

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعلیم العالی والبحث العلمی

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : **Travaux publics**

Spécialité : **Voies & Ouvrages d'Art**

Par : **MAHAMMEDI MOHAMED RIAD**

&

AISSAOUI RANIA

Sujet

Simulation Multi-physique d'une Chaussée Souple

Soutenu, le 05 juin 2024, devant le jury composé de :

Mr. BENYELLES Zoheir	MC B	Université de Tlemcen	Président
Mlle. KHELIFI Zakia	MC A	Université de Tlemcen	Examinatrice
Mr. TROUZINE Habib	Prof.	Université de Tlemcen	Encadrant
Mr. ZADJAOUI Abdeldjalil	Prof.	Université de Tlemcen	Co-Encadrant

Remerciements

Nous débutons en exprimant notre gratitude envers Dieu, le tout-puissant et miséricordieux, pour nous avoir accordé la force et la patience indispensables pour accomplir cette humble tâche. De plus, nous souhaitons adresser nos sincères remerciements à toutes les personnes qui nous ont soutenus et ont participé à l'élaboration de ce travail de fin d'études.

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance particulière envers notre encadrant **Professeur TROUZINE Habib** et deuxième encadrant **Professeur ZADJAOUI Abdeldjalil**, qui nous ont apporté leur soutien et leur orientation tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

On est aussi très reconnaissant envers **Docteur BENYELLES Zoheir** et **Docteur KHELIFI Zakia** qui ont accepté de faire partie du jury pour l'expertise et l'évaluation de ce modeste travail.

On tient à remercier,

Mr. KACEMI Ahmed, directeur à la DTP Tlemcen. **Mme. RAZAFIMAHATRATRA norotiana**, experte en chaussée, EGIS groupe France **Mr. BOUGHAZI Moussa**, ingénieur à la DTP Tlemcen. **Mlle. YALAOUI Nadia**, doctorante au LGCE à l'Université de Sidi Bel Abbés.

Nous souhaitons exprimer notre profonde reconnaissance envers l'équipe d'ingénierie de la LTPO-Tlemcen en particulier **Mr. AZZOUZ Mohamed**, **Mr. HADJADJI Amri**, et **Mr. BENABDALLAH Hamid**.

Ce mémoire n'aurait jamais pu être réalisé sans le soutien actif de notre famille, en particulier de nos parents qui nous ont toujours encouragés tant sur le plan moral que matériel. Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude envers eux.

Enfin, Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à tous les collègues de notre promotion ainsi qu'à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Je dédie ce projet

A Mes chers PARENTS,

Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir pour que je puisse atteindre mes objectifs

A mon binôme,

Pour son accord et sa bienveillance.

A Mon FRERE,

A Mes chères sœurs,

À cause de leur soutien moral et de leurs précieux conseils tout au long de mes années d'études.

à ma fidèle et très chère amie.

Lalia, pour son précieux soutien durant les moments difficiles.

Résumé

Simulation multi-physique d'une chaussée souple

Avec l'importance croissante de la construction des routes en Algérie, il est important de garantir la sécurité et la stabilité des infrastructures routières sous l'effet des sollicitations mécaniques et hydriques (simulation multiphysique). Ce projet de fin d'études vise à étudier le comportement hydromécanique d'une chaussée souple à l'aide du logiciel Comsol multiphysique, vu sa robustesse dans la prise en charge des phénomènes physiques de l'ingénierie. Il s'agit d'un cas réel d'une chaussée souple à Terny, dans la wilaya de Tlemcen dans le cadre du projet de modernisation de la RN22. Un modèle numérique de la chaussée a été créé, puis implanté avec deux scénarios de chargements. Un chargement mécanique induit par la charge du talus et aux chargements de circulation poids lourd de type Bt en tenant compte de la présence d'eau avec un écoulement ce qui induit un problème de couplage. Les résultats avec une interprétation pratique des différents tests et simulations montrent l'importance de cette étude.

Mots clés : Chaussée souple, Modélisation 2D, Chargement, Comsol, Couplage, Hydromécanique

ABSTRACT

Multiphysics simulation of a flexible roadway

With the growing importance of road construction in Algeria, it is essential to guarantee the stability of road infrastructure face to different applied loads, particularly the effect of water flow. This end-of-study project aims to study the hydromechanical behavior of a roadway using the Comsol multiphysics software, which allows digital modeling of the phenomena. The simulated case is a flexible roadway in Terny, in the wilaya of Tlemcen as part of the RN22 modernization project. A numerical model of the roadway was created, then implemented with two loading scenarios. A mechanical loading due to the load of the slope and heavy weight loadings type Bt coupled with the flow of water. The simulation results are presented and interpreted.

Key words: Flexible pavement, 2D modeling, Loading, Comsol, Coupling, Hydromechanics.

المخلص

محاكاة متعددة الفيزياء لطريق مرن

مع تزايد أهمية بناء الطرق في الجزائر، أصبح من الضروري ضمان استقرار البنية التحتية للطرق في مواجهة الأحمال المختلفة، وخاصة تأثير تدفق المياه. يهدف مشروع نهاية الدراسة هذا إلى دراسة السلوك الهيدروميكانيكي للطريق باستخدام برنامج Comsol multiphysique، والذي يسمح بالنمذجة الرقمية للطواهر. الحالة المحاكاة عبارة عن طريق مرن في تيرني بولاية تلمسان كجزء من مشروع تحديث الطريق الوطني 22 (RN22) تم إنشاء نموذج رقمي للطريق، ومن ثم تنفيذه بسيناريو هون للتحميل. تحميل ميكانيكي بسبب حمل المنحدر وأحمال الوزن الثقيل من نوع Bt مقرونة بتدفق الماء. يتم عرض نتائج المحاكاة وتفسيرها.

الكلمات المفتاحية: الرصف المرن، النمذجة ثنائية الأبعاد، الحمل، كومسول، الاقتران، الميكانيك المائية

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	
Dédicaces	
المخلص	
Résumé	
Abstract	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Notations et symboles	
Introduction générale	1
I. Chapitre 1 : Synthèse bibliographique sur les chaussées	2
I.1 Introduction	3
I.2 Généralités sur les chaussées	3
I.3 Les différents types des structures de chaussée	4
I.4 Caractéristiques et fonctionnement d'une chaussée souple	5
I.4.1 Chaussée stratifiée conventionnelle	6
I.4.2 Chaussée en asphalte pleine profondeur	6
I.4.3 Chaussée en tapis d'asphalte rocheux contenu (CRAM)	6
I.5 Les principales méthodes de dimensionnement	7
I.5.1 Méthode empirique: (American Association of State Highway and transportation Officials)	7
I.5.2 Approche-mécanique empirique	7
I.5.3 Modèle numérique	9
I.6 Comportement et modélisation d'une chaussée souple	9
I.7 CONCLUSION	10
II. Chapitre 2 : Synthèse bibliographique sur les méthodes de couplage numérique (hydromécanique)	11
II.1 Introduction	12
II.2 Loi d'endommagement	12
II.2.1 Fissuration	13
II.2.2 Dégradation	13
II.2.3 Comportement des interfaces	14
II.3 Solution adoptée pour loi d'endommagement	14
II.3.1 L'endommagement 'multiplics'	14
II.4 Ecoulement d'eau	15
II.4.1 Perméabilité	15

II.4.2	Ecoulement en régime permanent :.....	15
II.4.3	Ecoulement en régime transitoire :.....	16
II.5	Problème couplage hydromécanique :	16
II.5.1	Problème du couplage (HM) à long terme :.....	16
II.5.2	Problème du couplage (HM) à court terme :	17
II.5.3	Problème couplé en régime transitoire :.....	17
II.6	Construction du model numérique et le phasage :	17
II.7	Conclusion :.....	18
III.	Chapitre 3 : Présentation du cas d'étude	19
III.1	Introduction :	20
III.2	Les données du projet :.....	21
III.3	Activité Sismique :	22
III.4	La géométrie du projet :.....	23
III.4.1	Tracé en plan :	23
III.4.2	Profil en long :.....	23
III.4.3	profil en travers :	24
III.5	Etudes Géotechnique du projet et présentation Topographique :.....	24
III.5.1	Travaux d'investigation in-situ :.....	24
III.5.2	Description et caractéristique géotechnique du sol :.....	26
III.5.3	Formations constitutives du sol :.....	27
III.5.4	Analyse chimique du sol :	26
III.5.5	Condition de la nappe d'eau :.....	26
III.5.6	Cubature des terrassements et mouvements des terrassements :.....	26
III.6	Donnée des caractéristiques de la chaussée :	27
III.7	Conclusion :.....	30
IV.	Chapitre 4 : Modélisation Multi-physique	31
IV.1	Introduction :	32
IV.2	Position du problème :.....	32
IV.3	Logiciel Utilisé :.....	33
IV.4	Etude hydromécanique :	33
IV.5	Construction du modèle numérique sous Comsol	35
IV.5.1	Espace de la modélisation :	35

IV.5.2	Choix des physiques :	37
IV.6	Illustration de la structure et de l'application des matériaux sur le Comsol :	38
IV.6.1	Géométrie :	38
IV.6.2	Attribution des matériaux :	39
IV.7	Application de la loi de Darcy :	41
IV.7.1	Configuration de la physique :	41
IV.7.2	Valeurs initiales :	42
IV.7.3	Chargements :	43
IV.7.4	Configuration de la physique :	43
IV.7.5	Valeurs initiales :	44
IV.7.6	Chargements :	44
IV.8	Maillage :	45
IV.8.1	Configuration de l'analyse hydraulique (utilisation de la loi de Darcy) :	46
IV.9	Modélisation de la seconde étape (hydromécanique en élasticité) :	47
IV.9.1	Configuration des lois physiques :	47
IV.9.2	Les chargements :	48
IV.9.3	Chargement en pression sur frontières :	48
IV.9.4	Conditions aux limites :	49
IV.10	Conclusion :	49
V.	Chapitre 5 : Dépouillement et interprétation des résultats	50
V.1	Introduction :	51
V.2	Etude 01 (hydraulique) :	51
V.3	Etude 02 (Mécanique) :	52
V.3.1	5.3.1 Les chargements appliqués (solide) :	52
V.3.2	Les déformations :	53
V.3.3	Les déplacements :	53
V.4	Etude 03 (Hydromécanique) :	54
V.4.1	Les déformations :	54
V.4.2	Les pressions :	55
V.5	Comparaison de couplage HM :	55
V.5.1	Discussion des résultats :	55
V.6	Coefficients de sécurité :	56
V.7	Conclusion :	56

VI. Conclusion générale et perspectives.....	57
Références bibliographiques.....	59

Liste des figures

Figure I-1. Terminologie des différentes couches d'une chaussée. (Bassem, 2006)	3
Figure I-2. La structure d'une chaussée souple. (BROSSEAUD)	5
Figure I-3. Fonctionnement d'une chaussée souple (Bassem, 2006)	5
Figure I-4. Répartition des contraintes dans une chaussée souple.....	6
Figure I-5. Représente le Démarche du catalogue (Bassem, 2006).....	7
Figure I-6. Les deux critiques d'un système multicouche d'une chaussée (Bassem, 2006).....	8
Figure I-7 . Diffusion de la contrainte [Burmister] (Bassem, 2006)	8
Figure I-8. L'effet d'une charge sur la chaussée bitumineuse (LCMB, 30 Septembre 2016).....	9
Figure I-9. L'effet de déformation d'une chaussée (LCMB, 30 Septembre 2016)	10
Figure II-1. Cas d'une fissure (Mars 2024 prise par la DTP Tlemcen).	13
Figure II-2. Cas de dégradation d'une chaussée bitumineuses (comité français de mécanique des sols et de géotechnique, juin2023).....	14
Figure II-3. Sollicitation dans la chaussée :charge de référence (essieux) (comité français de mécanique des sols et de géotechnique, juin2023).....	14
Figure III-1.Vue aérienne de région d'étude et localisation du site (extrait de google earth).....	22
Figure III-2.Carte de zonage sismique du territoire national (GROUP, 06Aout2015)	22
Figure III-3.Profil en travers du point étudiée (Février 2024 la DTP Tlemcen).....	24
Figure IV-1. Barres de menu de l'espace de modélisation.....	35
Figure IV-2. Profil en travers du cas étudié.....	36
Figure IV-3. La liste des physiques.....	37
Figure IV-4. Les réglages des polygones.....	38
Figure IV-5. Fenêtre afficher la géométrie des différentes couches.....	38
Figure IV-6. Le modèle final appliqué.....	39
Figure IV-7. La fenêtre des matériaux.....	39
Figure IV-8. Affectation des matériaux sur les domaines.....	40
Figure IV-9. Fenêtre de Tableau des paramètres des matériaux.....	40
Figure IV-10. Réglage de loi de Darcy.....	41
Figure IV-11. Les réglages des valeurs initiales	42
Figure IV-12. Affichage du chargement sur frontières	43
Figure IV-13. Les domaines de la physique.....	43
Figure IV-14. Les parties libres de la chaussée qui ne sont pas obstruées.....	44
Figure IV-15. La valeur des mouvements et des vitesses nulles	44
Figure IV-16. La charge du talus et le chargement du convoi système tandem Bt.....	45
Figure IV-17. Réglages du maillage.....	45
Figure IV-18. Affichage du maillage	46
Figure IV-19. La Barre d'outils d'étude sur Comsol	46
Figure IV-20. Les réglages de l'étude stationnaire	47

<i>Figure IV-21. Les réglages des matériaux élastiques.....</i>	<i>47</i>
<i>Figure IV-22. Barre des réglages des matériaux élastiques (mécanique).....</i>	<i>48</i>
<i>Figure IV-23. Les chargements sur frontières (mécanique).....</i>	<i>48</i>
<i>Figure IV-24. Fenêtre de l'encastrement, Appui sur la chaussée.....</i>	<i>49</i>
<i>Figure V-1. La répartition des pressions interstitielles sur les différents éléments de la structure</i>	<i>51</i>
<i>Figure V-2. Champ de vitesse de Darcy (référentiels matériau et géométrique)</i>	<i>52</i>
<i>Figure V-3. Les chargements appliqués sur la chaussée.....</i>	<i>52</i>
<i>Figure V-4. Les déformations de la structure sous l'effet des charges des éléments constitutifs.....</i>	<i>53</i>
<i>Figure V-5. Déplacement total (m).....</i>	<i>54</i>
<i>Figure V-6. Déformation du système couplée</i>	<i>54</i>
<i>Figure V-7. Pression interstitielle distribution avec HM</i>	<i>55</i>
<i>Figure V-8. La valeur maximale du coefficient de sécurité.....</i>	<i>56</i>

Liste des photos

<i>Photo III-1. Projet de Terny (mars 2024 prise par la DTP Tlemcen).....</i>	<i>20</i>
<i>Photo III-2. Projet de route (17 mars 2024 prise par la DTP Tlemcen)</i>	<i>20</i>
<i>Photo III-3. Projet en cours de réalisation (Photo prise par la DTP Tlemcen le 17 mars 2024)</i>	<i>21</i>
<i>Photo III-4. Tracé en plan du projet (Février 2024 prise par la DTP Tlemcen)</i>	<i>23</i>
<i>Photo III-5. Profil en long du projet (Fevrier2024 prise par la DTP Tlemcen)</i>	<i>23</i>
<i>Photo III-6.Opération de sondage au première point ((GROUP, 06Aout2015)).....</i>	<i>24</i>
<i>Photo III-7.Sondage N°02 (0.00-6.4 m) ((GROUP, 06Aout2015)).....</i>	<i>25</i>
<i>Photo III-8.Opération de sondage au deuxième point (GROUP, 06Aout2015).....</i>	<i>26</i>
<i>Photo III-9.Opération de terrassement (17 janvier 2023prise par la DTP Tlemcen).....</i>	<i>27</i>
<i>Photo III-10.les travaux terrassement (17 janvier2023 prise par la DTP Tlemcen)</i>	<i>27</i>
<i>Photo III-11. Matériaux bitumineux (11fevrier 2024 prise par la DTP Tlemcen)</i>	<i>28</i>
<i>Photo III-12. Travaux de route (11fevrier 2024 prise par la DTP Tlemcen).....</i>	<i>28</i>
<i>Photo III-13. Compactage de bitume (17 mars 2024 prise par la DTP Tlemcen).....</i>	<i>30</i>
<i>Photo IV-1. Partie de cahier de charge précision de géotextile utilise (05 mai 2024 prise par la DTP Tlemcen).....</i>	<i>33</i>

Liste des tableaux

<i>Tableau I-1. Les différentes structures des chaussées (BROSSEAUD).....</i>	<i>4</i>
<i>Tableau III-1. Réparage de sondage SC02 (GROUP, 06Aout2015)</i>	<i>25</i>
<i>Tableau III-2. Les coordonnées de sondage SC02 (GROUP, 06Aout2015)</i>	<i>25</i>
<i>Tableau III-3. Les différentes formations géologiques (GROUP, 06Aout2015).....</i>	<i>26</i>
<i>Tableau III-4. Les pourcentages des essais granulométrie (GROUP, 06Aout2015)</i>	<i>27</i>
<i>Tableau III-5. les pourcentages de limite de liquidité et IP (GROUP, 06Aout2015)</i>	<i>27</i>
<i>Tableau III-6. Résultats d'essai de cisaillement (GROUP, 06Aout2015)</i>	<i>27</i>
<i>Tableau III-7. Résultat d'essai de Consolidation (GROUP, 06Aout2015).....</i>	<i>27</i>
<i>Tableau III-8. Résultats des essais de granulométrie / sédimentométrie (GROUP, 06Aout2015).....</i>	<i>29</i>
<i>Tableau III-9. Résultat de la limite de liquidité et IP (GROUP, 06Aout2015)</i>	<i>29</i>
<i>Tableau III-10. Résultats des essais cisaillement (GROUP, 06Aout2015)</i>	<i>29</i>
<i>Tableau III-11. Résultats des essais de consolidation (GROUP, 06Aout2015)</i>	<i>29</i>
<i>Tableau III-12. Capacité portante des différentes profondeurs (GROUP, 06Aout2015).....</i>	<i>26</i>
<i>Tableau III-13. Tassement de sondage SC02 (GROUP, 06Aout2015)</i>	<i>27</i>
<i>Tableau III-14. Epaisseur des couches de la chaussée (GROUP, 06Aout2015)</i>	<i>28</i>

NOTATIONS ET SYMBOLES

BB : Béton bitumineux

GB : Grave bitume

GNT : Grave non traité

HM: Hydro-mecanique

AASHTO: American Association of State Highway and transportation Officials

SETRA : Service d'études techniques des routes et autoroutes

LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

SC02 : Sondage n°02

φ : Angle de frottement

c : Cohésion

Pc : Pression de consolidation

Cc : Coefficient de compression

Cg : Coefficient de gonflement

Rc : Résistance à la compression

Ap : Argile plastique

Q_{adm} : Capacité portante admissible

ΔH : Tassement

H : Hauteur de la couche compressible

Cs : Indice de gonflement.

e₀: Indice des vides initial

ΔP : Accroissement des contraintes

P₀ : Pression des terres.

Φ : Porosité

β_w :Le coefficient de compressibilité de l'eau.

β_s et α :Coefficients relatifs à la compressibilité des grains

INTRODUCTION GENERALE

Les routes sont essentielles pour renforcer l'unité nationale et les liens entre les grandes métropoles économiques, ce qui est crucial pour la compétitivité internationale d'un pays industriel.

En Algérie, le réseau routier est vital pour le transport, représentant plus de 85% du transport de marchandises et de passagers. Comme de nombreux réseaux routiers en Algérie, les chaussées sont principalement composées de structures souples.

Ce projet de fin d'études vise à modéliser numériquement une structure de chaussée souple en utilisant un logiciel de calcul par éléments finis et les techniques de couplage multi-physique. La plupart des méthodes mécaniques utilisées pour analyser le comportement des chaussées considèrent une structure multicouche avec un comportement élastique, linéaire, homogène et isotrope, soumise à une charge statique, pour ce travail la structure est examinée sous l'effet double mécanique (charge permanent et charge d'exploitation) et hydrique (écoulement de l'eau) en tenant compte de l'effet couplé hydromécanique.

Après une introduction générale ce mémoire est structuré en cinq chapitres :

Une synthèse bibliographique sur les chaussées avec quelques définitions et terminologie nécessaires ont fait l'objet de premier chapitre.

Le focus du deuxième chapitre était mis sur le couplage numérique principalement le couplage hydromécanique.

Le chapitre trois donne une description détaillée de projet de dédoublement RN22 situé à Terny dans la Wilaya de Tlemcen qui est objet de ce travail de fin d'études.

Le quatrième chapitre aborde la méthodologie employée pour modéliser et simuler hydro mécaniquement la chaussée souple en utilisant le logiciel Comsol. Il montre les hypothèses admises pour une meilleure modélisation hydromécanique d'une chaussée souple. .

Le chapitre cinq, se veut comme présentation et analyse des résultats obtenus. Il montre la limite et l'intérêt des simulations effectuées en relation avec la pratique de l'ingénieur.

Enfin, une conclusion générale avec quelques perspectives achèvera cette étude.

*I. Chapitre 1 : Synthèse bibliographique sur
les chaussées*

I.1 Introduction :

I.2 Généralités sur les chaussées :

Une chaussée est un ouvrage composé de différentes couches de matériaux posées sur un sol nivelé appelé sol support. Son rôle est d'assurer un flux de circulation sûr et confortable en répartissant les contraintes sur une plate-forme de support, garantissant ainsi la sécurité et l'efficacité des déplacements. Une planification, une conception et un entretien appropriés sont essentiels pour assurer la durabilité et la fonctionnalité des chaussées.

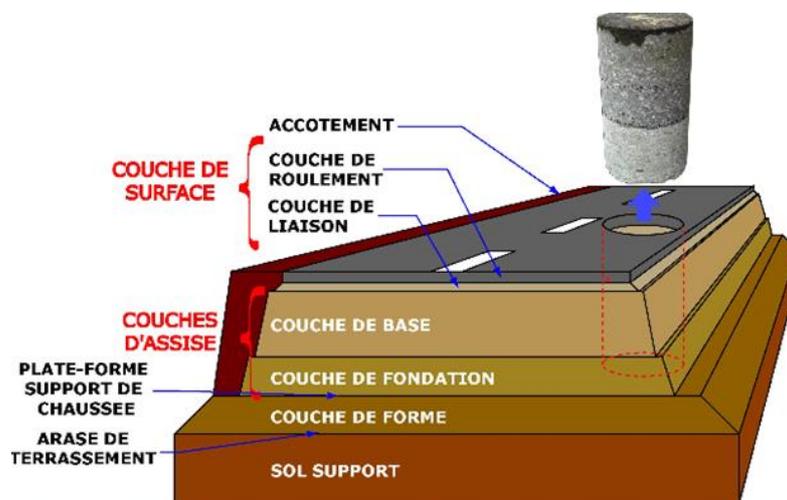


Figure I-1. Terminologie des différentes couches d'une chaussée. (Bassem, 2006)

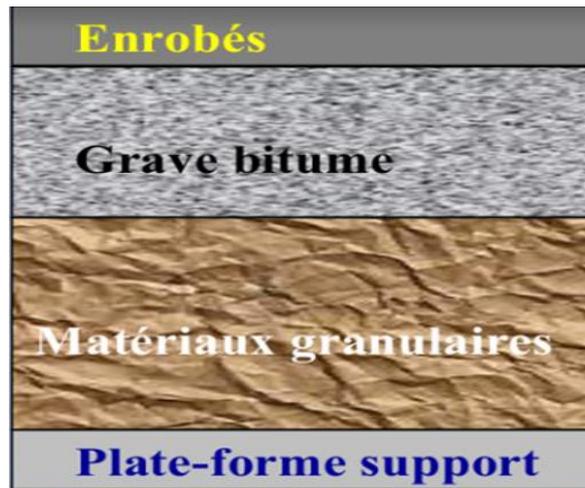
La structure d'un corps de chaussée, comprenant les différentes couches, est illustrée de manière générale dans la figure I-1.

I.3 Les différents types des structures de chaussée :

Selon le fonctionnement mécanique de la route, on distingue six (06) familles des structures de chaussées, notamment :

Tableau I-1. Les différentes structures des chaussées (BROSSEAUD)

Types des structures	Les différentes couches
Bitumineuses épaisses	Couche de surface en matériaux bitumineux Matériaux bitumineux d'assise de 15 à 40 cm Plateforme
Mixte	Couche de surface en matériaux bitumineux Matériaux bitumineux d'assise de 10 à 20 cm Matériaux traités aux liants hydrauliques de 20 à 40 cm Plateforme support
Inverse	Couche de surface en matériaux bitumineux Matériaux bitumineux d'assise de 10 à 20 cm Matériaux granulaires non traités environ 12 cm Matériaux traités aux liants hydrauliques de 15 à 50 cm Plateforme support
Semi rigide	Couche de surface matériaux bitumineux de 6 à 14 cm Matériaux traités aux liant hydraulique 20 à 50 cm Plateforme support
Rigide	Dalle ou béton arme continue (BAC) Béton maigre ou béton bitumineux Plateforme support
Souple	Couche de surface en matériaux bitumineux Matériaux bitumineux d'assise à 15 cm Matériaux granulaires non traités de 20 à 50 cm Plateforme support



FigureI-2. La structure d'une chaussée souple. (BROSSEAUD)

La figure I-2 présente une terminologie relative à la composition des matériaux d'une chaussée souple.

I.4 Caractéristiques et fonctionnement d'une chaussée souple :

Les chaussées souples sont composées d'une fine couche de bitume, généralement moins de 15 cm d'épaisseur, posée sur des matériaux granulaires non traités. Elles conviennent aux routes et autoroutes à trafic léger à moyen en raison de leur flexibilité et de leur résistance aux mouvements du sol. Bien que leur construction et leur entretien soient généralement moins coûteux que ceux des chaussées rigides, elles nécessitent cependant une maintenance plus fréquente.

Les matériaux granulaires utilisés dans les chaussées souples permettent une transmission précise des charges verticales au support, mais entraînent également des déformations plastiques fréquentes. Ces déformations causent des dommages permanents tels que des ornières et des affaissements sur la surface de la chaussée. De plus, la mince couche de bitume est soumise à des contraintes de traction-flexion régulières, ce qui entraîne une détérioration due à la fatigue.

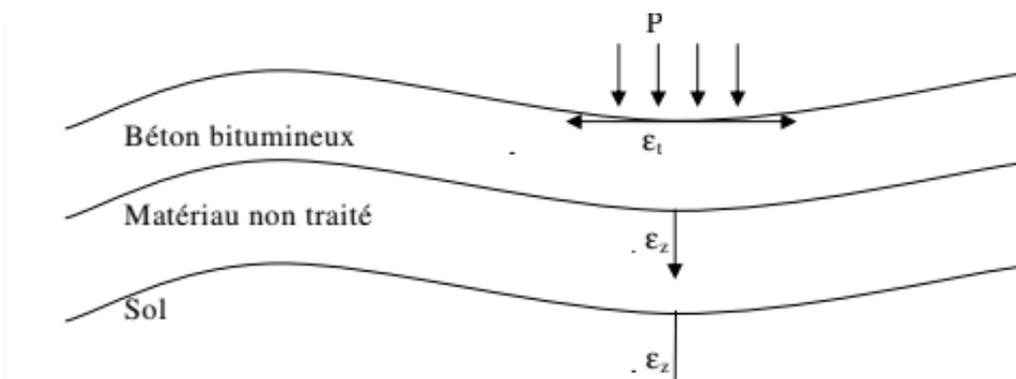


Figure I-3. Fonctionnement d'une chaussée souple (Bassem, 2006)

La figure I-3 illustre la déformation provoquée par l'application d'une charge P sur les matériaux

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique sur les chaussées

constituant la structure de la chaussée.

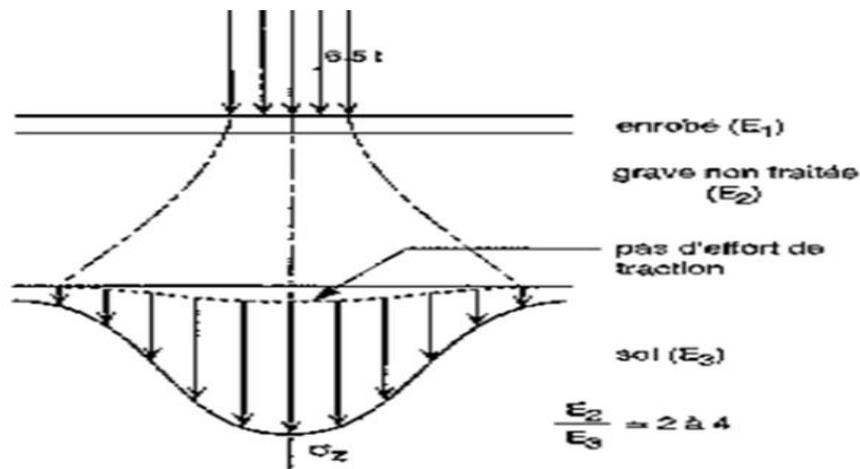


Figure I-4. Répartition des contraintes dans une chaussée souple

(Bassem, 2006)

La distribution des contraintes au sein de la chaussée flexible est illustrée par la figure I-4.

Les chaussées souples peuvent être réalisées de différentes manières, selon les contraintes et les exigences spécifiques de chaque projet, on peut préciser trois (03) type de chaussée souple :

I.4.1 Chaussée stratifiée conventionnelle :

Il s'agit d'un système de construction de haute qualité qui utilise des matériaux coûteux dans la couche supérieure.

I.4.2 Chaussée en asphalte pleine profondeur :

Les routes à fort trafic sont généralement construites en appliquant directement du bitume sur le sol du sous-sol, ce qui est plus adapté.

I.4.3 Chaussée en tapis d'asphalte rocheux contenu (CRAM) :

Cette technique consiste à superposer des couches d'agrégats entre deux couches d'asphalte, et elle est utilisée pour les sols denses ou ouverts.

I.5 Les principales méthodes de dimensionnement :

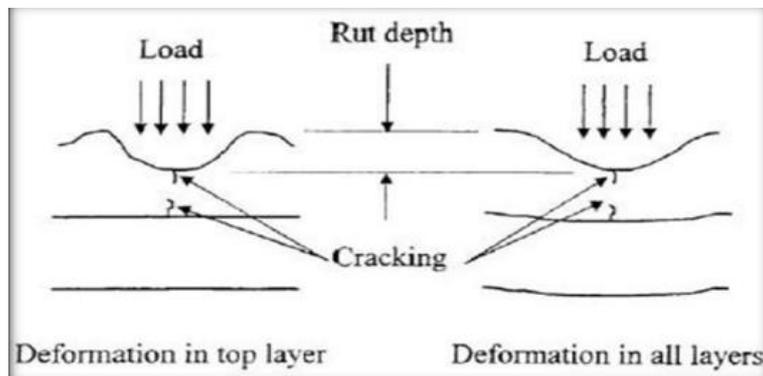
Le dimensionnement et la conception d'une chaussée souple prend en considération différents éléments tels que la voie, le trafic de poids lourds, l'agressivité du trafic, la durée de service, la géotechnique des sols, l'état hydrique du sol, le type d'hiver et l'indice de gel, et requièrent l'utilisation de divers modèles de comportement en fonction des méthodes utilisées. Nous examinons deux catégories différentes :

I.5.1 Méthode empirique: (American Association of State Highway and transportation Officials)

Elle est développée par la méthode d'AASHTO qui repose sur les paramètres entre la conception et la dégradation de la chaussée en se déterminant à partir des équations empiriques signifiant le nombre de cycles de charge jusqu'à la dégradation totale.

I.5.2 Approche-mécanique empirique :

S'appuyant sur la relation entre paramètres physiques et dégradation à l'aide modèles mathématiques en déterminant les paramètres à partir des essais, elle tient compte des charges de charges et des effets environnementaux pour étudier la sollicitation de la chaussée par le trafic.



FigureI-5. Représente le Démarche du catalogue (Bassem, 2006)

La figure I-5 illustre les deux types de réponses critiques d'un système multicouche d'une chaussée souple.

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique sur les chaussées

Autre méthode développée en raison des modèles de Boussinesq (1885), Burmister (1943,1945) utilisant le système d'une couche ou plusieurs couches élastiques linéaires et homogènes.

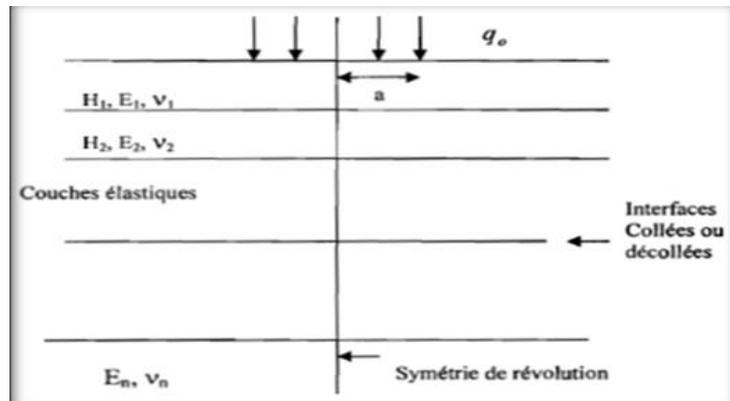


Figure I-6. Les deux critiques d'un système multicouche d'une chaussée (Bassem, 2006)

La figure I-6 Repose sur l'utilisation d'une ou plusieurs couches élastiques linéaires et homogènes.

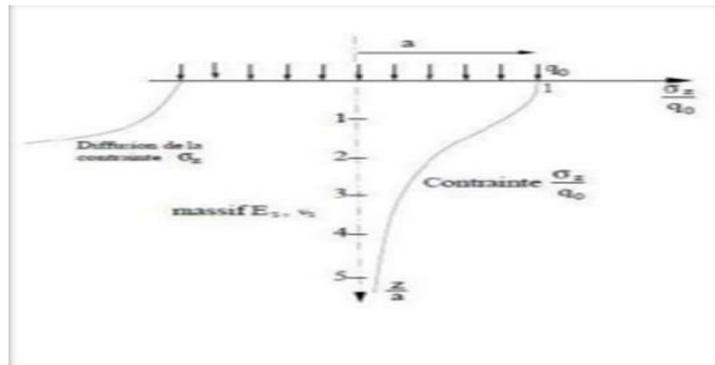


Figure I-7 . Diffusion de la contrainte [Burmister] (Bassem, 2006)

La figure I-7 est basée sur la propagation de la contrainte selon Burmister.

1.5.3 Modèle numérique :

Les méthodes numériques ont progressé et amélioré les techniques et les approches utilisées pour résoudre des problèmes d'ingénierie à l'aide d'ordinateurs et de calculs numériques. En cite :

- Eléments finis
- Les programmes ALIZE et CESAR du LCPC ; Comsol...

I.6 Comportement et modélisation d'une chaussée souple :

Il est nécessaire de prendre en compte deux éléments complémentaires pour comprendre le comportement "mécanique" d'une chaussée bitumineuse :

L'action des matériaux des différentes couches dans les structures de la chaussée.

Propriétés intrinsèques des matériaux traités par liaison hydrocarbonée.

Afin de mettre en évidence les éléments clés du dimensionnement, il est nécessaire de schématiser le mode de sollicitation.

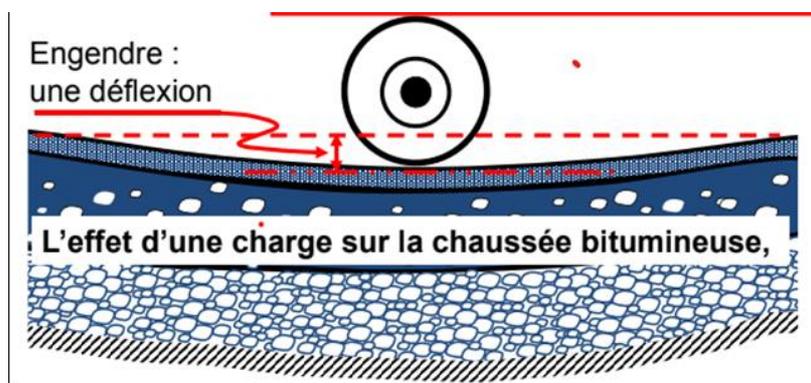


Figure I-8. L'effet d'une charge sur la chaussée bitumineuse (LCMB, 30 Septembre 2016)

Figure I-8 Représente l'impact d'une charge sur la chaussée bitumineuse entraînant une déformation mécanique de la surface.

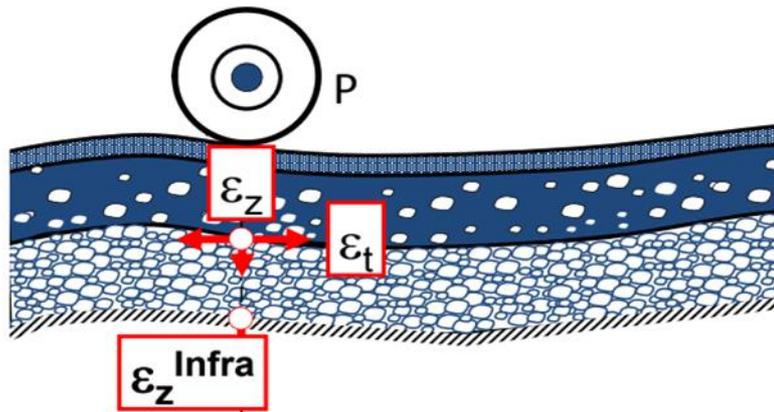


Figure I-9. L'effet de déformation d'une chaussée (LCMB, 30 Septembre 2016)

La figure I-9 Montre l'effet de la déformation de structure, ce qui gouverne la durée de vie en fatigue du revêtement.

I.7 CONCLUSION :

Ce chapitre a exposé les différents éléments d'une chaussée souple. Le dimensionnement repose en particulier sur l'analyse de la diffusion des contraintes en profondeur selon le cas de charge étudié avec la vérification nécessaire des déformations induites pour état limite de service convenable. Le chapitre a résumé ces éléments pour entamer dans le chapitre suivant les différents modèles de calcul qui seront étudiés dans ce projet de fin d'études.

*II. Chapitre 2 : Synthèse bibliographique sur
les méthodes de couplage numérique
(hydromécanique)*

II.1 Introduction :

Une analyse de champ couplé est une combinaison d'analyses de différentes disciplines d'ingénierie qui interagissent pour résoudre un problème d'ingénierie global. Certaines analyses peuvent avoir un couplage unidirectionnel. Dans un problème d'interaction fluide-structure, la pression du fluide provoque la déformation de la structure, ce qui entraîne à son tour la modification de la solution fluide. Ce problème nécessite des itérations entre les deux domaines de la physique pour la convergence. (OULD & MESSAOUDI, 2019/2020)

II.2 Loi d'endommagement

Une chaussée souple est essentielle pour maintenir sa longévité et ses performances. Elle peut se manifester par une usure permettant la formation de microfissures. Au fil du temps, la circulation des véhicules exerce une pression sur la structure de la chaussée affectée par un phénomène de fatigue, ce processus entraîne une augmentation significative de la sensibilité à l'eau. Il est important de comprendre les causes et les effets de ce phénomène.

En analysant les facteurs qui contribuent à la fatigue, nous pouvons développer des stratégies pour la prévenir ou l'atténuer. De plus, un entretien adéquat et des inspections régulières peuvent aider à identifier et à traiter.

Une brève description de ce phénomène peut inciter plusieurs défauts parmi les principaux types de défauts que l'on peut observer sur les chaussées souples sont :

- ✚ La fissuration.
- ✚ La dégradation.
- ✚ Le comportement des interfaces.

Chapitre 2 : Synthèse biographique sur les couplages numériques (hydromécanique).

II.2.1 Fissuration :

La fatigue provoque des fissures dans les couches bitumineuses qui se plient sous l'impact répété du trafic, créant ainsi une contrainte de traction et une déformation à la base de ces couches. Ces fissures se propagent de bas en haut jusqu'à la surface de la chaussée. Les couches d'assise traitées peuvent également présenter des fissures dues à la fatigue lorsqu'elles sont soumises à des contraintes de flexion et de traction. De plus, les sols et les matériaux non traités peuvent subir des déformations permanentes en raison de la plastification. Pendant la période de dégel, les sols support sensibles au gel peuvent également perdre leur portance.



Figure II-1. Cas d'une fissure (Mars 2024 prise par la DTP Tlemcen).

II.2.2 Dégradation :

En hiver, les chaussées bitumineuses peuvent subir des pelades soudaines qui entraînent la formation de nids de poule. Ces problèmes sont principalement observés sur les bandes de roulement des véhicules légers et ne présentent aucun signe précurseur spécifique. Parfois, ces dommages nécessitent la fermeture de routes et des interventions d'urgence.

Lors de la construction des chaussées, les caractéristiques des matériaux utilisés sont prises en compte. Cela inclut la résistance à l'eau, le vieillissement du bitume et la fissuration thermique. De plus, l'affaissement des couches de surface bitumineuses causé par le fluage thermoplastique est également pris en compte.

Il est important de noter que toutes les chaussées ne sont pas affectées de la même manière. Les dégradations telles que la décohésion des matériaux près des interfaces sont observées, mais rarement dans les couches de roulement elles-mêmes. Les configurations d'empilement de couches varient, avec différents matériaux bitumineux et épaisseurs. Il est donc fréquent de devoir recharger certaines

Chapitre 2 : Synthèse biographique sur les couplages numériques (hydromécanique).

zones. Parfois, des nids de poule profonds peuvent apparaître sur des anciennes autoroutes en béton qui ont été rechargées avec du bitume. De plus, les anciennes signalisations horizontales non fraisées peuvent également être recouvertes.



Figure II-2. Cas de dégradation d'une chaussée bitumineuse (comité français de mécanique des sols et de géotechnique, juin 2023)

II.2.3 Comportement des interfaces :

Il existe trois catégories d'interfaces en fonction de leur comportement : collé, semi-collé et glissant. Ces comportements peuvent entraîner des effets secondaires tels que des élargissements sur les chaussées. Lors du dimensionnement, on suppose que les couches bitumineuses adhèrent parfaitement les unes aux autres, assurant ainsi la continuité des déformations tangentielles dans les matériaux des deux côtés.

II.3 Solution adoptée pour loi d'endommagement :

L'inclusion explicite de l'intégration continue des extenseurs et du balayage latéral de la fonction de la trajectoire, l'élargissement du théorème des dommages cumulés (principe Miner) et l'établissement de modèles de fatigue multiaxiale bien connus.

II.3.1 L'endommagement 'multiplics' :

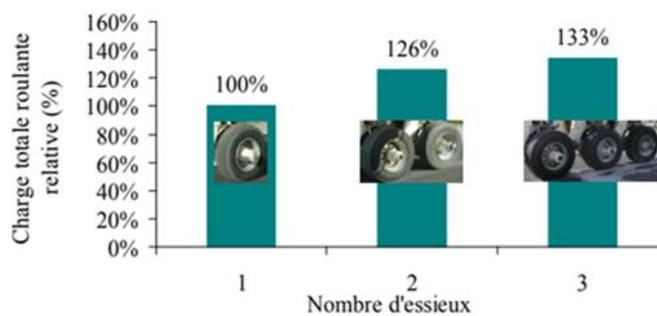


Figure II-3. Sollicitation dans la chaussée : charge de référence (essieux) (comité français de mécanique des sols et de géotechnique, juin 2023)

Chapitre 2 : Synthèse biographique sur les couplages numériques (hydromécanique).

Les configurations d'essieux multiples permettent de transporter une charge plus importante que les configurations d'essieux simples, même en cas de dommages.

II.4 Ecoulement d'eau :

II.4.1 Perméabilité :

Lorsque l'eau circule à travers des milieux perméables saturés, elle est soumise à une pression hydrostatique qui peut être calculée à l'aide de l'équation (1) suivante :

$$\text{grad } U_w = -\rho_w \cdot g \cdot z \quad \text{Eq. (1) (cfms, juin2023)}$$

Si la charge hydraulique reste constante et que le gradient hydraulique est nul, l'eau demeure immobile. En revanche, si le gradient hydraulique est différent de zéro, l'eau se met en mouvement et sa vitesse est régie par la loi de Darcy équation (2) Cette loi décrit la circulation de l'eau à un point donné.

$$\mathbf{Q} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{i} \quad \text{Eq. (2) (cfms, juin2023)}$$

D'autre forme dans équation (3) plus exacte dans un milieu non homogène :

$$\mathbf{V} = -\mathbf{K} \cdot \text{grad } \phi \quad \text{Eq. (3) (cfms, juin2023)}$$

L'évaluation du coefficient de perméabilité k est essentielle pour les situations d'écoulement unidirectionnel ou multidirectionnel. Une méthode de mesure initiale est utilisée pour les sols très perméables avec nappe phréatique, permettant des pompages ou des injections contrôlées. Une méthode alternative consiste à extraire un échantillon de sol pour le placer dans un dispositif de perméamétrie composé d'un cylindre et de deux plaques poreuses entourant l'échantillon.

II.4.2 Ecoulement en régime permanent :

Afin de calculer la charge hydraulique et la vitesse de l'eau, il est essentiel d'intégrer l'équation de continuité à la définition de la charge hydraulique et à la loi de Darcy. Cette équation exprime la conservation de la masse d'eau. En considérant que l'eau et le squelette (composé de grains solides) sont incompressibles, en régime permanent l'équation de continuité s'écrit:

$$\text{div } \mathbf{v} = 0 \quad \text{Eq. (4) (cfms, juin2023)}$$

Ceci implique que la vitesse et la charge hydraulique de l'eau peuvent être déterminées en considérant ces facteurs et en appliquant l'équation de continuité, ainsi que les équations de Darcy et la définition de la charge hydraulique.

II.4.3 Ecoulement en régime transitoire :

Pendant une période de transition, la variation de la charge hydraulique est déterminée par une équation qui intègre le coefficient d'emménagement (S), exprimé de manière uniforme en inversant une distance. Cette équation (5) traduit la conservation de la masse d'eau et le coefficient (S), représente la capacité du sol à retenir l'eau, que ce soit en augmentant sa densité par compression des particules solides ou en augmentant son volume total (cfms, juin2023)

$$\text{div}(\mathbf{K} \cdot \text{grad } h) = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{Eq. (5)}$$

Avec; $S = \rho_w \Phi \left(\beta_w + \beta_s + \frac{\alpha}{\phi} \right)$

Φ (Porosité)

β_w (Le coefficient de compressibilité de l'eau.)

β_s et α (Coefficients relatifs à compressibilité des graines)

II.5 Problème couplage hydromécanique :

Le couplage hydromécanique se réfère à l'interaction entre une structure et la surface d'un liquide peu compressible, généralement de l'eau. Par exemple, dans l'industrie maritime, le phénomène de tossage se produit lorsque la coque d'un navire entre en contact avec l'eau à grande vitesse. De même, le ballonnement se produit dans un réservoir partiellement rempli lorsque le liquide frappe la paroi interne en vagues successives. Une vitesse relative élevée entre la structure et le liquide accroît le risque d'impact violent, pouvant entraîner une défaillance prématurée due à la fatigue. Il est donc crucial de prédire les forces hydrodynamiques afin de dimensionner correctement la structure lors de sa conception ou pour prévenir tout dommage.

Les effets du couplage hydromécanique se manifestent dans divers contextes géologiques, qu'ils soient locaux et temporaires ou régionaux et durables. (cfms, juin2023)

II.5.1 Problème du couplage (HM) à long terme :

Les situations les moins favorables pour plusieurs raisons sont :

- Les champs de charge hydraulique et de déformation restent constants dans le temps.
- Le problème hydraulique peut être résolu séparément du problème mécanique.
- L'équation d'équilibre pour résoudre le problème mécanique prend en compte le champ de charge hydraulique et la pression interstitielle.
- Cela simplifie le calcul.
- Il est supposé implicitement que la situation la moins favorable est à long terme et non une situation intermédiaire. (cfms, juin2023)

Chapitre 2 : Synthèse biographique sur les couplages numériques (hydromécanique).

II.5.2 Problème du couplage (HM) à court terme :

Dans le cas où le chargement mécanique est effectué rapidement, l'écoulement de l'eau n'a pas encore commencé.

- Il est envisageable de résoudre ce problème en utilisant des contraintes totales.
- La variation de la pression interstitielle dépend de la déformation du squelette (voir équation 6) (cfms, juin2023):

$$(\Delta \mathbf{u}\mathbf{w}) = \mathbf{K} \text{tr}(\boldsymbol{\varepsilon}) \quad \text{Eq. (6)}$$

Avec : $\mathbf{K} = \mathbf{K}\mathbf{w} / \phi$

On peut analyser la situation à court terme en examinant l'évolution non perturbée qui se produit après l'application d'une charge mécanique qui bloque l'écoulement de l'eau dans le sol. Cela permet de mesurer la variation de la pression interstitielle en fonction de la déformation du squelette.

La loi de comportement équation (7) en contraintes totales résultante (cfms, juin2023):

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}' + \mathbf{u}\mathbf{w} \boldsymbol{\delta} = \boldsymbol{\Sigma} . \boldsymbol{\varepsilon} + (\mathbf{u}\mathbf{w} + \mathbf{K} \text{tr}(\boldsymbol{\varepsilon})) \boldsymbol{\delta} \quad \text{Eq. (7)}$$

Nécessite la considération d'une loi de comportement en contraintes effectives

II.5.3 Problème couplé en régime transitoire :

Une situation nécessitant un calcul entièrement couplé pour décrire l'évolution temporelle d'une structure.

Le manuel souligne les points clés de l'approche de Biot (1941) aboutissant à équation (8),

Et le couplage avec les équations d'équilibre et la loi de comportement du squelette (cfms, juin2023).

$$\text{div}(\mathbf{K} * \text{grad } \mathbf{h}) = \frac{\rho \mathbf{w} \mathbf{g} \phi}{\mathbf{k}\mathbf{w}} \frac{\delta h}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta t} (\text{tr}(\boldsymbol{\varepsilon})) \quad \text{Eq. (8)}$$

La modélisation des phénomènes hydrauliques dans le sol selon la méthode de Biot (1941) repose sur l'observation d'un volume de sol élémentaire et l'intégration du concept de courant de masse de l'eau pour considérer les interactions entre l'eau et la structure du sol.

II.6 Construction du model numérique et le phasage :

Un modèle est une simplification de la réalité, créée à partir de décisions délibérées sur la manière d'aborder et de résoudre les équations liées au couplage hydromécanique. La planification de la construction d'une chaussée souple implique l'organisation des étapes requises pour la réalisation d'une chaussée en enrobé bitumineux, en tenant compte de facteurs tels que le type de projet, le trafic, le climat et les contraintes environnementales.

II.7 Conclusion :

Ce chapitre a reproduit l'ensemble des équations nécessaires à une modélisation hydromécanique. Il est important pour l'ingénieur de tenir en compte de l'ensemble des aspects hydriques dans une chaussée souple soit en termes de pression d'eau, charge hydraulique ou gradient hydraulique. L'approche privilégiée consiste à déterminer séparément le champ de pression interstitielle avant de l'introduire dans le calcul mécanique.

III. Chapitre 3 : Présentation du cas d'étude

III.1 Introduction :

Le projet actuel vise à élargir la route nationale RN22 sur une distance de 13 km entre Tlemcen et Terny. Cette extension inclura toutes les infrastructures nécessaires en termes d'assainissement et de dispositifs de sécurité pour assurer la sécurité des usagers de la route et de leurs biens. Cette route est caractérisée par un trafic intense, la présence fréquente de poids lourds et des conditions météorologiques difficiles en hiver. Une nouvelle méthode a été développée pour travailler sur la chaussée sans perturber la circulation des véhicules sur cet itinéraire connu pour ses virages dangereux.



Photo III-1. Projet de Terny (mars 2024 prise par la DTP Tlemcen).



Photo III-2. Projet de route (17 mars 2024 prise par la DTP Tlemcen)

Chapitre 3 : Présentation du cas d'étude



Photo III-3. Projet en cours de réalisation (Photo prise par la DTP Tlemcen le 17 mars 2024)

Les trois photos (III.1 ; III.2 ; III.3) montrent l'évolution du projet de Terny.

III.2 Les données du projet :

Le tracé est composé de 04 section :

Tableaux III.1. Position des 04 sections (GROUP, 06Aout2015)

Section	Position
01	Traversée de Beni Boublene sur 1.8 km
02	Entre carrefour desservant Lala satti et le carrefour de Beni snous sur 4.2 km
03	Entre le carrefour Beni snous et Terny sur 4.7 km
04	Evitement de Terny sur 2.3 km

Chapitre 3 : Présentation du cas d'étude



Figure III-1. Vue aérienne de région d'étude et localisation du site (extrait de google earth)

La Figure III-1 Présente une vue aérienne de la région d'étude, avec la localisation précise du site indiquée (extrait de Google Earth).

III.3 Activité Sismique :

Étant donné que la région de Tlemcen présente une faible activité sismique (I), il est nécessaire de se conformer au règlement parasismique Algérien en vigueur (RPA 99 version 2003) lors du calcul dynamique des ouvrages. Il est impératif de concevoir ces ouvrages de manière qu'ils puissent résister aux secousses telluriques les plus intenses.

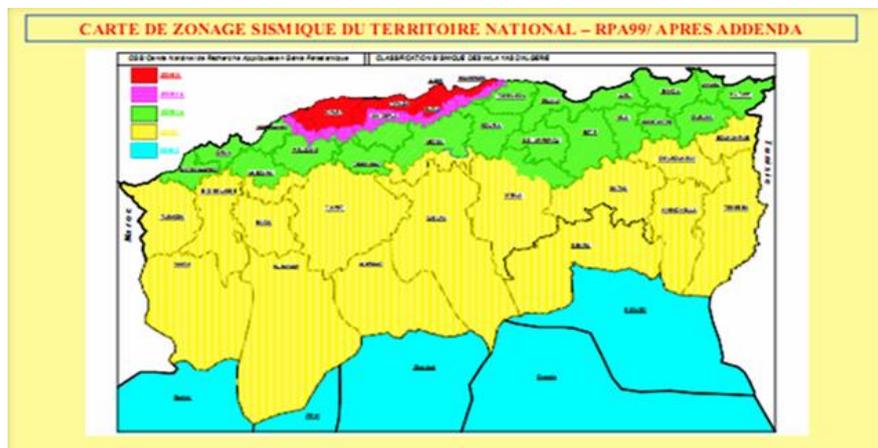


Figure III-2. Carte de zonage sismique du territoire national (RPA 2013)

Chapitre 3 : Présentation du cas d'étude

III.4 La géométrie du projet :

III.4.1 Tracé en plan :

L'étude démarre au 1+725 km et se termine à 9+250 km sur une route à double voie avec circulation dans les deux sens. La chaussée, d'une largeur moyenne de 7m, est bordée de bas-côtés de 2m de chaque côté.



Photo III-4. Tracé en plan du projet (Février 2024 prise par la DTP Tlemcen)

Voici le plan du projet, représenté en photo III-4.

III.4.2 Profil en long :

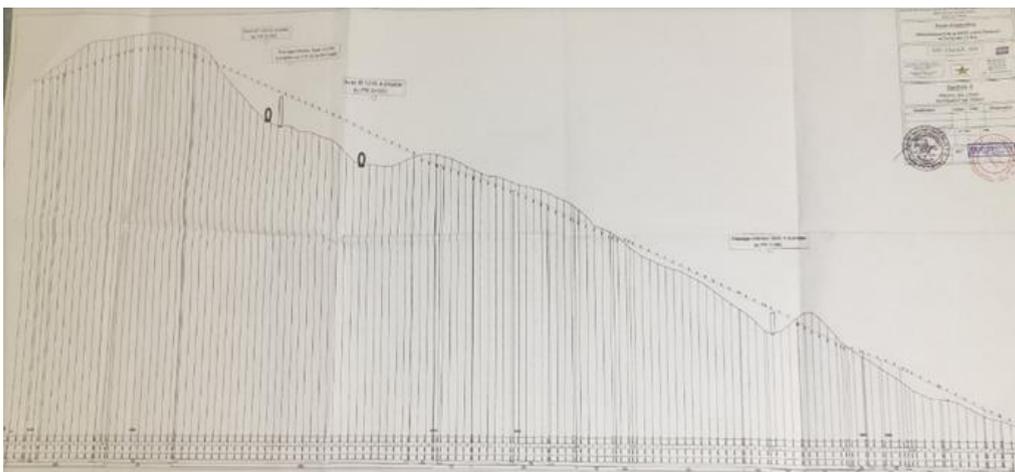


Photo III-5. Profil en long du projet (Fevrier2024 prise par la DTP Tlemcen)

La perspective du projet vue de loin est illustrée dans l'image III-5.

Chapitre 3 : Présentation du cas d'étude

III.4.3 profil en travers :

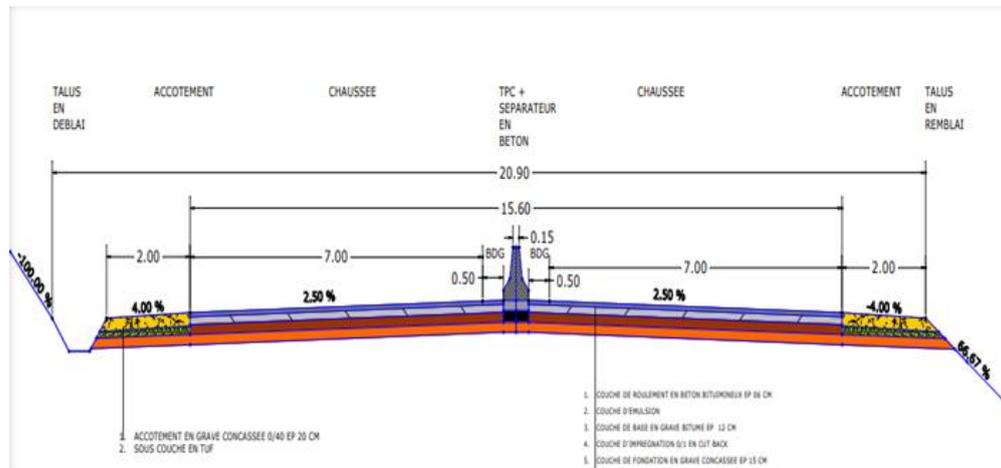


Figure III-3. Profil en travers du point étudié (Février 2024 la DTP Tlemcen)

Le profil en travers du point analysé est représenté par la figure III-.3

III.5 Etudes Géotechnique du projet et présentation Topographique :

III.5.1 Travaux d'investigation in-situ :

Le programme de reconnaissance a été basé sur la réalisation de :

III.5.1.1 Travaux de carottage :

🚧 Sondage :

La photo ci-dessus montre le commencement du sondage au premier point.



Photo III-6. Opération de sondage au première point ((GROUP, 06Aout2015))

Chapitre 3 : Présentation du cas d'étude

Grâce à l'utilisation d'une foreuse Seddidril, l'opération a été un succès. Trois sondages ont été réalisés et les résultats obtenus ont permis de sélectionner un des trois cas pour notre modélisation., notamment :

Tableau III-1. Réparage de sondage SC02 (GROUP, 06Aout2015)

N°de sondage	Point kilométrique
SC02	1+725

Tableau III-2. Les coordonnées de sondage SC02 (GROUP, 06Aout2015)

Les coordonnées	SC02
X	0651051
Y	3858085
Z	990



Photo III-7.Sondage N°02 (0.00-6.4 m) ((GROUP, 06Aout2015)

La photo III-7. Représente les échantillons du sondage numéro 02, qui a été effectué sur une plage de profondeur allant de 0.00 à 6.40 mètres.

Chapitre 3 : Présentation du cas d'étude



Photo III-8. Opération de sondage au deuxième point (GROUP, 06Aout2015)

Sur la photo III-8. On peut voir une opération de sondage réalisée au deuxième point.

III.5.2 Description et caractéristique géotechnique du sol :

Le sondage réalisé a révélé que le sol présente une diversité tant verticale qu'horizontale, résultant de la superposition de différentes formations géologiques. Ces formations sont les suivantes :

✚ Sondage SC 02 :

Tableau III-3. Les différentes formations géologiques (GROUP, 06Aout2015)

Profondeur (m)	Terre
0.00 à 0.30	Terre végétale
0.30 à 0.90	Grès fragmenté de couleur blanchâtre
0.90 à 1.60	Argile limoneuse sableuse de couleur noirâtre
1.60 à 3.50	Grès dur de couleur grisâtre, fragmenté par endroit, devenant friable vers la fin de l'intervalle.
3.50 à 4.50	Marne compacte de couleur verdâtre à grisâtre, intercalée par un passage de pelite de 4.30 à 4.50m de profondeur
4.50 à 10.00	Grès dur de couleur verdâtre à grisâtre, friable par endroit
10.00 à 12.00 m	Pelite très dure de couleur rougeâtre, intercalée par un passage de grès de 11.50 à 11.80m de profondeur.

Chapitre 3 : Présentation du cas d'étude

III.5.3 Formations constitutives du sol :

 *Argile limoneuse sableuse :*

Cette couche de sol est composée d'argile, de limon et de sable, avec parfois une proportion plus élevée de sable .sa couleur peut aller du marron au noir les analyses granulométriques /sédimentométriques effectuées sur cette strate ont révélé les pourcentages suivants :

Tableau III-4. Les pourcentages des essais granulométrie (GROUP, 06Aout2015)

Type	Pourcentage(%)
Graviers	4.63 à 11.43
Sables	28.35 à 39.93
Fines argileuses Limoneuses	48.64 à 67.02

Cette formation est caractérisée par :

Tableau III-5. les pourcentages de limite de liquidité et IP (GROUP, 06Aout2015)

une limite de liquidité	34.50%
un indice de plasticité(IP)	17.50%

D'après ces résultats, elle présente une faible plasticité est classée "CL" selon la classification ASTM unifiée (ou "Ap" selon la classification française LCPC). L'essai de cisaillement direct UU a donné :

Tableau III-6. Résultats d'essai de cisaillement (GROUP, 06Aout2015)

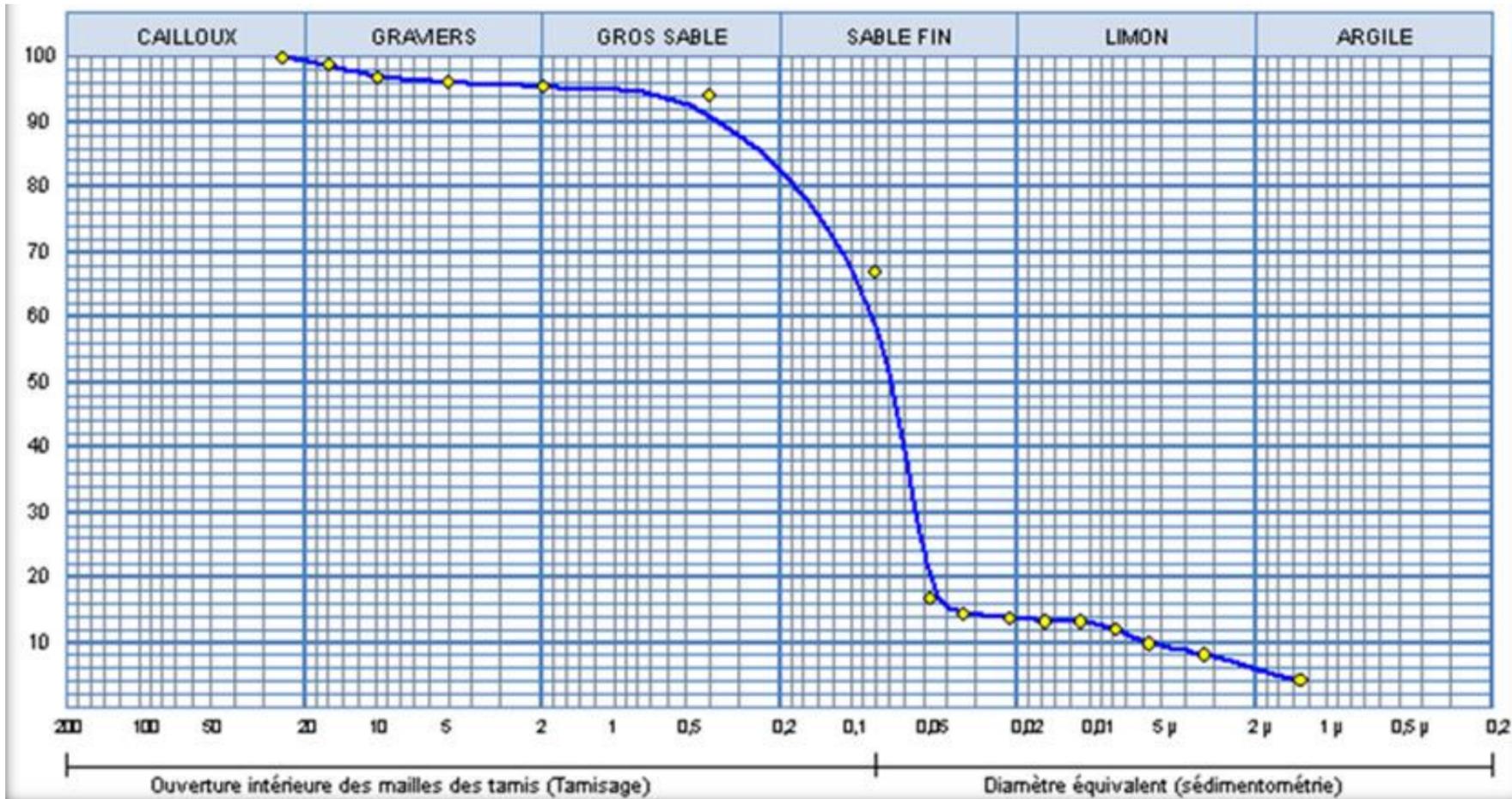
un angle de frottement(ϕ)	13.63°
une cohésion (C)	0.46 kg/cm²

L'essai de consolidation a permis de déterminer les caractéristiques suivantes :

Tableau III-7. Résultat d'essai de Consolidation (GROUP, 06Aout2015)

Une pression de consolidation(Pc)	2.32 à 2.96 Kg/cm ²
Un coefficient de compression(Cc)	18.27 à 18.60%
Un coefficient de gonflement(Cg)	1.16 à 2.74%

Résultats d'essai d'analyse granulométrique (argile limoneuse sableuse)



Analyse Granulométrique		Analyse sédimentométrique	
Tamis (mm)	Tamisat (%)	Diamètre équivalent	Tamisat (%)
25,00	100,00	47,40 µm	16,66
16,00	98,81	34,20 µm	14,40
10,00	96,91	21,80 µm	13,83
5,00	96,08	15,40 µm	13,26
2,00	95,37	10,90 µm	13,26
0,40	94,30	7,80 µm	12,13
0,08	67,02	5,60 µm	9,86
		3,30 µm	8,16
		1,30 µm	4,19

Echant	< 80 µ	LIMITES D'ATTERBERG			Classificat ^{on}
		W.L (%)	W.P (%)	I.P (%)	
—◆—	67,02 %	34,23 %	17,16 %	17,07 %	Ap

Chapitre 03 :Présentation du cas d'étude

 Marne :

Lors du sondage SC02, une formation marneuse a été repérée, principalement constituée de fines particules de marne avec des traces de sable et de graviers. Sa couleur varie du vert au gris. Cette marne présente une structure feuilletée qui devient plus compacte en profondeur. Les analyses granulométriques ont donné les résultats suivants :

Tableau III-8. Résultats des essais de granulométrie / sédimentométrie (GROUP, 06Aout2015)

Type	Pourcentage(%)
Graviers	0.00 à 5.50
Sables	2.58 à 9.27
Fines argileuses Limoneuses	85.23 à 100

Tableau III-9. Résultat de la limite de liquidité et IP (GROUP, 06Aout2015)

une limite de liquidité	45.32 et 52.80%
un indice de plasticité(IP)	22.39 et 24.10%

Selon la classification ASTM unifiée, cette formation est classée comme "CL à CH" (ou "Ap à At" selon la classification française LCPC), ce qui indique qu'elle est très plastique.

L'essai de cisaillement direct UU a donné :

Tableau III-10. Résultats des essais cisaillement (GROUP, 06Aout2015)

un angle de frottement(ϕ)	13.17°
une cohésion (C)	0.47kg/cm ²

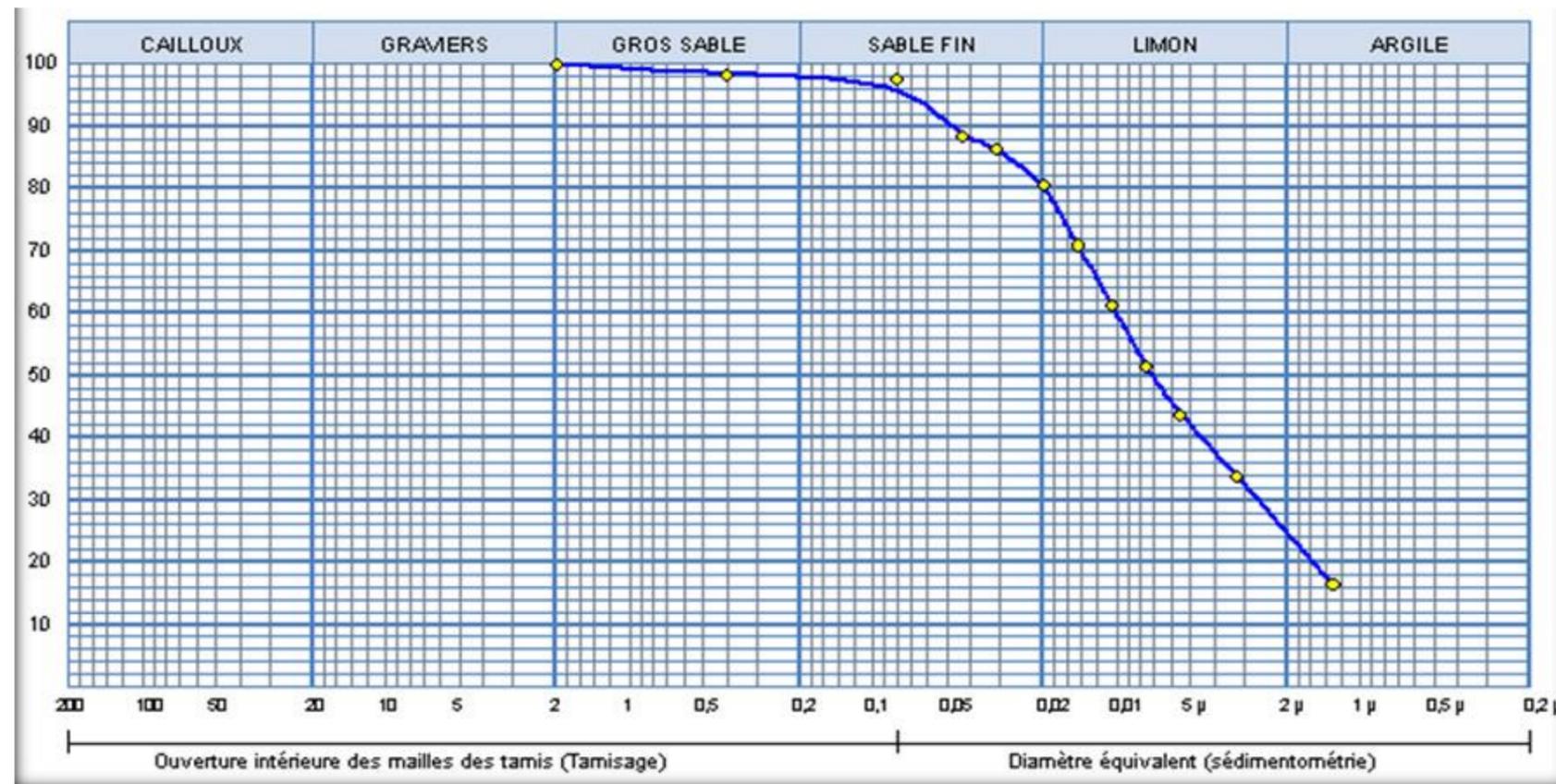
Les essais de consolidation ont permis de déterminer les caractéristiques suivantes :

Tableau III-11. Résultats des essais de consolidation (GROUP, 06Aout2015)

Une pression de consolidation(Pc)	1.44 à 2.75kg/cm²
Un coefficient de compression(Cc)	13.29 à 24.58%
Un coefficient de gonflement(Cg)	1.58 à 3.40%

Ces résultats attestent que l'argile est préconsolidée, constituant **un sol moyennement à assez** fortement compressible.

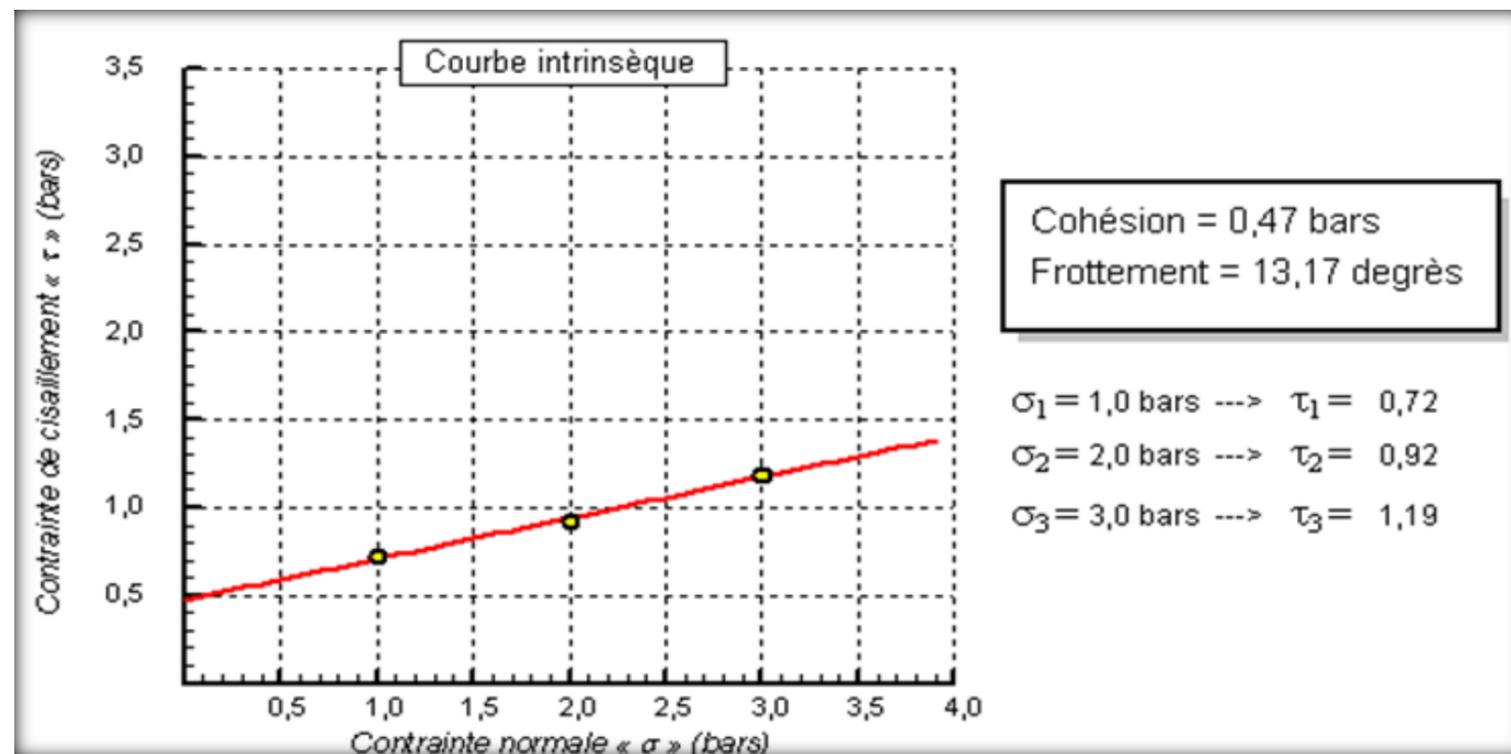
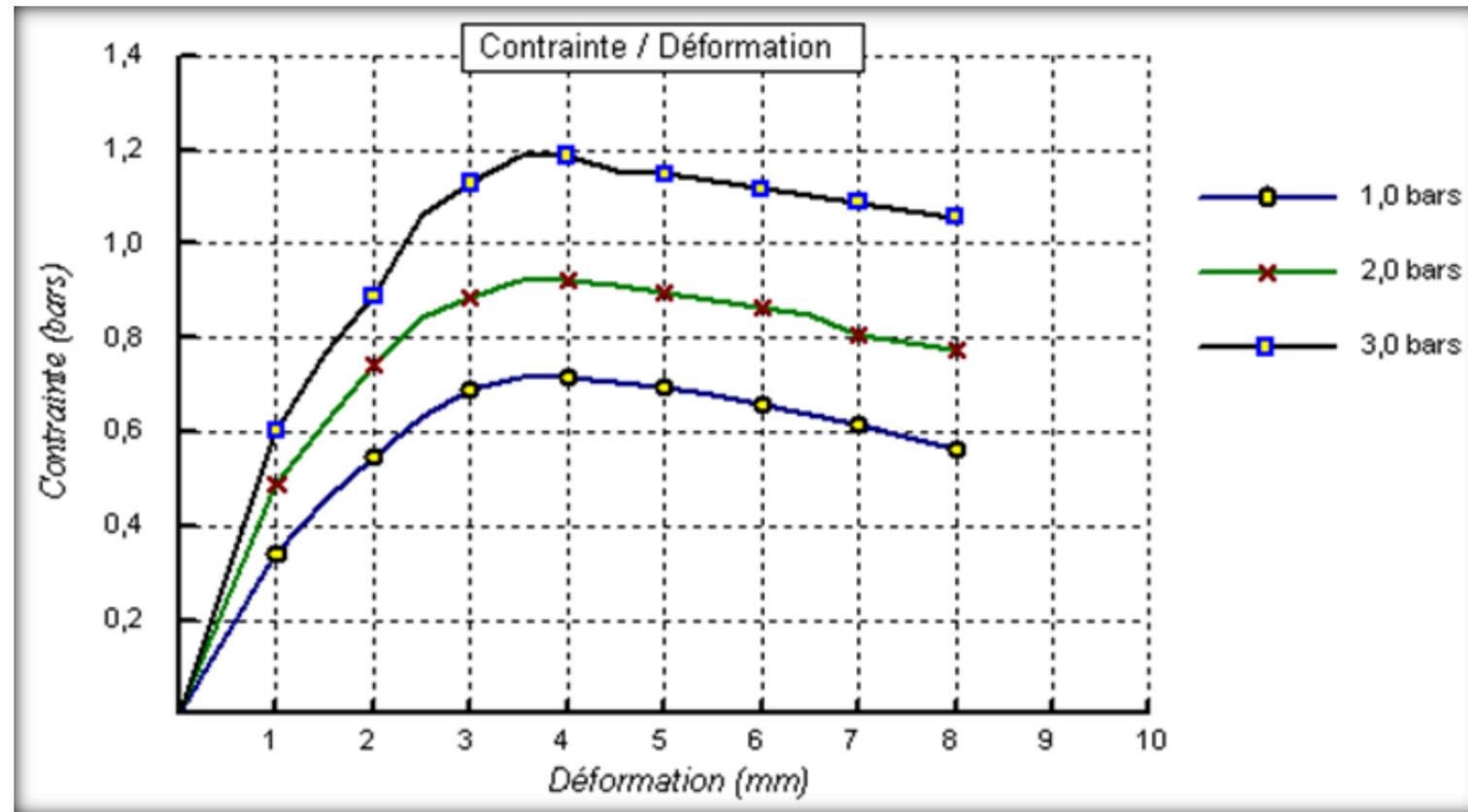
Résultats d'essai d'analyse granulométrique(Marne)



Analyse Granulométrique		Analyse sédimentométrique	
Tamis (mm)	Tamisat (%)	Diamètre équivalent	Tamisat (%)
2,00	100,00	43,30 µm	88,46
0,40	98,33	31,00 µm	86,51
0,08	97,42	19,80 µm	80,66
		14,50 µm	70,92
		10,40 µm	61,18
		7,60 µm	51,44
		5,50 µm	43,64
		3,20 µm	33,90
		1,30 µm	16,37

Echant	< 80 µ	LIMITES D'ATTERBERG			Classificat ^o
		W.L (%)	W.P (%)	I.P (%)	
—◆—	97,42 %	48,50 %	26,11 %	22,39 %	Ap

Résultats d'essais de cisaillement (Marne a prof=3.70 a4.00 m)



Chapitre 03 : Présentation du cas d'étude

 Grès :

Le sondage SC02 a mis en évidence la présence de grès à différentes profondeurs. Ces grès se caractérisent par une texture fine à moyenne, parfois friable, et une palette de couleurs allant du beige au blanchâtre. L'analyse de compression simple a démontré une résistance :

Rc varie de 46.47 à 123.50 Bars.

La capacité portante a été calculée dans chaque couche à des différentes profondeurs, comme est mentionné ci-dessous :

Tableau III-12. Capacité portante des différentes profondeurs (GROUP, 06Aout2015)

Formation	Sondage	Qadm(Bars)
Argile limoneuse sableuse	SC02	1.87
Marne	SC02	1.98
Grès	SC02	4.67

III.5.4 Analyse chimique du sol :

Les essais chimiques ont été réalisés pour détecter la présence de sulfate dans les échantillons de sol prélevés jusqu'à une profondeur de 12 mètres dans le sondage SC02. Les résultats ont révélé une absence totale de sulfate, ce qui signifie que le sol est non agressif et correspond à la catégorie A0 selon la norme "NA 778". Cette classification est utilisée pour évaluer la qualité du sol en termes de risques pour les constructions. Ainsi, l'absence de sulfate indique que le sol est parfaitement adapté à la construction, sans risque d'altération due à une agressivité.

III.5.5 Condition de la nappe d'eau :

Aucune infiltration d'eau en provenance du sol naturel n'a été constatée. Cependant, il est possible que des écoulements d'eau sporadiques se produisent dans les couches superficielles du sol en réponse à des épisodes de fortes précipitations.

III.5.6 Cubature des terrassements et mouvements des terrassements :

Le tassement a été calculé d'après les résultats des essais de consolidation unidimensionnelle, selon

la formule (9) suivante :
$$\Delta H = H \frac{C_s}{1 + e_0} \text{Log} \left(\frac{P_0 + \Delta P}{P_0} \right) \quad \text{Eq.(9)}$$

H : Hauteur de la couche compressible

Cs : Indice de gonflement.

e0: Indice des vides initial

P : Accroissement des contraintes

P0 : Pression des terres

Chapitre 03 : Présentation du cas d'étude

Tableau III-13. Tassement de sondage SC02 (GROUP, 06Aout2015)

SONDAGE	ΔH
SC02	2.89



Photo III-9. Opération de terrassement (17 janvier 2023 prise par la DTP Tlemcen)



Photo III-10. les travaux terrassement (17 janvier 2023 prise par la DTP Tlemcen)

III.6 Donnée des caractéristiques de la chaussée :

Chapitre 03 : Présentation du cas d'étude

Tableau III-14. Epaisseur des couches de la chaussée (GROUP, 06Aout2015)

Nature des couches	Epaisseur (cm)
Béton Bitumineux (BB)	06
Grave Bitume (GB)	12
Grave Concasse (GC)	15
Anti-Contaminant	15



Photo III-11. Matériaux bitumineux (11fevrier 2024 prise par la DTP Tlemcen)

La photo III-11. Illustre des matériaux bitumineux, qui sont utilisés comme agent de liaison dans les enrobés bitumineux pour la couche supérieure des routes flexibles.



Photo III-12. Travaux de route (11fevrier 2024 prise par la DTP Tlemcen)

Les photos illustrent le processus de compactage, qui garantit une densité et une uniformité optimales du bitume, contribuant ainsi à la durabilité et à la qualité de la chaussée.



Photo III-13. Compactage de bitume (17 mars 2024 prise par la DTP Tlemcen)

III.7 Conclusion :

Ce chapitre présente les résultats de l'étude géotechnique réalisée dans le cadre de la modernisation d'une partie du projet de la route nationale RN° 22. La diversité du sol dans la zone étudiée se manifeste à la fois par sa composition verticale et latérale variée. On y trouve principalement des argiles, des argiles limoneuses sableuses, des marnes, ainsi que des formations rocheuses telles que le grès, le calcaire récifal et la pyélite. Les caractéristiques géotechniques des sols en place sont fournies à partir des sondages effectués, et toute variation anormale de la nature du sol lors des travaux d'excavation devra être signalée au laboratoire.

IV. Chapitre 4 : Modélisation Multi-physique

IV.1 Introduction :

Ce chapitre se concentrera sur la modélisation et la simulation des sols, en tenant compte à la fois de leur comportement hydraulique et mécanique. Les sols sont des milieux poreux composés d'un squelette déformable et de fluides compressibles qui peuvent s'écouler à travers leur porosité. La présence d'eau, en particulier dans les sols fins, peut avoir un impact significatif sur leur comportement mécanique complexe. En 2008, Yves Berthaud et ses collègues ont souligné l'importance de prendre en considération le couplage hydromécanique, c'est-à-dire les interactions entre ces deux phénomènes.

IV.2 Position du problème :

La présence d'eau sur la route peut entraîner différents problèmes et dommages. En cas d'accumulation en surface, elle peut perturber la visibilité et la sécurité des conducteurs, tout en causant l'érosion des bas-côtés de la chaussée. Dans ce cas la question pose : « Quelles sont les mesures à prendre pour assurer l'évacuation de l'eau de la surface et du corps de chaussée ?»

Il traite également des actions à entreprendre pour garantir un bon drainage de l'eau et propose des recommandations importantes concernant la collecte et l'évacuation des eaux de surface, notamment celles provenant des abords des routes. La gestion de l'eau comprend trois aspects :

✚ *La canalisation d'eau*

✚ *Le débit*

✚ *Analyse d'eau*

Pour ce projet, ils ont opté pour l'utilisation du géotextile, un matériau qui permet de stabiliser le sol et de limiter la croissance de l'herbe, tout en restant perméable. Connue sous le nom de toile ou de feutre, le géotextile est un revêtement polyvalent capable de résister à la compression causée par le passage de véhicules lourds, ainsi qu'au poinçonnement, tout en conservant sa capacité à se déformer sans se déchirer.

V. ASSAINISSEMENTS		
V.4	Béton armé dosé à 350 KG/m3 pour les ouvrages courants (Regard de déssipation , calibrage des écoulements des eaux pluviales , regards de raccordement et autres)	M3
V.5	Béton armé dosé à 250 KG/m3 légèrement armé en treillis soudés (Cunnettes,canniveaux ,descentes d'eau de la plateforme et autres)	M3
V.6	Drainage des sources composé de graviers ,géotextile ,et tuyau PVC perforé de diamètre Ø200 mm	ML

Photo IV-1. Partie de cahier de charge précision de géotextile utilise (05 mai 2024 prise par la DTP Tlemcen)

La photo IV-1 montre une partie du cahier des charges précise l'utilisation du géotextile dans les travaux du projet à étudier.

IV.3 Logiciel Utilisé :

Le logiciel COMSOL Multiphysique est idéal pour mener des études grâce à son interface utilisateur complète et spécialisée dans différents domaines de la physique. COMSOL Multiphysique est un outil puissant et polyvalent pour la modélisation et la simulation dans différents domaines de la physique. Sa capacité à modéliser numériquement différentes structures et phénomènes physiques en fait un choix idéal pour notre projet de modélisation et de simulation du comportement d'une chaussée souple soumise à des charges mécaniques et hydrauliques.

IV.4 Etude hydromécanique :

Cette étude vise à vérifier la stabilité de la structure de la chaussée et à calculer le coefficient de sécurité.

Chapitre 4 :Modélisation Multiphysique

La modélisation de ce processus se fera en trois études :

❖ 1^{ère} étude :

Il s'agit d'une étude hydraulique qui utilise la loi de Darcy pour évaluer les pressions interstitielles générées par l'écoulement de l'eau à travers les matériaux poreux.

❖ 2^{ème} étude :

En se concentrant sur la partie mécanique, il est nécessaire de calculer les contraintes résultantes en intégrant la loi de Darcy avec les charges exercées sur la chaussée.

❖ 3^{ème} étude :

Les contraintes initiales identifiées dans l'étude 2 résultent de l'interaction hydromécanique provoquant une collision entre la structure et le liquide en surface. Ensuite, ces contraintes sont comparées aux contraintes interstitielles.

IV.5 Construction du modèle numérique sous Comsol

IV.5.1 Espace de la modélisation :

La modélisation sera réalisée en 2D de manière non symétrique (Voir la figure IV-1).

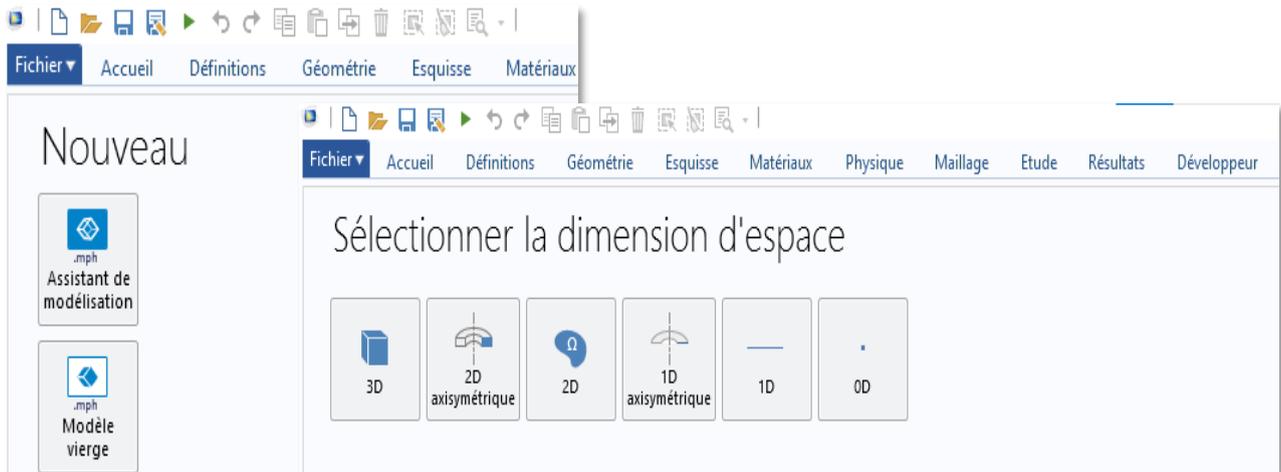


Figure IV-1. Barres de menu de l'espace de modélisation

Le profil à modéliser est un profil en travers de la chaussée souple, (voir la figure IV-2)

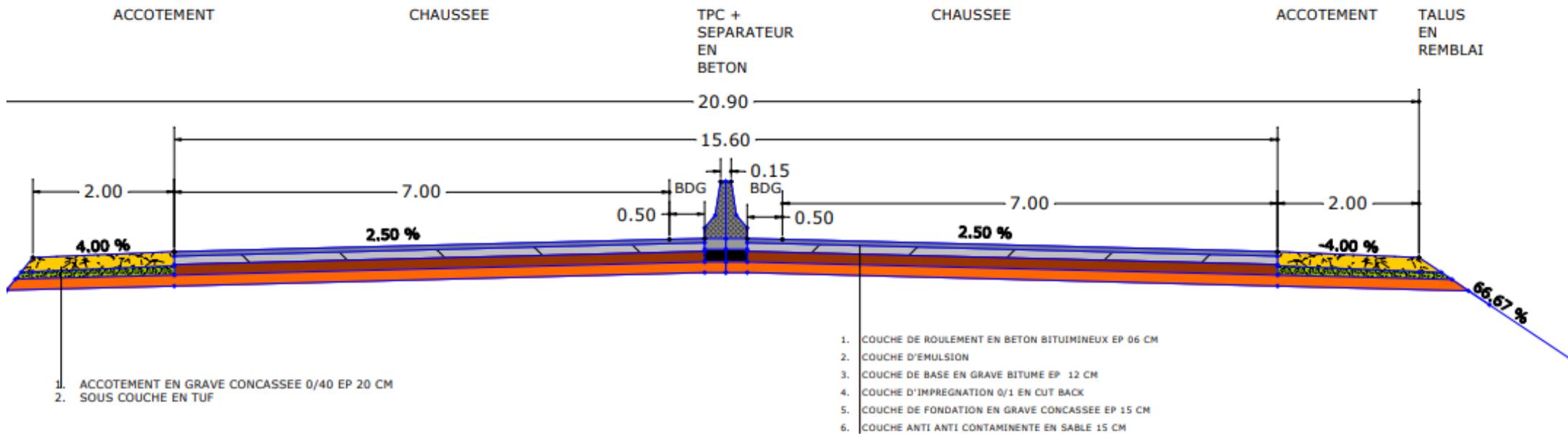


Figure IV-2. Profil en travers du cas étudié

Chapitre 4 : Modélisation Multiphysique

IV.5.2 Choix des physiques :

Les deux physiques à étudier sont ajoutées à la liste des physiques pour notre cas (Loi de Darcy et mécanique des solides),(Voir figure IV-4)

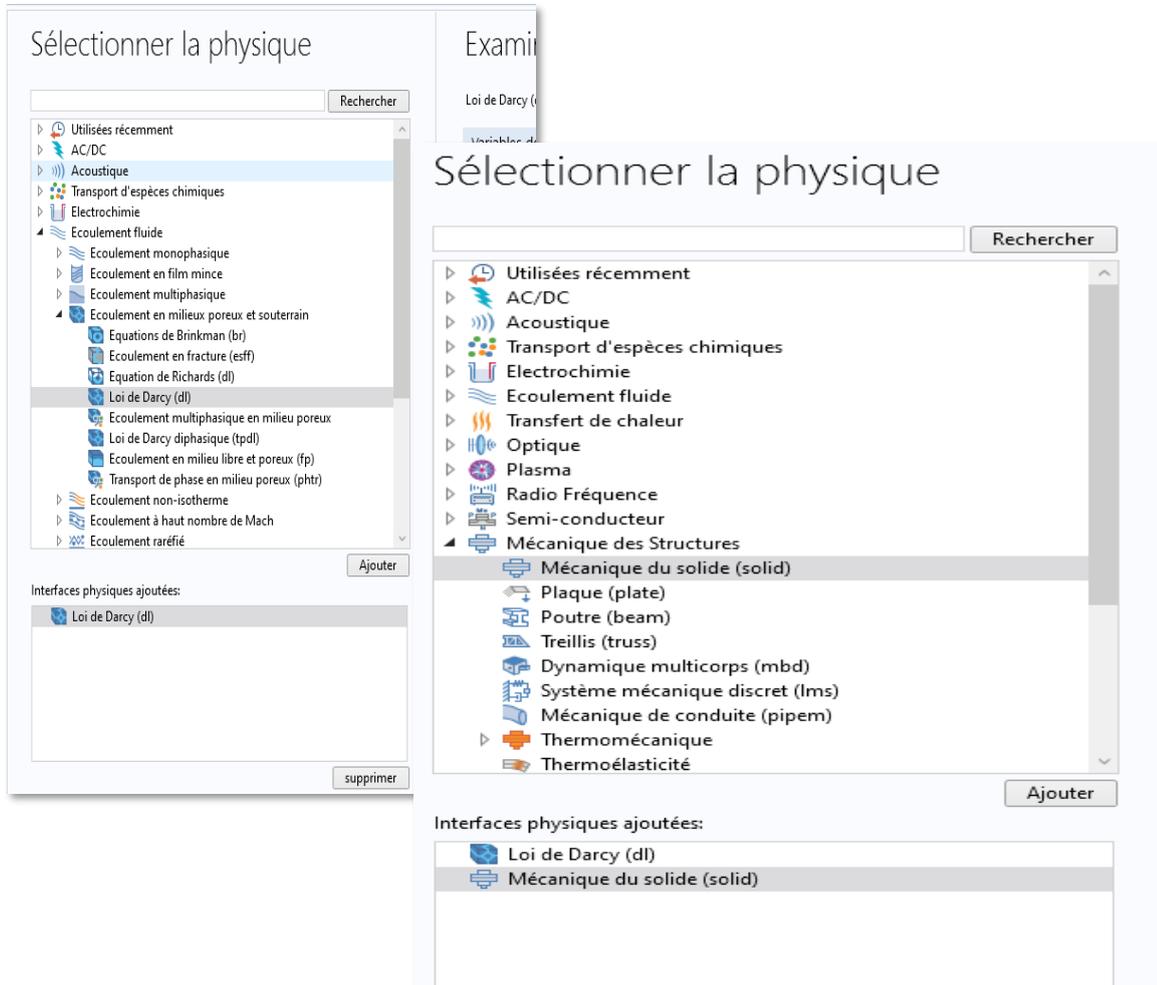


Figure IV-3. La liste des physiques

IV.6 Illustration de la structure et de l'application des matériaux sur le Consol :

IV.6.1 Géométrie :

La construction de la géométrie dans notre cas on a utilisés quelques outils des polygones, le point, Ensuite l'union des polygones à partir leurs cordonnées. (Voir la figure IV-5 et la figure IV-6).

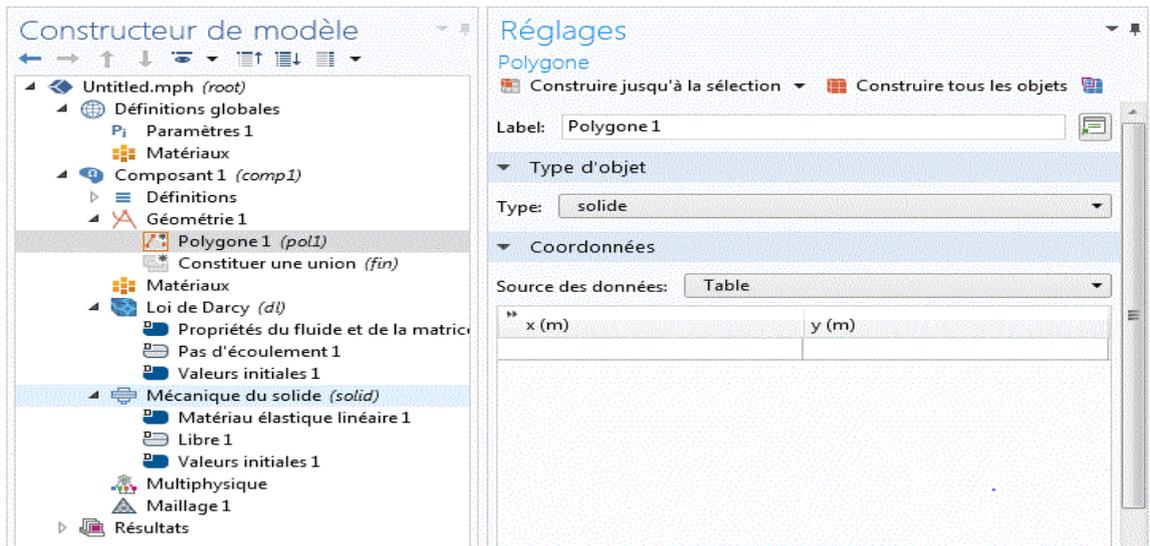


Figure IV-4. Les réglages des polygones

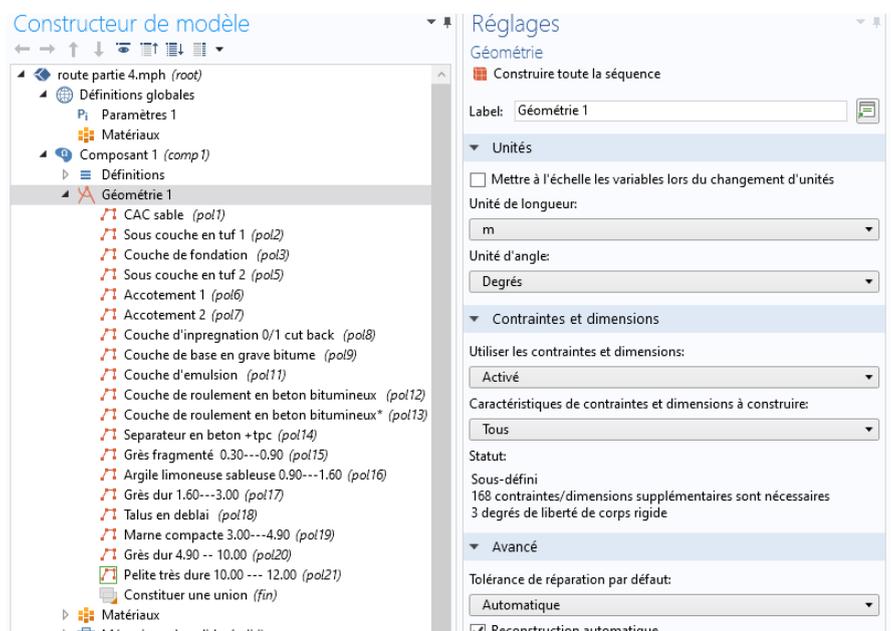


Figure IV-5. Fenêtre afficher la géométrie des différentes couches

Finalement la résultante de la géométrie était la création à partir des domaines et les frontières (Voir la figure IV-7).

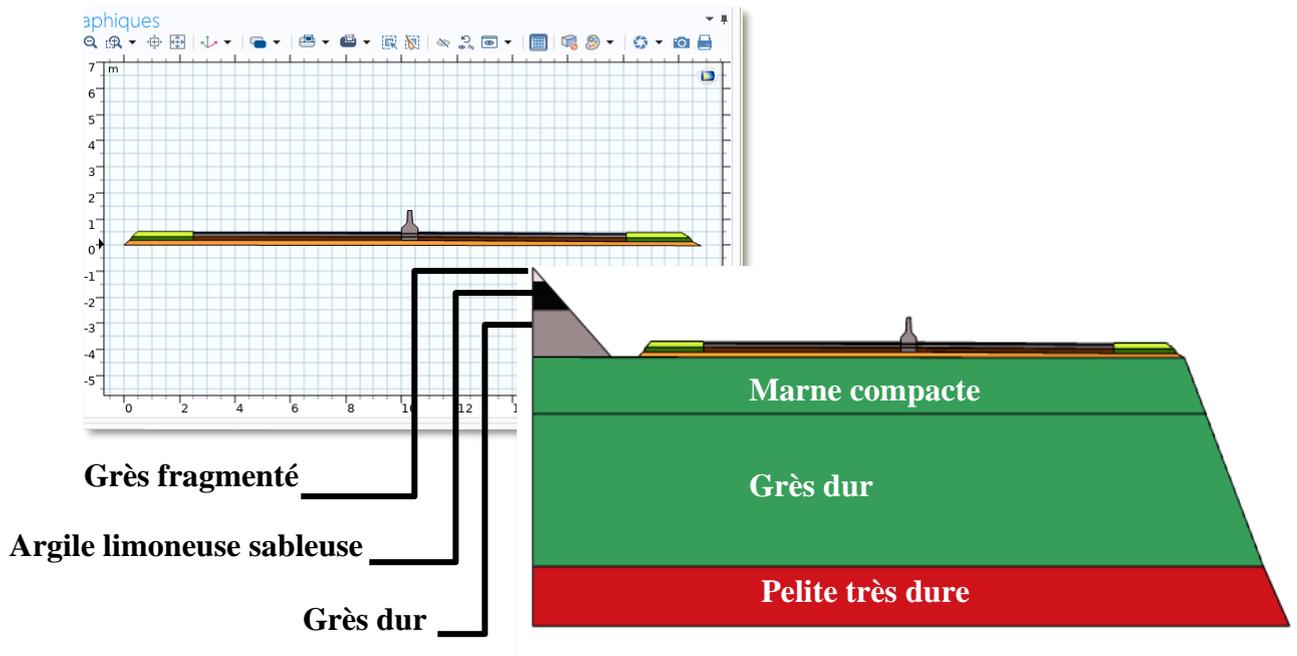


Figure IV-6. Le modèle final appliqué

IV.6.2 Attribution des matériaux :

Nous avons choisi d'utiliser des matériaux vierges pour introduire manuellement les propriétés spécifiques de nos matériaux dans chaque domaine (chaque couche)., (Voir figure IV-8).

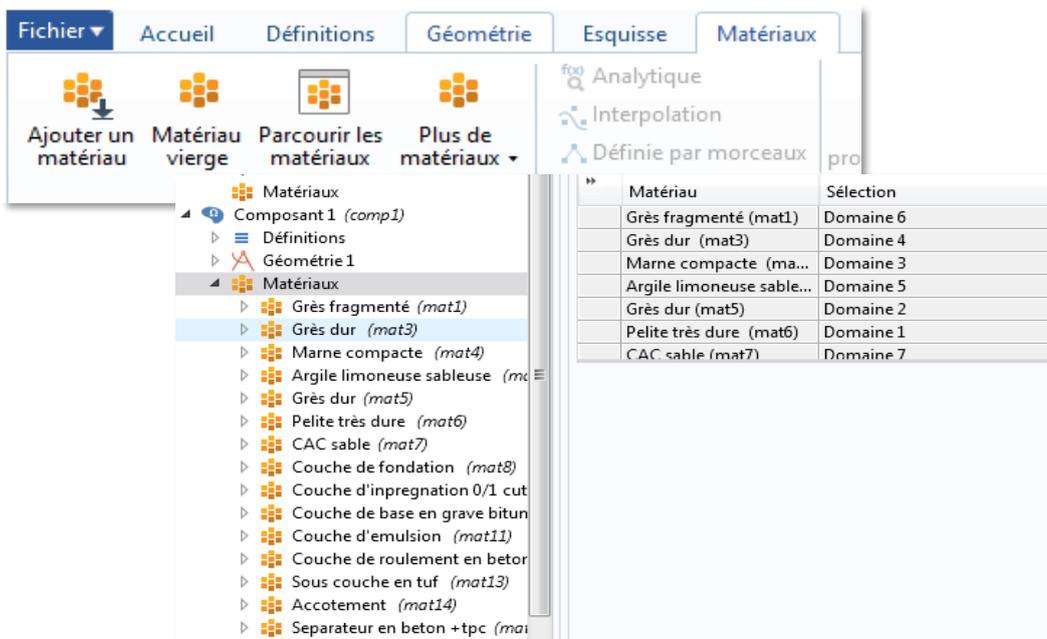


Figure IV-7. La fenêtre des matériaux

Chapitre 4 : Modélisation Multiphysique

Pour chaque matériau on donne un nom identifiant et de choisir les domaines pour tous les matériaux (Voir figure IV-9).

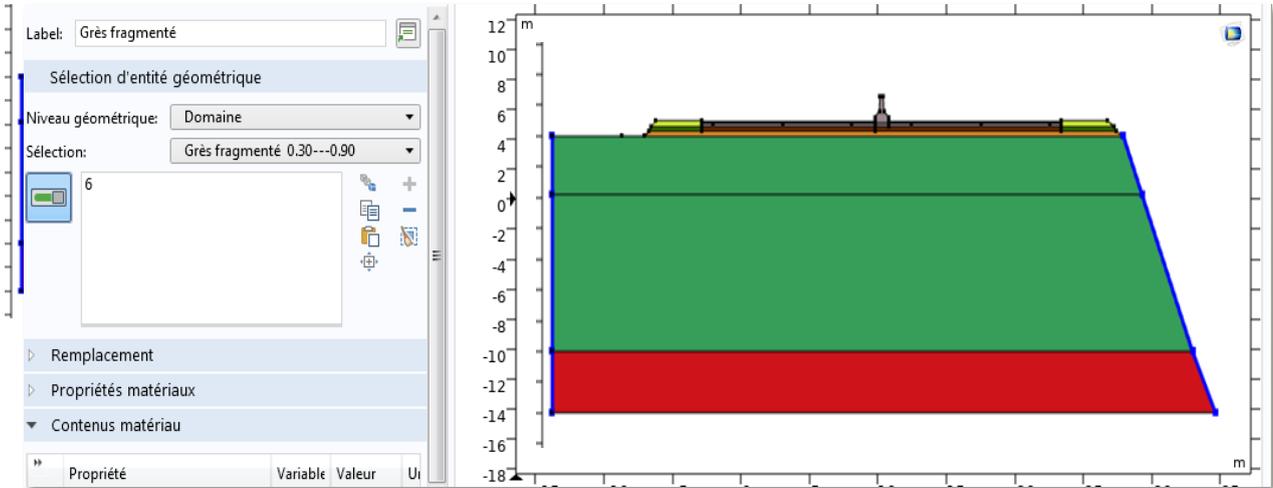


Figure IV-8. Affection des matériaux sur les domaines

Ensuite, les paramètres géotechniques de tous les matériaux sont introduits successivement (Voir figure IV-10).

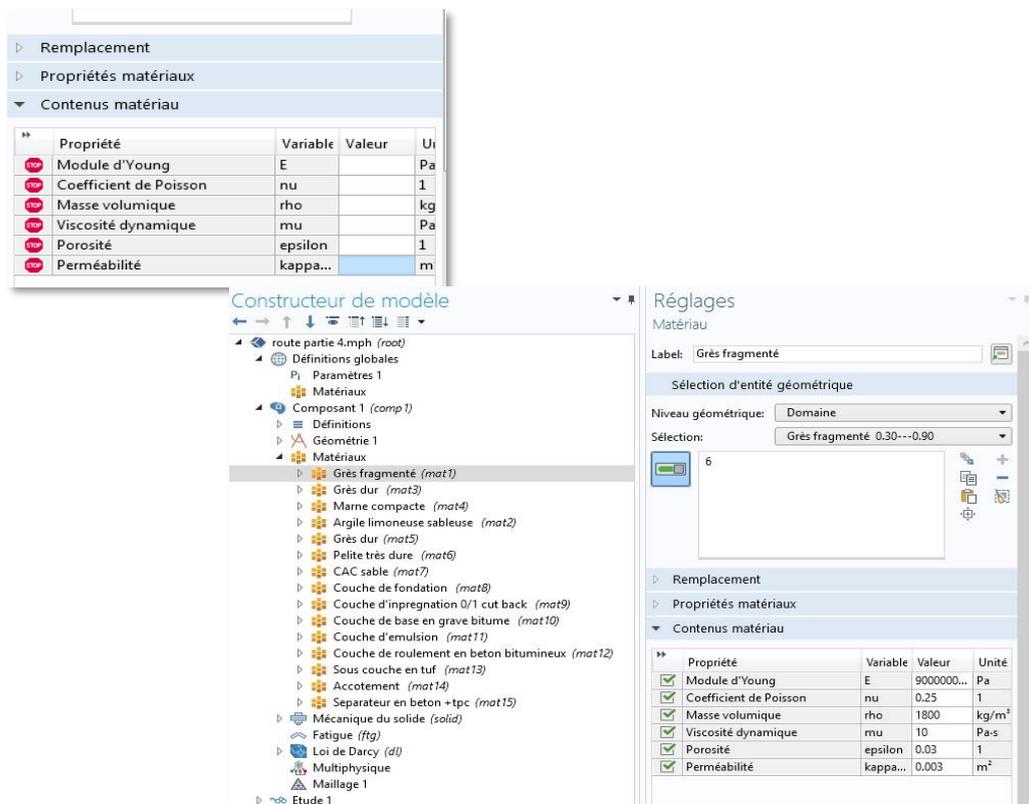


Figure IV-9. Fenêtre de Tableau des paramètres des matériaux

On continue à répéter la même opération jusqu'à ce que tous les matériaux soient identifiés.

IV.7 Application de la loi de Darcy :

IV.7.1 Configuration de la physique :

D'abord en cliquant sur la loi de Darcy (Voir figure IV-11), On commence par sélectionner les domaines liés à la physique, en incluant le poids et en définissant la pression comme variable. Ensuite, on passe au réglage des propriétés du fluide (eau).

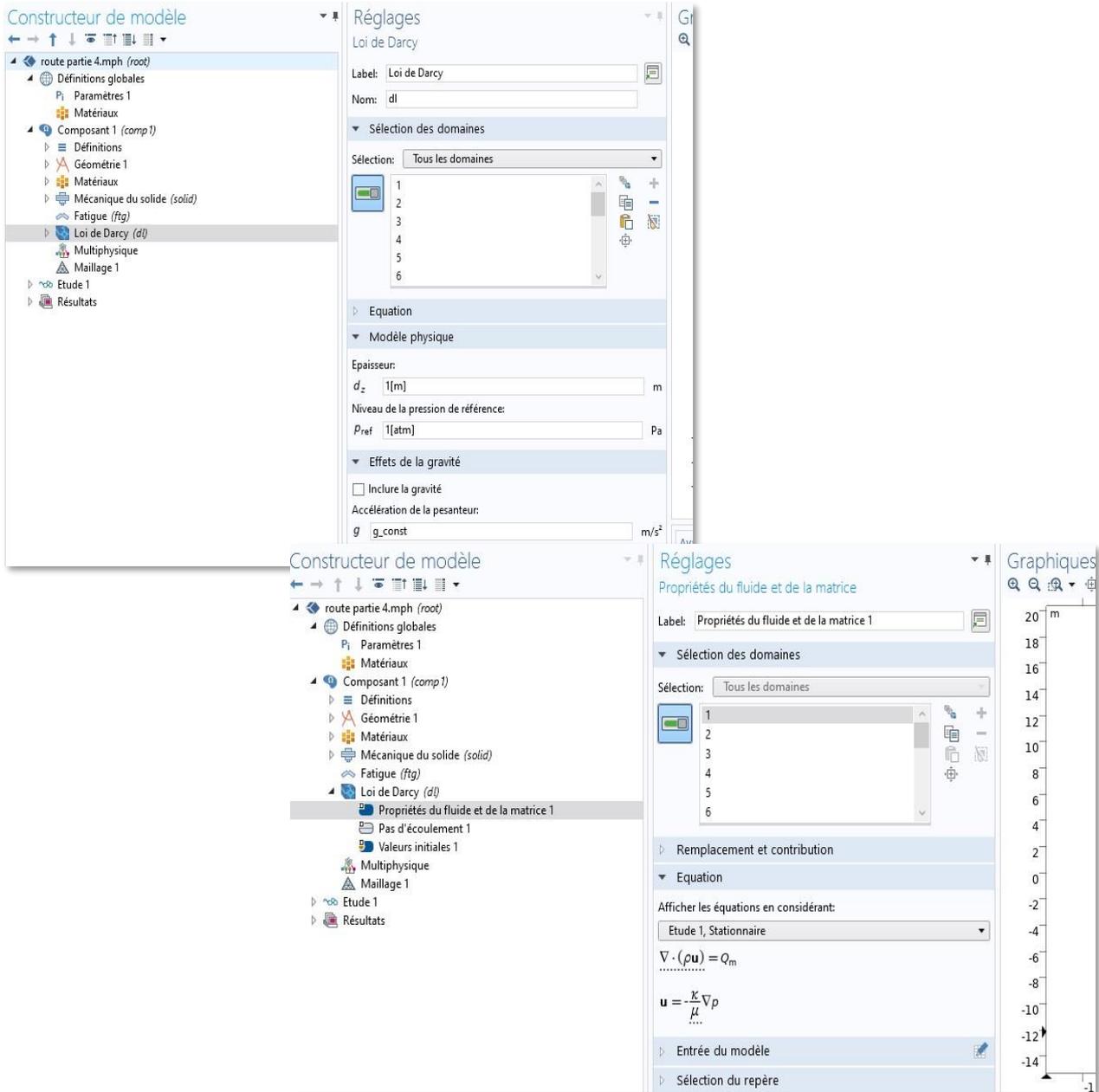


Figure IV-10. Réglage de loi de Darcy

IV.7.2 Valeurs initiales :

Pour saisir les valeurs initiales de la charge hydraulique (pression), il suffit de cliquer sur le titre. Une fenêtre apparaîtra ensuite, il est possible de faire entrer les valeurs suivantes :

- Charge hydraulique 1 : la rentrée d'eau
- Charge hydraulique 2 : sortie d'eau (voir figure IV-12).

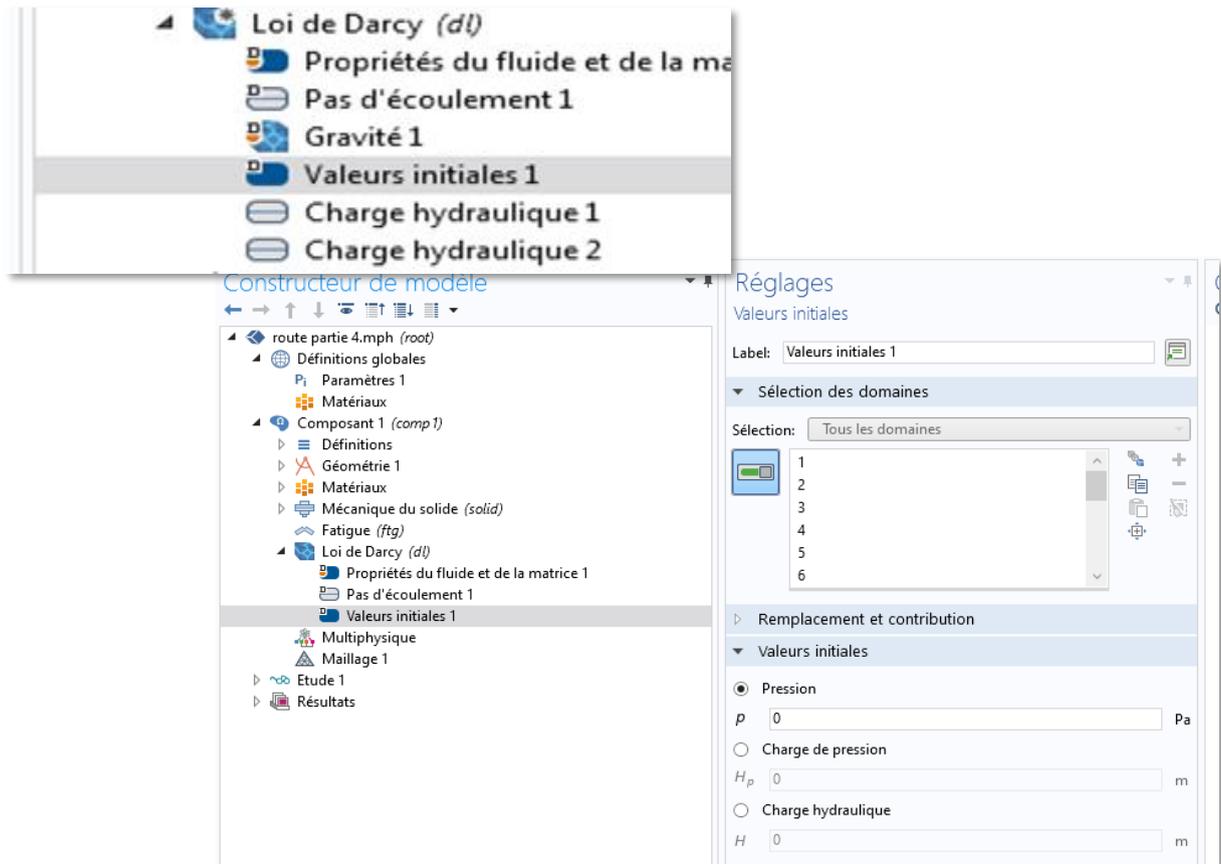


Figure IV-11. Les réglages des valeurs initiales

IV.7.3 Chargements :

Chargement en pression :

L'application des pressions sur les frontières se fait manuellement par la ligne de saturation. (Voir figure IV-13).

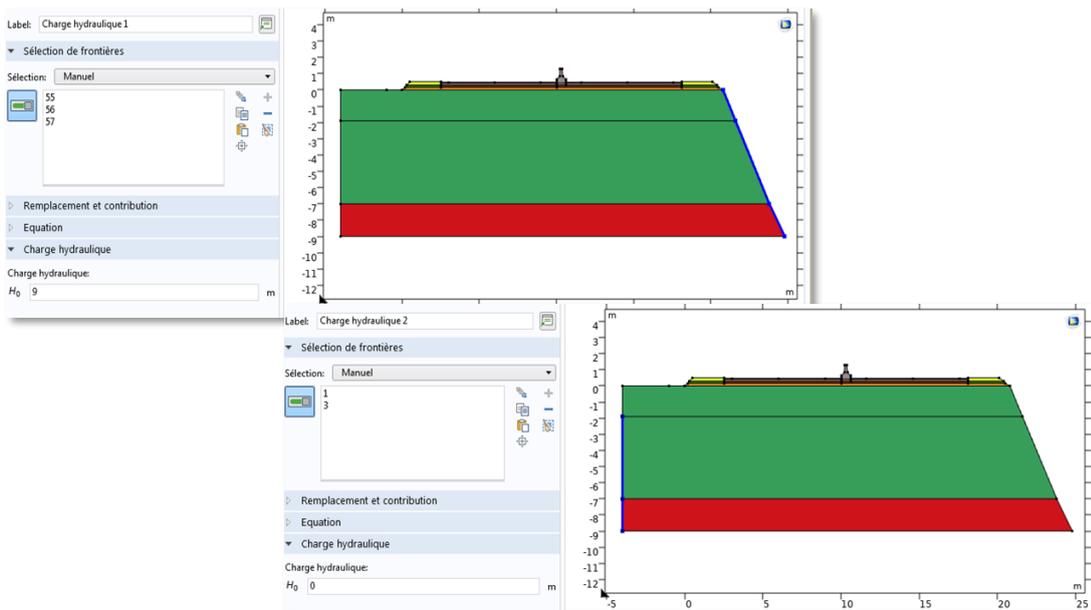


Figure IV-12. Affichage du chargement sur frontières

IV.7.4 Configuration de la physique :

En cliquant sur mécanique des solides, On commence par sélectionner les domaines liés à la physique (Voir la figure IV-14).

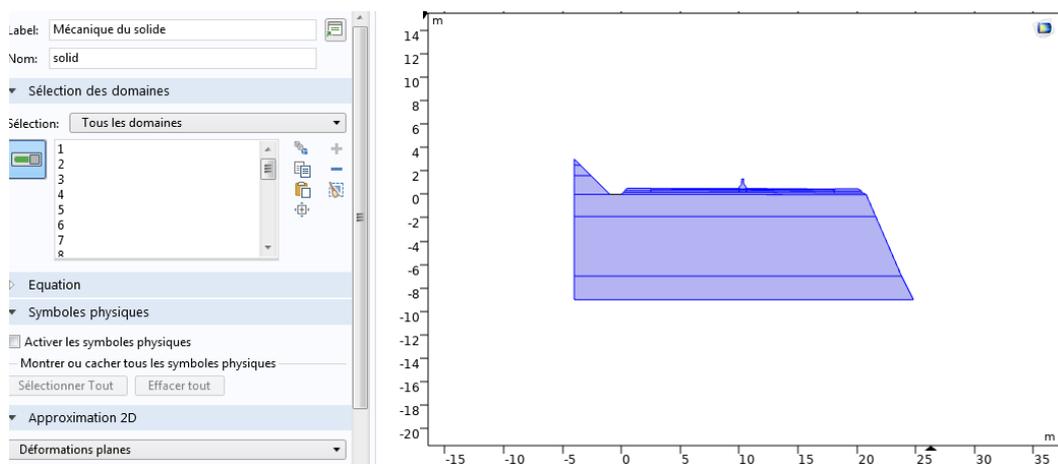


Figure IV-13. Les domaines de la physique

La figure IV-15 indiquant les parties libres qui sont dans la chaussée qui ne sont pas chargées.

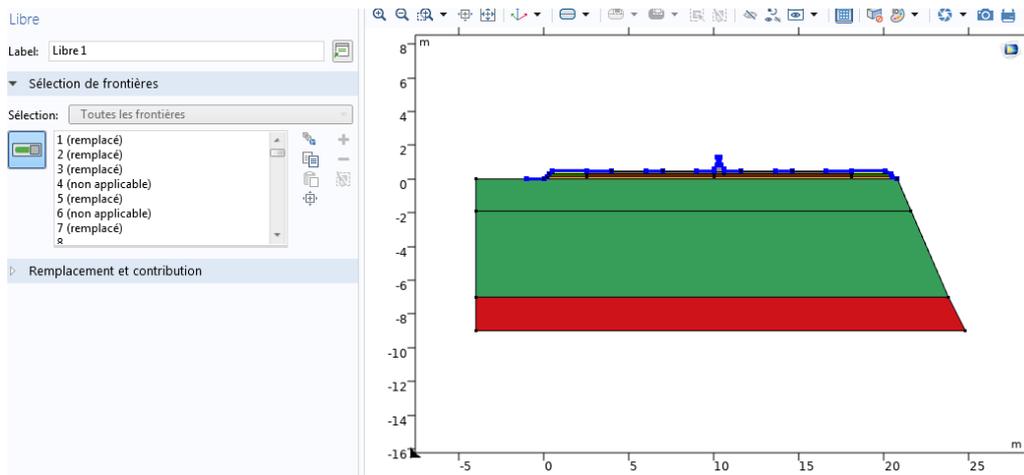


Figure IV-14. Les parties libres de la chaussée qui ne sont pas obstruées.

IV.7.5 Valeurs initiales :

En mettant la valeur des déplacements et aussi le champ de vitesse dans notre cas sont nuls (Voir la figure IV-16).

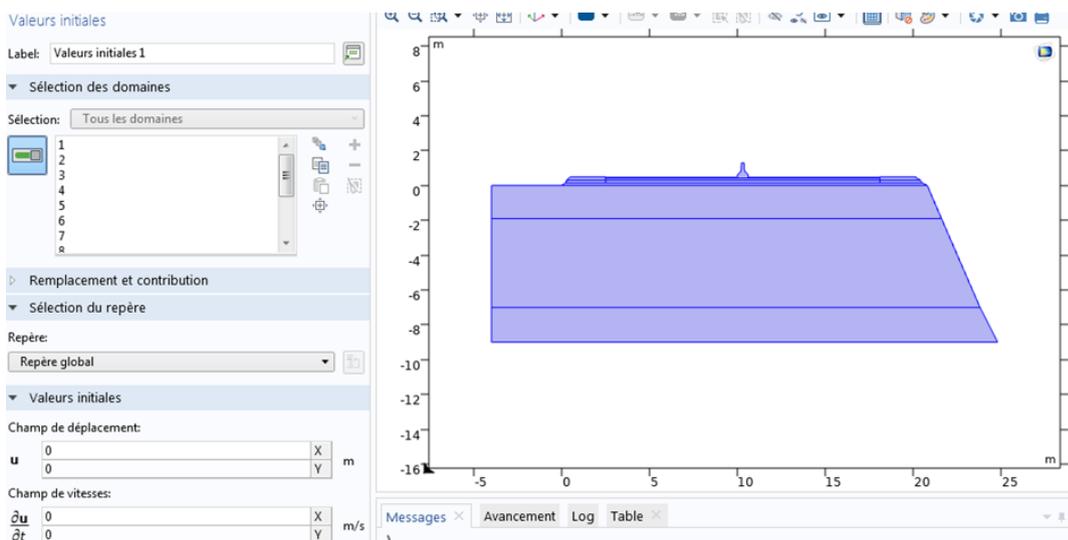


Figure IV-15. La valeur des mouvements et des vitesses nulles

IV.7.6 Chargements :

En définie les charges premièrement la charge du talus c à dire une pression après le chargement du convoi système tandem Bt (Voir la figure IV-17).

Chapitre 4 : Modélisation Multiphysique

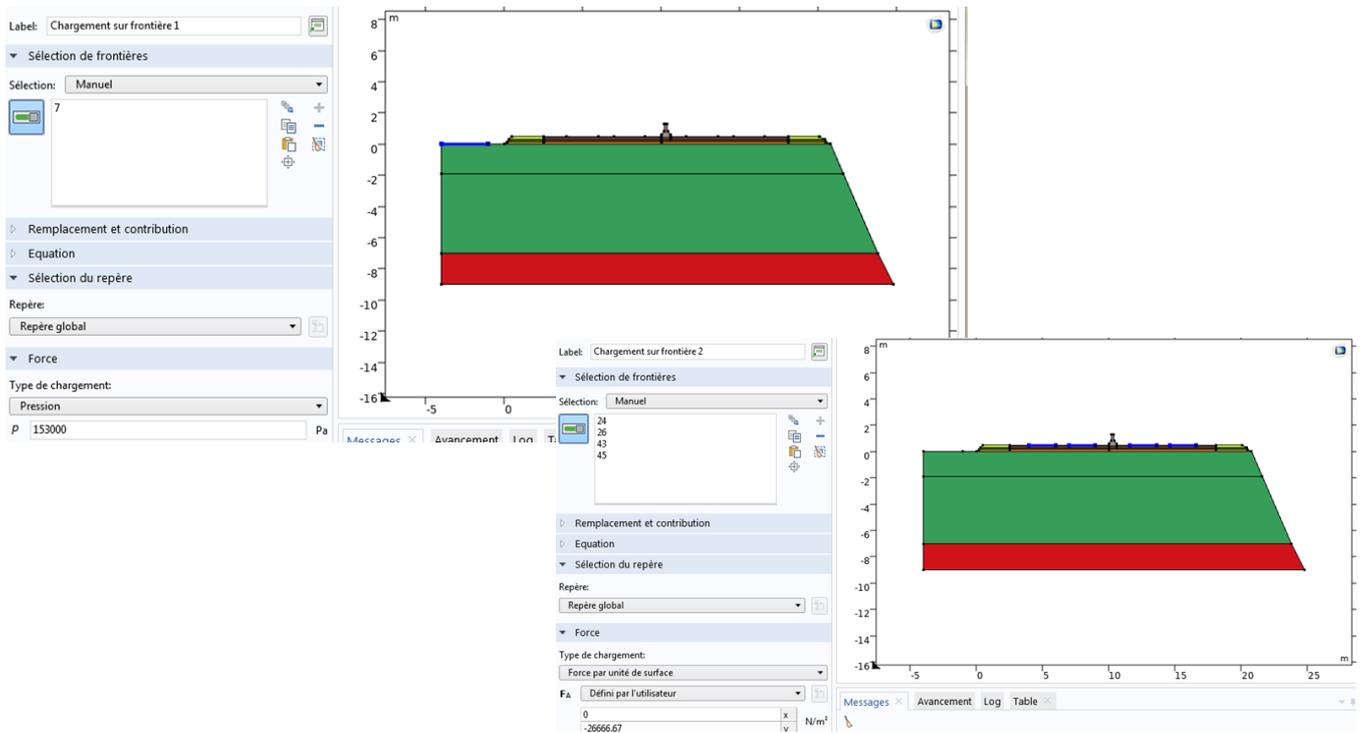


Figure IV-16. La charge du talus et le chargement du convoi système tandem Bt

IV.8 Maillage :

Pour sélectionner le type de maillage et la taille des mailles, il suffit de cliquer sur l'icône "maillage" dans la barre de menu de consol (Voir figure IV-18).

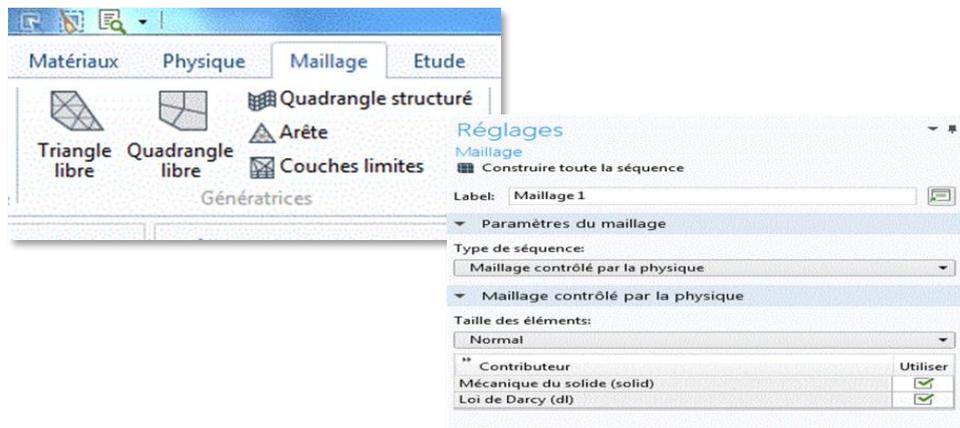


Figure IV-17. Réglages du maillage

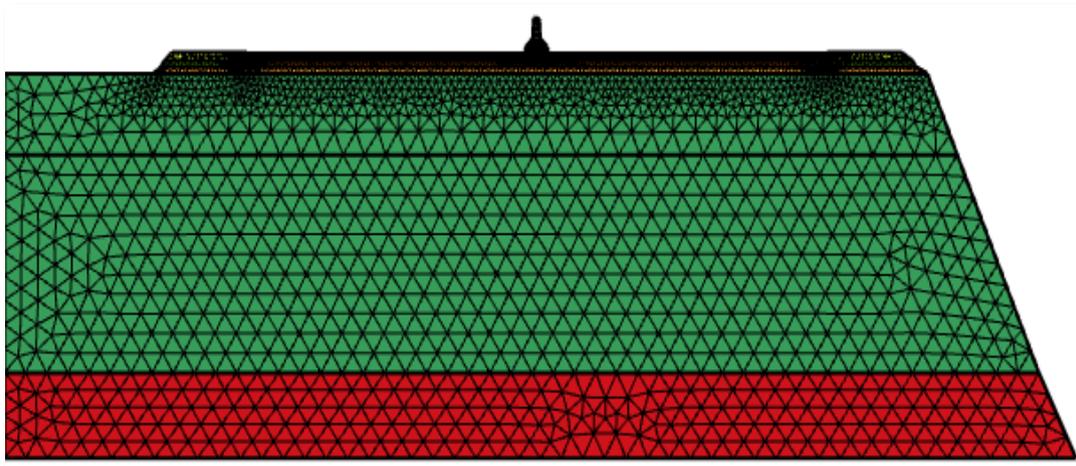


Figure IV-18. Affichage du maillage

La figure IV-19 montre le maillage complet de la structure avec ces éléments suivants :

- ✚ Triangle :5104 éléments.
- ✚ Eléments d'arêtes : 1077 éléments.
- ✚ Eléments ponctuels : 47 éléments.

IV.8.1 Configuration de l'analyse hydraulique (utilisation de la loi de Darcy) :

Pour ajouter une nouvelle étude stationnaire nommée "Loi de Darcy" dans comsol, il suffit de sélectionner l'icône d'étude dans la barre de menu comme il est montré dans (figure IV-20; IV-21).

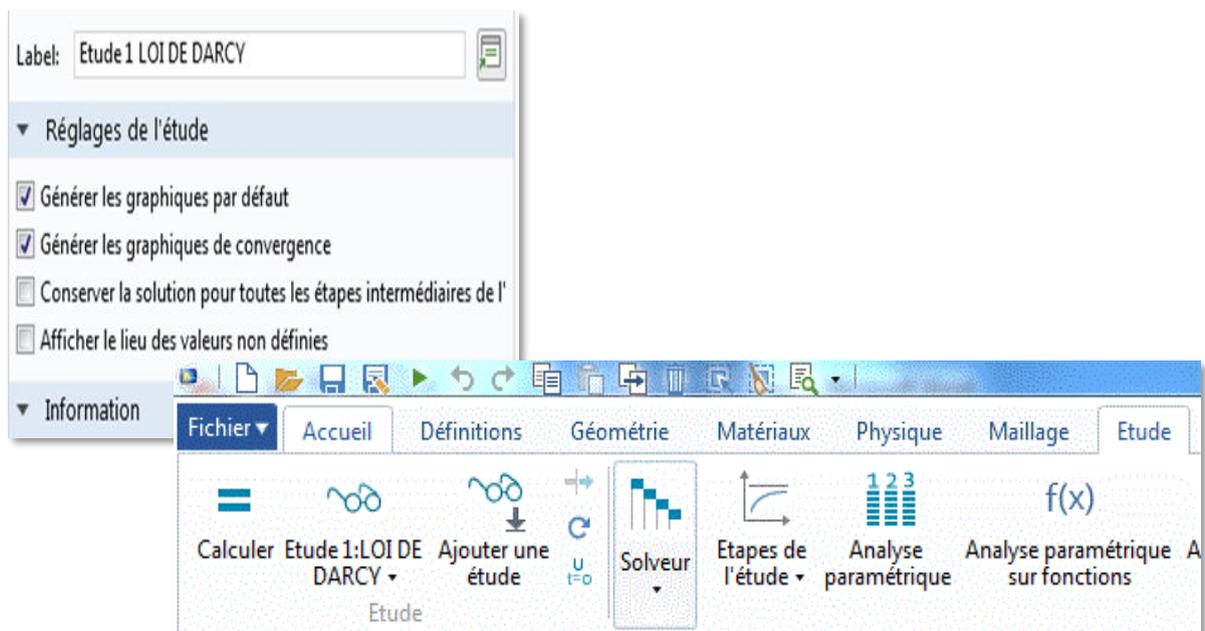


Figure IV-19. La Barre d'outils d'étude sur Comsol

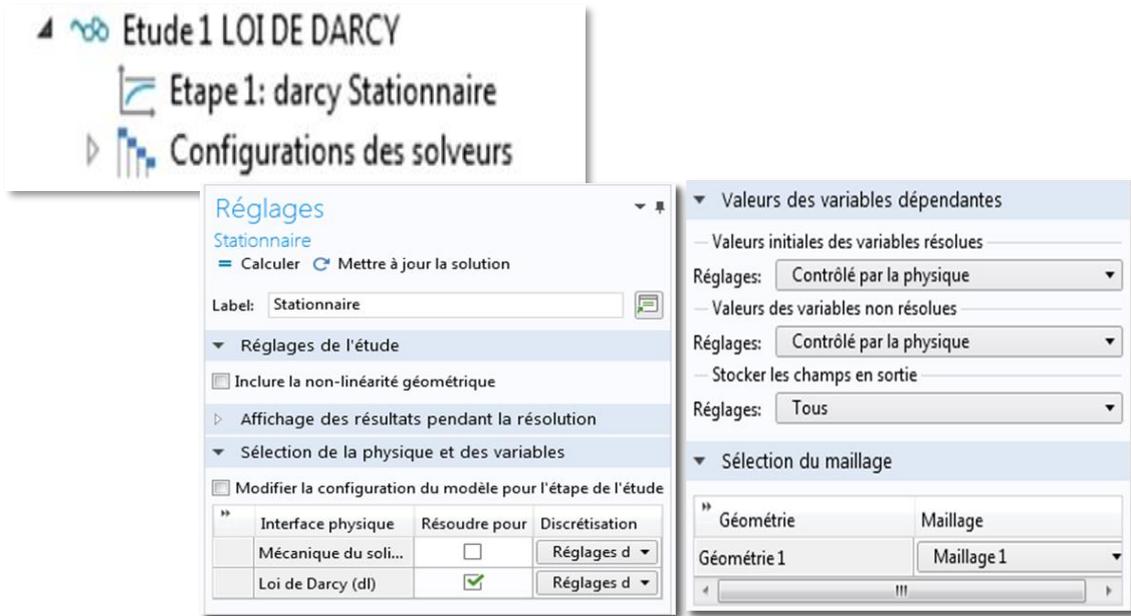


Figure IV-20. Les réglages de l'étude stationnaire

IV.9 Modélisation de la seconde étape (hydromécanique en élasticité) :

IV.9.1 Configuration des lois physiques :

Si vous cliquez sur le bouton "matériau élastique", vous accéderez à la fenêtre de paramétrage des matériaux où vous pourrez sélectionner les paramètres appropriés (Voir figure IV-22).

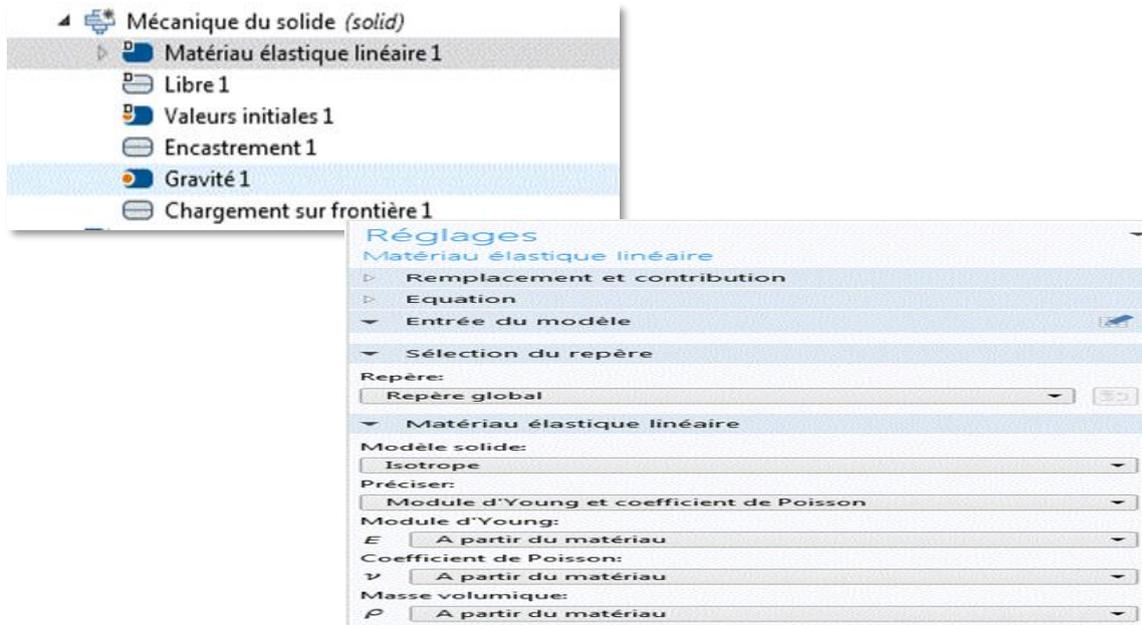


Figure IV-21. Les réglages des matériaux élastiques

IV.9.2 Les chargements :

IV.9.2.1 Les pressions interstitielles externes sont dues à des facteurs externes :

Pour accéder aux contraintes interstitielles, il suffit de cliquer sur "Attributs" dans la barre de menu de consol (Voir figure IV-23).

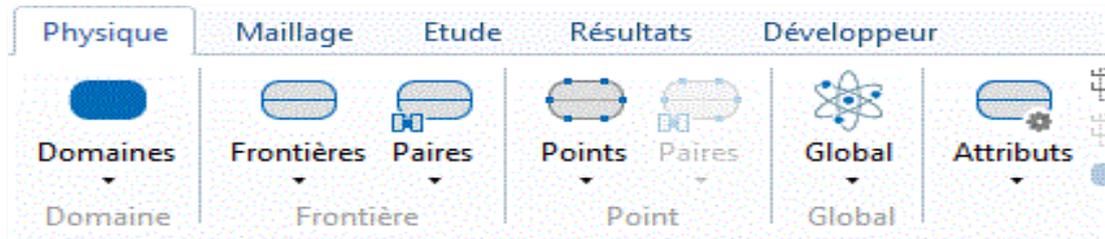


Figure IV-22. Barre des réglages des matériaux élastiques (mécanique)

IV.9.3 Chargement en pression sur frontières :

La figure IV-24. Montré La pression est appliquée sur les frontières de contact avec l'eau.



Figure IV-23. Les chargements sur frontières (mécanique)

Chapitre 4 : Modélisation Multiphysique

IV.9.4 Conditions aux limites :

Un encastrement est fixé sur la partie inférieure du sol et des appuis pour les extrémités (Voir figure IV-25).

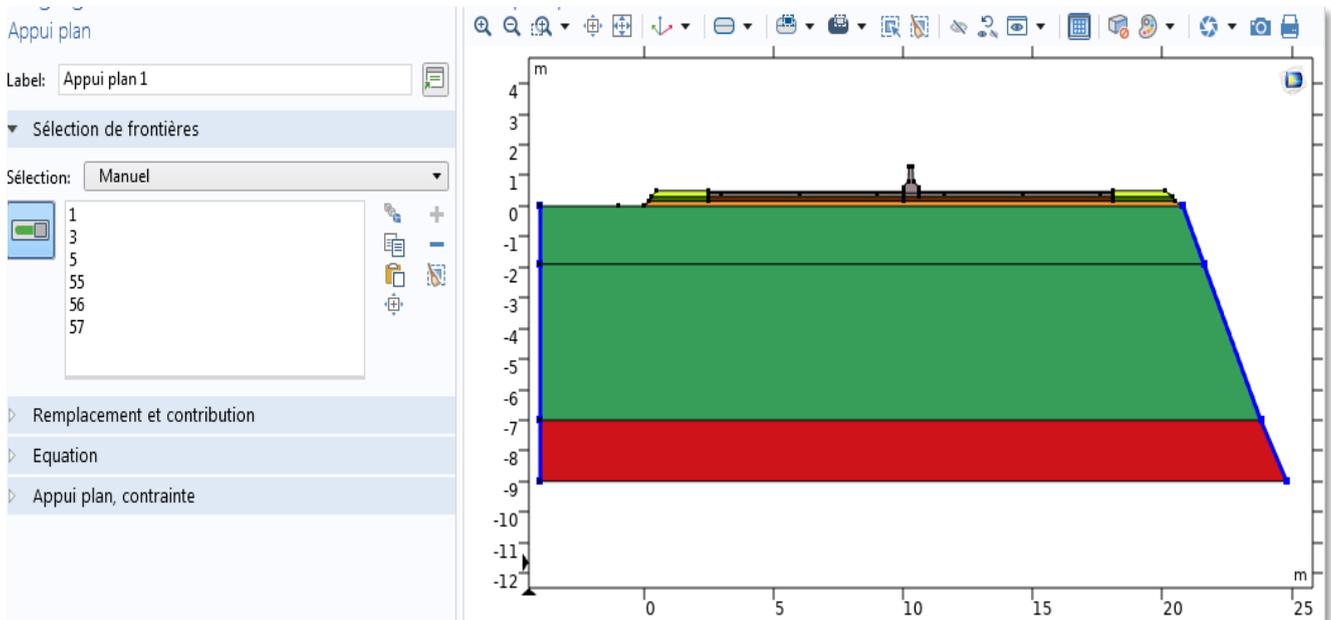


Figure IV-24. Fenêtre de l'encastrement, Appui sur la chaussée

IV.10 Conclusion :

Ce chapitre a exposé en détail l'ensemble des éléments nécessaire à aboutir à un modèle physique réel représentant la chaussée en cohérence avec le chapitre 3, c'est-à-dire géométrie, données physiques, mécanique et hydrique. Nous avons choisi trois situations différentes pour une meilleure étude de faisabilité et de réalisation. L'ingénieur est confronté à un problème de choix en fonction des contraintes et des exigences en relation avec le terrain, le budget et les aspects techniques de circulation.

Le chapitre suivant montre les résultats de ces différentes variantes y compris l'analyse et l'interprétation.

***V. Chapitre 5 : Dépouillement et
interprétation des résultats***

V.1 Introduction :

Ce chapitre est le fruit des chapitres précédents, les données brutes se métamorphosent en informations pertinentes et utile à la pratique de l'ingénieur. Nous avons essayé de faire une présentation graphique des contraintes et déformation nécessaires à la justification par la suite de la chaussée selon la réglementation en vigueur. Dans ce chapitre, nous examinerons les résultats et faisons une tentative d'interprétation.

V.2 Etude 01 (hydraulique) :

En se basant sur la loi de Darcy mentionnée dans le chapitre 4, cette analyse a utilisé un rapport géotechnique pour extraire les informations nécessaires, comme les paramètres de la solution exacte et les données d'entrée du tableau des matériaux du chapitre précédent. Les résultats obtenus ont permis de visualiser la distribution de la pression interstitielle tel que présenté dans la figure V-1.

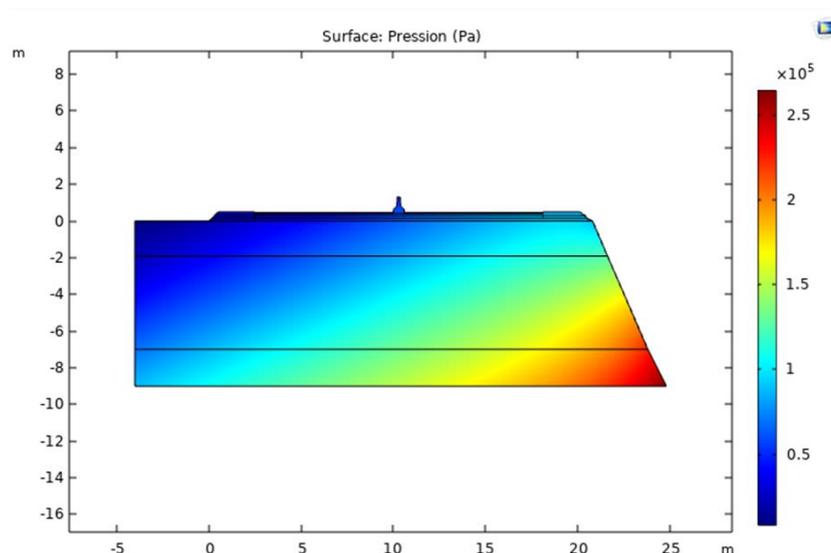


Figure V-1. La répartition des pressions interstitielles sur les différents éléments de la structure

À partir de la figure qui illustre la répartition des pressions interstitielles sur les différents éléments de la structure, on observe clairement que la pression est significativement plus élevée sur le coin droit bas du profile en travers, ce qui est en concordance avec les conditions aux limites initialement choisies La pression maximale atteint $2,5.10^5$ Pa.

Chapitre 5 : Dépouillement et interprétation des résultats

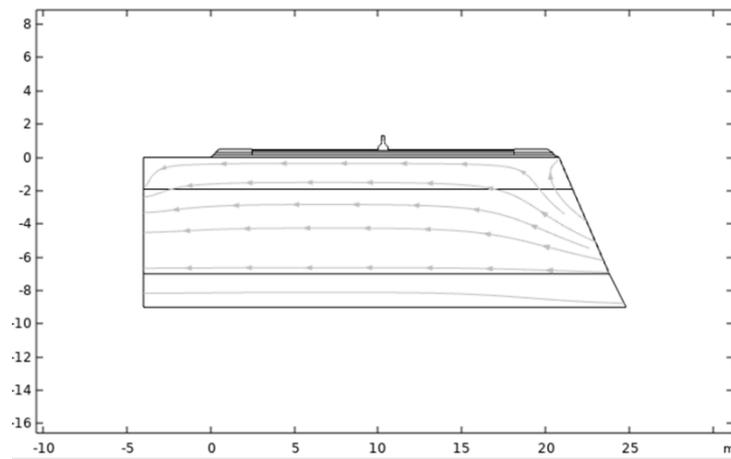


Figure V-2. Champ de vitesse de Darcy (référentiels matériau et géométrique)

La figure V-2 Montre le réseau des vitesses d'écoulement qui montre que l'eau se déplace de droite à gauche ou la dépression est plus faible c'est-à-dire le suintement s'effectue dans ce sens ce qui donne à l'ingénieur une idée sur le système de drainage a adapté. Il est clair que la conception de système de draine nécessite une connaissance aussi des pressions interstitielles induites de la figure V-1.

V.3 Etude 02 (Mécanique) :

V.3.1 5.3.1 Les chargements appliqués (solide) :

La figure V-3. Montre deux types de chargements ont été appliqués sur la chaussée. Sur le côté gauche de la chaussée, il y a un talus exerçant une pression de $1.53 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$. Sur la voie de la chaussée, un convoi de tandem Bt exerce une pression de $2.67 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2$. Ces chargements peuvent avoir un impact sur la stabilité et la résistance de la chaussée, et doivent être pris en compte lors de la conception et de la construction de la chaussée.

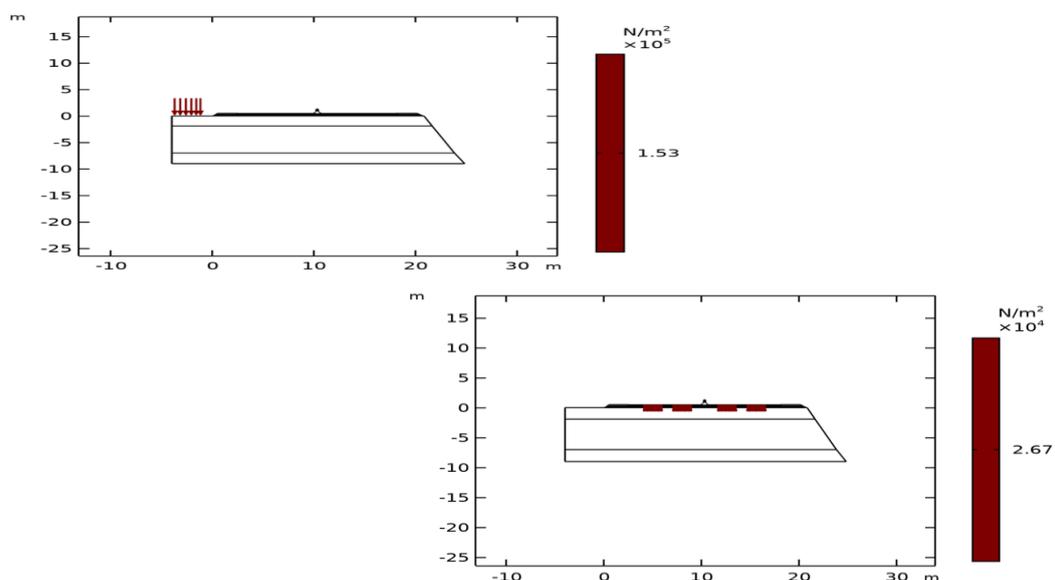


Figure V-3. Les chargements appliqués sur la chaussée

V.3.2 Les déformations :

La figure V-4 est une présentation des déformations sous les charges des poids des éléments constitutifs sur la structure. Les déformations sont plus au moins fortes en fondation à gauche et au noyau de chaussée dont la valeur maximale est de 9×10^{-5} .

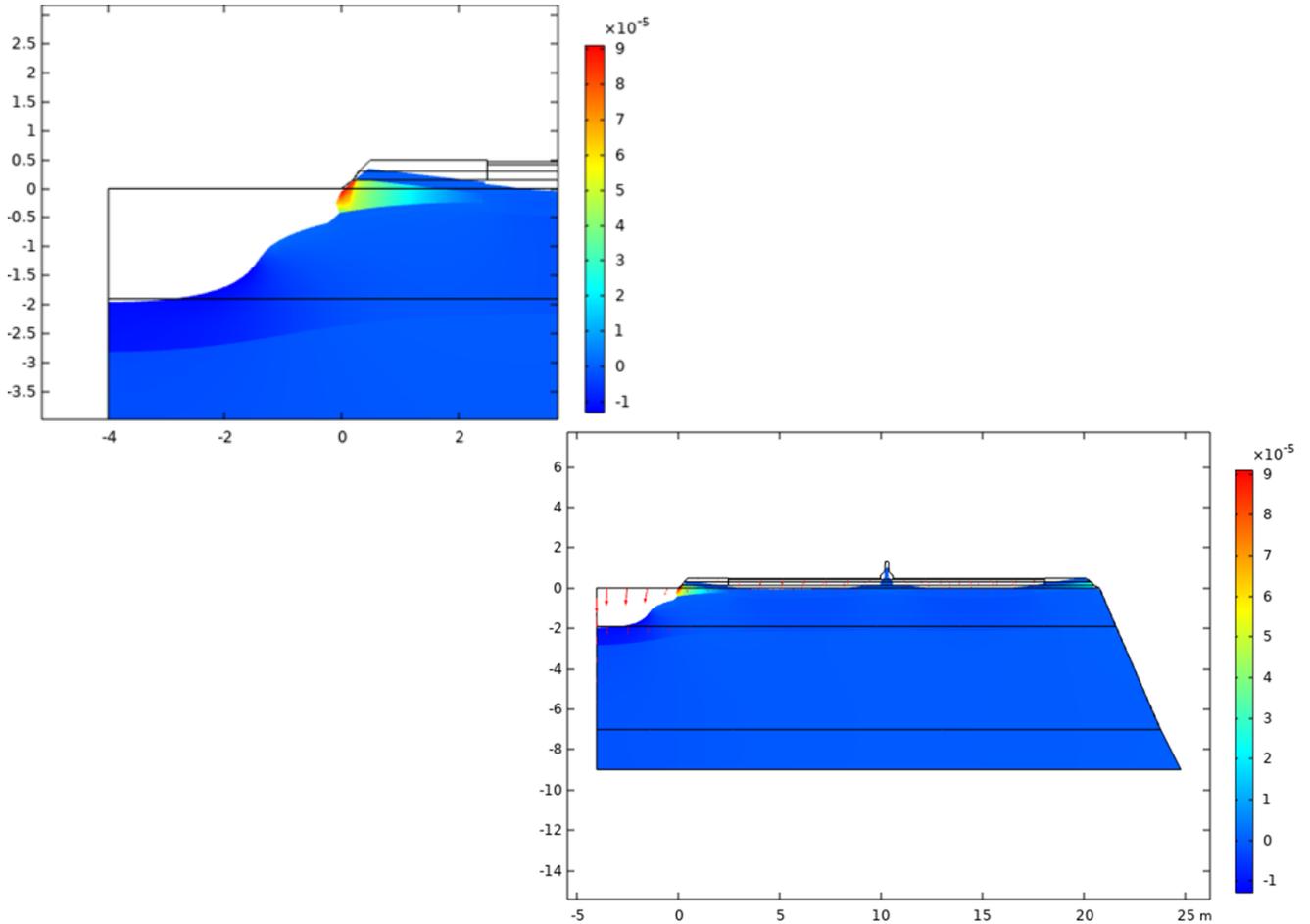


Figure V-4. Les déformations de la structure sous l'effet des charges des éléments constitutifs

V.3.3 Les déplacements :

La figure V-5 affiche la partie la plus déformée celle de la partie supérieure de sol dont le déplacement est estimé à 30×10^{-6} m.

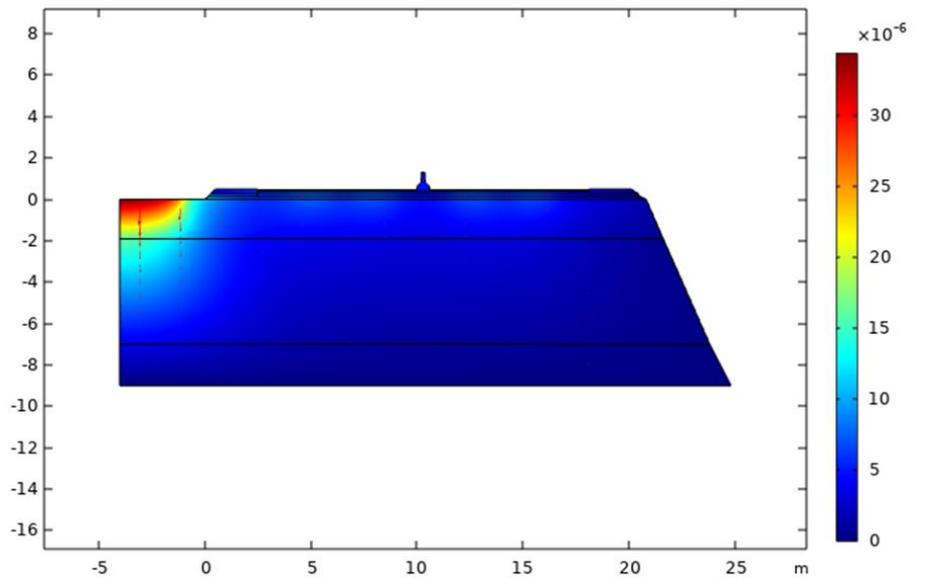


Figure V-5. Déplacement total (m)

V.4 Etude 03 (Hydromécanique) :

V.4.1 Les déformations :

Les analyses couplées de la mécanique des sols sont considérées comme l'élément le plus essentiel pour comprendre le comportement du sol. Elles permettent de faire le lien entre les changements de déformation et de contrainte avec les variations des contraintes et de pression du fluide en utilisant les équations de Biot.

La figure suivante montre déformation du système couplée dont une valeur maximale $40 \cdot 10^{-9}$.

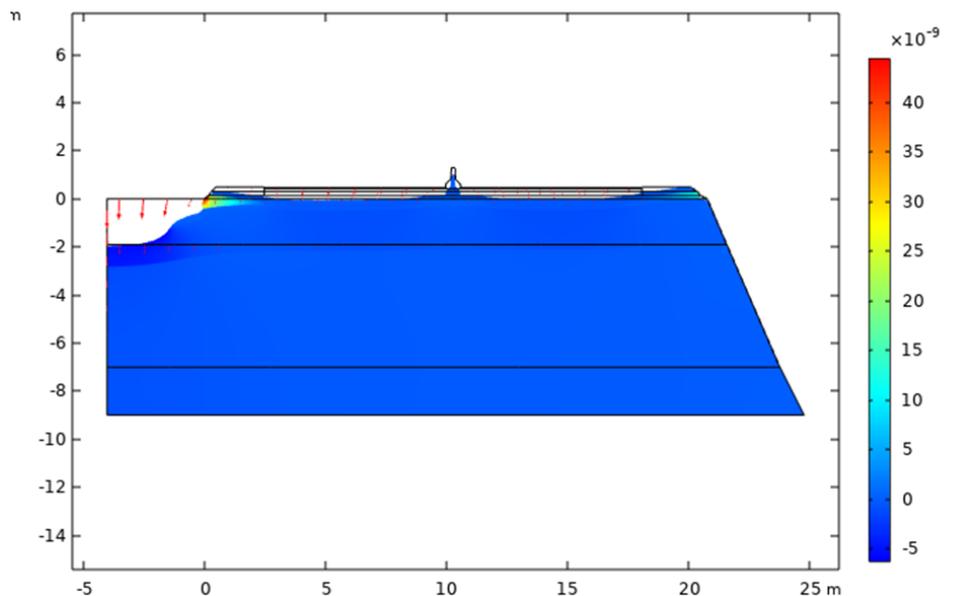


Figure V-6. Déformation du système couplée

V.4.2 Les pressions :

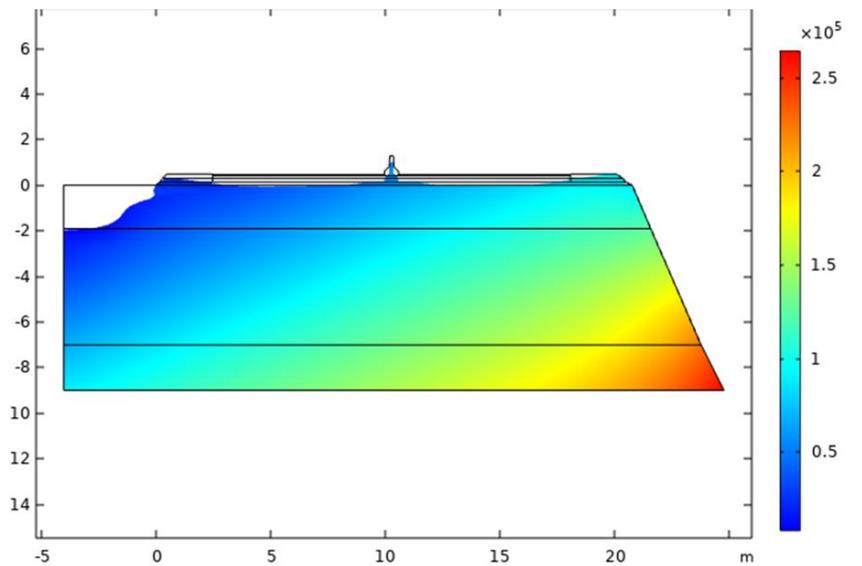


Figure V-7. Pression interstitielle distribution avec couplage HM

La figure V-7 Montre que Lorsqu'on se trouve dans un état stationnaire, on peut observer comment la pression du fluide affecte notre comportement. En effet, la pression interstitielle de l'eau dans le sol du modèle HM diminue par rapport à la pression du modèle hydraulique.

V.5 Comparaison de couplage HM :

La principale différence entre les deux approches réside dans le fait qu'un changement de pression interstitielle dans l'eau causé par la déformation du sol (c'est-à-dire un changement de volume du sol) n'est pas pris en compte dans l'analyse découplée.

Plusieurs chercheurs ont tenté d'évaluer les avantages de l'utilisation du comportement couplé et non couplé des matériaux. Ces études ont démontré la précision et l'efficacité informatique de l'analyse découplée, qui dépend fortement de l'incrément de temps choisi.

Dans notre cas, la valeur de déformation dans l'analyse découplée (étude hydraulique) est de 9×10^{-5} , tandis que dans l'analyse couplée (étude de couplage) elle est de $40 \cdot 10^{-9}$. temps de calcul

V.5.1 Discussion des résultats :

La solution obtenue par la simulation sous COMSOL Multiphasiques est considérée comme précise car elle est conforme aux figures V-1, V-3, et V-4 pour parvenir à cette précision, il a été nécessaire d'apporter des modifications aux propriétés des matériaux en utilisant deux fonctions spécifiques. De plus, il était essentiel d'utiliser un pas de temps adéquat pour mener à bien l'analyse stationnaire avec COMSOL.

Il a été démontré que, en utilisant un pas de temps de 45 secondes, il était possible de décrire

Chapitre 5 : Dépouillement et interprétation des résultats

avec précision l'emplacement de la solution, même si une petite erreur de 6% s'accumulait au cours des 15 premières secondes du processus de calcul. Cette approche a permis d'obtenir des résultats fiables et précis malgré la petite marge d'erreur, ce qui renforce la validité des conclusions tirées de la simulation.

V.6 Coefficients de sécurité :

La figure V-8 représente la valeur maximale du coefficient de sécurité, représentant le déplacement maximal avant la rupture de la structure. Un coefficient de sécurité de 2 est observé pour un déplacement extrême, témoignant d'une marge de sécurité élevée garantissant la stabilité de la chaussée.

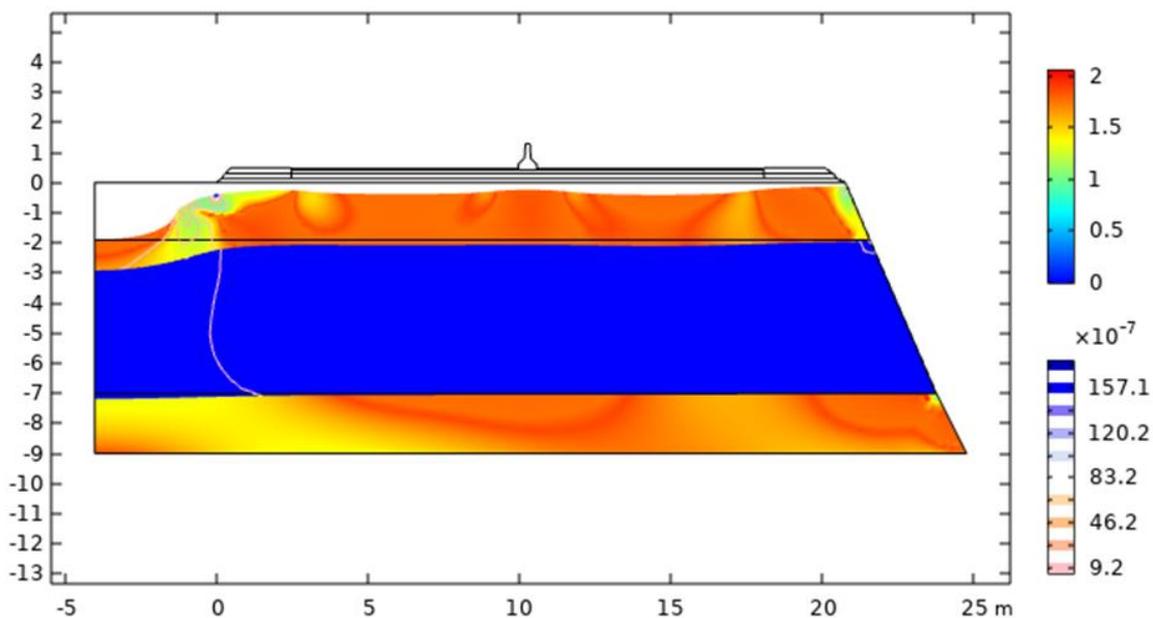


Figure V-8. La valeur maximale du coefficient de sécurité

V.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, les résultats des simulations numériques réalisées avec le logiciel Comsol, ceux du programme utilisant la méthode des éléments finis et les résultats de la solution exacte pour une géométrie en deux dimensions ont été présentés. Ces résultats mettent en évidence que le modèle est relativement acceptable pour un travail de projet de fin d'études.

Le rapprochement a été effectué en se basant sur le couplage hydromécanique entre les deux aspects mécanique et hydraulique. Une comparaison avec la solution exacte et la solution obtenue par Comsol montre l'importance et la limite de travail effectué.

VI. Conclusion générale et perspectives

Afin d'assurer la sécurité et le confort des usagers de la route, il est essentiel de tenir compte de la qualité de la surface de la chaussée dès sa conception. Cela nécessite de prendre en considération divers éléments tels que le volume de circulation, la charge supportée, le type de sollicitation et la facilité d'entretien.

La modélisation multi-physique de la chaussée souple permet aux ingénieurs d'analyser de manière précise le comportement de la chaussée en prenant en compte différents phénomènes physiques. Cette approche leur permet d'évaluer les contraintes et déformations subies par la chaussée dans différentes situations, ce qui les aide à prendre des décisions éclairées pour concevoir des routes plus solides, durables et économiques. Grâce à notre étude de simulation réalisée avec le logiciel Comsol, nous avons pu obtenir des conclusions sur le comportement hydromécanique du cas étudié.

La perméabilité de l'eau change selon le milieu par lequel elle traverse pour atteindre le point de drainage. En utilisant la loi de Darcy, qui explique comment le débit d'un fluide à travers un milieu poreux dépend de la perméabilité du milieu, de la différence de pression et de la viscosité du fluide, nous avons pu représenter graphiquement la distribution de la pression interstitielle et les chemins des fluides en fonction de leur vitesse après un certain laps de temps relativement acceptable dans ce genre de modélisation.

Les déformations les plus importantes sont généralement observées au niveau des fondations à gauche de la chaussée, en raison du poids des charges qui y sont appliquées. Ensuite, les déformations se propagent vers le milieu de la chaussée et finissent par affecter la partie supérieure du profil géologique.

Le déplacement de la partie supérieure du sol est souvent le plus visible, car c'est la partie de la chaussée qui est en contact direct avec les véhicules et subit donc le plus grand impact des charges appliquées.

Les techniques de couplage numériques sont nombreuses et donnent des résultats différents selon le cas étudié, il serait intéressant de comparer les résultats de ces différentes techniques aux résultats obtenues par cette approche simpliste.

Références bibliographiques

- [Aus2006] AUSTRROADS (2006) Pavement Design: A guide to the structural design of road pavements. STANDARS AUSTRALIA
- [BAL2012] Jean-Maurice Balay, Jean-Michel Piau (2012) Facteurs d'endommagement des chaussées : Congrès de l'IDRRIM – Lyon Eurexpo – 2/4 octobre 2012
- [Bassem 2006] Bassem, Ali (2006) Model numérique pour comportement mécanique des chaussées. Application à l'analyse de l'orniérage. Thèse de doctorat de l'université Lille, France.
- [BETEF2015] DERGAM, B.E.T.E.F. PROGRAMME GEOTECHNIQUE. ORAN: s.n., 03mars2015.
- [CFMS2023] **Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique.** *Recommandations pour la modélisation numérique des ouvrages géotechniques.* France, Juin 2023.
- [DIA2007] Malick, Diakhaté (2007) Fatigue et comportement des couches d'accrochage dans les structures de chaussée. Thèse de doctorat de l'université de Limoges.
- [BROSSEAUD 2003] BROSSEAUD, Yves (2003) Structures des chaussées. –LCPC France.
- [ONCCTP2001a] Organisme National de Contrôle Technique des Travaux Publics. Catalogue de dimensionnement des chaussées Neuvres. Fascicule 1 (Notion d'utilisation). Algérie, Novembre 2001.
- [ONCCTP2001b] Organisme National de Contrôle Technique des Travaux Publics. Catalogue de dimensionnement des chaussées Neuvres. Fascicule 2 (Hypothèses et données de dimensionnement). Algérie, Novembre 2001.
- [OULDMAHA, MESS2020] OULD MAHAMMED Youcef et MESSAOUDI, Chahrazad. Modélisation et simulation d'un barrage en terre en cas de séisme Cas du barrage de Tabia. PFE Master géotechnique de l'université de Sidi Bel Abbés, 2019/2020
- [RPA 20013] Règlement Parasismique Algerien, 2003

[SETRA2007]

SETRA. Conception et realisation des terrassement -fascicule 03, Methodes d'essais. France, mars2007.

ANNEXE 01

**GRAPHES DES ESSAIS DE LABORATOIRE
EFFECTUES SUR DES ECHANTILLONS
RECUPERES DU SONDAGE**

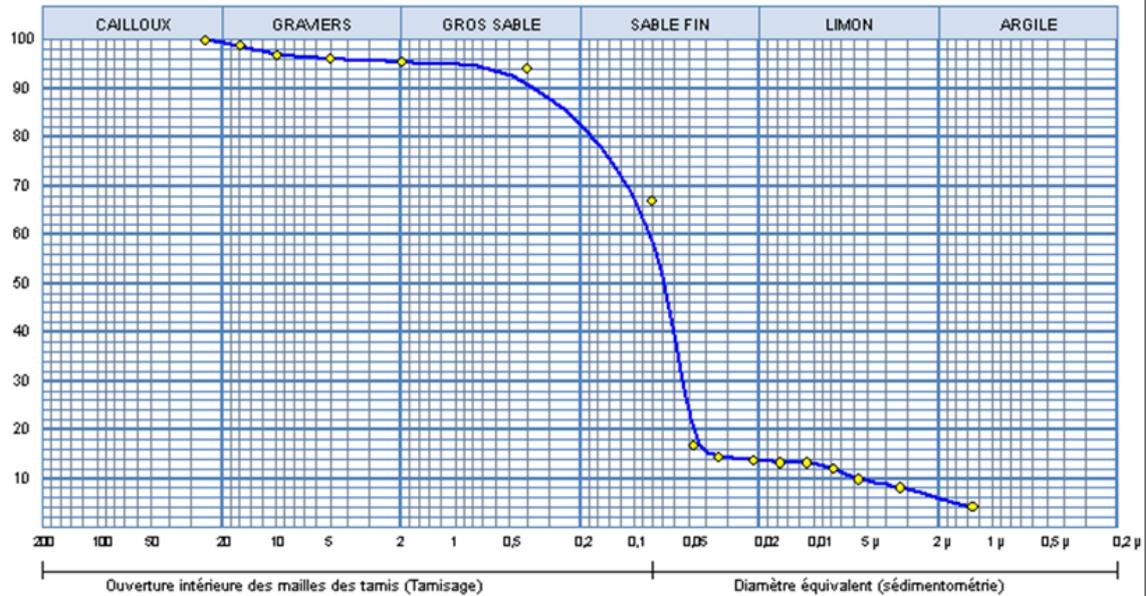


Client : BET DERGHAM AEK
Projet : MODERNISATION DE LA RN 22
Endroit : MANSOURAH

N° Projet : G 150120

Sondage n° : SC 02
Profondeur : 1.20-1.50
Matériaux : ARGILE LIMONEUSE SABLEUSE
Provenance :
Date essais : 12/07/2015

—◆— Sondage: SC 02 : 1.20-1.50



Analyse Granulométrique		Analyse sédimentométrique	
Tamis (mm)	Tamisé (%)	Diamètre équivalent	Tamisé (%)
25,00	100,00	47,40 µm	16,86
16,00	98,81	34,20 µm	14,40
10,00	96,91	21,80 µm	13,83
5,00	96,08	15,40 µm	13,26
2,00	95,37	10,90 µm	13,26
0,40	94,30	7,80 µm	12,13
0,08	67,02	5,60 µm	9,86
		3,30 µm	8,16
		1,30 µm	4,19

Echant	< 80 µ	LIMITES D'ATTERBERG			Classificat ^e
		W.L (%)	W.P (%)	I.P (%)	
—◆—	67,02 %	34,23 %	17,16 %	17,07 %	Ap

© Solstis 2007

Remarque :
R. A. S.

Préparé par :
EL-BACHIR

Approuvé par :
HAMAL

Date :
30/07/2015

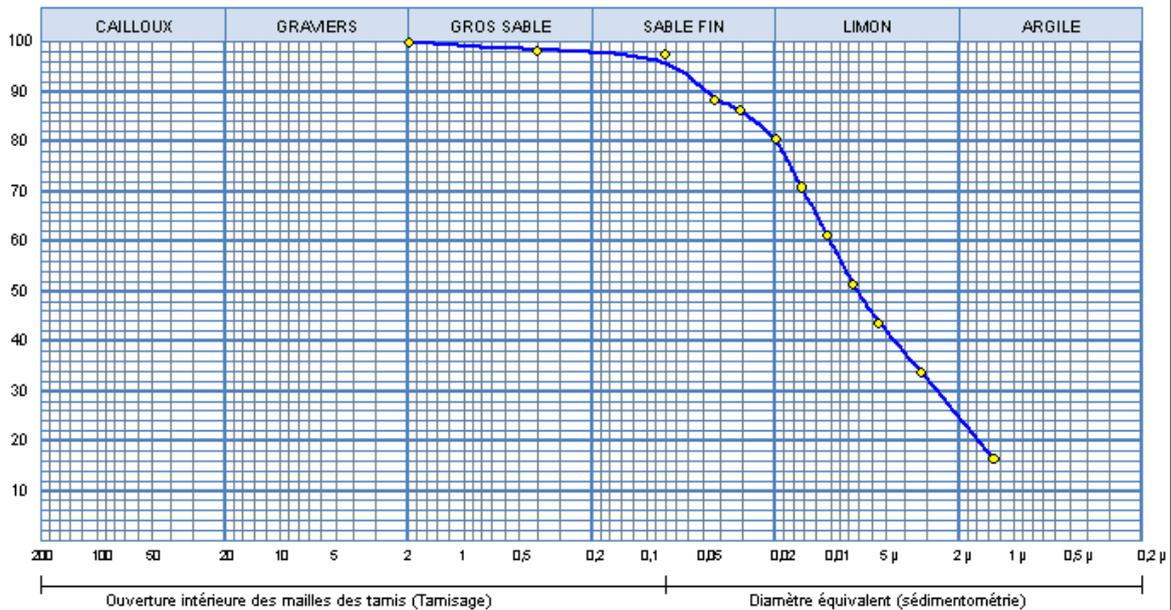


Client : BET DERGHAM AEK
Projet : MODERNISATION DE LA RN 22
Endroit : MANSOURAH

N° Projet : G 150120

Sondage n° : SC 02
Profondeur : 3.70-4.00
Matériaux : MARNE
Provenance :
Date essais : 30/06/2015

—●— Sondage: SC 02 : 3.70-4.00



Analyse Granulométrique		Analyse sédimentométrique	
Tamis (mm)	Tamisé (%)	Diamètre équivalent	Tamisé (%)
2,00	100,00	43,30 μm	88,46
0,40	98,33	31,00 μm	86,51
0,08	97,42	19,80 μm	80,66
		14,50 μm	70,92
		10,40 μm	61,18
		7,60 μm	51,44
		5,50 μm	43,64
		3,20 μm	33,90
		1,30 μm	16,37

Echant	< 80 μ	LIMITES D'ATTERBERG			Classification
		W.L (%)	W.P (%)	I.P (%)	
—●—	97,42 %	48,50 %	26,11 %	22,39 %	Ap

© Soltest 2007

Remarque :
R. A. S.

Préparé par :
CHERFAOUI M.

Approuvé par :
HAMAL

Date :
30/07/2015

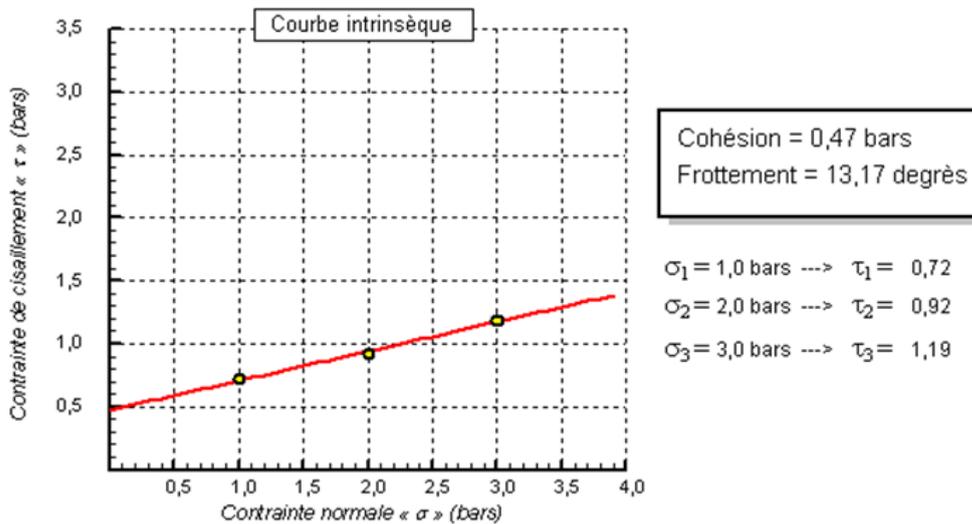
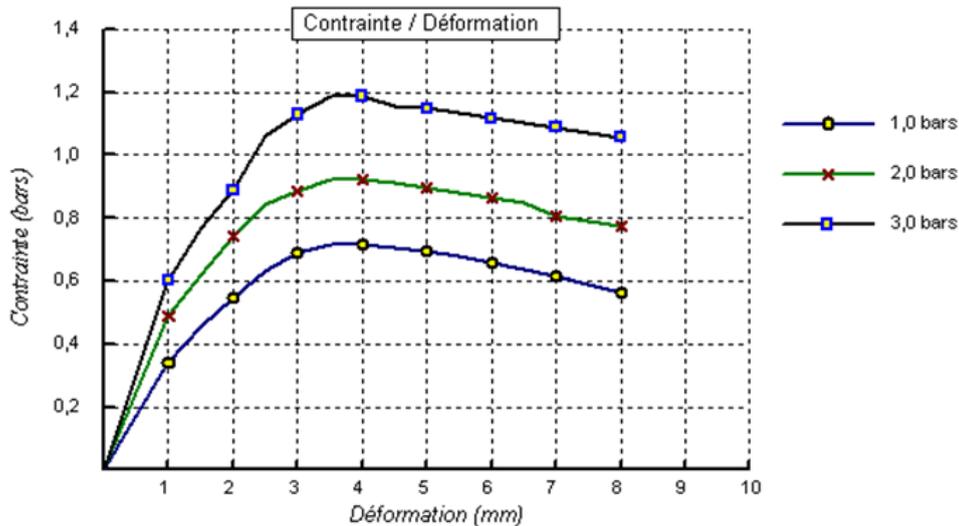


Client : BET DERGHAM AEK
Projet : MODERNISATION DE LA RN 22
Endroit : MANSOURAH / W. TLEMCEM

N° Projet : G 150120

Sondage n° : SC 02
Profondeur : 3.70-4.00
Nature : MARNE
Date essais : 28/06/2015

Type d'essai : UU
Vitesse de cisaillement : 1 mm/mn



© SOURIS 2007

Remarque :
R. A. S.

Préparé par :
HAMAL

Approuvé par :
HAMAL

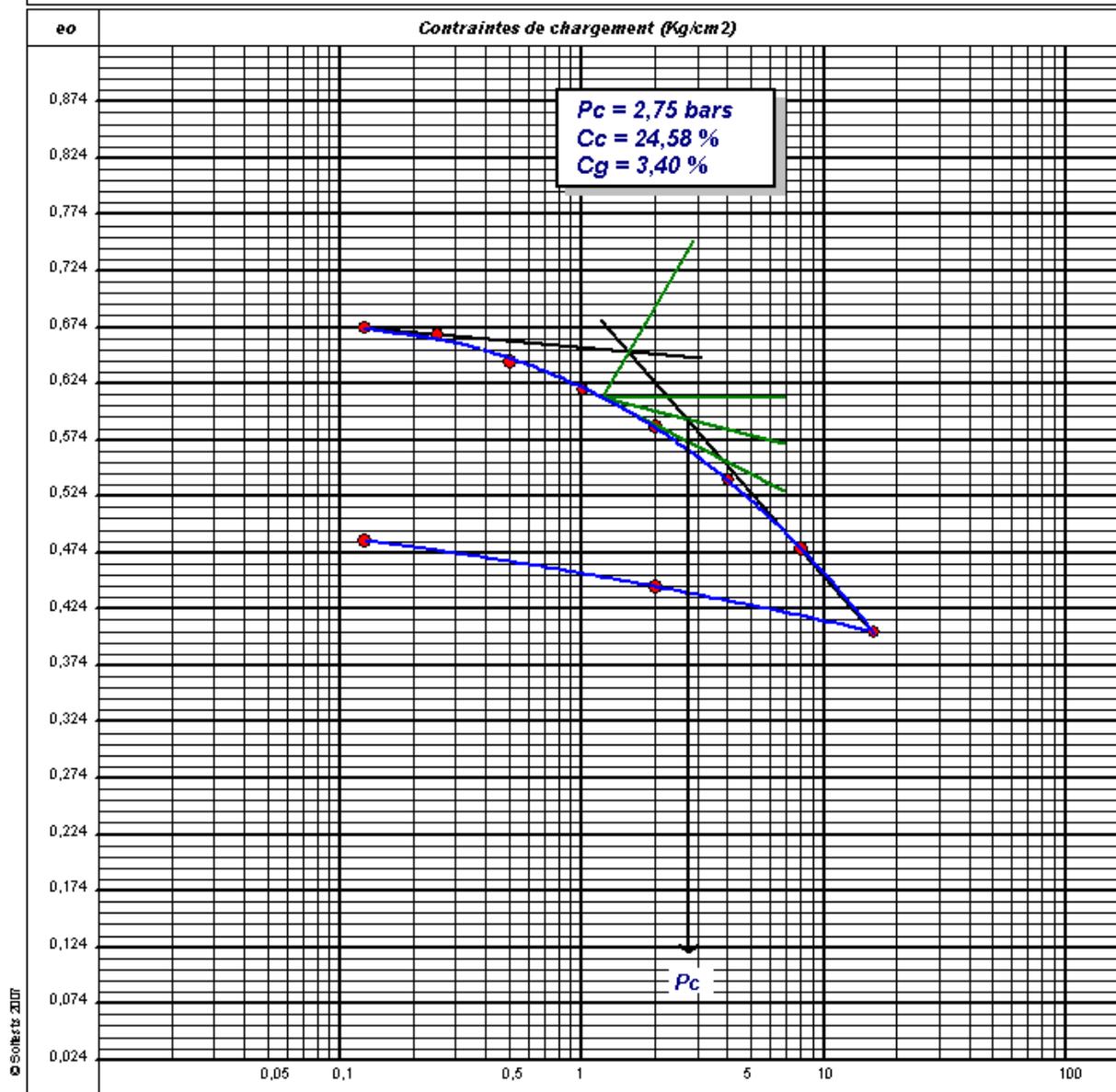
Date :
22/07/2015



Client : BET DERGHAM AEK
Projet : MODERNISATION DE LA RN 22
Endroit : MANSOURAH / W. TLEMEN

N° Projet : G 150120

Sondage n° : SC 02
Profondeur : 3,70-4,80
Nature : MARNE
Date essais : 28/06/2015



Remarque :
R. A. S.

Préparé par :
EL-BACHIR

Approuvé par :
HAMAL

Date :
30/07/2015



AGRO-HYD Group

Laboratoire D'analyse De La Qualité (Eaux, Sols Et Matériaux De Construction),
Travaux D'expertises Et D'études Géotechniques Des Sols.



AUTORISATION MINISTERIELLE/ DECISION N° : 162 DU 23 JUN 2010

PROJET : MODERNISATION DE LA RN 22

LOCALISATION: MANSOURAH / W. TLAMCEN

CLIENT: BET DERGHAM AEK

CODE PROJET: G 150120

TABLEAU RECAPITULATIF DE RESULTATS DES ESSAIS AU LABORATOIRE

SONDAGE N°	PROF (m)	W %	γ_h g/cm ³	γ_d g/cm ³	TAMISAGE SEDIM.			LIMITE DE CONSISTANCE			CISAILLEMENT		ESSAI OEDOMETRIQUE				ESSAI DE RESISTANCE A LA COMPRESSION	
					G %	S %	F %	LL %	LP %	IP %	C Kg/cm ²	φ°	Pc bars	Cc %	Cg %	Pg Bars	Rcs Bars	Rc Bars
SC 01	5.00-5.30	22.50	1.91	1.55	11.43	39.93	48.64	35.70	17.17	18.59			2.96	18.27	1.16			
	8.70-9.00	18.34	1.88	1.59	0.15	25.74	74.11	42.21	20.12	22.09	0.46	13.63	2.32	18.60	2.74			
	11.00-11.40	14.01			0.95	19.70	79.35	42.37	20.18	22.19							2.81	
SC 02	1.20-1.50				4.63	28.35	67.02	34.23	17.16	17.07								
	3.70-4.00	10.73	1.99	1.79	0.00	2.58	97.42	48.50	26.11	22.39	0.47	13.17	2.75	24.58	3.40			
	6.40-6.70		2.69															46.47
	7.30-7.50		2.75															123.50

LE CHARGE DES ESSAIS

LE RESPONSABLE DU LABORATOIRE



AGRO-HYD Group

Laboratoire D'analyse De La Qualité (Eaux, Sols Et Matériaux De Construction),
Travaux D'expertises Et D'études Géotechniques Des Sols.



AUTORISATION MINISTERIELLE/ DECISION N° : 162 DU 23 JUIN 2010

PROJET : MODERNISATION DE LA RN 22

LOCALISATION: MANSOURAH / W. TLAMCEN

CLIENT: BET DERGHAM AEK

CODE PROJET: G 150120

TABLEAU RECAPITULATIF DE RESULTATS DES ESSAIS AU LABORATOIRE

SONDAGE N°	PROF (m)	W %	γ_h g/cm ³	γ_d g/cm ³	TANISAGE SEDIM.			LIMITE DE CONSISTANCE			CISAILLEMENT		ESSAI OEDOMETRIQUE				ESSAI DE RESISTANCE A LA COMPRESSION
					G %	S %	F %	LL %	LP %	IP %	C Kg/cm ²	ϕ°	Pc bars	Cc %	Cg %	Pg Bars	Res Bars
SC 03	1.50-2.80		1.9		19.85	19.63	60.52	35.09	15.40	19.69							
	3.00-3.40		2.72		0.00	0.00	100	52.80	28.70	24.10							
	5.30-5.50	13.88	2.04	1.80	5.50	9.27	85.23	45.32	22.17	23.15			1.44	13.29	1.58		
	7.10-7.40	10.11	1.93	1.75	0.40	13.25	86.35	45.00	22.19	22.81	0.45	12.19	4.25	20.93	2.57		
	9.00-9.30	40.63			14.72	4.94	80.34	50.00	26.59	23.41							

LE CHARGE DES ESSAIS

LE RESPONSABLE DU LABORATOIRE

AGRO-HYD Group



Laboratoire D'analyse De La Qualité (Eaux, Sols Et Matériaux
De Construction), Travaux D'expertises Et D'études
Géotechniques Des Sols.



AUTORISATION MINISTERIELLE/ DECISION N° : 162 DU 23 JUIN 2010

PROJET : MODERNISATION DE LA RN 22

LOCALISATION: MANSOURAH / W. TLAMCEN

CLIENT: BET DERGHAM AEK

CODE PROJET: G 150120

TABLEAU RECAPITULATIF DE RESULTATS DES ESSAIS AU LABORATOIRE

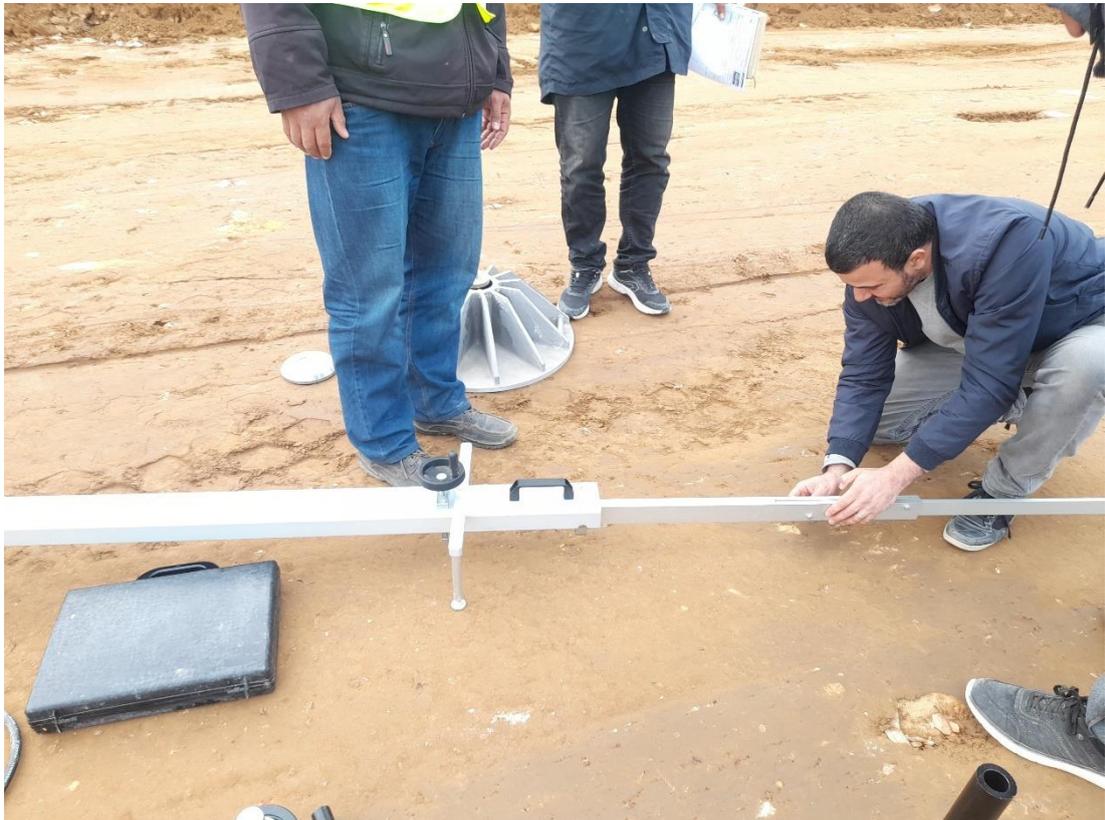
SONDAGE N°	PROF (m)	SO ₄ ²⁻ (mg/Kg)	CaCO ₃ %	MO %	Class. Agressivité (selon la teneur en SO ₄ ²⁻)
SC 01	5.00-5.30	-	89	-	-
	8.70-9.00	-	3	-	-
	11.00- 11.40	-	3	-	-
SC 02	1.20-1.50	Trace	3	2.49	A ₀ : non agressif
	3.70-4.00	Trace	37	-	A ₀ : non agressif
	6.40-6.70	-	37	-	-
	7.30-7.50	-	16	-	-
SC 03	1.50-2.80	42640.7	54	-	A ₃ : fortement agressif
	3.00-3.40	9020.9	67	-	A ₃ : fortement agressif
	5.30-5.50	-	18	-	-
	7.10-7.40	-	21	-	-
	9.00-9.30	-	16	-	-

LE CHARGE DES ESSAIS

LE RESPONSABLE DU LABORATOIRE

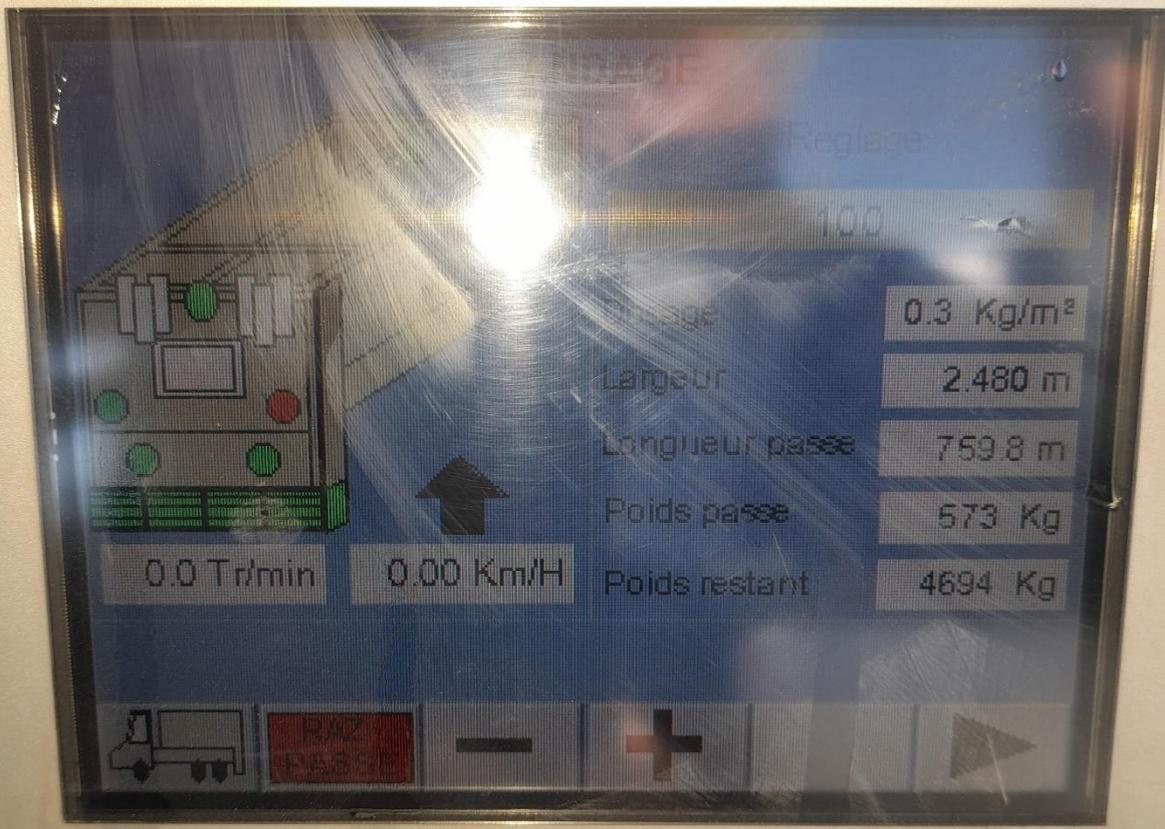
ANNEXE 02

Reportage photographique sur les essais dans le terrain









F1
esc

F2

F3

F4

F5

F6