification des matériaux selon leur nature (GTR, 2000).

Les résultats des analyse granulométriques montrent que 11%, 14% et 21,2% des sols analysés sont des d'éléments de dimensions inférieurs à 80 μm.

Selon la méthode *GTR*, les sols de Sainte barbe sont de classe **B4**, ce qui signifie que ce sont des graves argileuses (peux argileuses) et par Les sols de Sud de la mine de Ouenza et ceux de Ain Mimoun sont de classe **B5**, ce qui signifie que ce sont des sables et graves très silteux.

III.3.2. Propriétés chimiques

Pour déterminer la composition chimique des stériles étudiés, j'ai effectué un stage pratique en laboratoire de la société des ciments de Tébessa (S.C.T), et je veux appliquer la méthode classique pour cela.

III.3.2.1. Préparation des échantillons

- Séchage des échantillons dans l'étuve 24h ;



Figure III.16. Opération du séchage.

- Après 24 h broyer les échantillons dans le broyeur;



Figure III.17. Opération du broyage.



Figure III.18. Les échantillons après le broyage.

III.3.2.2. Dosage de l'oxyde ferrique (Fe_2O_3)[12]

Le dosage des oxydes de fer est effectué par l'acide éthylène diamino tétra acétique (EDTA) en présence d'acide salicylique comme indicateur.

La formule utilisée pour calculer la teneur en oxyde ferrique (Fe_2O_3) est :

$$Fe_2O_3(\%) = 1,1977 \times N_{EDTA} \times V_{EDTA} \quad (08)$$

III.3.2.3. Dosage d'alumine (Al_2O_3)

Le dosage de l'oxyde d'alumine par l'EDTA.

L'indicateur est composé de cuivre et de peroxyde azotique naphatol (PAN) .

La formule utilisée pour calculer la teneur en oxyde Alumine (Al_2O_3) est :

$$Al_2O_3(\%) = 0,7647 \times N_{EDTA} \times V_{EDTA} \quad (09)$$

III.3.2.4. Dosage de chaux (CaO)

Le dosage de CaO est effectué par l'EDTA et en utilisant la calcéine, comme indicateur.

La formule utilisée pour calculer la teneur en (CaO) est :

$$CaO(\%) = 1,6824 \times N_{EDTA} \times V_1 \quad (10)$$

Avec :

V_1 : Volume de titrage avec l'EDTA .

III.3.2.5. Dosage de magnésium (MgO)

Le dosage de MgO est effectué par l'EDTA et en utilisant la Ind MgO, comme indicateur.

La formule utilisée pour calculer la teneur en (MgO) est :

$$\mathbf{MgO(\%) = (V_2 - V_1) \times N_{EDTA} \times 1,2093} \quad (11)$$

Avec :

V_1 : Volume de titrage de CaO .

V_2 : Volume de titrage avec l'EDTA .

N_{EDTA} : Normalité du complexant EDTA calculée .

III.3.2.6. Dosage de Silice (SiO_2)

La teneur en SiO_2 calculé comme suite :

$$\mathbf{SiO_2(\%) = P_2 - P_1/G \times 100} \quad (12)$$



Figure III.19. Quelques photos des essais chimiques.

Tableau III.11. Composition chimique moyenne des stériles étudiés.

Stériles	Teneur en (%)		
	Sainte barbe	Sud	Ain Mimoun
Eléments			
Fe_2O_3	6,66	6,41	4,44
Al_2O_3	14,97	8,66	4,73
CaO	2,43	13,86	2,43
MgO	0,75	1,49	1,99
SiO_2	54,80	50,14	67,4

A partir les résultats des essais chimiques les pourcentages de silice est donc les stériles étudiés sont de type sableux

III.3.3. Estimation des valeurs de C et ϕ

D’après les travaux de Li (2013), on peut estimer l’angle de frottement interne d’un sol à partir du pourcentage des grains $\geq 80 \mu$ et la contrainte normale (σ).

Dans notre cas :

En prend $\sigma = 300 \text{ kPa}$

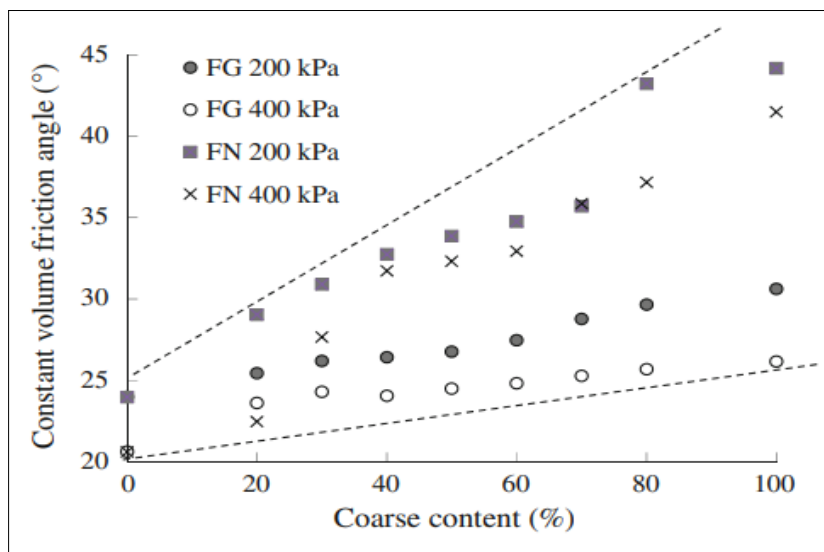


Figure III.20. Courbe des angles de frottement en fonction les passants.

Tableau III.12. Angle de frottement en fonction du pourcentage des particules $\geq 80 \mu\text{m}$.

Les paramètres	Sainte barbe	Sud	Ain Mimoun
P ($D \geq 80 \mu\text{m}$) (%)	89	86	78,8
Angel de frottement ϕ (°)	42	41	40

Dans notre cas, en prend :

$C=1 \text{ KN/m}^2$ parce que le sol est sable.

III.3.4. Estimation de valeur E_{Oed}

La relation entre $E_{d\acute{e}f}$ et E_{Oed} est fourni par :

$$E_{Oed} = \frac{E}{\beta} \quad (13)$$

$$\beta = 1 - \frac{2\vartheta^2}{\vartheta} \quad (14)$$

La valeur de E est prise égale à la valeur théorique du sable dans logiciel PLAXIS 2D V8.2 :

$$E = 13000 \text{ KN/m}^2 \quad (15)$$

$$\vartheta = 0,33 \quad (16)$$

A partir l'équation (14) : $\beta = 0,34$

et a partir l'équation (13) : $E_{Oed} = 17500 \text{ KN/m}^2$

III.4. Conclusion

L'étude expérimentale a permis de caractériser les stériles de la Mine de l'Ouenza et Ain Mimoun. L'utilisation des stériles de ces deux mines comme matériaux de remblai présente des avantages potentiels, mais nécessite une évaluation minutieuse de la faisabilité technique, économique et environnementale.

Chapitre IV:

Modélisation

numérique

IV.1. Introduction

Le développement des méthodes de calcul numérique sur ordinateur (méthode des différences finies et méthode des éléments finis) a permis de chercher des solutions beaucoup plus réalistes et générales, fondées sur un certain nombre de modèles rhéologiques et d'algorithmes de résolution des divers aspects du comportement des sols.

Ces modèles, reposant sur des approches élastiques non linéaires ou sur des approches élastoplastiques, permettent de décrire assez correctement le comportement des sols.

Quant aux algorithmes de résolution, leur fiabilité et leur performance dépendent surtout de la méthode de calcul utilisée et des critères de convergence fixés.

On a adopté un phasage de la construction par couches du remblai car cette approche permet de tenir compte de la technique de construction, en installant des couches successives de sol (tassement). Le calcul par éléments finis s'effectue alors en plusieurs étapes en suivant au plus près la chronologie des travaux et les techniques utilisées.

Le but de ce chapitre est de faire une étude numérique des remblais construits par des différents stériles miniers avec le logiciel PLAXIS 2D V.8.2, pour comprendre leur comportement géomécanique.

IV.2. Présentation du logiciel utilisé (PLAXIS 2D V.8.2)

Le logiciel PLAXIS est conçu par des géotechniciens numériques, le code d'éléments finis PLAXIS représente certainement un optimum actuel sur les plans scientifique et pratique en analyse des contraintes et déformation.

Scientifiquement c'est un outil d'analyse non linéaire élasto-plasticité, avec prise en compte des pressions interstitielles (et même consolidation linéaire), dotée des méthodes de résolution, éprouvées, ainsi que de procédures de choix automatique évitant des choix délicats à l'opérateur peu averti.

Bien que très fiable sur le plan numérique, le code fait appel à des éléments de haute précision (triangles à 15 nœuds).

IV.3. Définition des paramètres du modèle

IV.3.1. Système de coordonnées

Le système de coordonnées cartésiennes « dans une analyse en déformation symétrie «6 nœuds ».

IV.3.2. Entrée des caractéristiques générales

Les modèles géométriques représentent les remblais et les déblais construits par des différentes strates étudiées avec de couche sol support (argile) ; les dimensions des couches de sol et de la structure sont les suivantes ;

➤ **Le sol support**

Il sera modélisé par un modèle géométrique de 30 m de longueur par 27 m de profondeur.

➤ **Les remblais et les déblais**

Ils seront modélisés par des modèles géométriques de :

Hauteur du remblai : on applique 3 cas pour cela :

Cas 1 : 2 m ;

Cas 2: 4 m ;

Cas 3 : 6 m ;

Angle du talus:

Pour les déblais $\theta=45^\circ$

Pour les remblais $\theta= 30^\circ$

IV.3.3. Les conditions aux limites

Le déplacement horizontal et vertical suivant les limites latérales et la base du modèle ($u_x=0, u_y=0$). Le déplacement vertical est libre dans le côté droit du modèle.

IV.3.4. Caractéristique des matériaux

On choisit la loi de comportement Mohr Colomb pour toutes les couches des remblais. Les matériaux qui composent les modèles sont détaillés au tableau suivant :

Tableau IV.1. Caractéristiques des matériaux.

Paramètres	Symbole	Sainte barbe	sud	Ain Mimoun	Argile	Unité
type de Comportement	Type	Drainé	Drainé	Drainé	Non drainé	-
Poids sec	γ_{unsat}	27,95	30,21	29,43	18	KN/m ³
Poids humide	γ_{sat}	27,95	30,21	29,43	16	KN/m ³
Coefficient de poisson	ν	0,33	0,33	0,33	0,35	-
Modules de Young	E	1,300E+04	1,300E+04	1,300E+04	1,000E+04	KN/m ²
Cohésion	C	1	1	1	5	KN/m ²
Angle de frottement	φ	42	41	40	25	°

IV.4. Construction des modèles

IV.4.1. Cas des remblais

IV.4.1.1. La géométrie des modèles

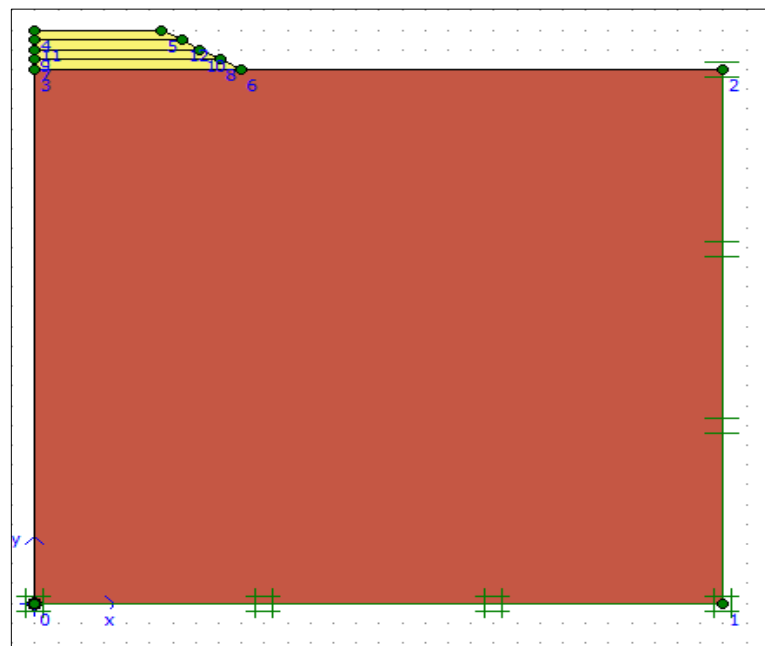


Figure IV.1. Géométrie de modèle pour le cas H = 2 m.

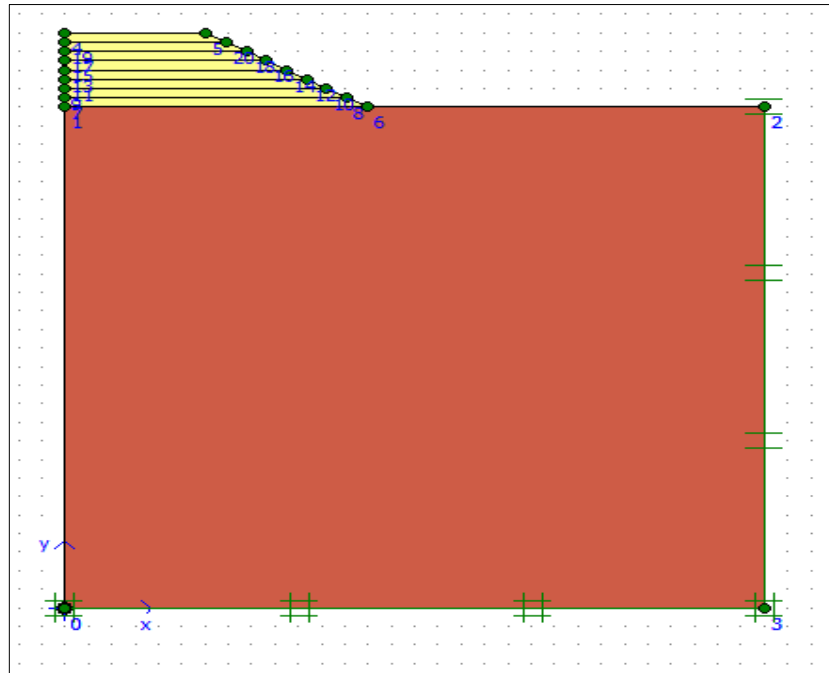


Figure IV.2. Géométrie de modèle pour le cas $H = 4$ m.

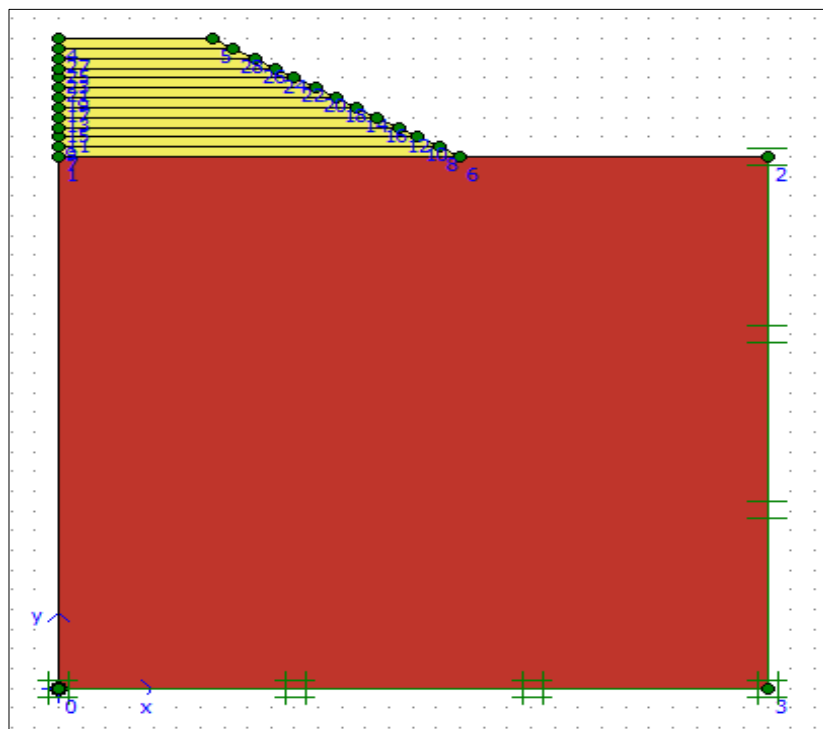


Figure IV.3. Géométrie de modèle pour le cas $H = 6$ m.

IV.4.1.2. Génération du Maillage

Le maillage doit être resserré dans les régions situées directement au tour du remblai où des concentrations de contraintes sont attendues. La finesse du maillage (global coarseness) est réglée sur medium pour tout le sol.

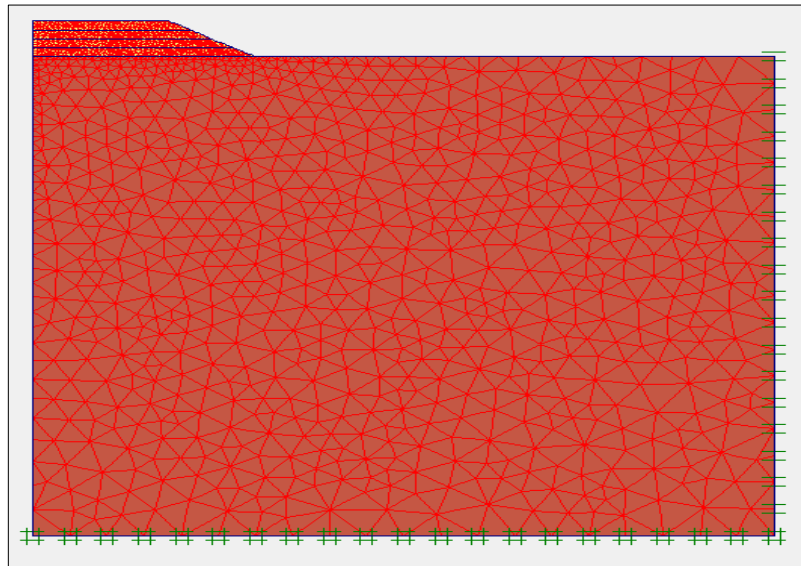


Figure IV.4. Génération du maillage cas $H = 2$ m

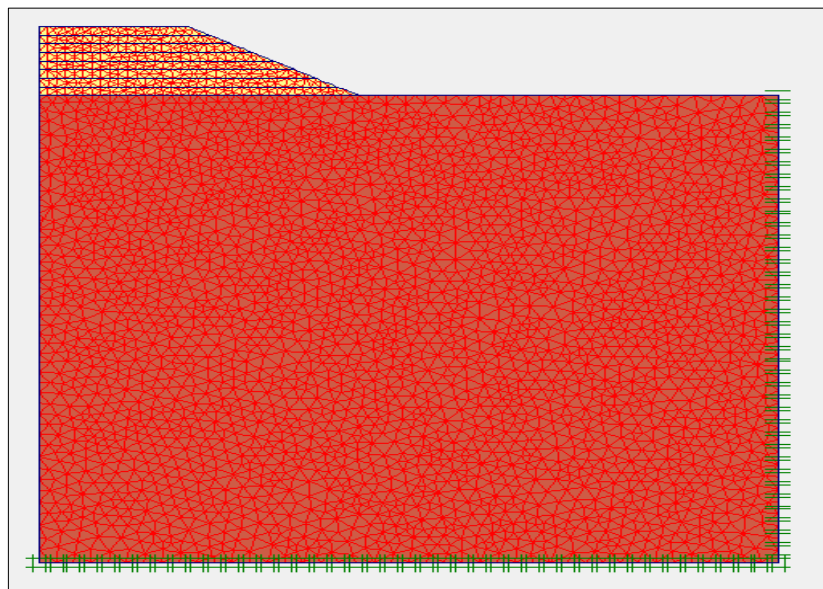


Figure IV.5. Génération du maillage cas $H = 4$ m

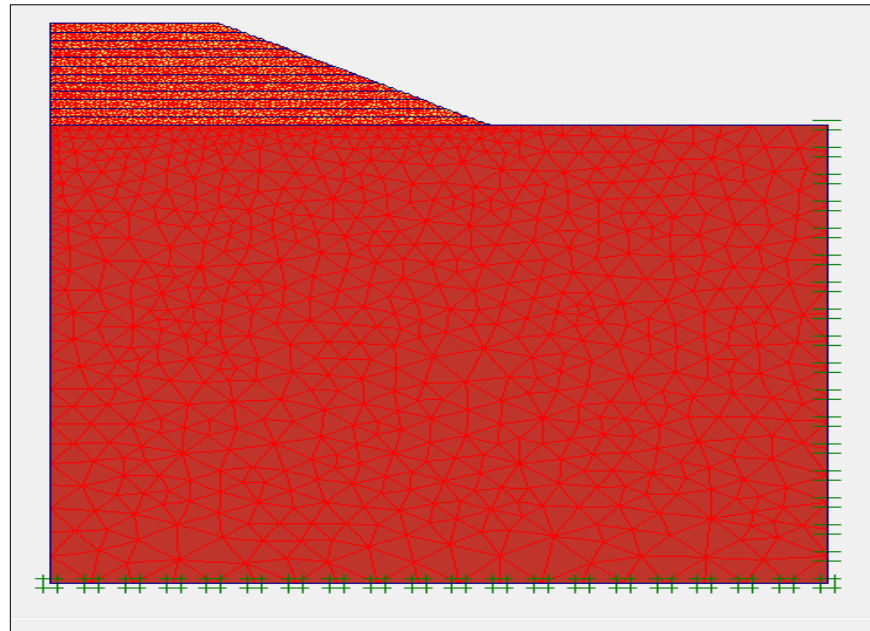


Figure IV.6. Génération du maillage cas H = 6 m

IV.4.1.3. Phase de calcul

Les phases de calcul sont déterminées selon les phases réelles de construction des remblais.

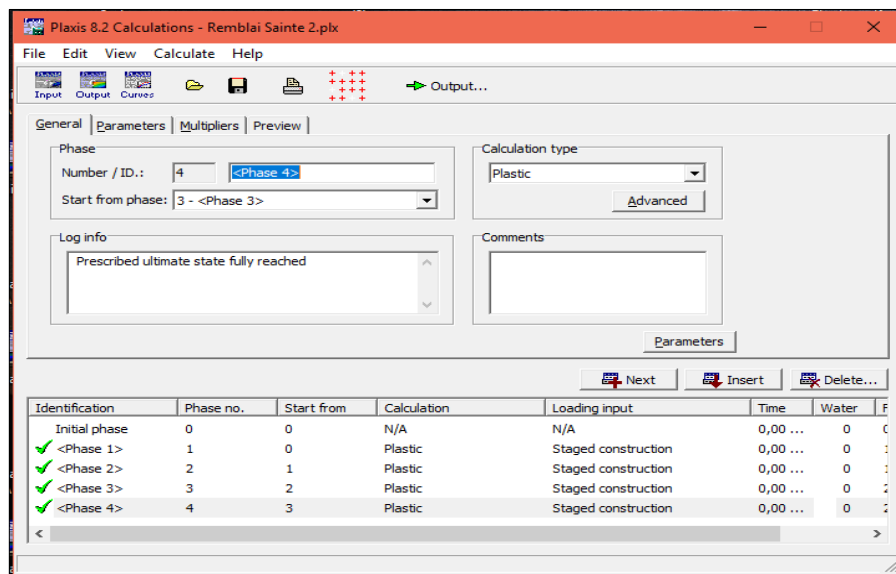


Figure IV.7. Phases de calcul cas H = 2 m.

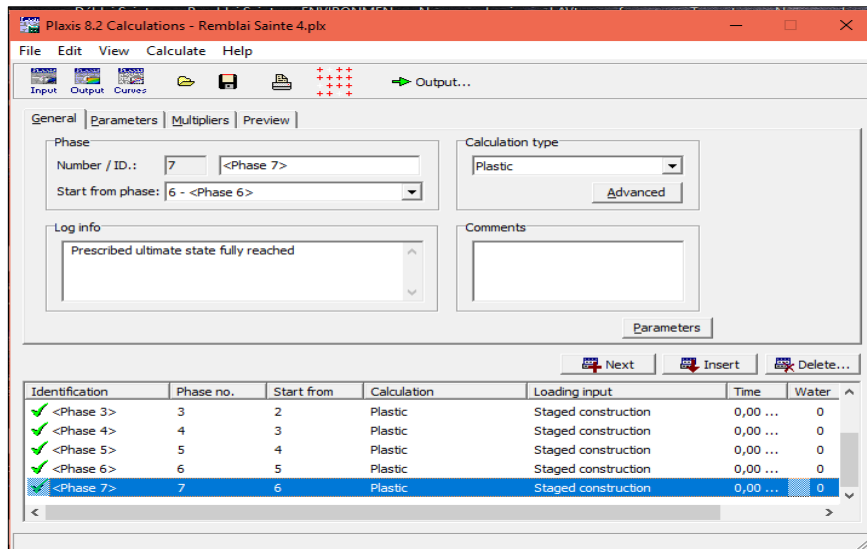


Figure IV.8. Phases de calcul cas H = 4 m.

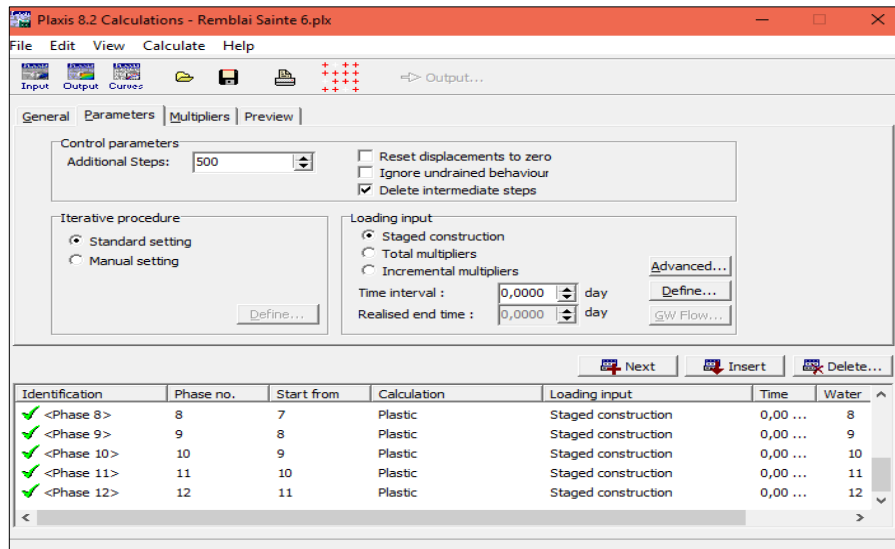


Figure IV.9. Phases de calcul cas H = 6 m.

IV.5. Résultats et discussions

IV.5.1. Déformation totale (tassement)

IV.5.1.1. Stérile de Sainte barbe

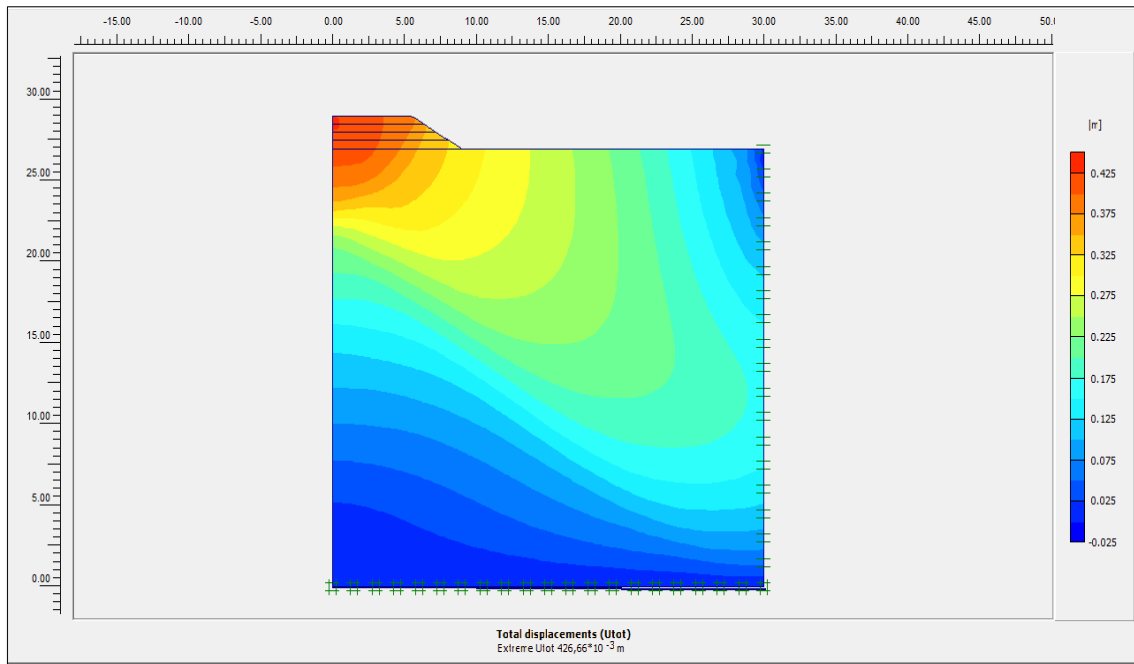


Figure IV.10. Déplacement total Cas H = 2 m.

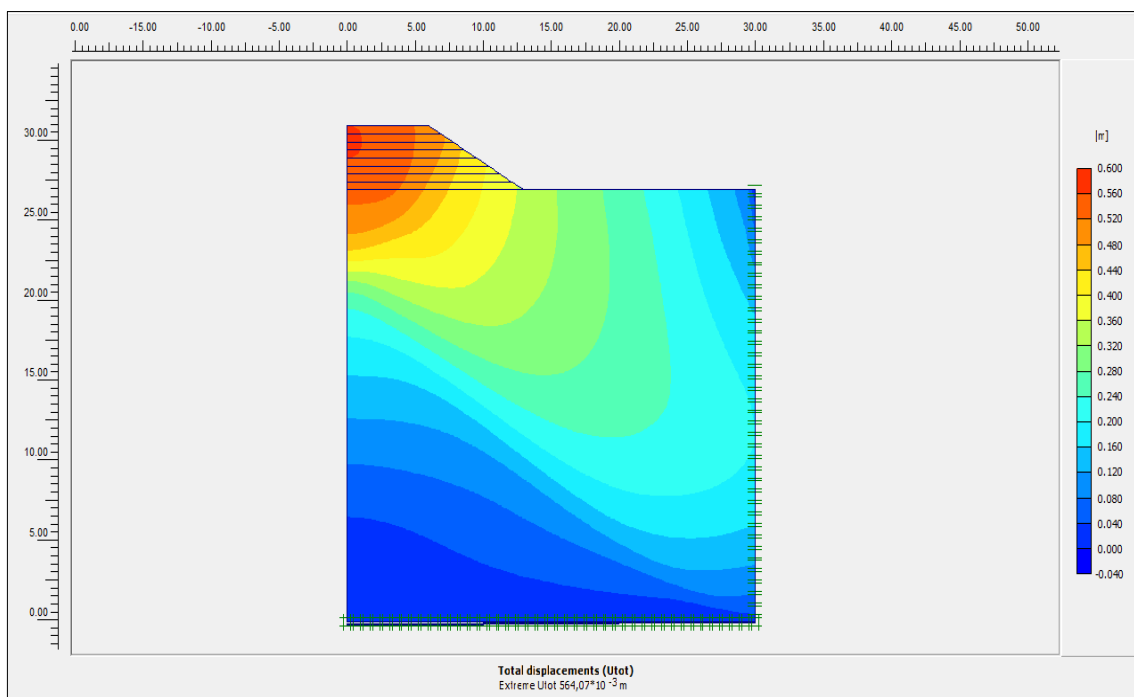


Figure IV.11. Déplacement total Cas H = 4 m.

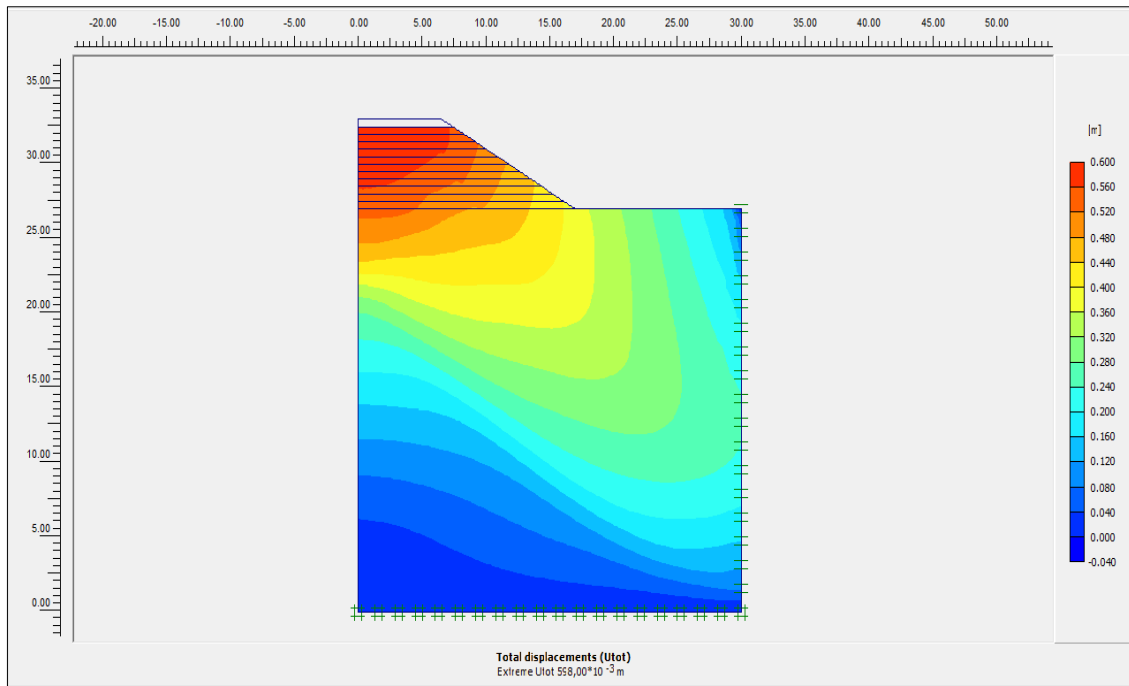


Figure IV.12. Déplacement total Cas H = 6 m.

IV.5.1.2. Stérile du Sud

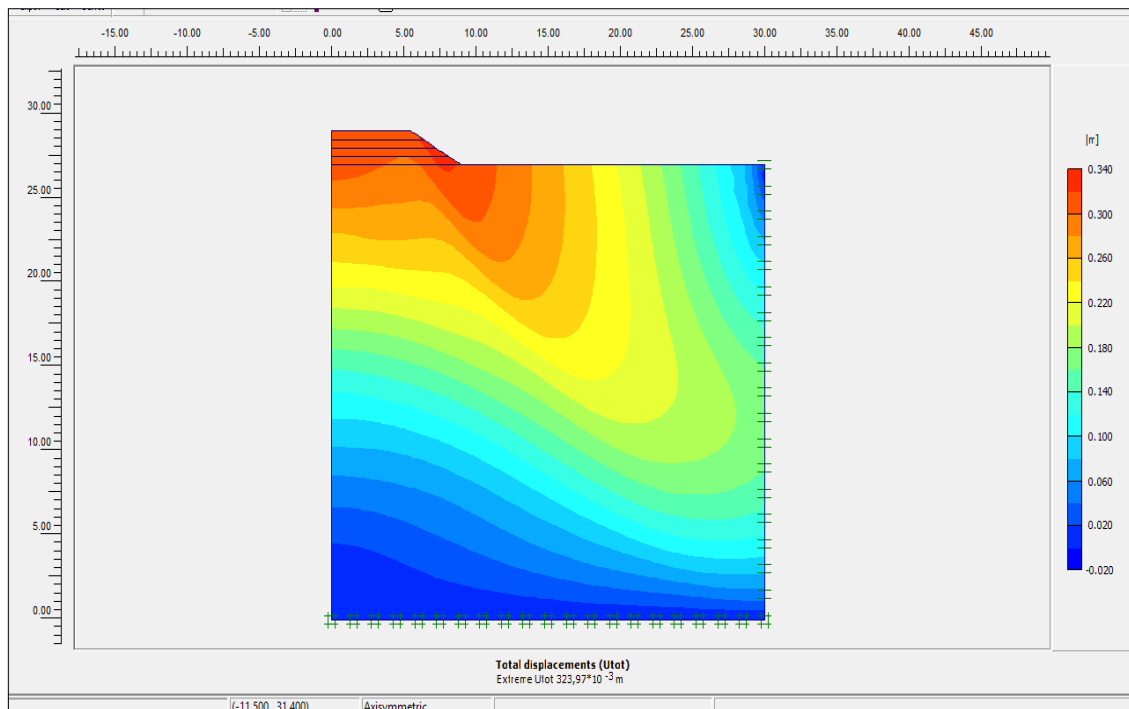


Figure IV.13. Déplacement total Cas H = 2 m.

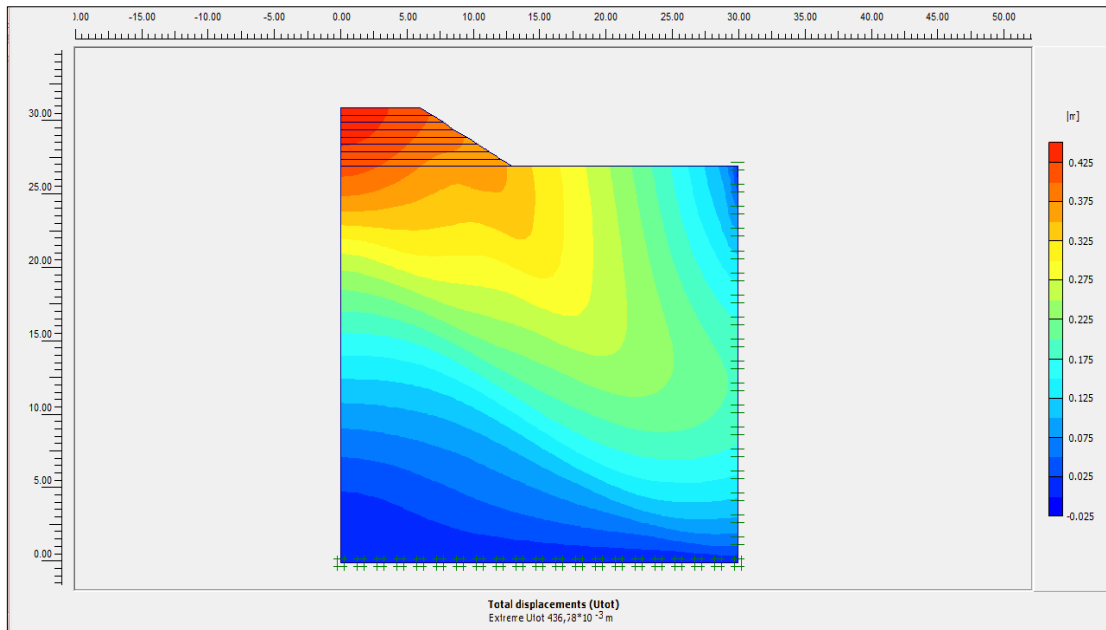


Figure IV.14. Déplacement total Cas H = 4 m.

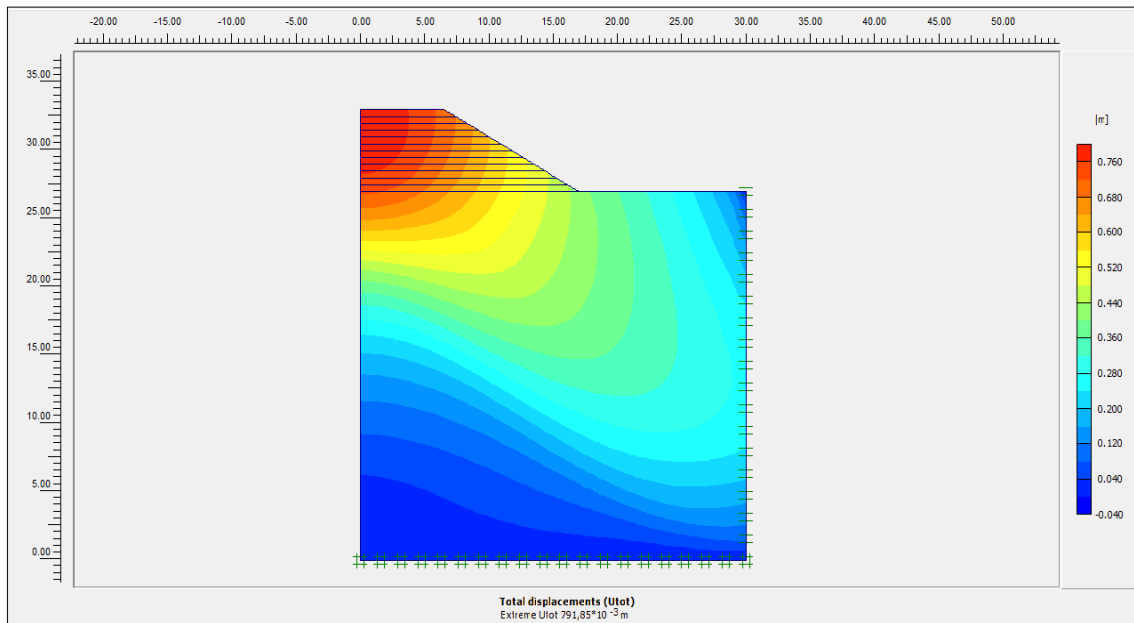


Figure IV.15. Déplacement total Cas H = 6 m.

IV.5.1.3. Stérile d'Ain Mimoun

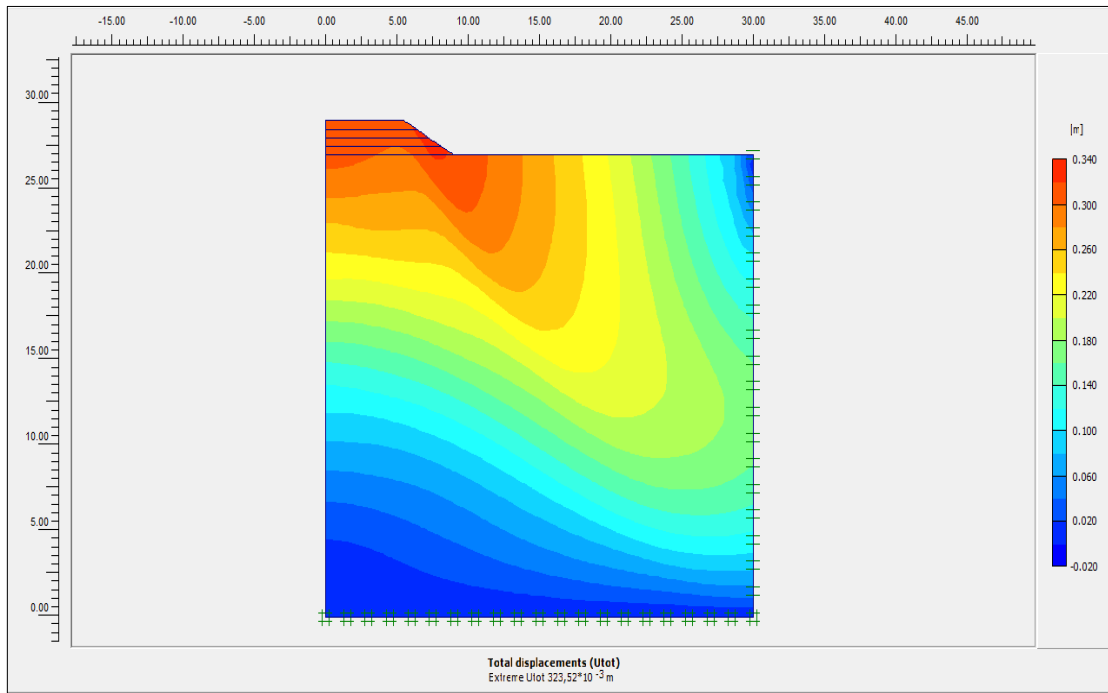


Figure IV.16. Déplacement total Cas H = 2 m.

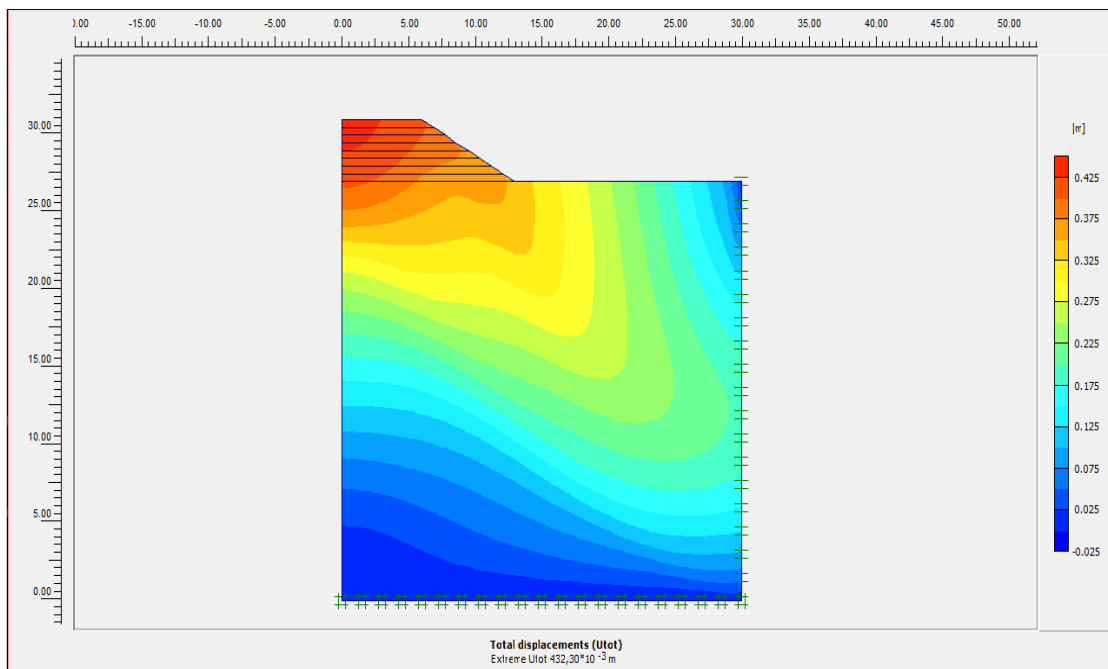


Figure IV.17. Déplacement total Cas H = 4 m.

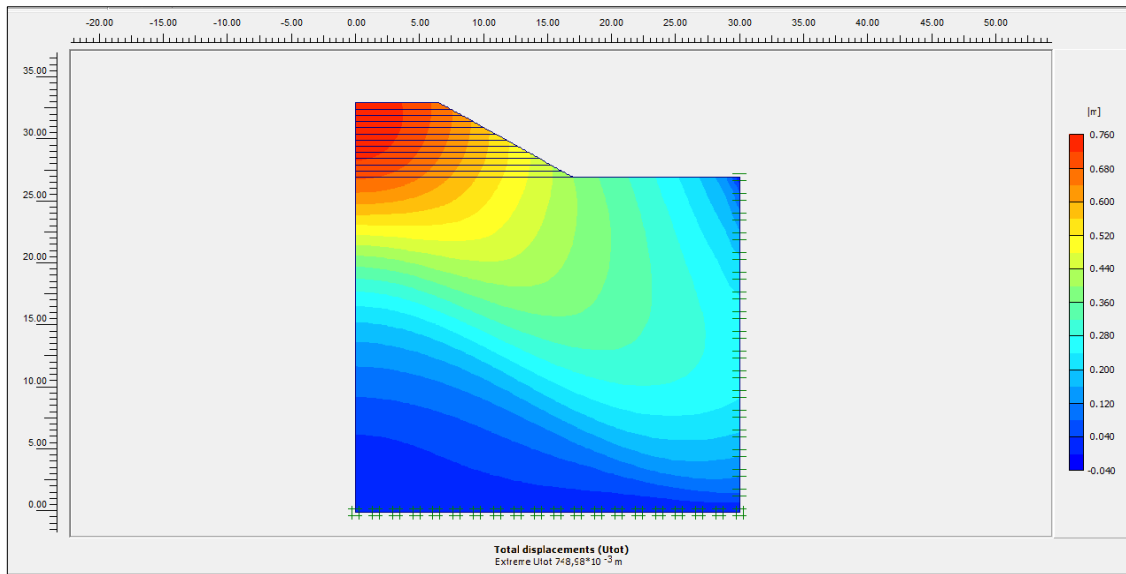


Figure IV.18. Déplacement total Cas H = 6 m.

IV.5.2. Coefficient de sécurité (Stabilité)

➤ Sainte barbe

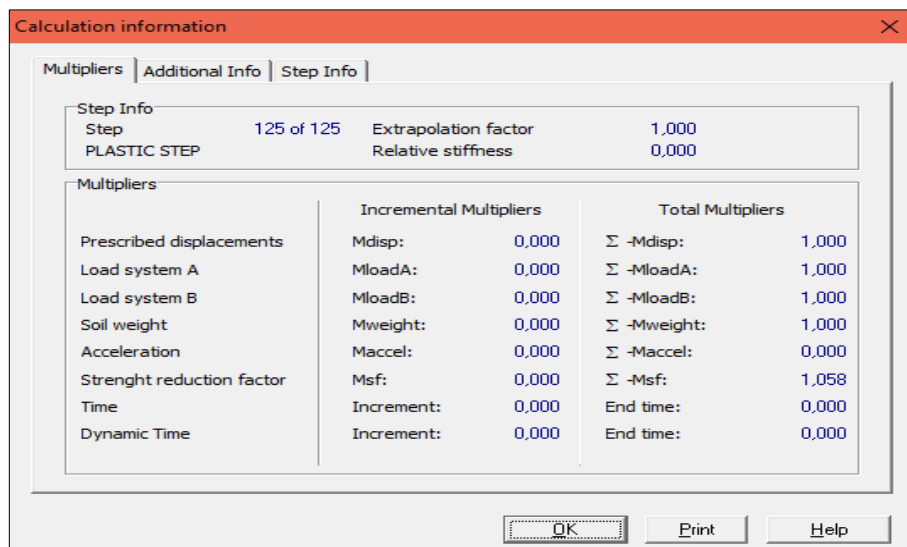


Figure IV.19. Coefficient de sécurité cas H = 2 m.

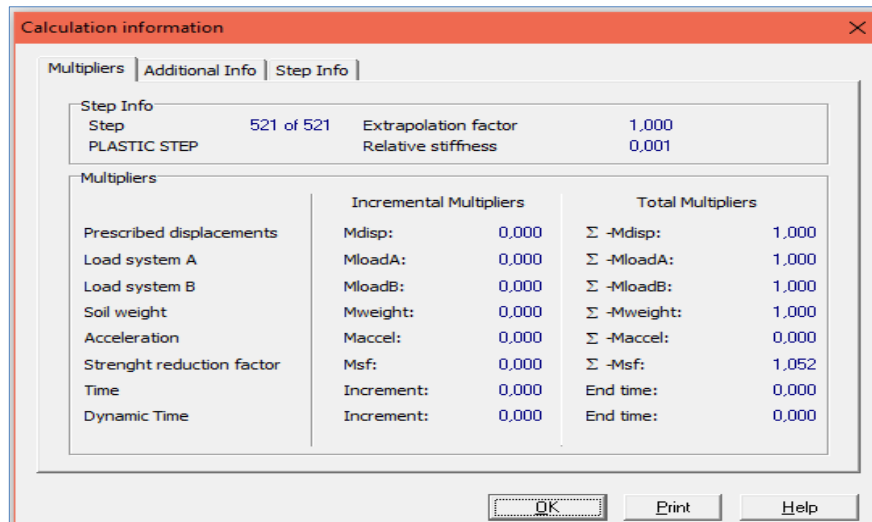


Figure IV.20. Coefficient de sécurité cas H = 4 m.

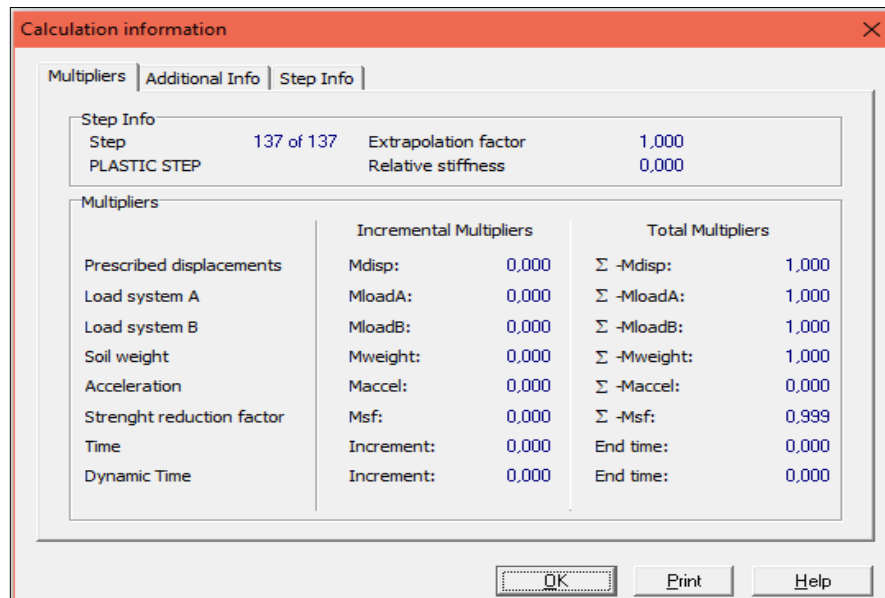


Figure IV.21. Coefficient de sécurité cas H = 6 m.

➤ Sud

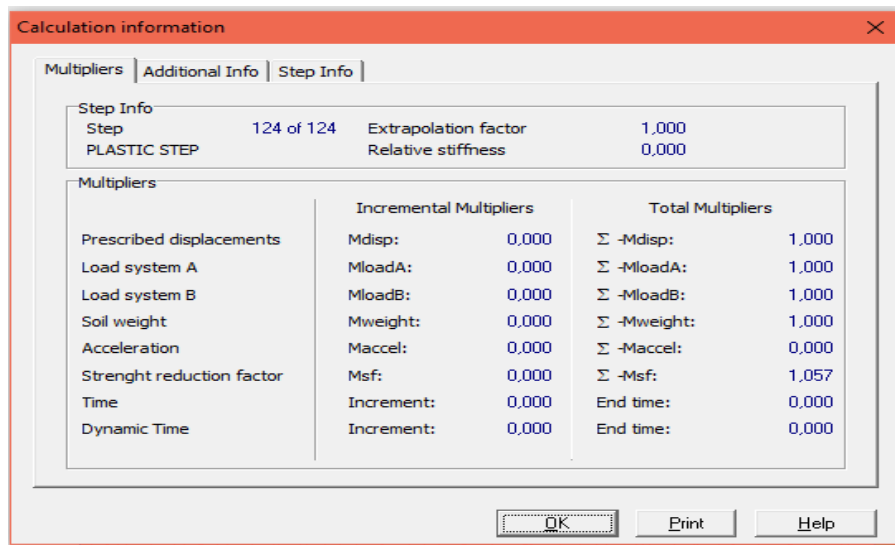


Figure IV.22. Coefficient de sécurité cas H = 2 m.

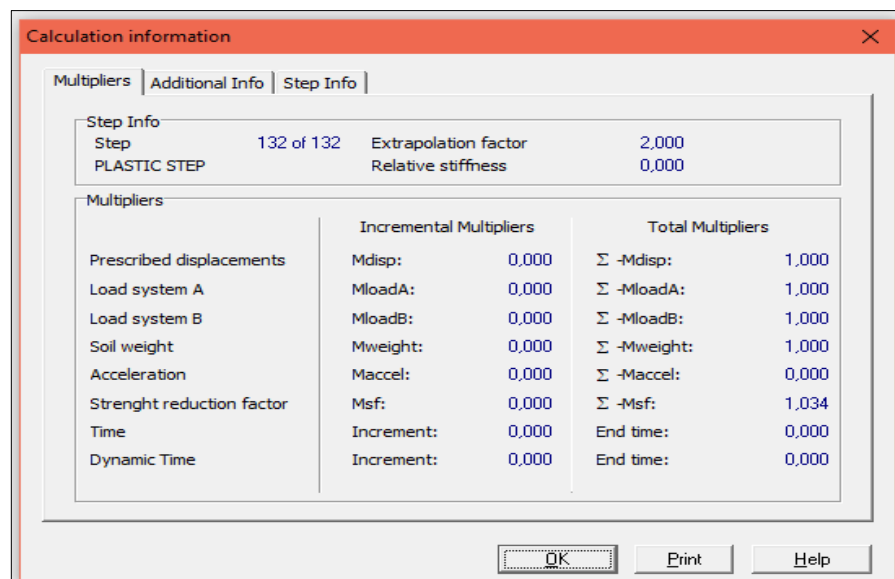


Figure IV.23. Coefficient de sécurité cas H = 4 m.

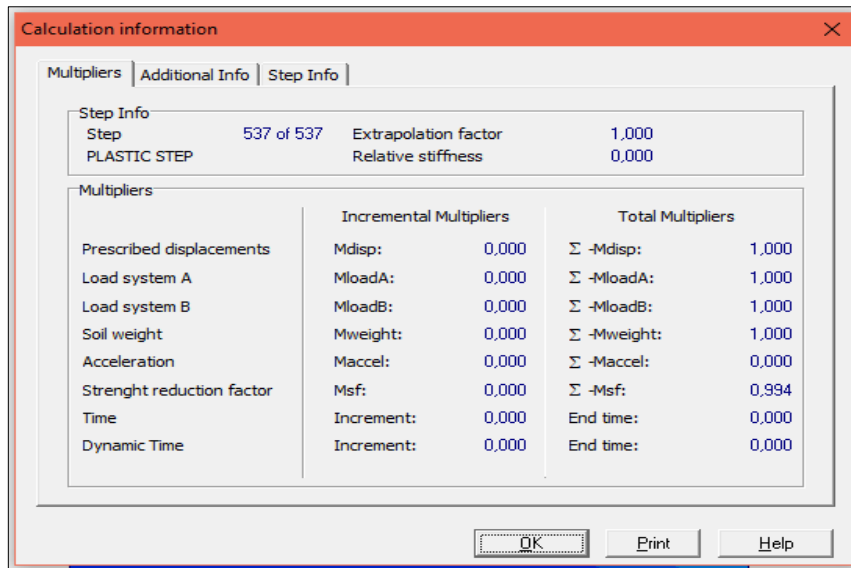


Figure IV.24. Coefficient de sécurité cas H = 6 m.

➤ **Ain Mimoun**

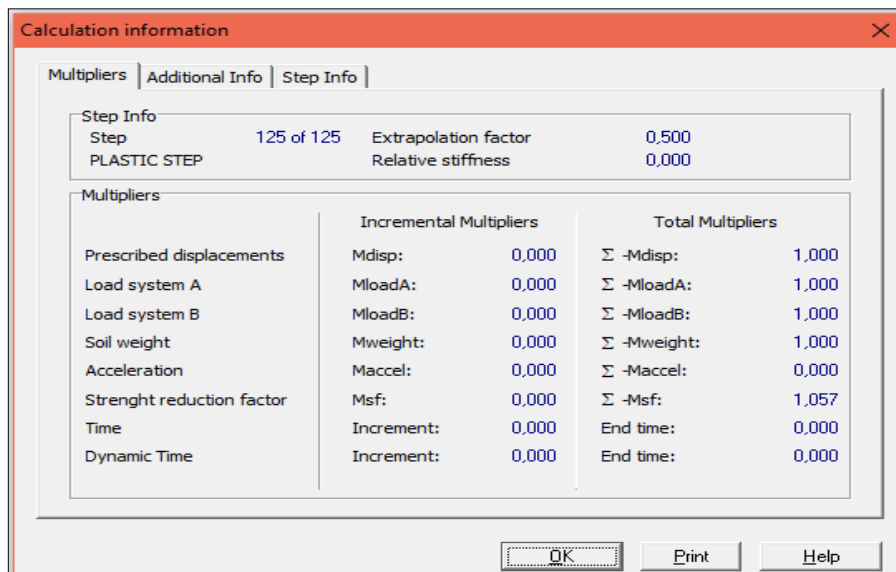


Figure IV.25. Coefficient de sécurité cas H = 2 m.

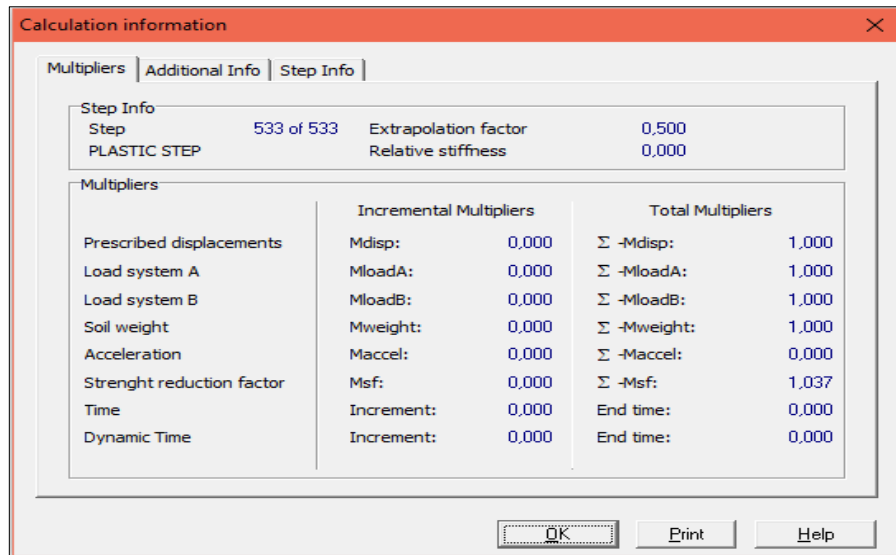


Figure IV.26. Coefficient de sécurité cas H = 4 m.

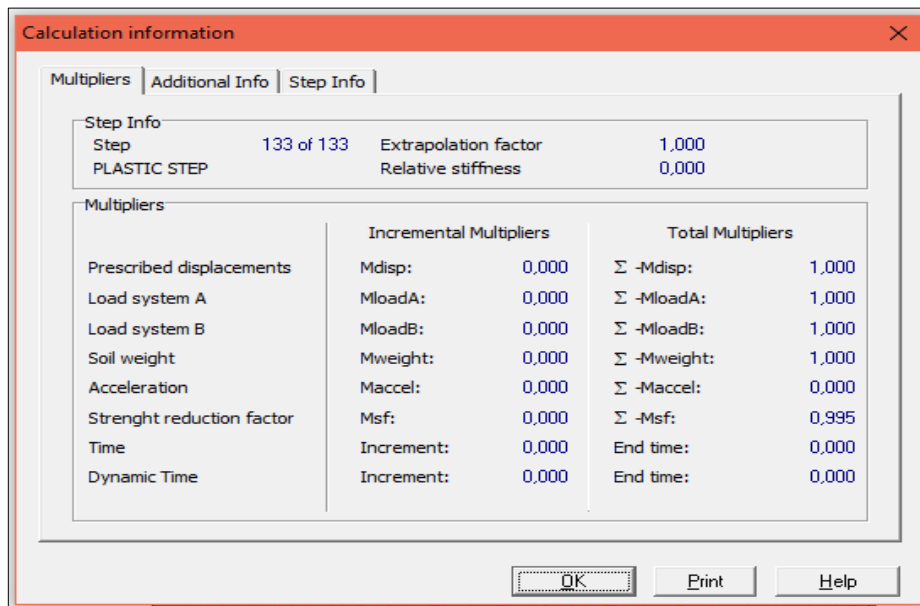


Figure IV.27. Coefficient de sécurité cas H = 6 m.

Tableau IV.2. Valeurs des tassements et les coefficients de sécurité pour les remblais.

Stérile	Hauteur (m)	Valeur de Tassement (m)	Coefficient de sécurité
Sainte barbe	2	$426,66 \times 10^{-3}$	1,058
	4	$564,07 \times 10^{-3}$	1,052
	6	$598,00 \times 10^{-3}$	0,999
Sud	2	$323,97 \times 10^{-3}$	1,057
	4	$436,78 \times 10^{-3}$	1,034
	6	$791,85 \times 10^{-3}$	0,994
Ain Mimoun	2	$323,52 \times 10^{-3}$	1,057
	4	$432,30 \times 10^{-3}$	1,037
	6	$748,98 \times 10^{-3}$	0,995

D'après les résultats représentés dans le tableau IV.2, on constate que les déplacements totaux sont acceptables dans l'ensemble. Le stérile de Saint barbe est celui qui donne les déplacements les plus faibles pour $H = m$.

Les valeurs des coefficients de sécurité (FS) sont proche de 1, ce qui indique un équilibre à la limite (risque potentiel de glissement), malgré que l'angle de talus est inférieur à ϕ des trois stériles. Cela peut être dû aux propriétés du sol support.

IV.5.3. Pour le remblai d'une fouille

IV.5.3.1. La géométrie des modèles

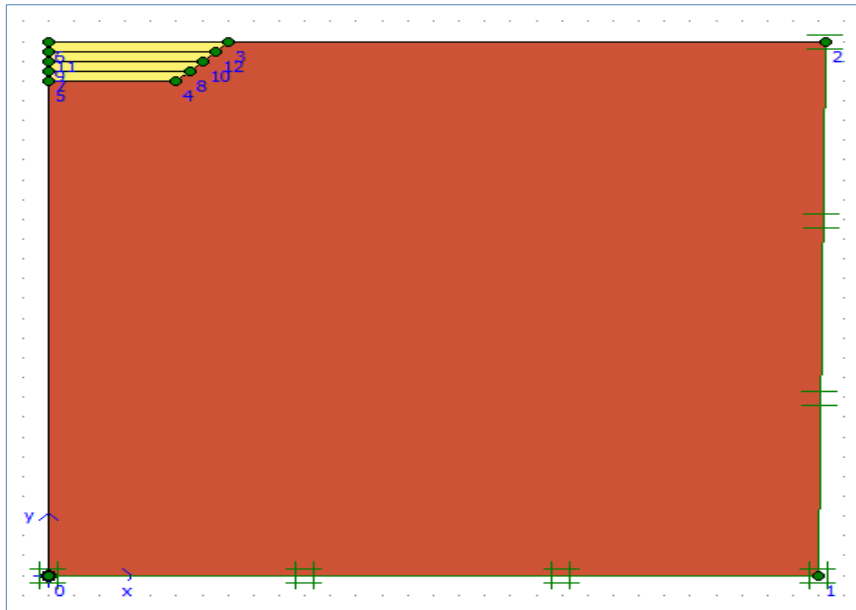


Figure IV.28. Géométrie de modèle pour le cas $H = 2$ m.

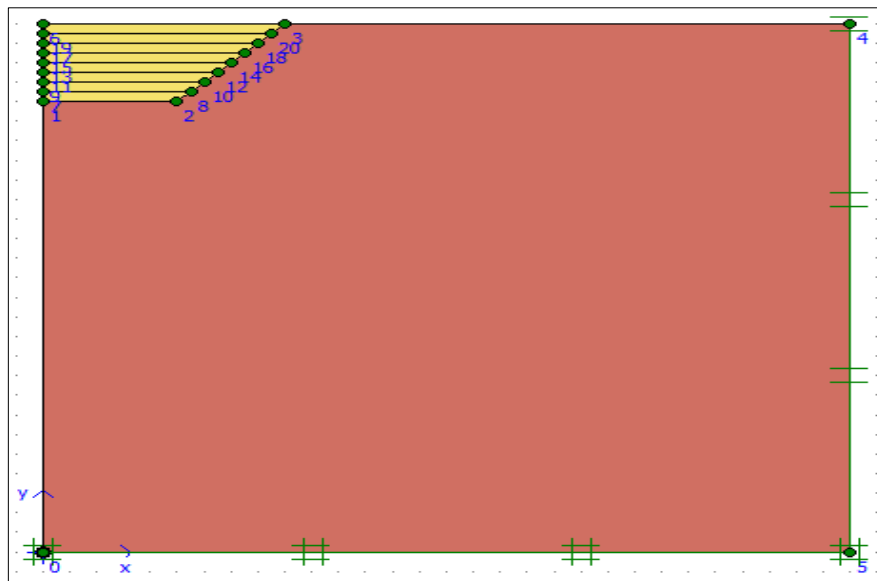


Figure IV.29. Géométrie de modèle pour le cas $H = 4$ m.

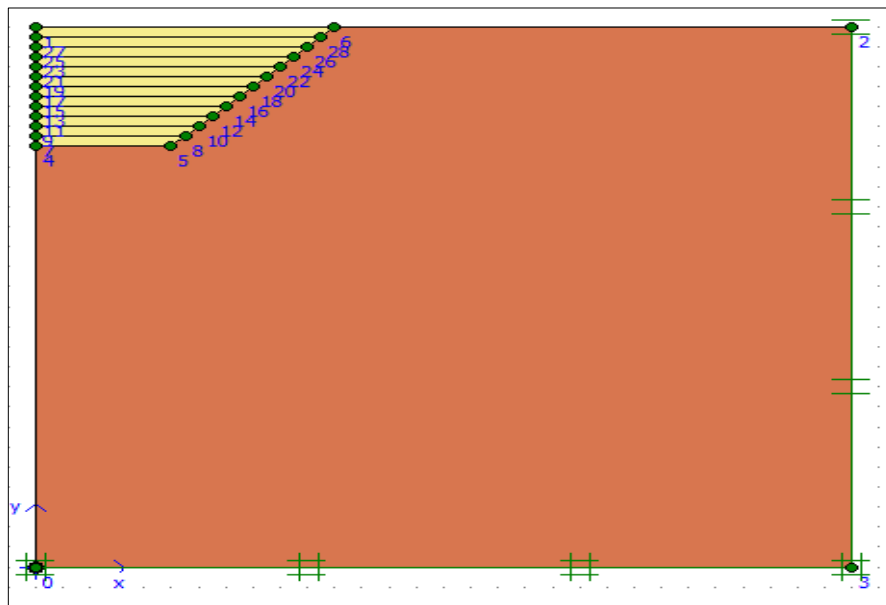


Figure IV.30. Géométrie de modèle pour le cas $H = 6$ m.

IV.5.3.2. Génération du Maillage

Le maillage doit être resserré dans les régions situées directement au tour du déblai où des concentrations de contraintes sont attendues. La finesse du maillage (global coarseness) est réglée sur medium pour tout le sol.

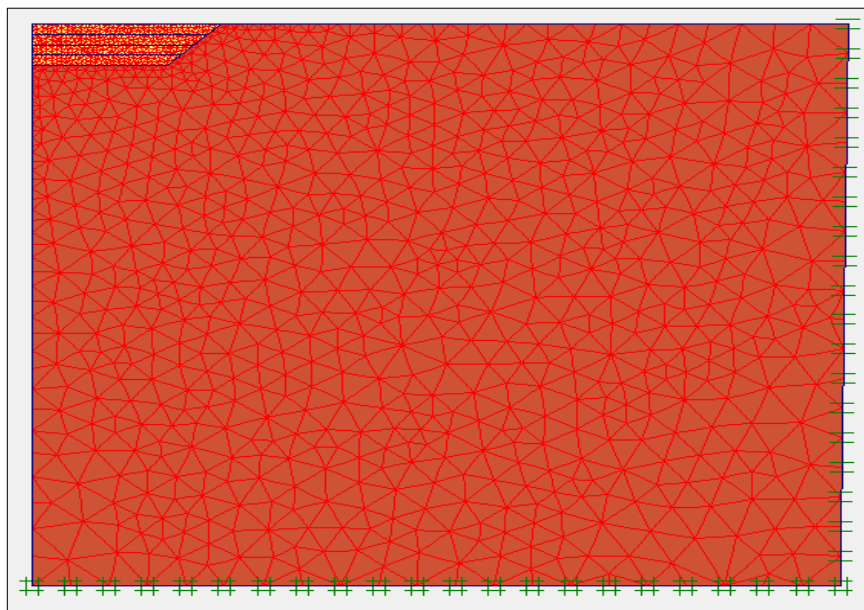


Figure IV.31. Génération du maillage cas $H = 2$ m.

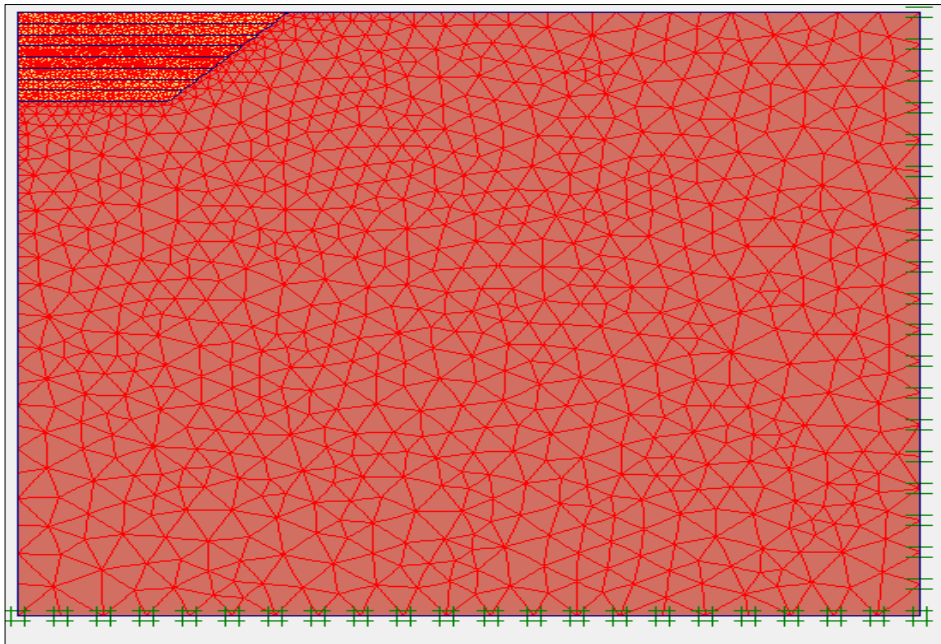


Figure IV.32. Génération du maillage cas $H = 4$ m.

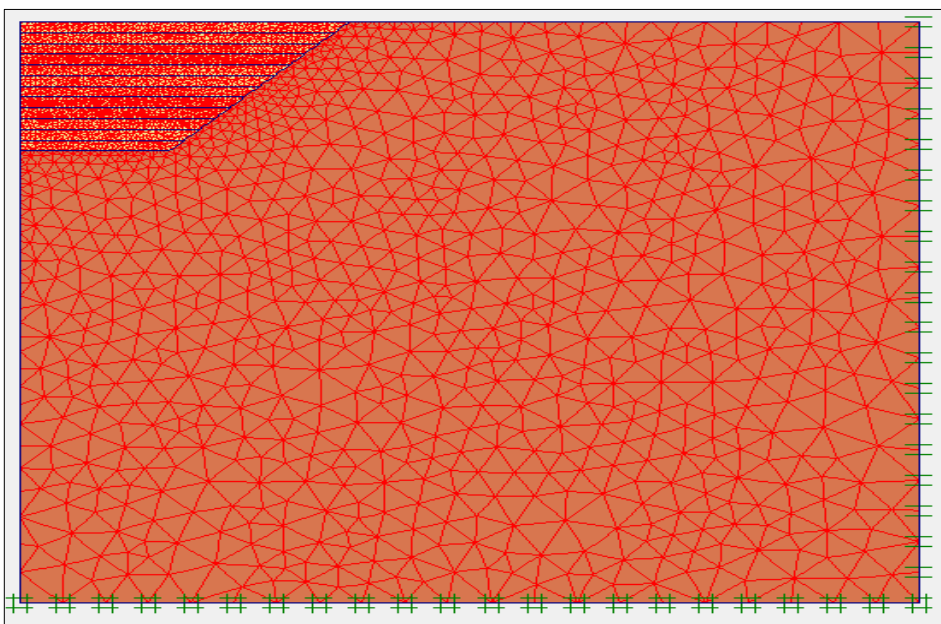


Figure IV.33. Génération du maillage cas $H = 6$ m.

IV.5.3.3. Phase de calcul

Les phases de calcul sont déterminées selon les phases réelles de construction des remblais.

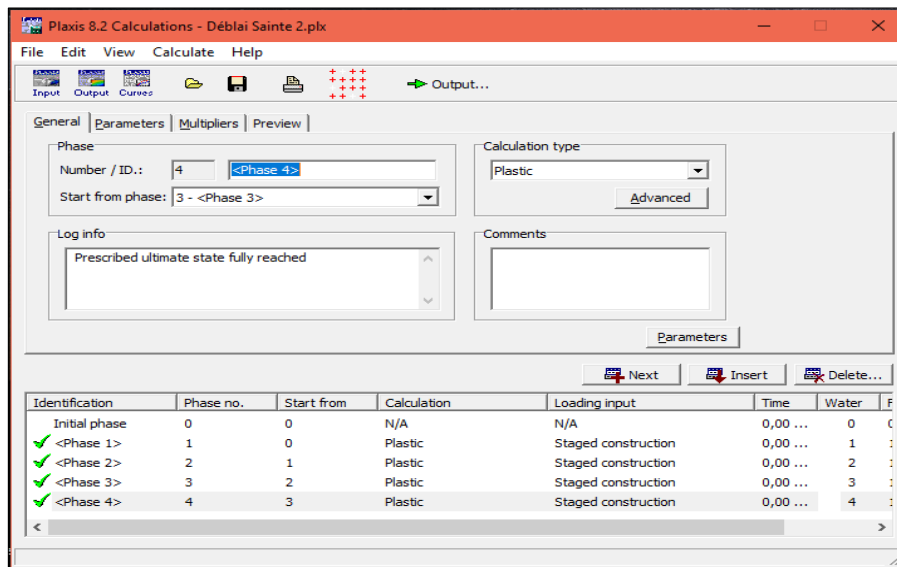


Figure IV.34. Phases de calcul cas H = 2 m.

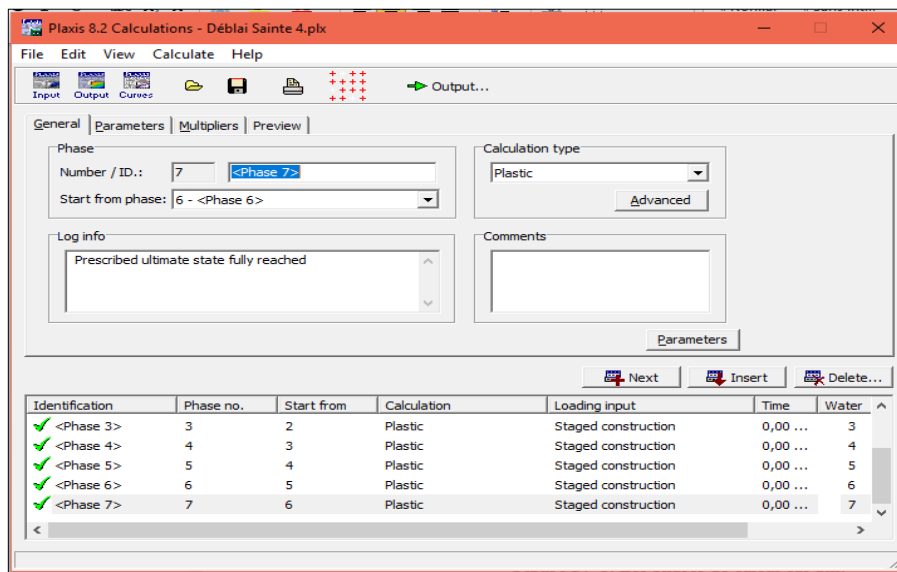


Figure IV.35. Phases de calcul cas H = 4 m.

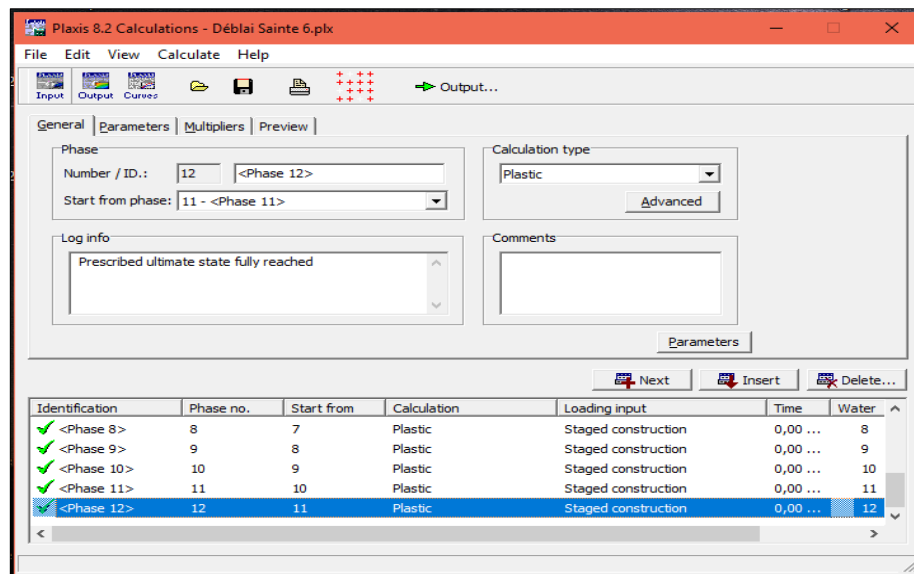


Figure IV.36. Les phases de calcul cas H = 6 m.

IV.5.4. Résultats et discussions

IV.5.4.1. Stérile de Sainte barbe

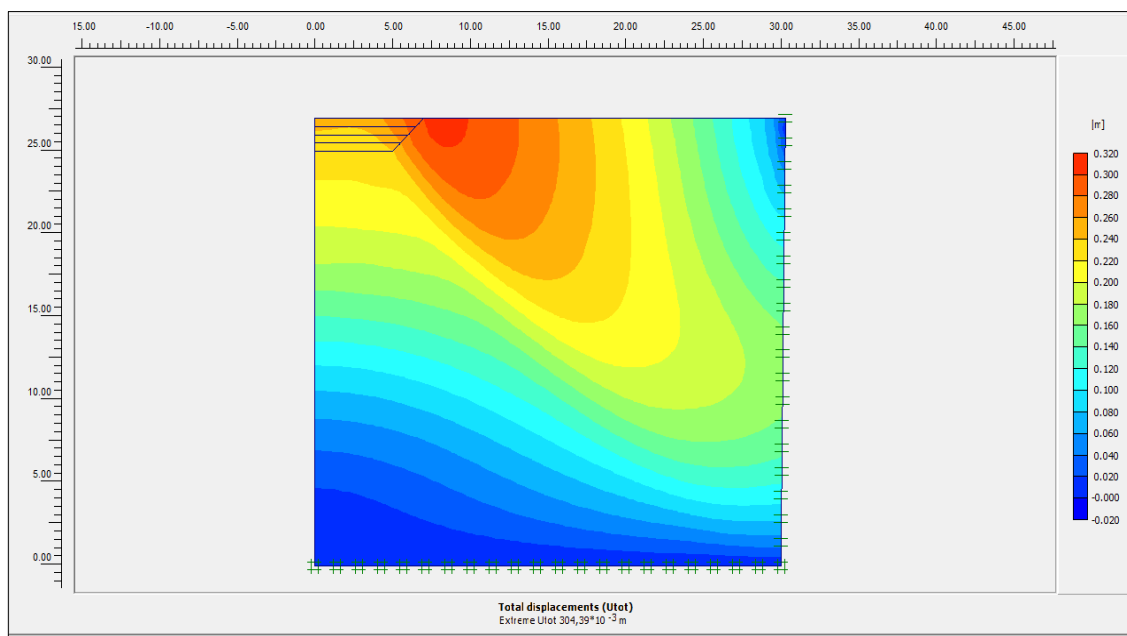


Figure IV.37. Déplacement total Cas H = 2 m.

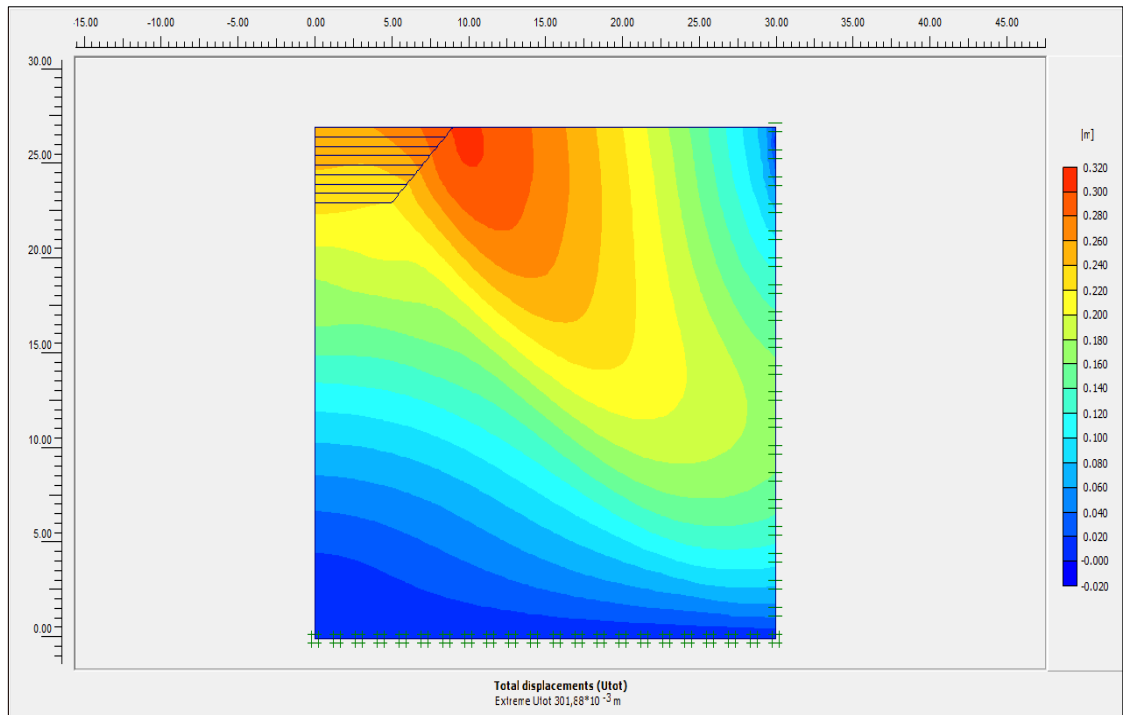


Figure IV.38. Déplacement total Cas H = 4 m.

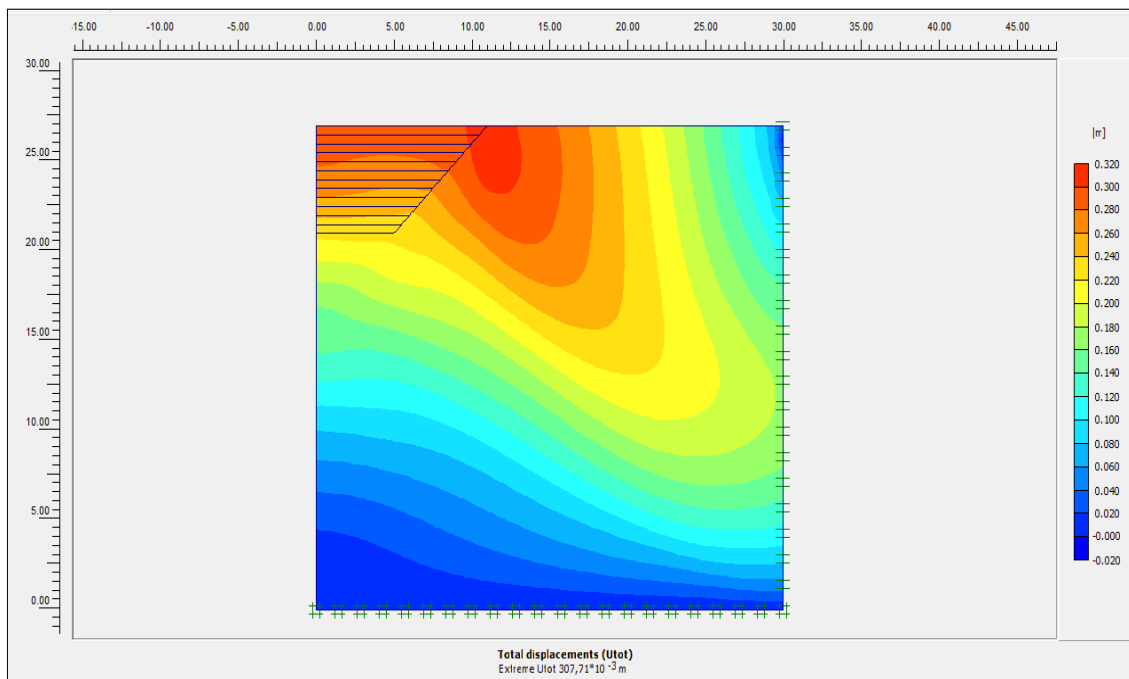


Figure IV.39. Déplacement total Cas H = 6 m.

IV.5.4.2. Stérile du Sud

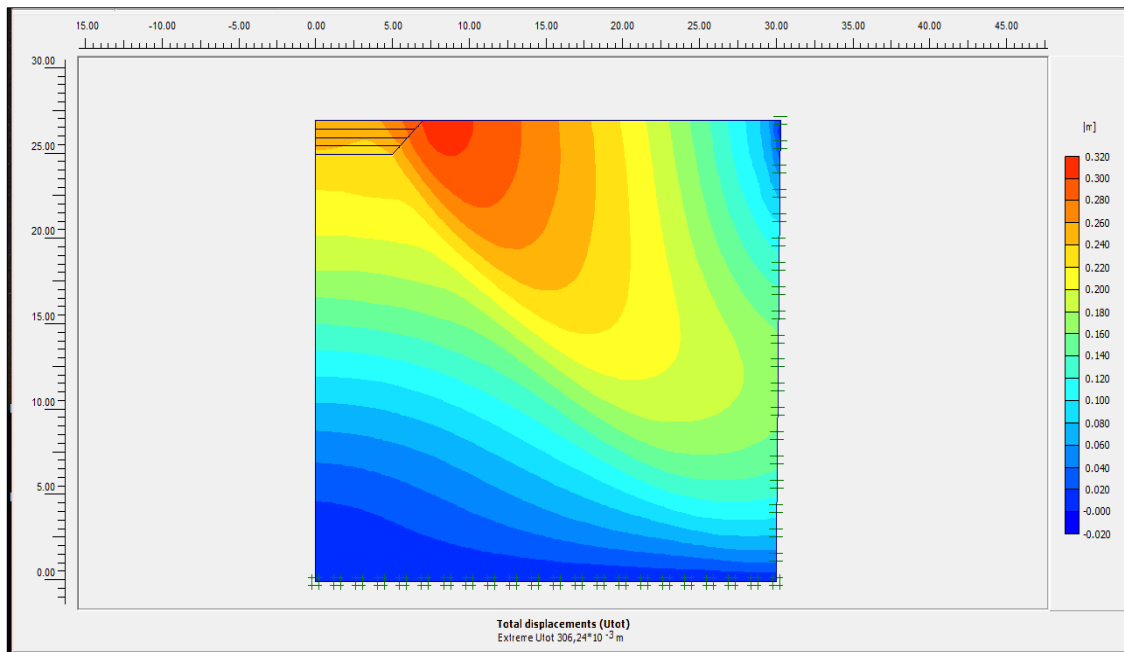


Figure IV.40. Déplacement total Cas H = 2 m.

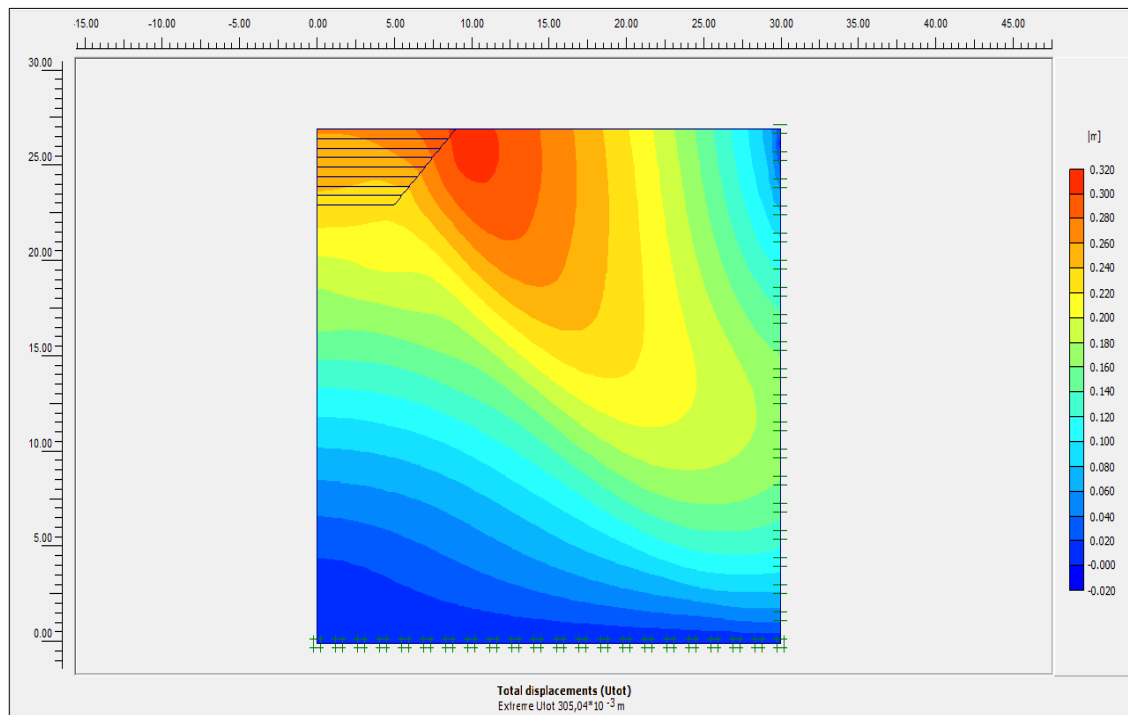


Figure IV.41. Déplacement total Cas H = 4 m.

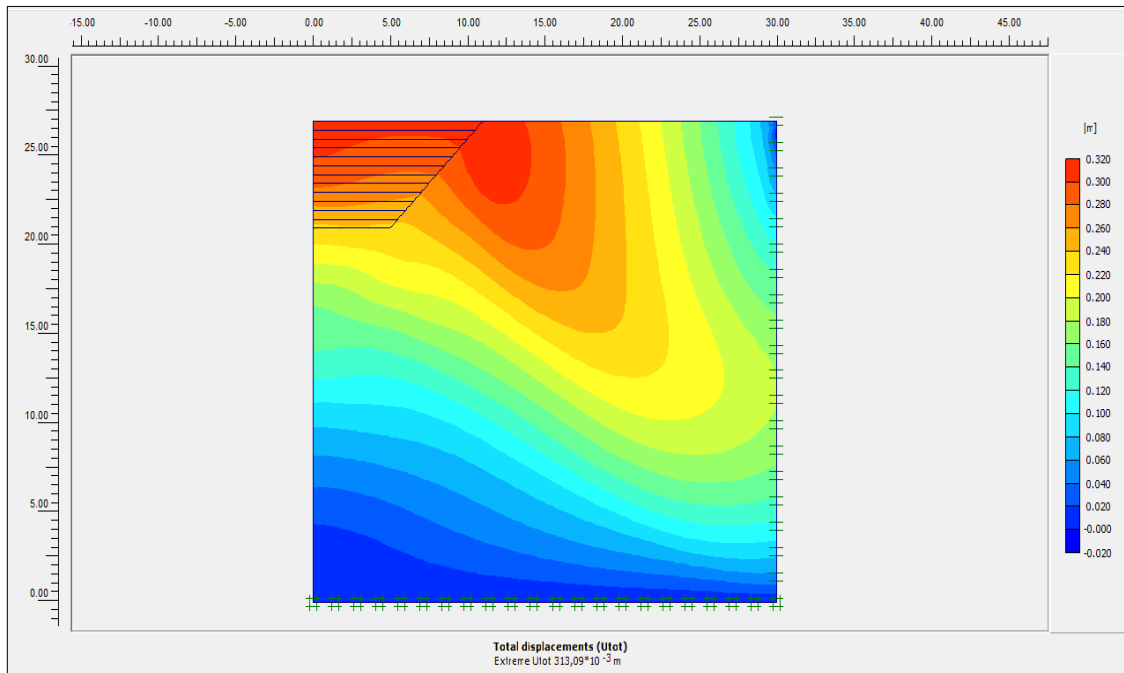


Figure IV-42: Déplacement total Cas H = 6 m.

IV.5.4.3. Stérile d'Ain Mimoun

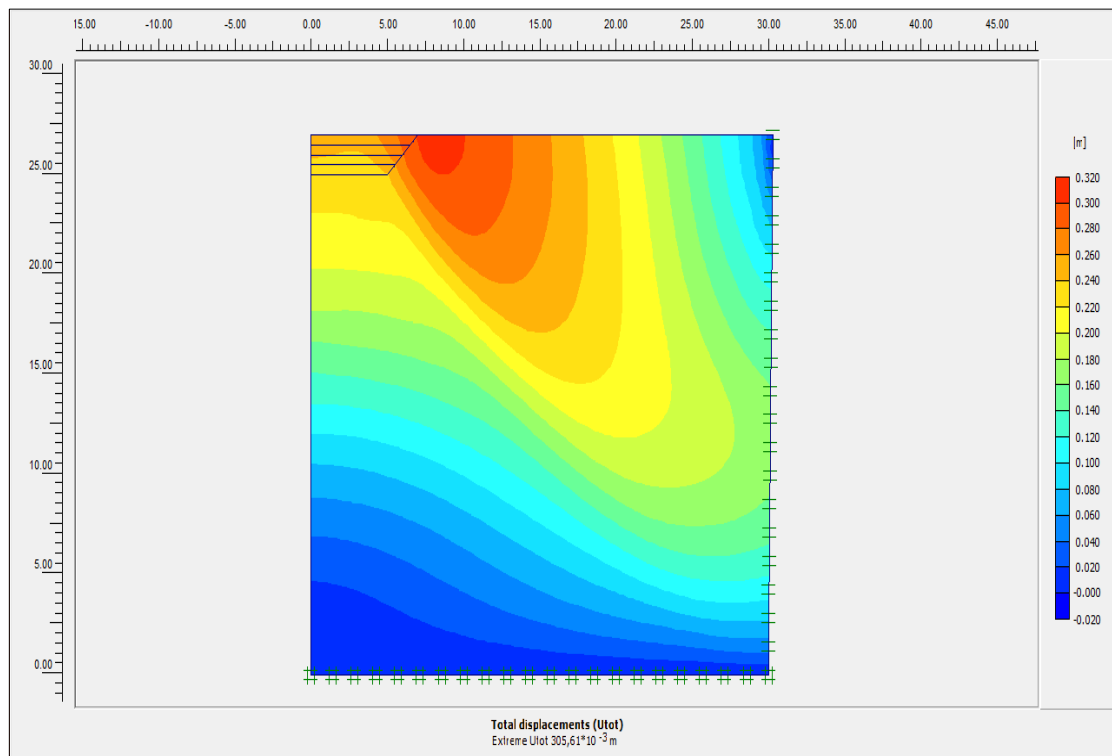


Figure IV.43. Déplacement total Cas H = 2 m.

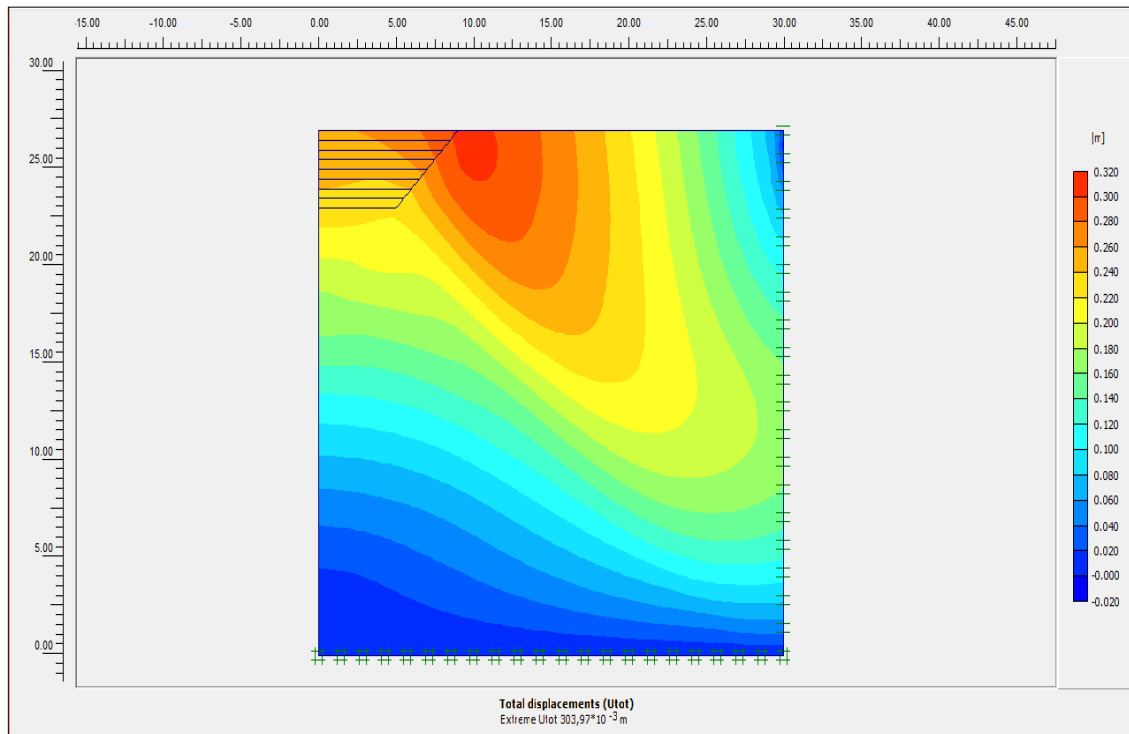


Figure IV.44. Déplacement total Cas H = 4 m.

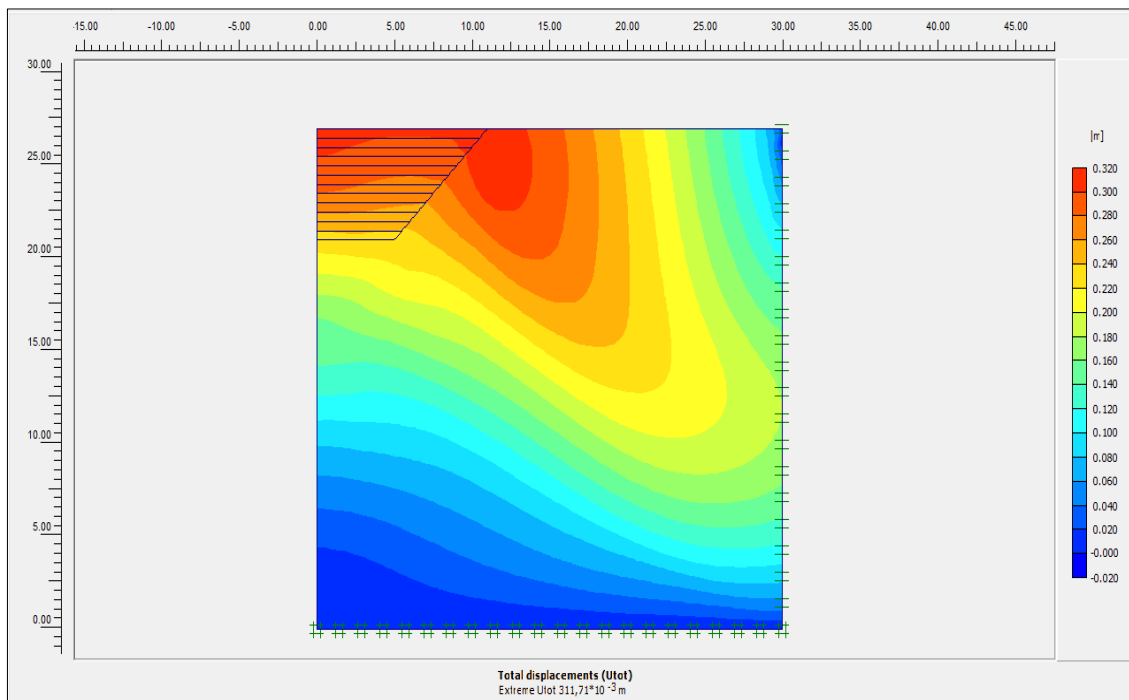


Figure IV.45. Déplacement total Cas H = 6 m.

Tableau IV.3. Valeurs des tassements pour les remblais des fouilles.

Hauteur (m) Quartier	2	4	6
Sainte barbe	$304,39 \times 10^{-3}$	$301,88 \times 10^{-3}$	$307,71 \times 10^{-3}$
Sud	$306,24 \times 10^{-3}$	$305,04 \times 10^{-3}$	$313,09 \times 10^{-3}$
Ain Mimoun	$305,61 \times 10^{-3}$	$303,97 \times 10^{-3}$	$311,71 \times 10^{-3}$

D'après le tableau IV.3, c'est le stérile de sainte barbe qui donne les déplacements les plus faibles.

IV.6. Conclusion

Cette étude numérique a permis de comprendre le comportement géomécanique des remblais construits avec différents stériles miniers. Les résultats obtenus fournissent des informations utiles pour la conception et la construction de remblais dans des conditions similaires.

Ce sont les remblais construits en utilisant le stérile de Sainte barbe qui a montré les déplacements les plus faibles.

Conclusion générale et perspectives

Dans ce travail, on a traité la possibilité de l'utilisation des stériles miniers comme matériaux de remblais. Les stériles choisis dans cette études sont ceux de la mine de l'Ouenza et ceux de la mine de Ain Mimoun. L'étude a été menée sur deux parties, une partie expérimentale afin de caractériser les stériles choisis, et une modélisation numérique pour comprendre le comportement géomécanique de ces matériaux.

La modélisation a été réalisée à l'aide du logiciel Plaxis 2D V.8.6 où le sol et les stériles ont été mobilisés avec la loi de comportement de Mohr-Coulomb en variant un certain la hauteur des remblais pour chaque stérile.

Les résultats obtenus ont montré des déplacements totaux acceptables dans l'ensemble pour tous les stériles étudiés. Le stérile de Sainte barbe a donné les déplacements les plus faibles pour une hauteur de remblai donnée. Les coefficients de sécurité (FS) étaient proches de 1, indiquant un équilibre à la limite, malgré des angles de talus inférieurs à ceux des stériles. Cela peut être attribué aux propriétés du sol support.

Pour les remblais des fouilles, le stérile de Sainte barbe a également montré les déplacements les plus faibles. Les résultats obtenus ont démontré l'importance de prendre en compte la géométrie des modèles et de générer un maillage adéquat pour obtenir des résultats précis.

Comme perspectives futures :

- Une étude des propriétés mécaniques des stériles peut être menée pour compléter la caractérisation géotechnique des stériles étudiés.
- La modélisation numérique on utilisant d'autres sols supports peut aider à mieux déterminer la cause de l'instabilité des remblais construits en utilisant les stériles choisis dans cette étude.

Références bibliographiques

- [1] Etude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM « Elément à prendre en compte pour l'évaluation des impacts environnementaux dans l'élaboration d'un plan de prévention des risques miniers », 2003.
- [2] L. Sibille, Géotechnique pour le technicien IUT Génie Civil et Construction Durable Module MXG5, ffccl-01784592f, France, 2018.
- [3] M. Debouz, Cours : Techniques d'exploitation 2 (M1 Géotechnique), 2022.
- [4] B. Lottermoser, Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts, Springer, 2010.
- [5] Gestion des résidus et stériles des activités minières, Commission européenne, 2009.
- [6] S. Beucler, fosse n° 11 - 19 de la Compagnie des mines de Lens, Loos-en-Gohelle, Pas-de-Calais, Nord-Pas-de-Calais, France, 2006.
- [7] A. Dimech, Mémoire de master en génie minéral, Université de Montréal, 2018.
- [6] = [8] M. Aubertin, R. Simon, La gestion des rejets miniers dans un contexte de développement durable et de protection de l'environnement, Congrès annuel de la Société canadienne de génie civil, Montréal, Québec, Canada, Juin 5-8, 2002
- [9] Z. Akermi, Contrôle de la stabilité des couches de remblai et application des systèmes de confortement : Cas : Ligne ferroviaire (Ouargla /Hassi Massoud), Mémoire de Master Académique, département des mines et de la géotechnologie, Université de Tebessa, 2022.
- [10] A. Djellali, Terrassement : Cours et exercices, photocopié de cours, Institut des mines Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa, 2021.
- [11] D. Baala, caractérisation et valorisation des stériles Francs de la mine de l'Ouenza, Thèse de Doctorat, Département des Mines, Université d'Annaba, 2019.
- [12] Rapport géologique, Société des mines de fer de l'est mine d'l'Ouenza, 2022.
- [13] M. Lazizi, La mine de l'Ouenza histoire et avenir. Service géologie, mine de L'Ouenza, 2011/2012.

- [14] B. Ayadi, Caractérisation et choix d'un schéma de traitement du minerai cuivre-fer de Douamis (Ouenza). Mémoire de magistère, Université d'Annaba ,2010.
- [15] Mines de l'Ouenza et de Boukhadra, « Document Arcelor Mittal », 2007.
- [16] S. Khellal, C. Messara , Caractérisations et valorisation du rejet de marne issu d'exploitation de fer d'El-Ouenza, Mémoire de Master, Département des Mines et Géologie, Université de Béjaia, 2014.
- [17] F. Baladah, revalorisation des rejets barytiques issues des jigs et impact environnemental: cas de la mine d'Ain Mimoun/Khenchla, Mémoire de Magistère Département des Mines, Université d'Annaba, 2012.
- [18] Plans d'exploitation de la mine d'Ain-Mimoun ; document interne, 2017.
- [19] Y. Khaldoun, I. Chandad, Etude de l'exploitation souterraine du gisement de la baryte d'Ain Mimoun –Khanchela, Mémoire de Master ,Institut des mines, Université de Tébessa, 2018.
- [20] T. Kheffache, Mémoire de Fin d'Etudes « Etude Géotechnique D'un Tronçon De La Pénétrante Autoroutière Reliant Le Port De Bejaia à l'AutoRoute Est-Ouest Au Niveau d'Ahnif De PK35+000 Au PK36+800», Université A. Mira-Bejaia ,2017.