

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

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 : **ARBOUZ Si Housseyn**

Sujet

Simulation multiphysique d'une chaussée semi-rigide

Soutenu publiquement, le 11 juin 2024, devant le jury composé de :

M. HAMZAOUI Fethi	MCA	Université de Tlemcen	Président
M. BENMAMMAR Mohammed	MCB	Université de Tlemcen	Examineur
M. TROUZINE Habib	Prof.	Université de Tlemcen	Encadreur
M. ZADJAOUI Abdeldjalil	Prof.	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire 2023/2024

Remerciements

J'offre ma grande gratitude à Dieu qui m'a aidé à faire ce travail. J'exprime ma profonde gratitude à mes parents pour leurs encouragements, leurs soutiens et pour les sacrifices qu'ils ont endurés.

Je remercie mes deux encadrants Professeur TROUZINE Habib et Professeur ZADJAOUI Abdeldjalil pour les efforts qu'ils ont déployés, pour m'aider, conseiller, encourager et corriger ce projet de fin d'études.

Je voudrais remercier les membres de jury Docteur HAMZAOUI Fethi et Docteur BENMAMMAR Mohammed d'avoir accepté d'évaluer et examiner mon travail.

Je remercie vivement Mlle Yalaoui N. de l'équipe ifD2m du Laboratoire de Génie Civil & Environnement de l'UDL de Sidi Bel Abbés, les responsables de la DTP Tlemcen, le staff technique du projet de dédoublement de la RN22, aussi tout le corps enseignant dans le département de génie civil qui a contribué à ma formation universitaire.

En fin, Je remercie tous ceux de près ou de loin qui ont contribué à la réalisation de ce travail ; qu'ils trouvent ici ma sincère reconnaissance.

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail, à mes parents, à ma source de
générosité*

*Et de patience tout au long de ma carrière scolaire. Que Dieu
vous protèges, vous prêtez bonne santé et longue vie.*

*À mes frères et sœurs et sa petite famille, qui m'ont toujours
indiqué*

La bonne voie et qui ont su m'aider.

*Aux personnes qui m'ont accompagné durant mon cursus
universitaire,*

*À mes amies pour leurs encouragements Permanents, et leurs
soutiens .*

ملخص

يركز مشروع نهاية الدراسات هذا على محاكاة الفيزياء المتعددة لطريق شبه صلب باستخدام برنامج كومسول. هذه الدراسة العددية تتعلق بدراسة السلوك الهيدروميكانيكي لطريق حقيقي. تركز النماذج والاختبارات التي تم إجراؤها على مراعاة الأحمال الدائمة وأحمال التشغيل وخاصة الوصلات المائية والميكانيكية لمراعاة تدفق المياه المحتمل. وتظهر النتائج التي تم الحصول عليها أهمية وحدود هذه الدراسة لتبرير استقرار الطريق، ولكن أيضا لتشغيله في ظروف جيدة، وخاصة بما يتعلق بالسلامة وبتصريف المياه.

الكلمات المفتاحية: الطريق شبه الصلب؛ كومسول مولتيفيزيكس؛ اقتران ، الهيدروميكانيكي.

Résumé

Ce projet de fin d'études porte sur la simulation multiphysique d'une chaussée semi-rigide avec le logiciel Comsol. Il s'agit d'une étude numérique portant sur la prise en charge de comportement hydromécanique d'une chaussée réelle. Les modèles et tests effectués portent sur la prise en compte des charges permanentes, d'exploitations et surtout de couplage hydrique et mécanique pour tenir en compte d'un éventuel écoulement d'eau. Les résultats obtenus montrent l'importance et les limites de cette étude pour une justification de la stabilité de la chaussée, mais aussi de son exploitation dans de bonnes conditions en particulier sécurité et le drainage des eaux.

Mots Clés : Chaussée semi-rigide ; Comsol Multiphysique ; Couplage, Hydrique ; Mécanique

Abstract

This end-of-studies project focuses on the multi-physics simulation of a semi-rigid roadway with Comsol software. This is a numerical study relating to the management of the hydromechanical behavior of a real roadway. The models and tests carried out focus on taking into account permanent loads, operating loads and especially water and mechanical coupling to take into account possible water flow. The results obtained show the importance and limits of this study for a justification of the stability of the roadway, but also of its operation in good conditions, particularly safety and water drainage.

Key words: Semi-rigid pavement; Comsol Multiphysics; Couplage, Hydric; Mechanical

Liste des tableaux

Tableau 1: Position des 04 sections (Groupe, 06 Aout 2015)	24
Tableau 2: Repérage du sondage SC03 (Groupe, 06 Aout 2015)	25
Tableau 3: Les coordonnées de sondage SC03 (Groupe, 06 Aout 2015)	29
Tableau 4: Les différentes couches géologiques (Groupe, 06 Aout 2015)	29
Tableau 5: Paramètres utilisés pour les séparateurs.	33
Tableau 6: Paramètres utilisés pour la couche de base.	34
Tableau 7: Paramètres utilisés	34
Tableau 8: Paramètres utilisés	35
Tableau 9: Paramètres utilisés	36
Tableau 10: Plasticité des sols	39

Liste des figures

Figure	Pages
Figure 01 : Structure type d'une chaussée rigide	4
Figure 02 : Structure type d'une chaussée Semi-rigide	5
Figure 03 : Structure type d'une chaussée souple	6
Figure 04 : Schéma de fonctionnement pour une méthode mécanique empirique de dimensionnement	7
Figure 05 : Types de modèles de comportement	10
Figure 06 : Couplage hydromécanique – court terme	14
Figure 07 : Cas de la rupture de Nicholl Highway – Singapour 2004	14
Figure 08 : Exemple d'impact d'une erreur sur les perméabilités (homogène vs hétérogène)	16
Figure 09 : Sol homogène anisotrope et sol stratifié anisotrope.	16
Figure 10 : Sol isotrope et sol anisotrope	17
Figure 11 : Vue une image satellite illustrant la région d'étude ainsi que la position précise du site (capture provenant de Google Earth)	25
Figure 12 : Carte de zonage sismique du territoire national (Groupe, 06 Aout 2015)	26
Figure 13 : Le profil en travers du point d'étude, pris en février 2024 par la DTP Tlemcen	27
Figure 14 : Modèle physique étudié	32
Figure 15 : Les séparateur	33
Figure 16 : Couche de base.	34
Figure 17 : Couche semi-rigide.	34
Figure 18 : Couche de roulement.	34
Figure 19 : Couche anti-contaminante	35
Figure 20 : PST et couches de sol	36
Figure 21 : Loi de Darcy	36
Figure 22 : Charge hydraulique	37
Figure23 : Précipitation	38
Figure24 :Maillage	40
Figure 25 : Pression interstitielle distribution de couplage HM	42
Figure 26 : Déplacement verticale pour modèle HM	43
Figure 27 : Charges volumiques	44
Figure 28 : Pression interstitielle distribution de couplage HM	45
Figure 29 : les chargements appliqués sur la chaussée	46

Liste des abréviations

<i>BDD</i>	Base de données
<i>DTP</i>	Direction des travaux publics
<i>BB</i>	Béton bitumineux
<i>GB</i>	Grave bitume
<i>GNT</i>	Grave non traité
<i>HM</i>	Hydromécanique
<i>AASHTO</i>	American Association of State Highway and transportation Official
<i>RQD</i>	Rock quality designation
<i>LCPC</i>	Laboratoire Central des Ponts et des chaussées.
<i>SC-03</i>	Sondage N° 03
Φ	Angle de frottement
<i>C</i>	Cohésion
<i>Pc</i>	Pression de consolidation
<i>Cc</i>	Coefficient de compression
<i>GC</i>	Coefficient de gonflement
<i>RC</i>	Résistance
<i>Q_{adm}</i>	Contrainte admissible
<i>ΔH</i>	Tassement

Table des matières

ملخص

Résumé

Abstract

Liste de tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction générale

Chapitre 01 : Synthèse bibliographique sur les chaussées

1.1. Introduction	1
1.2. Généralité sur les chaussées	2
1.3. Les différents types des chaussées.	3
1.4. La structure d'une chaussée semi-rigide	7
1.5. Comportement et modélisation d'une chaussée semi-rigide	10
1.6. Conclusion	11

Chapitre 02 : Aspects théorique sur le couplage hydromécanique

2.1. Introduction	13
2.2. Position du problème (opération du couplage numérique)	13
2.3. Hydraulique des sols saturés	15
2.4. Charge hydraulique	16
2.5. Équation générale de l'écoulement	18
2.6. Conclusion	19

Chapitre 03 : Présentation du cas d'étude

3.1. Introduction	21
3.2. Les données du projet	24
3.3. Activité Sismique	25
3.4. La géométrie du projet	26
3.5. Etudes géotechniques du projet et présentation topographique	28

3.6. Conclusion	30
Chapitre 04 : Modélisation numérique d'une chaussée semi-rigide	
4.1. Introduction	32
4.2. Paramètres globaux et réglages préliminaires	33
4.3 Géométrie	34
4.4 Matériaux	35
4.4. Loi de Darcy	37
4.5 Mécanique du solide et interfaces	38
4.6. Plasticité des sols	39
4.7. Maillage	40
4.8. Conclusion	42
Chapitre 05 : Résultats et interprétations	
5.1. Introduction	44
5.2. Pressions (dl)	44
5.3. Déplacements	45
5.4. Charges volumiques	46
5.5. Pressions selon le model HM	46
5.6. Chargements appliqués sur la chaussée	47
5.7. Conclusion	48
Conclusion générale & perspectives	52
Références bibliographiques	54
Annexe A	58
Annexe B	59
Annexe C	70

Introduction générale

Les infrastructures routières jouent un rôle vital dans le fonctionnement efficace des sociétés modernes, fournissant des voies de communication essentielles pour le transport de biens et de personnes. Parmi les différents types de routes, les chaussées semi-rigides constituent une composante importante du réseau routier, offrant un compromis entre les chaussées rigides et flexibles en termes de performances et de coûts.

Cependant, la conception et la gestion efficaces des chaussées semi-rigides nécessitent une compréhension approfondie de leur comportement sous différentes conditions de charge et d'environnement. Dans cette optique, la simulation multiphysique émerge comme une approche puissante pour modéliser et étudier le comportement complexe de ces structures routières.

Ce projet de fin d'études se veut comme une contribution dans ce sens. Il présente la pertinence et l'utilité pour l'ingénieur de la simulation multiphysique pour l'analyse des chaussées semi-rigides, en mettant en évidence les défis associés à leur conception et à leur maintenance, ainsi que les avantages offerts par une approche de simulation avancée.

Dans les sections suivantes, nous examinerons en détail les différents aspects de la simulation multiphysique des chaussées semi-rigides, en mettant l'accent sur les méthodologies de modélisation, les considérations matérielles, les conditions de charge, et les résultats potentiels de ces analyses. En outre, nous explorerons l'utilisation spécifique de la plateforme Comsol Multiphysique pour mener à bien de telles simulations, en mettant en évidence ses capacités et ses applications dans ce domaine des chaussées et routes.

Le mémoire est structuré comme suit : Après l'introduction générale, le chapitre un est une synthèse bibliographique sur les chaussées. Le second chapitre est dédié au couplage numérique, notamment le couplage hydromécanique. Le chapitre trois présente le cas étudié. Le chapitre quatre présente la modélisation multiphysique et son application pour les chaussées semi-rigide. Enfin le chapitre cinq est un dépouillement et une tentative d'interprétation des résultats.

On achèvera ce modeste travail par une conclusion générale qui regroupe les conclusions partielles de chaque chapitre avec des pistes utiles à la pratique de l'ingénieur en génie civil offrant des perspectives importantes pour la conception, l'analyse et la gestion efficaces de ces infrastructures routières cruciales.

Chapitre 1

Synthèse bibliographique sur les chaussées

1.1. Introduction

La conception, la construction, la qualité et la durée de vie d'une route dépendent essentiellement de son environnement : climat, qualité du sous-sol, teneur en eau du sol, matériaux disponibles, trafic...). L'insertion de la route dans un milieu nécessite parfois une révolution dans la façon de concevoir et de réaliser le corps de chaussée.[1]

La mise en place de la technique routière fut le résultat de plusieurs années d'expériences ; Aujourd'hui le défi est d'adapter les nouvelles techniques aux nouvelles réalités, d'établir des critères de classification des matériaux afin de faciliter leur utilisation pour les projeteurs (choix de matériaux selon les possibilités offertes sur le terrain, les techniques de réalisation, le dimensionnement de la chaussée...). [2]. Ce chapitre comporte des éléments de base et de définitions sur les chaussées pour une meilleure compréhension des modèles choisis et les simulations multiphysiques adoptées dans les chapitres suivants.

1.2. Généralité sur les chaussées

Les chaussées sont des structures multicouches. Elles sont composées généralement de quatre couches superposées : le sol support, la couche de forme, les couches d'assises, et les couches de surface. Les chaussées bitumineuses, sous l'effet conjugué du trafic en poids lourds croissant et d'une température élevée, subissent des dégradations de type déformation. Devant l'agressivité du trafic qui continue à croître, les réseaux routiers sont mis davantage à l'épreuve et on se trouve dans l'obligation d'investir de plus en plus dans leur développement, leur entretien et leur amélioration. [3]. Il apparaît donc nécessaire d'approfondir les études menées sur les matériaux de chaussées et en particulier, les bitumes et les enrobés bitumineux. Un effort important se concentre dans la compréhension, aussi bien au laboratoire que sur la route, de la performance des enrobés bitumineux dans la chaussée telle que la résistance à l'orniérage, la résistance au retrait thermique, la résistance à la fatigue, etc.

Pour réduire ces phénomènes, diverses techniques ont été utilisées, parmi lesquelles : les modifications des enrobés par des polymères. Cette technique apparaît comme la meilleure voie pour améliorer les caractéristiques physiques et mécaniques des enrobés bitumineux.

1.3. Différents types des chaussées :

Les types de chaussée se réfèrent aux différentes surfaces utilisées pour la circulation des véhicules et des piétons.

Ces types de chaussées sont déterminés en fonction de facteurs tels que :

- ❖ La vitesse de circulation
- ❖ Le volume de trafic La classification des routes.
- ❖ La nature du terrain.
- ❖ L'utilisation prévue.[4]

1.3.1. Chaussée rigide :

Grâce à leur grande cohésion, ces structures résistent par effet de dalle : Elles transmettent les charges avec une surface de pression relativement importante. Ainsi les efforts parvenant aux couches sous - jacentes sont d'autant plus faibles que l'épaisseur de la dalle est élevée. Elles sont constituées d'une dalle reposante, soit directement sur le sol naturel soit par l'intermédiaire d'une couche de fondation.

- Sol Naturel : Le sol de plateforme, lorsqu'il est appelé à supporter la dalle, doit être à l'abri des mouvements de retrait ou de gonflement. De même les remblais susceptibles de tassements différés sont à proscrire, ainsi que les couches hétérogènes capables de tassements différentiels.

- Sol de fondation : La présence de la fondation permet d'augmenter la portance de la structure. Cependant elle est adoptée pour d'autres raisons : [5]

- Fournir à la dalle une surface portante uniforme. Remplacer les sols très compressibles ou susceptibles de gonfler.

- Empêcher la remontée des particules fines qui entraîne le phénomène de pompage au niveau des joints.

- Revêtement. - Le revêtement est généralement une dalle de béton.

Cependant, dans certaines conditions sa mise en œuvre peut être très délicate et requiert des dispositions particulières aussi distingue-t-on :

- Les dalles non goujonnées en béton. [6]

- Arase dont le transfert des charges d'une dalle à l'autre se fait par friction inter granulates ou par emboitement au niveau des joints.

- Les dalles goujonnées en béton non armé.
- Ces goujons sont des tiges d'acier doux qui assurent le transfert des charges.
- Les dalles goujonnées en béton armé.
- La présence de l'acier n'a pas pour objectif d'accroître sensiblement la résistance de la dalle, mais surtout d'éviter les fissures.
- On utilise des armatures de retrait le plus souvent en treillis soudés.

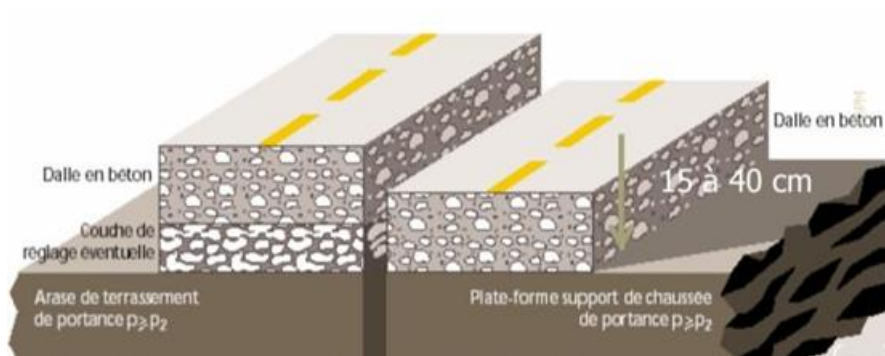


Figure 1.1 : Structure type d'une chaussée rigide [4].

1.3.2. Chaussée semi-rigide :

Elles comportent une couche de surface bitumineuse reposant sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposés en une couche (base) ou deux couches (base et fondation). Dans le cas d'une chaussée neuve à faible trafic, la structure-type est illustrée sur la figure 1.2 suivante. [7]

Ce sont des structures hybrides : on trouvera des chaussées en béton très peu dosé, recouvertes de revêtements hydrocarbonés ou encore des chaussées souples dont certaines couches sont stabilisées au bitume ou au ciment. Elles sont plus flexibles que les bétons classiques mais moins résistantes. Par contre elles reposent sur des fondations suffisamment épaisses. [8].

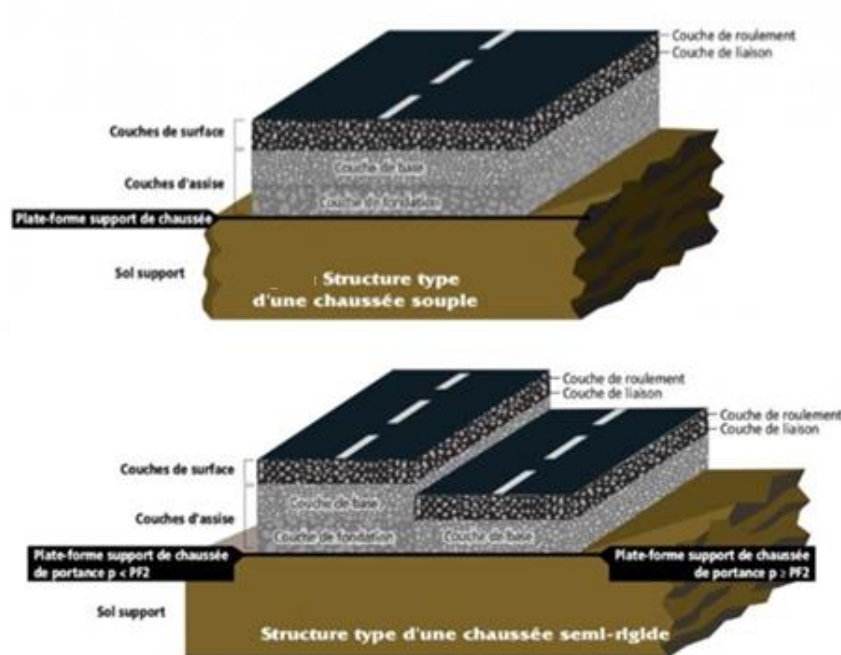


Figure 1.2 : Structure type d'une chaussée semi-rigide [4].

1.3.3. Chaussée souple :

Les chaussées souples sont des chaussées dont le corps est réalisé avec des matériaux non liés ou traités avec un liant hydrocarboné. On distingue les chaussées souples traditionnelles, comportant au moins une couche de matériau non lié, plutôt destinées à des trafics légers, et les chaussées souples épaisses, dont toutes les couches sont bitumineuses, utilisées pour tout type de trafic.

Les chaussées « souples » qui sont constituées d'un corps de chaussée en matériaux non traité et en matériau traité au bitume. Celles-ci ne pouvant mobiliser que de faibles efforts assimilables à une flexion, la répartition des efforts verticaux sur le sol support est modérée. Le critère principal de dimensionnement d'une chaussée souple réside donc dans la limitation de la sollicitation du sol support de manière à éviter sa « plastification » qui se traduirait en surface par d'importantes déformations de la chaussée. [9]

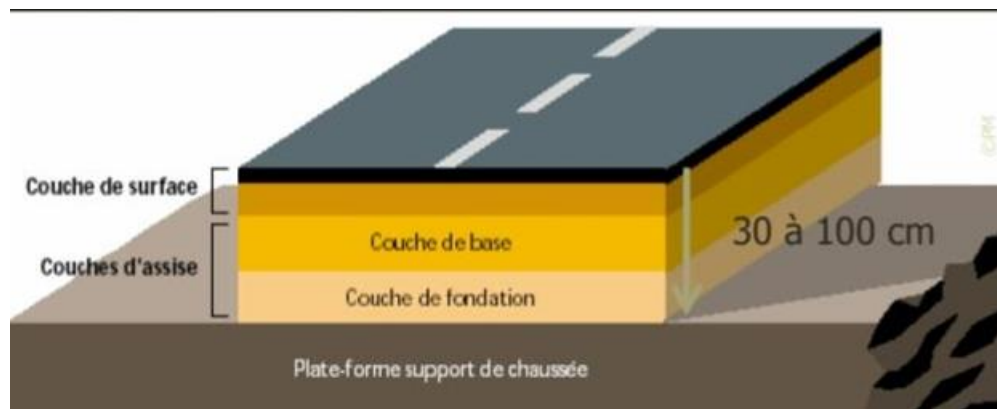


Figure 1.3 : Structure type d'une chaussée souple.

1.4. Structure d'une chaussée semi-rigide :

Les chaussées semi - rigides épaisses sujet de cette étude : elles sont constituées d'une couche de surface reposant sur une couche d'assise (base) ou de deux couches (base + fondation). Les matériaux de composition sont traités avec un liant hydraulique (laitier, cendres, ciment...). Voici les différents matériaux qui peuvent être utilisés : [10]

- ❖ Couches de base / fondation : la grave ciment ou liant routier (G3) , la grave laitier prébroyé (G3) , la grave laitier granulé (G2) , le sable traité (S3) , sols fin traités .
- ❖ Couche de fondation seulement : le sable traité (S2) , les MIOM traités (S2) .

1.4.1. Caractéristiques d'une chaussée semi-rigide :

❖ Les chaussées à assise semi-rigide traitée aux liants hydrauliques :

Le traitement des matériaux leur donne une rigidité qui permet de répartir les efforts verticaux et ainsi de ne pas affecter le sol support. Le manque d'adhérence entre les différentes couches entraîne des contraintes de traction en partie basse de chacune d'entre elles. De plus, ces matériaux sont sujets aux retraites thermiques et de prises créant des fissures qui peuvent remonter en surface jusqu'à la couche de roulement. Les conséquences sont une perte d'étanchéité qui peut conduire à une affectation du support avec des déformations et une perte de portance. [11]

Les chaussées bitumineuses sont flexibles. Le bitume est utilisé pour lier les particules d'agrégats entre elles pour former une couche flexible, solide et imperméable. Le mélange d'agrégat et de bitume est appelé béton bitumineux (ou asphalte ou goudron pour faire court). Les routes à granulats peuvent recevoir une surface mince et flexible de pierre liée au bitume qui

empêchera la poussière, fournira l'imperméabilisation, réduira l'entretien et fournira une surface de conduite plus sûre. Le bitume est pulvérisés et les copeaux de pierre sont étalés sur la surface et liés en place par le bitume.[12]

Le type de construction de loin le plus couramment adopté pour les routes urbaines et de réseau est le revêtement bitumineux flexible en couches. La chaussée est constituée d'une ou plusieurs couches d'agrégats non liées, la sous-couche, suivie d'une base granulaire non liée ou d'une couche de base en enrobé. Au-dessus se trouve la couche de liant d'enrobé et enfin la couche de roulement en enrobé. La couche de base et la couche de liaison fournissent la majeure partie du support structurel tandis que le revêtement offre une surface de conduite lisse et imperméable avec une résistance élevée au dérapage. La durée de vie nominale des chaussées souples bitumineuses est normalement de 20 ans. La défaillance se produit parfois en raison de l'orniérage, de la fissuration ou du vieillissement des couches d'enrobé ou de la défaillance de la plate-forme conduisant à un orniérage profond. Un entretien régulier de la couche de revêtement peut prolonger considérablement la durée de vie de la chaussée.

1.4.2. Principes méthodes de dimensionnement :

Le dimensionnement d'une chaussée consiste à déterminer la nature et l'épaisseur des couches qui la constituent afin qu'elle puisse résister aux diverses agressions auxquelles elle sera soumise tout au long de sa vie.

- ❖ **Les méthodes empiriques** : dérivées des études expérimentales sur les performances des chaussées. Les méthodes empiriques de dimensionnement font appel exclusivement à des expériences comparant le comportement à long terme de diverses structures pour différentes conditions climatiques et de trafic.

Des essais en vraie grandeur apportent également de nombreuses informations nécessaires pour la mise en place des règles empiriques de dimensionnement. [13]

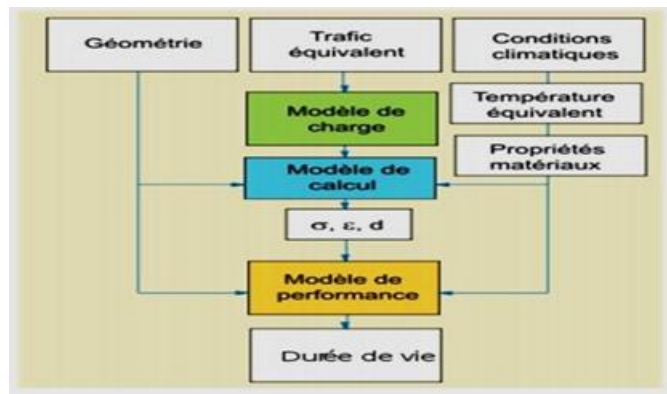


Figure 1.4 : Schéma de fonctionnement pour une méthode mécanique empirique de dimensionnement [13]

❖ **Les méthodes dites « rationnelles » :**

Basées sur l'étude théorique du comportement des chaussées, des modèles élastiques ou viscoélastiques. Les propriétés mécaniques des matériaux sont définies en fonction de des conditions de température et de chargement.

Les modèles permettent le calcul des contraintes et des déplacements au niveau de chaque couche.[14]

1.4.3. Modelés mécanique de la chaussée semi-rigide :

La mécanique de chaussées porte principalement sur la compréhension du fonctionnement des Structures et sur les règles de dimensionnement. On définit alors le niveau de sollicitation de la structure à l'aide d'un modèle. Ce dernier doit représenter de façon réaliste le Fonctionnement de la structure. Sans qu'il soit question ici de présenter toutes les méthodes, on indiquera seulement les plus importantes, notamment par chronologie, le modèle monocouche, le modèle bicouche, les modèles multicouches et les modèles numériques. [15]

1.5. Comportement et modélisation d'une chaussée semi-rigide

En fonction du type de l'approche utilisée pour développer les modèles de comportement on peut considérer trois types de modèles : les modèles empiriques, analytique-empiriques et analytiques. [16]

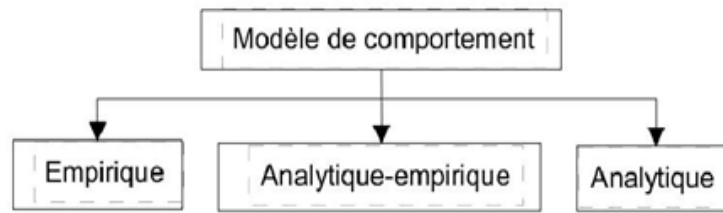


Figure 1.5 : Types de modèles de comportement. [16]

1.5.1. Modèle empirique :

Les modèles empiriques sont des modèles basés sur l'analyse de l'observation des dégradations des chaussées et en particulier leur évolution.

1.5.2. Modèles analytique-empiriques :

Les modèles analytique-empiriques se basent pour une part sur les lois de comportement des matériaux, mais également sur l'observation de l'évolution des dégradations des chaussées. Ces modèles permettent de combiner les avantages des modèles analytiques et empiriques tout en diminuant les inconvénients de l'un et de l'autre. [17]

1.5.3. Modèles analytiques :

Les modèles analytiques sont basés sur l'application des lois théoriques de comportement des matériaux. Les structures de chaussées étant un système multicouche de matériaux hydrocarbonés, ces modèles nécessitent la détermination d'un nombre considérable de paramètres. Ces modèles présentent l'avantage de pouvoir simuler le comportement de n'importe quel type de structure bitumineuse pour des conditions de sollicitations (charge, température) définies. Toutefois, ces modèles sont difficilement applicables de par la difficulté du calage des sollicitations théoriques avec les sollicitations réelles que subit la chaussée. [18]

1.6. Conclusion :

Les bases nécessaires à la caractérisation et la classification des matériaux des spécifications liées aux conditions d'exécution des chantiers et aux risques d'évolution du matériau sous l'effet du trafic (attrition, matériau d'essence évolutive..) ont fait l'objet de ce chapitre à caractère bibliographique.

Au vu de l'expérience capitalisée durant plus de trois décennies et des moyens-modernes permettant de mieux comprendre le comportement des matériaux sous fatigue, il serait opportun de faire un constat réel des routes, dans des conditions technico-économiques convenables de procéder à une démarche rationnelle qui sortirait ces matériaux du stade local à un stade plus universel.

Cependant, le chapitre suivant expose les éléments nécessaires à une modélisation numérique en tenant compte d'un couplage hydrique et mécanique.

Chapitre 2

*Aspects théorique sur le couplage
hydromécanique*

2.1. Introduction

La modélisation des aspects physiques de comportement d'une chaussée semi-rigide, nécessite la prise en compte du couplage hydromécanique entre l'écoulement d'eau dans les différentes couches qui compose la structure sujet de notre étude et entre les charges mécaniques induites par la structure et les charges d'exploitation à savoir le trafic.

Chaque discipline porte donc un regard particulier sur l'eau et nous décrirons dans ce chapitre celui de la mécanique des sols et des roches.

Dans ce chapitre de ce projet de fin d'études nous allons présenter un modèle numérique pour le traitement du couplage hydromécanique en milieu fibreux déformable. Ce modèle est basé sur des équations de conservation moyennées obtenues par la méthode de prise de moyenne des équations de conservation (masse, quantité de mouvement).

La relation de Terzaghi est introduite pour permettre d'explicitier le phénomène de couplage entre écoulement du fluide et déformation du milieu poreux. Un schéma numérique par éléments finis couplé à un à un algorithme de résolution itératif est développé pour résoudre ce couplage. [20]

2.2. Position du problème (opération du couplage numérique) :

Quelle démarche adopter pour rendre compte du couplage hydromécanique (interaction comportement hydrique / comportement mécanique)?

La démarche à suivre comporte les étapes suivantes :

- ❖ Problème à long terme (analyse en contraintes effectives)
- ❖ Problème à court terme (analyse en contraintes totales)
- ❖ Problème couplé en régime transitoire

L'eau a deux formes d'interaction avec les milieux poreux : elle se déplace dans les pores et elle exerce une pression sur la phase solide et la déforme. Ces deux phénomènes coexistent en général. Ils ont reçu des noms différents dans chaque discipline. En mécanique des sols on distingue :

- L'hydraulique des sols, qui étudie les écoulements dans un milieu poreux indéformable,

- La (théorie) de la consolidation, qui étudie les écoulements transitoires dans un milieu poreux déformable, en couplant l'écoulement de l'eau et les déformations du sol au cours du temps.

L'hydraulique des sols fournit les instruments du calcul des débits (débit à travers un barrage, débit vers une excavation, débit vers un puits de pompage...). Elle donne aussi les champs de pressions d'eau qui permettent d'analyser la stabilité de certains ouvrages (pentes, soutènements, barrages, excavations, ...).

La théorie de la consolidation s'applique au calcul au cours du temps des déformations des massifs de sol soumis à des charges (fondations, remblais) ou à des modifications des conditions hydrauliques (abaissement naturel ou artificiel du niveau des eaux souterraines).

2.3. HYDRAULIQUE DES SOLS SATURÉS

2.3.1 Généralités

Il est pratiquement impossible de décrire de façon détaillée l'écoulement de l'eau entre les particules d'un sol. La forme et les connections des vides sont inconnues dans un empilement quelconque de particules. Les définitions relatives à l'hydraulique des sols sont pour cette raison établies sur des valeurs moyennes du volume des pores. Ce choix est cohérent avec celui de la définition des contraintes et des déformations. Mais il implique que les résultats des études d'hydraulique des sols ne doivent pas être analysés à une échelle trop petite, pour laquelle les phénomènes physiques ne sont plus décrits par leurs moyennes. On admet souvent que le nombre de particules d'un volume élémentaire doit être de l'ordre d'un millier. Si les particules sont très petites, comme dans les argiles, le volume élémentaire est très petit (10^{-5} mm³). Pour des sables fins, dont les particules ont des dimensions de l'ordre de 0,2 mm, le volume élémentaire est d'environ dix centimètres cubes. Pour des graviers (2 cm), le volume élémentaire est d'environ dix décimètres cubes. Pour des enrochements d'un mètre de dimension moyenne, le volume élémentaire serait de dix mètres cubes. Il est évident que seul les problèmes d'écoulements dans des sols assez fins peuvent être analysés en pratique avec les outils décrits dans ce chapitre.

2.3.2 Définitions

2.3.2.1 Ligne et tube de courant

Si l'on imagine l'écoulement « moyen » de l'eau à l'intérieur d'un massif de sol, on peut suivre le déplacement au cours du temps de l'eau contenue initialement dans un volume élémentaire. Cette trajectoire de cette eau est appelée « ligne de courant ». Une ligne de courant a la propriété de ne pouvoir être traversée par l'eau, puisque c'est sa propre trajectoire.

On appelle « tube de courant » la trajectoire de l'eau qui passe sur la frontière de cette surface (Figure 2.1). Toute l'eau qui entre dans un tube de courant ressort à l'autre extrémité du même tube, puisqu'aucune des lignes de courant formant le tube ne peut être traversée.

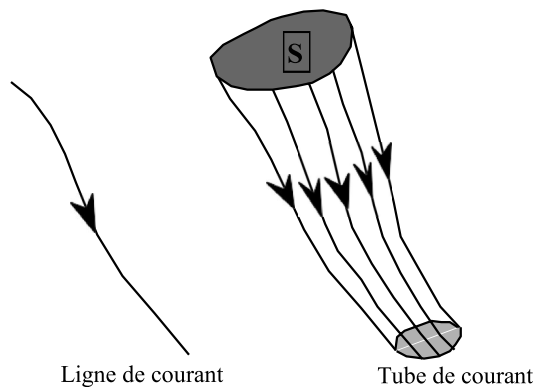


Figure 2.1 Ligne et tube de courant

2.4.22 Vitesse d'écoulement (de percolation ou de filtration)

Nous admettrons pour simplifier l'exposé que la surface S de la figure 3.12 est normale aux lignes de courant. Appelons q le débit de l'écoulement à travers la surface S , c'est à dire le volume ΔV_w de l'eau qui traverse cette surface par unité de temps Δt :

$$q = \frac{\Delta V_w}{\Delta t} .$$

On appelle « vitesse d'écoulement » à travers la surface S le rapport du débit q à l'aire de S :

$$v = \frac{q}{S} .$$

Cette vitesse est dirigée selon la normale \vec{n} à la surface S . La vitesse d'écoulement ainsi définie est le rapport de la quantité d'eau qui traverse réellement la surface S à une surface.

2.4.23 Charge hydraulique

La mécanique des fluides définit une charge hydraulique composée de trois termes (§3.3.21) :

$$h = \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z$$

où p est la pression de l'eau, ρ sa masse volumique, g l'accélération de la pesanteur, v la vitesse de l'écoulement et z l'altitude au-dessus d'un plan de référence. Les vitesses d'écoulement de l'eau dans les sols sont en général très faibles. En mécanique des sols, on néglige donc systématiquement le terme d'énergie cinétique dans la définition classique de la charge hydraulique. D'autre part, on désigne par u la pression de l'eau dans les pores du sol et par ρ_w la masse volumique de l'eau. La définition de la charge hydraulique au sens de la mécanique des sols est donc la suivante :

$$h = \frac{u}{\rho_w g} + z \quad . \text{ La charge hydraulique a pour dimension [L] et s'exprime en mètres.}$$

2.4.2.4 Équipotentielle

Les surfaces d'égale valeur de la charge hydraulique sont appelées surfaces équipotentielles ou « équipotentielles ».

2.4.2.5 Gradient hydraulique

La dernière notion nécessaire à la description des mouvements de l'eau dans le sol est le gradient hydraulique i , qui est par définition l'opposé du gradient de la charge hydraulique h :

$$\vec{i} = -\overline{\text{grad}} h \quad .$$

Le gradient hydraulique, dérivée d'une longueur par rapport à une autre longueur est un paramètre sans dimension.

2.4.3 Loi de Darcy

La loi expérimentale de Darcy (1856) décrit le mouvement du fluide à l'intérieur des pores du sol. Établie pour un écoulement d'eau dans un sable propre saturé, elle a été généralisée aux écoulements dans les autres types de sols saturés et sert aussi pour les écoulements d'autres fluides (pétrole, gaz, air, ...) seuls ou en mélange. C'est donc une des lois les plus importantes de l'hydraulique dans les milieux poreux.

2.4.3.1 Les expériences de Darcy

Les expériences de Darcy ont été réalisées à Dijon en octobre 1855 et février 1856. Inspecteur général des Ponts et Chaussées, alors en retraite anticipée pour raison de santé, H.P.G. Darcy a exécuté dans la cour de l'hôpital de cette ville, avec l'ingénieur Charles Ritter, des expériences d'écoulement d'eau à travers des tubes verticaux remplis de sable propre qui l'ont conduit à formuler la relation qui porte son nom entre la vitesse d'écoulement de l'eau et le gradient hydraulique.

$$\frac{Q}{A} = v = k \frac{\Delta h}{L} ,$$

En appelant A l'aire de la section du tube. Le coefficient k est une constante du sable, appelé « coefficient de perméabilité ».

La loi expérimentale de Darcy, établie dans des cylindres de section constante pour un écoulement unidirectionnel, peut être généralisée aux trois directions de l'espace, en définissant un tenseur de perméabilité \bar{k} qui lie le vecteur de vitesse d'écoulement au vecteur gradient hydraulique :

$$\vec{v} = \bar{k} \cdot \vec{i} .$$

Lorsque l'orientation des axes est quelconque, le tenseur de perméabilité est un tenseur symétrique à six coefficients indépendants :

$$\bar{k} = \begin{pmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{xy} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{xz} & k_{xy} & k_{zz} \end{pmatrix} .$$

Analyse du coefficient de perméabilité

Le coefficient de perméabilité k, qui décrit la vitesse d'écoulement moyenne de l'eau à travers les pores du sol, dépend de trois facteurs principaux, qui sont :

- le volume et la géométrie de l'espace dans lequel l'eau circule,
- les propriétés de l'eau (notamment sa viscosité, qui dépend elle-même de la température),
- les conditions de contact de l'eau avec les particules, déterminées par la nature des

particules et leurs interactions plus ou moins grandes avec l'eau.

Il est impossible d'analyser séparément l'influence de ces trois facteurs car la géométrie des pores dépend de la nature des particules et est donc liée aux conditions de contact de ces particules avec l'eau, tandis que la viscosité de l'eau a aussi une influence sur les conditions

d'interaction entre l'eau et les particules. Cette difficulté a conduit à caractériser d'abord l'influence de la viscosité de l'eau, puis à relier la perméabilité aux particules et aux pores du sol en distinguant les sols grenus et les sols fins argileux.

L'influence de la viscosité de l'eau est celle que l'on met le plus facilement en évidence, puisqu'il suffit de chauffer l'eau pour modifier sa viscosité. Le coefficient de perméabilité k est inversement proportionnel à la viscosité du liquide interstitiel et on peut l'écrire sous la forme :

$$k = \frac{\gamma_w K}{\mu},$$

en séparant l'influence de la viscosité et des autres facteurs liés à la géométrie des pores et aux interactions avec les particules.

La **viscosité dynamique** μ , égale au produit de la viscosité cinématique ν par la masse volumique du fluide qui se déplace dans le sol, vaut

$$\mu \cong 10^{-6} \text{ kN} \cdot \text{s} / \text{m}^2 \quad \text{Pour l'eau pure à } 20^\circ\text{C}.$$

Le coefficient de perméabilité (à l'eau) augmente d'environ 20% quand la température du sol (et de l'eau) passe de 10°C à 20°C .

Le **coefficient** K , appelé « perméabilité » ou « perméabilité géométrique » ou « perméabilité intrinsèque » a la dimension d'une surface

$$[K] = \frac{[L \cdot T^{-1}][ML^{-1}T^{-1}]}{[ML^{-2}T^{-2}]} = [L^2] \quad . \text{ Cette dernière est utilisée dans ce travail.}$$

Bien que l'on puisse exprimer la perméabilité intrinsèque en mètres carrés, la perméabilité intrinsèque est souvent exprimée en « darce » (10^{-12} m^2) ou en « darcy » ($0,987 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$).

2.5 Équation générale de l'écoulement

Les mouvements de l'eau dans les sols obéissent d'une part à la loi de conservation de la masse (de l'eau) et d'autre part à la loi de Darcy. La combinaison de ces deux lois, exprimées en coordonnées d'Euler, permet d'établir l'équation générale de l'écoulement de l'eau dans le sol, dont l'inconnue est la charge hydraulique.

2.5.1 Loi de conservation de la masse d'eau

Considérons un domaine fixe D quelconque à l'intérieur du sol (Figure 2) et écrivons que la masse de l'eau comprise à l'instant t dans ce volume reste constante au cours du temps (principe de conservation de la masse). La masse M_w de l'eau s'exprime en fonction de la porosité n par :

$$M_w = \int_D n \rho_w dV .$$

Quel que soit le domaine D, la masse de l'eau doit rester constante, soit :

$$\frac{dM_w}{dt} = 0 .$$

On en déduit la condition :

$$\int_D \left[\frac{\partial}{\partial t} (n \rho_w) + \text{div}(n \rho_w \vec{v}') \right] dV = 0 ,$$

Dans laquelle la vitesse de l'eau est la vitesse moyenne vraie v' . Il vient ensuite :

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \text{div}(n \vec{v}') = 0$$

qui s'écrit finalement, puisque $\vec{v} = n \vec{v}'$:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \text{div} \vec{v} = 0 .$$

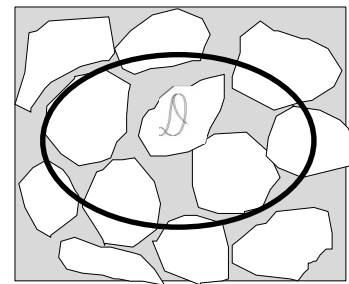


Figure 2.2

Définition du domaine D

2.5.2 Équation de la charge hydraulique (Équation générale de l'écoulement)

Deux équations doivent être simultanément vérifiées en tout point du sol :

- l'équation de conservation de la masse de l'eau, que nous venons d'établir :

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \text{div} \vec{v} = 0 ,$$

- et la loi de Darcy :

$$\vec{v} = -\bar{k} \overline{\text{grad}} h .$$

En éliminant la vitesse d'écoulement entre ces deux équations, on obtient l'équation générale :

$$\text{div} \left[\bar{k} \overline{\text{grad}} h \right] = \frac{\partial n}{\partial t} ,$$

qui relie la charge hydraulique h à l'indice des vides n.

Si l'on se place dans les axes principaux du tenseur de perméabilité, dont il a été noté plus haut qu'ils correspondent en général au plan horizontal et à la direction verticale, on obtient l'équation aux dérivées partielles du second ordre :

$$\operatorname{div} \left[k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} + k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} + k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right] = \frac{\partial n}{\partial t} .$$

Si les coefficients de perméabilité sont les mêmes en tout point du massif de sol, cette

équation s'écrit :

$$k_{xx} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_{yy} \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_{zz} \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{\partial n}{\partial t} .$$

Si, de plus, le coefficient de perméabilité est le même dans toutes les directions (sol isotrope), l'équation prend la forme :

$$k \left[\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right] = \frac{\partial n}{\partial t} ,$$

c'est à dire :

$$\Delta h = \frac{\partial n}{\partial t} .$$

Cette équation générale régit tous les types d'écoulements qui peuvent se produire dans les sols : écoulements transitoires, écoulement permanents, écoulements en milieu déformable. Elle est analogue aux équations de propagation de la chaleur et de l'électricité.

Écoulement permanent

Les écoulements permanents sont par définition invariables au cours du temps, de sorte que l'équation générale précédente se réduit dans ce cas à :

$$\operatorname{div} \left[\bar{k} \overline{\operatorname{grad}} h \right] = 0 ,$$

Et, avec la même succession d'hypothèses que dans le paragraphe précédent, à l'équation de Laplace :

$$\Delta h = 0 .$$

Forces d'écoulement

L'écoulement de l'eau dans le sol s'effectue avec perte de charge hydraulique, c'est à dire avec perte d'énergie. Cette énergie est dissipée par l'interaction de l'eau avec les grains. Cette interaction peut être représentée par le travail d'une force d'écoulement, exercée par l'eau sur les particules du squelette solide du sol. Cette force d'écoulement, dont nous allons évaluer l'intensité, est orientée dans le sens de l'écoulement.

Considérons un sol saturé dans lequel s'est établi un écoulement d'eau. Au niveau local, les conditions d'équilibre s'écrivent, en contraintes totales, sous la forme :

$$\operatorname{div} \bar{\sigma} = \rho \bar{g} .$$

D'autre part, le principe des contraintes effectives relie les contraintes totales, la pression interstitielle et les contraintes effectives par la relation :

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}' + u \cdot \bar{1} \quad .$$

Enfin, la définition de la charge hydraulique conduit à écrire la relation :

$$u = \rho_w g (h - z) \quad ,$$

Avec les notations classiques pour ce problème :

$\bar{\sigma}$ - tenseur des contraintes totales	ρ - masse volumique du sol
$\bar{\sigma}'$ - tenseur des contraintes effectives	ρ_w - masse volumique de l'eau
$\bar{1}$ - tenseur unité	h - charge hydraulique
u - pression interstitielle	z - altitude du point par rapport à un repère fixe
g - accélération de la pesanteur	

En reportant dans l'équation d'équilibre la définition des contraintes totales comme somme des contraintes effectives et de la pression interstitielle, et l'expression de cette dernière en fonction de la charge hydraulique, on obtient :

$$\text{div } \bar{\sigma} = \text{div } \bar{\sigma}' + \rho_w g \bar{\text{grad}} h - \rho_w g \bar{\text{grad}} z = \rho \bar{g} \quad .$$

Le terme $-\rho_w g \bar{\text{grad}} z$ est égal, avec la notation vectorielle \bar{g} pour l'accélération (verticale, dirigée vers le bas) de la pesanteur, à $-\rho_w \bar{g}$. L'équation précédente peut donc aussi s'écrire :

$$\boxed{\text{div } \bar{\sigma}' = (\rho - \rho_w) \bar{g} + \rho_w g \bar{1}} \quad .$$

Cette équation s'analyse, par analogie avec l'équation d'équilibre en contraintes totales :

$$\text{div } \bar{\sigma} = \rho \bar{g} \quad ,$$

Comme l'équation d'équilibre en contraintes effectives d'un milieu continu soumis à :

- une force volumique de pesanteur (verticale) appliquée à une masse volumique « déjaugée » égale à la différence de la masse volumique du sol et de la masse volumique de l'eau et à

- une force volumique d'écoulement, orientée dans le sens de la vitesse d'écoulement de l'eau et proportionnelle au gradient hydraulique et au poids volumique de l'eau.

Équivalence des équations en contraintes effectives et en contraintes totales

Ainsi, l'effet de l'écoulement de l'eau sur l'état des contraintes effectives (donc sur les

déformations et l'équilibre) du sol peut être décrit par deux systèmes d'équations équivalents :

- ❖ en introduisant la force d'écoulement $\rho_w g \vec{i}$ et la poussée d'Archimède $-\rho_w \vec{g}$:

$$\text{div } \overline{\overline{\sigma'}} = \rho \vec{g} + \left[\rho_w g \vec{i} - \rho_w \vec{g} \right]$$

Sol sans écoulement + forces volumiques dues à l'eau

- ❖ En faisant le bilan des forces volumiques totales et des pressions interstitielles appliquées sur la surface du volume de sol considéré. En effet, l'équation d'équilibre peut s'écrire aussi :

$$\text{div } \overline{\overline{\sigma'}} = \rho \vec{g} + \text{div}(\mathbf{u} \cdot \vec{\mathbf{1}}) \quad \text{ou} \quad \overline{\text{grad}} u$$

Sol sans écoulement + système de forces de surface

Suivant le problème à étudier, on utilisera l'une ou l'autre de ces approches. Ainsi, lorsque le gradient hydraulique \vec{i} est constant (cas d'un écoulement unidimensionnel uniforme), la force totale \vec{E} exercée par l'écoulement sur un volume de sol V quelconque est facile à calculer :

$$\vec{E} = \rho_w g V \vec{i} \quad .$$

Il est alors intéressant d'utiliser le premier système. Au contraire, dans le cas d'un écoulement quelconque, l'intégration des forces volumiques d'écoulement :

$$\vec{E} = \iiint_V \rho_w g \vec{i} \, dV$$

est longue et fastidieuse et il est plus simple d'utiliser le deuxième système et de calculer l'intégrale des pressions interstitielles sur le pourtour du massif de sol à étudier. La figure 2.2 montre deux exemples de l'utilisation pratique de la pression interstitielle.

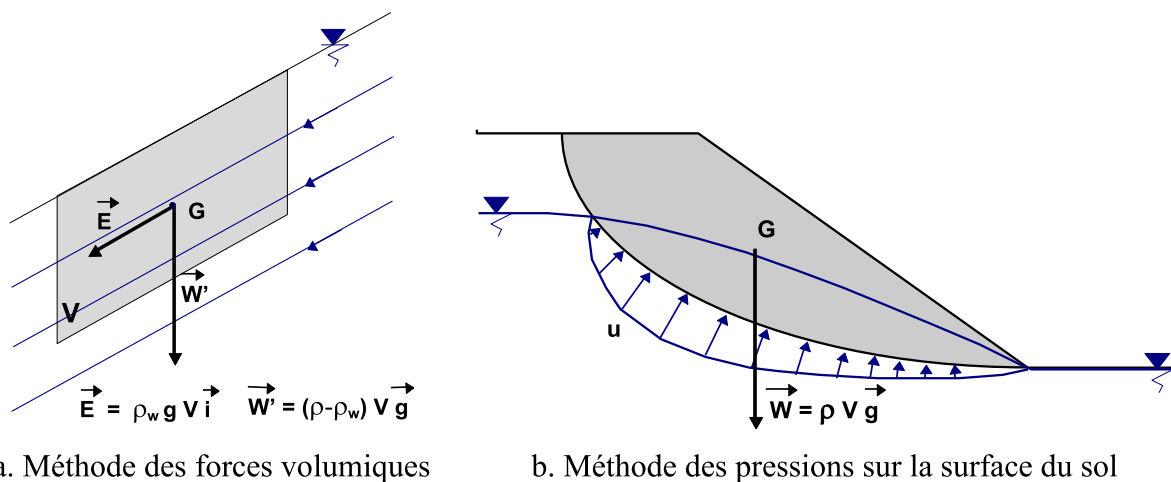


Figure 2.2 : Exemples de calcul du système des forces hydrauliques dans les sols

2.6. Conclusion

L'hydraulique des sols décrit les mouvements et les états de pression de l'eau dans les sols. Elle les décrit à l'échelle de volumes élémentaires, sur lesquels sont définies des quantités moyennes (vitesse d'écoulement, pression).

Les mouvements de l'eau dans les pores du sol dépendent principalement de la taille, de la nature et de l'arrangement plus ou moins dense des particules, d'une part, et des proportions de l'eau et de l'air dans les pores, d'autre part. Les sols non saturés sont le siège de phénomènes capillaires complexes. La succion est un facteur physique important du comportement des sols non saturés.

La loi expérimentale de Darcy est la base de toute l'hydraulique des sols. Elle fait intervenir les paramètres fondamentaux des écoulements : vitesse d'écoulement et lignes de courant ; charge hydraulique, gradient hydraulique et équipotentiels ; coefficient de perméabilité.

Le coefficient de perméabilité varie de huit puissances de dix entre les graviers et les argiles. Sa mesure est complexe et le résultat dépend du volume du sol testé. On détermine les coefficients de perméabilité en laboratoire ou sur le terrain, par des essais à charge constante ou à charge variable.

Les écoulements permanents dans les sols saturés isotropes sont régis par l'équation différentielle $\nabla^2 h = 0$, qui est analogue aux équations de l'électricité et de la thermique. La solution est représentée par un réseau d'écoulement (équipotentiels et lignes de courant).

La construction de réseaux d'écoulement s'effectue actuellement surtout par des méthodes numériques, mais on peut le faire par d'autres méthodes (analytique, d'analogie électrique, manuelle). Une fois construit, le réseau d'écoulement permet de déterminer les pressions interstitielles et les débits d'écoulement.

L'écoulement de l'eau applique des forces volumiques au squelette du sol. Lorsque l'écoulement est dirigé vers le haut, les forces d'écoulement s'opposent à la pesanteur et peuvent induire un phénomène de soulèvement hydraulique du sol (renard).

Chapitre 3

Présentations du cas d'étude

1.1 Introduction

Le projet en cours vise à étendre la route nationale RN-22 sur une distance de 13 km entre Tlemcen et Terny. Cette initiative comprend l'ajout d'infrastructures d'assainissement et de dispositifs de sécurité afin d'assurer la protection des usagers de la route et de leurs biens. La RN-22 est caractérisée par un trafic dense, la présence fréquente de poids lourds et des conditions météorologiques difficiles en hiver. Une méthode innovante a été élaborée pour effectuer les travaux sur la chaussée tout en minimisant les perturbations pour les véhicules, notamment sur les tronçons réputés pour leurs virages dangereux.

La DTP de Tlemcen est engagée dans un projet visant à élargir la route nationale RN-22 sur 13 km entre Tlemcen et Terny. Cette extension comprendra toutes les infrastructures nécessaires en termes d'assainissement et de sécurité pour répondre aux besoins des usagers de la route. La route est sujette à un trafic dense, la présence fréquente de poids lourds et des conditions météorologiques difficiles en hiver.



Photo 3.1 Projet de Terny (Décembre 2022 Photo prise par la DTP de Tlemcen).



Photo 3.2 Projet de Terny (08 Janvier 2023 Photo prise par la DTP de Tlemcen).



Photo 3.2 Projet de route (Juin 2023 photo prise par la DTP Tlemcen)



Photo 3.3 Projet en cours de réalisation (Photo prise par la DTP Tlemcen Février 2024)

Les quatre photos (3-1 ; 3-2 ; 3-3 ; 3-4) montrent l'évolution du projet de Terny y compris les difficultés rencontrées. Elles montrent que le projet est très récent.

2.1 Données du projet :

Le tracé est composé de 04 sections différentes :

Tableau 3.1 Position des 04 sections (Groupe, 06 Aout 2015)

Section	Emplacement de la portion.
01	La traversée de Beni Boublene s'étend sur une distance de 1,8 kilomètre.
02	Entre carrefour desservant Lala Setti et le carrefour de Beni Snous sur 4,2 km
03	Entre le carrefour Beni Snous et Terny sur 4.7km
04	Evitement de Terny sur 2,3 km



Photo 3.4. *Vue une image satellite illustrant la région d'étude ainsi que la position précise du site (capture provenant de Google Earth)*

La photo 3.4 montre une vue aérienne de la région d'étude, en précisant l'emplacement du site grâce à un extrait de Google Earth.

3.2.1 Données sismologique :

Du fait de la faible activité sismique dans la région de Tlemcen (I), il est essentiel de suivre les directives du règlement parasismique Algérien actuel (RPA 99 version 2003) lors de l'évaluation dynamique des structures. Il est crucial de concevoir ces ouvrages de manière à les rendre résistants aux tremblements de terre les plus intenses.

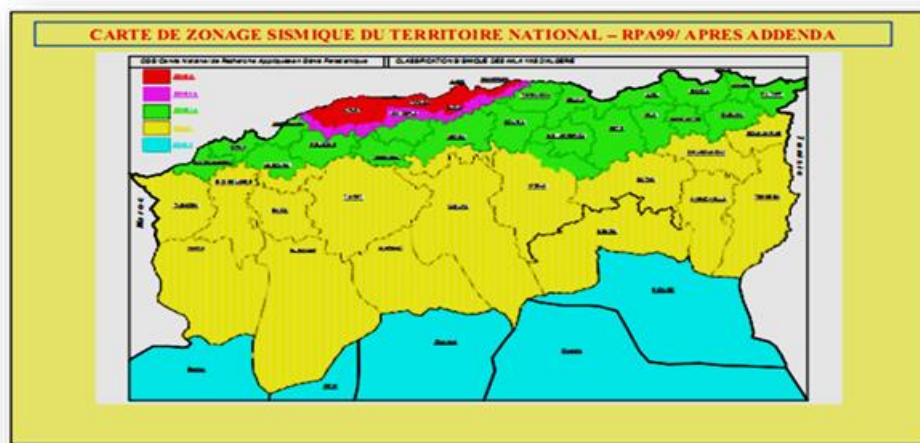


Figure 3.1 : *Carte de zonage sismique du territoire national (RPA 2013)*

3.2.2 Géométrie du projet :

3.2.2.1 Tracé en plan :

L'analyse commence au point kilométrique 1+725 et s'étend jusqu'au point kilométrique 9+250 sur une route à double voie avec circulation dans les deux sens. La chaussée, ayant une largeur moyenne de 7 m, est flanquée de bas-côtés de 2 m de chaque côté.



Photo 3.5. Tracé en plan du projet (Photographié par la DTP Tlemcen en février 2024).

Ci-dessus, la photo 3.5 qui présente le le plan du projet

3.2.2.2 Profil en long :

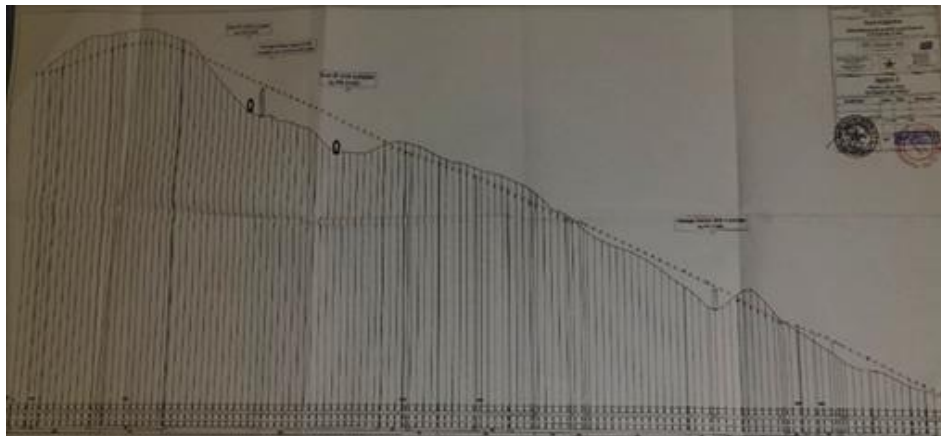


Photo 3.6. Profil en long du projet, photographié en février 2024 par la DTP Tlemcen

Voici ci-dessous, la photo 3.6 qui montre une vue d'ensemble du projet sujet de ce projet de fin d'études.

3.2.2.3 Profil en travers :

La figure ci-dessous 3.2 illustre le profil en travers détaillé du point analysé dans cette étude. La figure montre les dimensions et donne une idée sur les conditions aux limites qui peuvent être envisagées dans les simulations numériques qui seront étudiées dans le chapitre suivant.

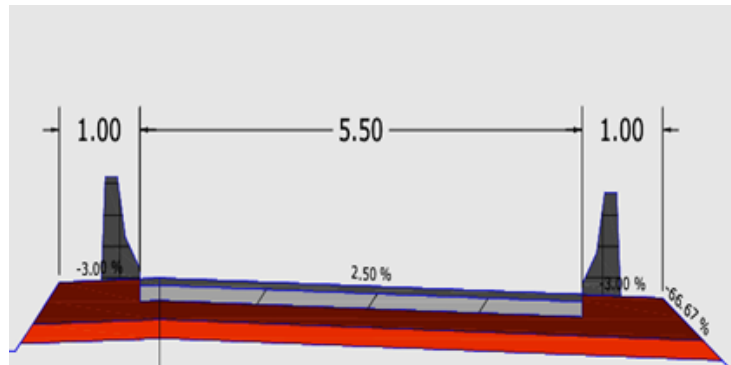


Figure 3.2 : Profil en travers du point d'étude. Extrait rapport DTP

3.1 Etudes géotechniques du projet et présentation topographique :

3.2.3 Travaux d'investigation in-situ :

Le programme de reconnaissance a été basé sur la réalisation de plusieurs sondages et travaux de carottage pour une meilleure estimation des paramètres physique, mécanique et hydrauliques nécessaires au calcul numérique.

3.2.3.1 Travaux de carottage et sondages :

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



Photo 3.7. Opération de sondage premier Point (La DTP Tlemcen).

Grâce à l'utilisation d'une foreuse Seddidril, l'opération a été déroulée avec succès dans de bonnes conditions. Trois sondages ont été réalisés. Nous avons exploité dans ce projet de fin

d'études les résultats du sondage 03, vu les suggestions des encadrants et aussi en complémentarité avec le projet de fin d'études de mes deux collègues Aissaoui et Mohammedi concernant le cas des chaussées rigides. Les tableaux suivants résument le dépouillement des éléments nécessaires de ce sondage.

Tableau 3.2 : Repérage de sondage SC 03 selon le (Groupe, 06 Aout 2015)

N° de sondage	Point kilométrique
SC03	1+725

Tableau 3. : Coordonnées de sondage SC03 (Groupe, 06 Aout 2015)

Coordonnées	SC 03
X	0649350
Y	3852085
Z	1158

3.2.3.2 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 récapitulées dans le tableau suivant 3.4. Le détail des paramètres de calcul utilisés est reporté à titre indicatif et informatif dans les annexes A et B à la fin de ce projet de fin d'étude. Ce choix facilite l'exploitation de rapport géotechnique pour des futurs travaux dans ce domaine. Cette contribution reste modeste par rapport à une exploitation profonde d'une part par la durée courte de ce projet de fin d'études et d'autre part l'état de santé de candidat.

Tableau 3.4 : Différentes couches géologiques (Groupe, 06 Aout 2015)

Profondeur (m)	Type de formation géologique
0.00 à 0.40	Terre végétale
0.40 à 1.50	Conglomérat : des graviers et galets emballés par une matrice argileuse
1.50 à 1.90	Argile marneuse compacte de couleur grisâtre à marron.
1.90 à 2.70	Grès friable et fragmenté de couleur beige à blanchâtre .
2.70 à 7.00	Marne compacte de couleur verdâtre à grisâtre, à aspect schisteux au début de l'intervalle devenant dure à aspect rocheux à partir de 3,30 m
7.00 à 12.00	Argile compacte de couleur marron, renfermant des fragments de la marne dure

3.3 Conclusion :

Ce chapitre présente les résultats de l'étude géotechnique effectuée dans le cadre de la modernisation d'une partie de la route nationale RN-22. Il souligne la diversité des sols dans la zone étudiée, comprenant 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 sont dérivées des sondages effectués, ces paramètres affectent énormément les résultats des tests et simulations numériques envisagés dans ce projet de fin d'études.

Chapitre 4

Modélisation numérique d'une chaussée semi-
rigide

4.1 Introduction

Grace à l'outil numérique, il est possible de résoudre un problème à l'aide de méthodes numériques telles que la méthode des éléments finis, la méthode des différences finies et la méthode des volumes finis.

Parfois le problème fait appel à plusieurs phénomènes physiques, dans ce cas, le problème est dit multiphysique. Ce chapitre présente la méthodologie, l'outil et les hypothèses de calcul dans la simulation numérique hydromécanique du profil en travers présenté dans le chapitre précédent.

4.2 Paramètres globaux et réglages préliminaires

Le logiciel utilisé est Comsol Multiphysics, avec les unités SI du système international.

Quatre modules sur les trente-deux modules proposés par Comsol sont utilisés dans ce travail de fin d'études :

- ✓ Design Module (*Module de conception*)
- ✓ Geomechanics Module (*Module Géomécaniques*)
- ✓ Structural Mechanics Module (*Module de Mécanique des Structures*)
- ✓ Subsurface Flow Module (*Module d'écoulement souterrain*)

La simulation est réalisée en 2D c'est-à-dire l'hypothèse de déformation plane est admise, elle est pleinement justifiée vu la dimension importante de la longueur de projet par rapport aux dimensions transversales.

4.3 Géométrie

La figure 4.1 présente la géométrie du problème étudié. Il s'agit d'un profil en travers d'une chaussée semi-rigide sur un multicouche avec présence d'eau.

En résumé, la géométrie est comme suit : dimensions 2 (x et y), le nombre de domaines est douze (12), le nombre de frontières est de quarante-neuf (49) et le nombre de sommets est de trente-huit (38).

Pour chaque domaine, un matériau est affecté.

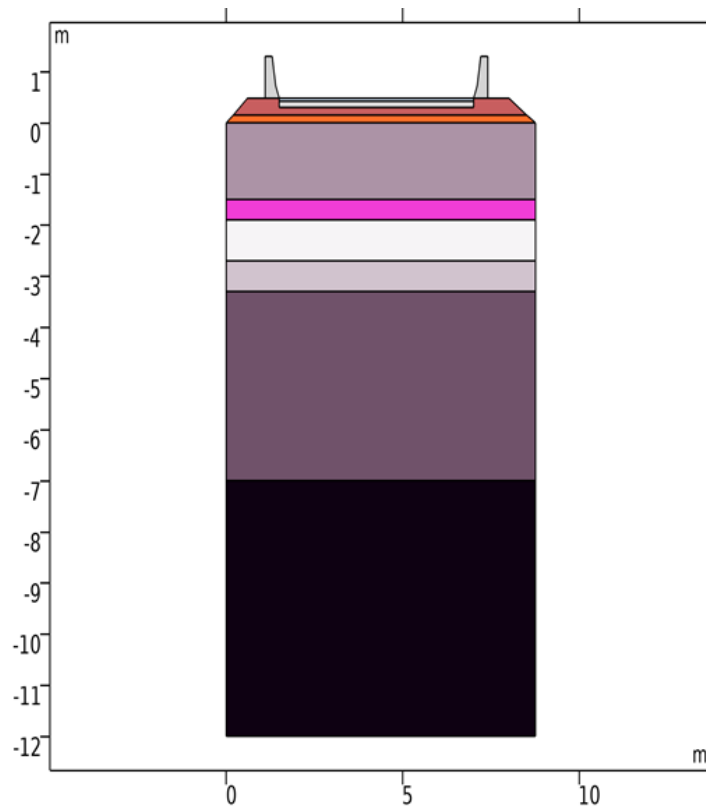


Figure 4.1: Modèle physique étudié.

4.4 Matériaux

4.4.1. Séparateurs : Les séparateurs sont modélisés comme deux domaines identiques comme le montre la figure 4.2 ci-dessous.

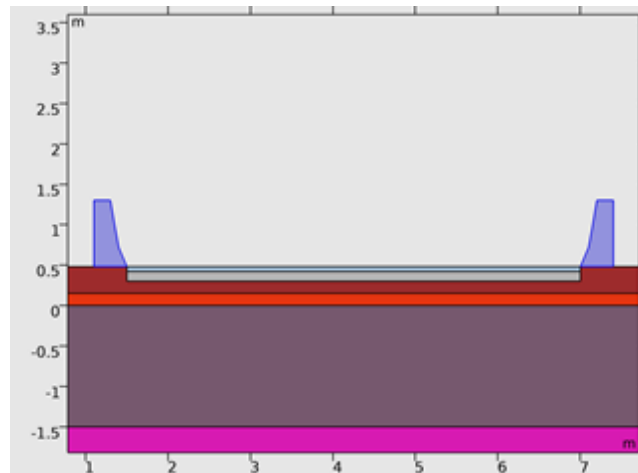


Figure 4.2 : Les séparateurs.

Le tableau ci-dessous présente les paramètres du séparateur utilisés.

Tableau 4.1: Paramètres utilisés pour les séparateurs.

Désignation	Valeurs	Unité
Young's modulus	30000000000	Pa
Porosity	0.05	--
Poisson's ratio	0.15	--
Density	2200	kg/m ³
Permeability	0.0000000001	m ²
Biot-Willis coefficient	1	--

4.4.2. Couche de base

La couche de base est modélisée comme suit sur la figure 4.3. Encore une autre fois les extrémités montrent les conditions aux limites utilisées dans le test numérique.

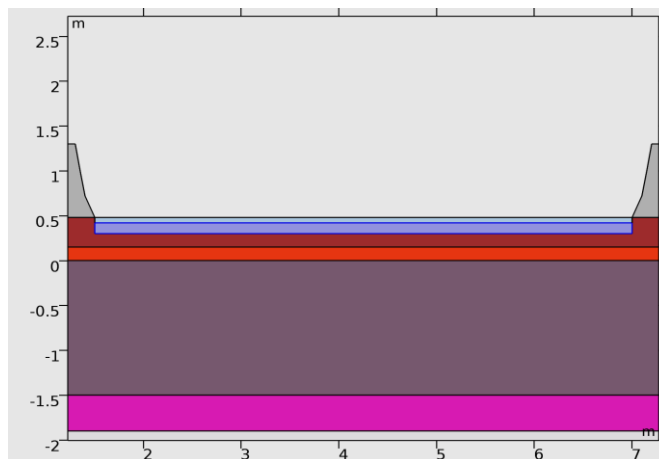


Figure 4.3: Couche de base.

Le tableau ci-dessous présente les paramètres utilisés.

Tableau 4.2: Paramètres utilisés pour la couche de base.

Désignation	Valeurs	Unité
Density	2250	kg/m ³
Permeability	0.001	m ²
Young's modulus	40000000000	Pa
Poisson's ratio	0.2	--
Porosity	0.2	--
Biot-Willis coefficient	1	--

4.4.3. Couche semi-rigide :

Par contre la couche semi rigide est schématisée sur le figure 4.4 ci-dessous.

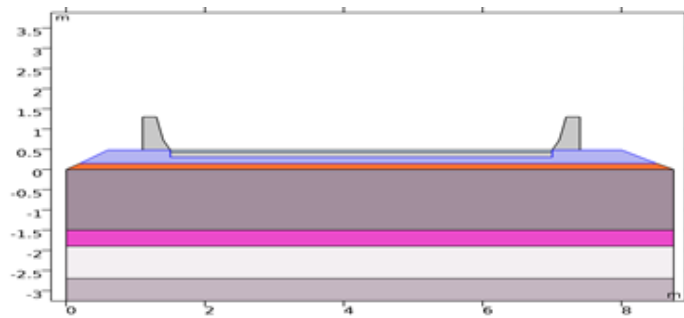


Figure: 4.4 : Couche semi-rigide.

Le tableau 4.3 ci-dessous résume les valeurs des paramètres utilisés dans cette couche.

Tableau 4.3: Paramètres utilisés couche semi-rigide.

Désignation	Valeur	Unité
Density	1600	kg/m ³
Porosity	0.2	--
Permeability	0.05	m ²
Young's modulus	20000000000	Pa
Poisson's ratio	0.2	--
Biot-Willis coefficient	1	--

4.4.4. Couche de roulement :

La couche de roulement est représentée sur la figure 4.5 en détail.

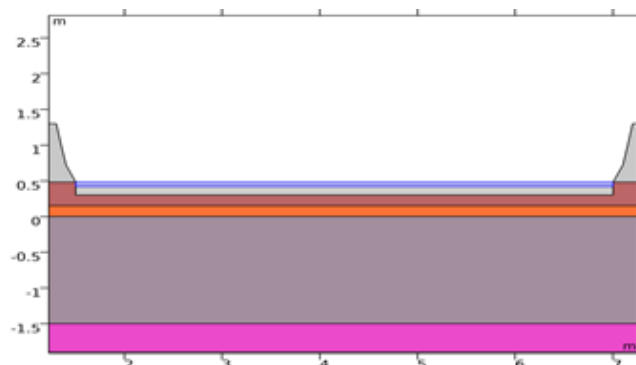


Figure 4.5 : Couche de roulement.

Le tableau 4.4 ci-dessous présente les paramètres utilisés pour la couche de roulement.

Tableau 4.4.: Paramètres utilisés couche de roulement.

Design	Value	Unit
Young's modulus	40000000000	Pa
Poisson's ratio	0.2	--
Permeability	0.001	m ²
Porosity	0.2	--
Density	2250	kg/m ³
Biot-Willis coefficient	1	--

4.4.5. Couche anti-contaminante :

La couche anti-contaminante est représentée sur la figure 4.6.

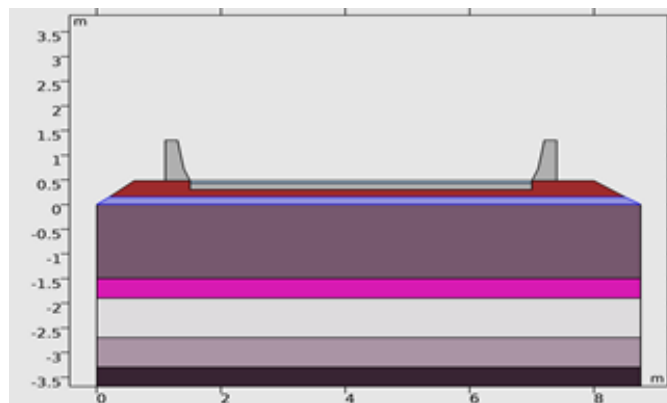


Figure. 4.6. Couche anti-contaminante.

Le tableau 4.5 ci-dessous présente les paramètres utilisés pour cette couche.

Tableau 4.5.: Paramètres utilisés de la couche anti-contaminante.

Name	Value	Unit
Density	1500	kg/m ³
Porosity	0.3	--
Permeability	0.000084	m ²
Young's modulus	20000000000	Pa
Poisson's ratio	0.3	--
Biot-Willis coefficient	1	--

4.4.6. Conglomérats, argile marneuse, grès, marne et argile compacte :

La figure 4.7 schématise le modèle géométrique de cette couche en détail.

De la même manière, la partie supérieure des terrassements et les couches de sol sont modélisés.

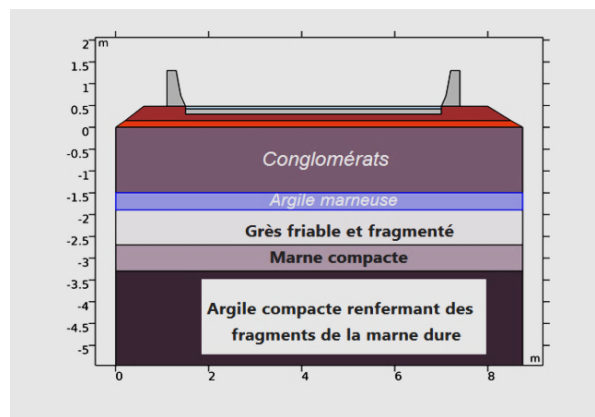


Figure:4.7 : PST et couches de sol.

4.5 Loi de Darcy

En utilisant le module *écoulement souterrain*, la loi de Darcy est appliquée pour tous les domaines et les interfaces du modèle physique comme le montre la figure 4.8.

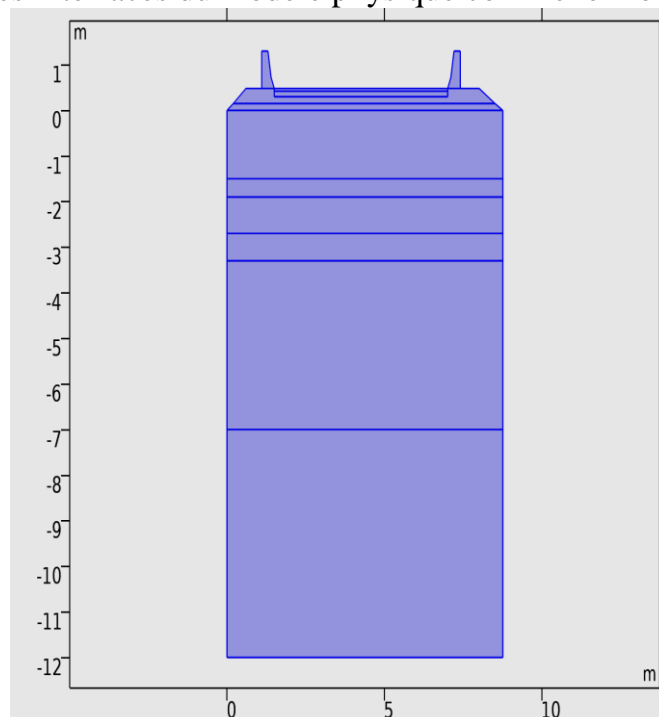


Figure 4.8: Loi de Darcy

Les équations ci-dessous sont implantées.

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = Q_m \quad (\text{Eq. 4.1}) \quad \mathbf{u} = -\frac{\kappa}{\mu} (\nabla p + \rho \mathbf{g}) \quad (\text{Eq. 4.2})$$

De la même manière, la partie supérieure des terrassements et les couches de sol sont modélisés.

4.5.1. Charge hydraulique et précipitation

La charge hydraulique et les précipitations sont modélisés comme suit (Figures 4.9-a et 4.9-b):

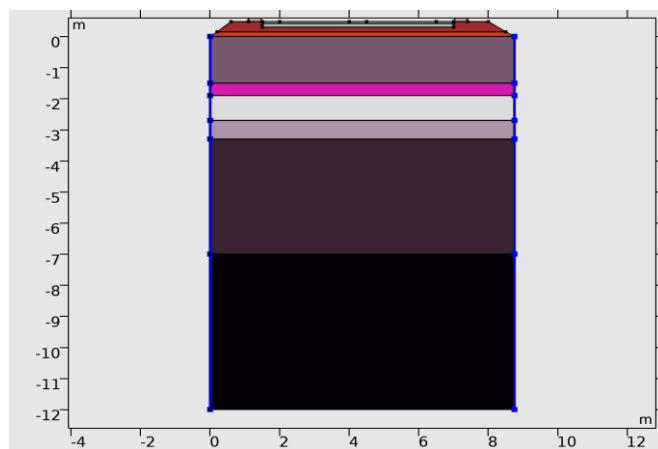


Figure 4.9-a.: Charge hydraulique

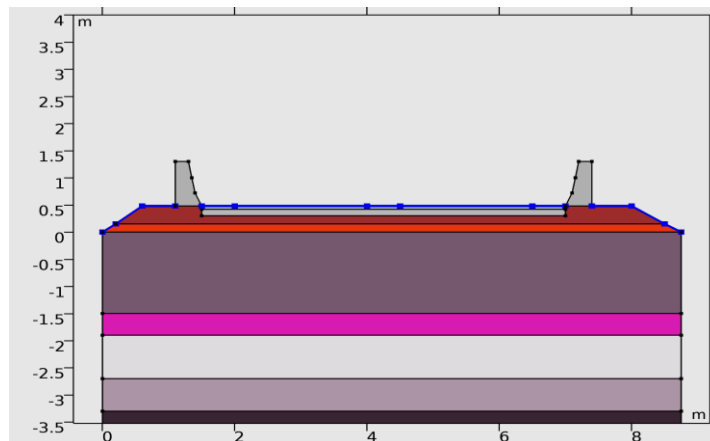


Figure 4.9-b: Précipitations

4.5.2. Mécanique du solide et interfaces

Dans la modélisation numérique d'une chaussée semi-rigide, la mécanique des solides et les interfaces sont essentielles. Les couches de la chaussée sont modélisées comme des solides avec des comportements élastiques ou viscoélastiques, et les interfaces entre les couches sont représentées pour capturer leur interaction. L'interaction sol-structure est prise en compte via des conditions aux limites et une modélisation du sous-sol si nécessaire. Une analyse de contact peut également être effectuée pour simuler l'interaction roue-chaussée. Cette approche permet une représentation précise du comportement de la chaussée sous différentes conditions, aidant à la conception, à l'évaluation de la performance et à la maintenance.

4.6 Plasticité des sols

Grace au module géomécaniques, la plasticité des sols est considérée selon les équations ci-dessous et par rapport aux critères du tableau 4.6.

$$\dot{\epsilon}_{pl} = \lambda \frac{\partial Q}{\partial S}, \lambda \geq 0, F(\sigma, \sigma_{ys}) \leq 0, \lambda F = 0$$

$$F = \sqrt{J_2} + \alpha I_1 - k$$

$$\alpha = \frac{\tan \phi}{\sqrt{9 + 12 \tan^2 \phi}}, \quad k = \frac{3c}{\sqrt{9 + 12 \tan^2 \phi}}$$

Tableau 4.6 : Plasticité des sols

Description	Value
Yield criterion	Drucker - Prager
Match to Mohr-Coulomb criterion	On
Cohesion	From material
Angle of internal friction	From material
Use dilatation angle in plastic potential	Off
Include elliptic cap	Off

4.7 Maillage

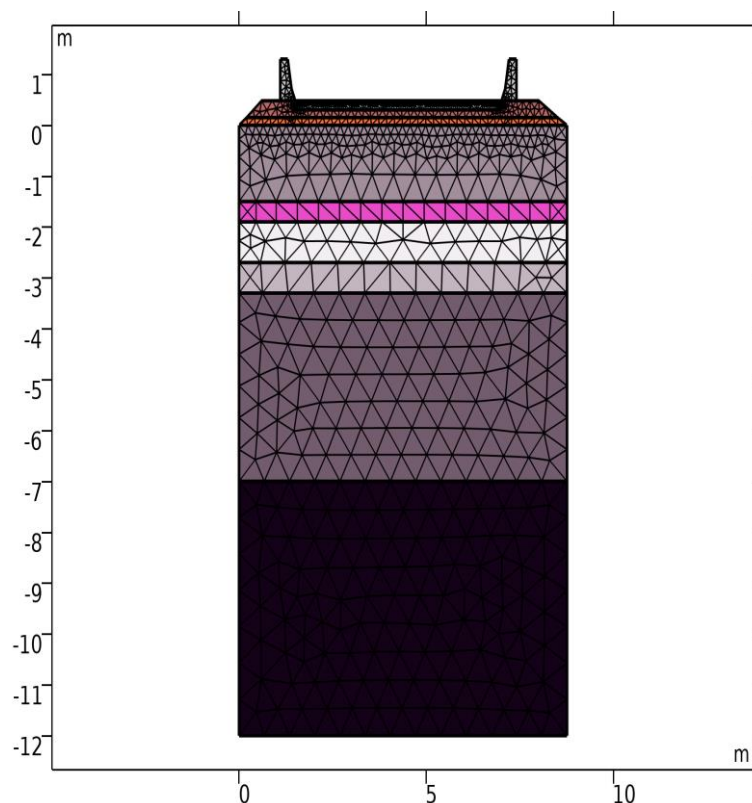


Figure 4.10 : Maillage

Pour le maillage utilisé, la qualité minimale des éléments est de 0,3863, la qualité moyenne des éléments est de 0,8923, le nombre d'éléments triangulaires égal à 1583, le nombre d'élément de bord vaut 427 et le nombre d'élément au sommet égal à 38.

4.8 Conclusion

La modélisation numérique des chaussées semi-rigides est essentielle pour comprendre leur comportement sous diverses conditions. À l'aide de logiciels spécialisés comme Comsol Multiphysics, la méthode des éléments finis est utilisée pour discrétiser la géométrie de la chaussée et résoudre les équations physiques impliquées.

Cette approche permet d'analyser la réponse structurelle de la chaussée, en évaluant les contraintes, déformations et durabilité sous l'impact du trafic routier. En tenant compte des propriétés des matériaux, des charges et des conditions environnementales, la simulation offre une vision complète du comportement de la chaussée.

Les résultats obtenus guident la conception, la gestion et la maintenance des chaussées, anticipant les dommages potentiels, identifiant les zones critiques et proposant des solutions d'amélioration. Ainsi, la modélisation numérique contribue à renforcer la durabilité, la sécurité et l'efficacité des réseaux routiers, tout en fournissant des outils essentiels pour les ingénieurs et décideurs dans ce domaine.

Chapitre 5

Résultats et Interprétations

5.1 Introduction

Une tentative d'interprétation des résultats avec une présentation détaillée de l'ensemble des tests et des simulations effectués est représentée dans ce dernier chapitre.

Les résultats sous forme de contraintes, déformations pressions interstitielles, vitesse d'écoulement et en tenant compte de la présence d'écoulement sont données pour une meilleure exploitation et dépouillement dans la pratique de l'ingénieur. Le chapitre se termine par des pistes intéressantes pour assurer la stabilité et la sécurité en tenant compte des aspects environnementaux dans la gestion des chaussées de la région d'étude.

5.2. Pressions (DL)

La figure 5.1 montre la distribution de la pression interstitielle pour le modèle (H). la plus grande valeur est enregistrée en bas de modèle. Ce qui est logique dans le cas d'une nappa statique. Résultat en cohérence avec la théorie fondamentale de l'hydrostatique.

La valeur numérique enregistrée est $2,5 \times 10^5$ Pa.

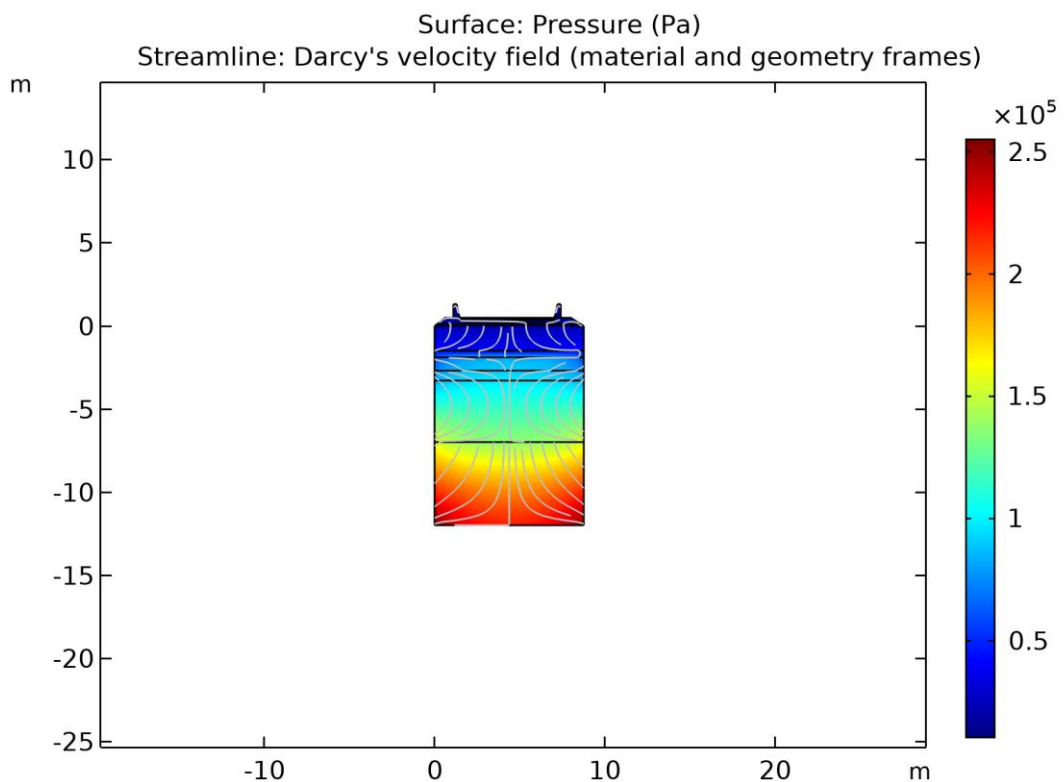


Figure 5.1: Pression interstitielle distribution de couplage H

5.3. Déplacements :

Dans la figure 5.2 les déplacements sont très remarquables avec une valeur de 10^{-5} m. Il s'agit de la composante verticale de l'effet des contraintes plastique volumique.

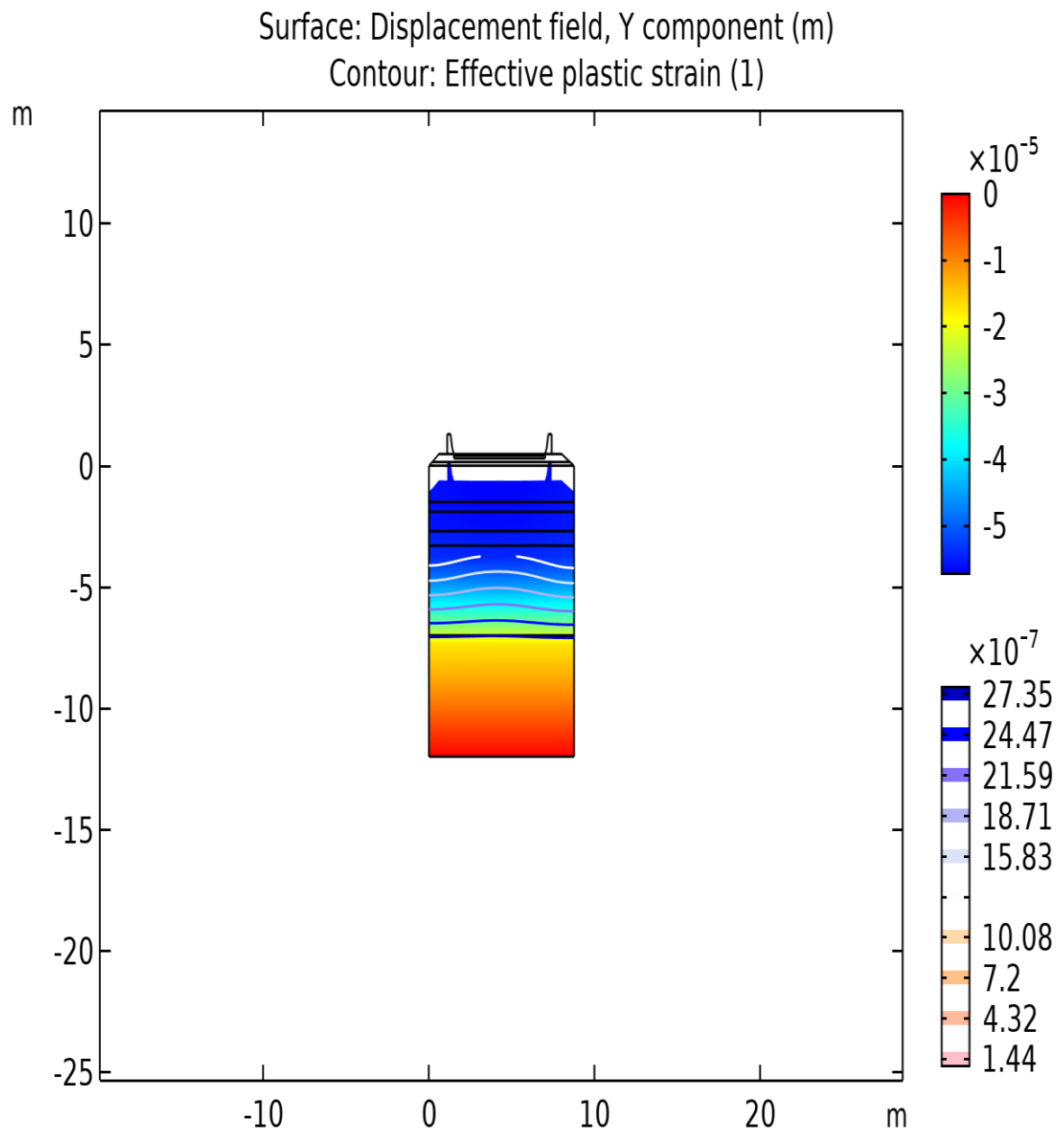


Figure 5.2: Déplacement verticale pour modèle HM

5.4. Charges volumiques :

La figure 5.3 montre la charge volumique sur la chaussée sa valeur égale à $2.6 \times 10^4 \text{ N/m}^3$.

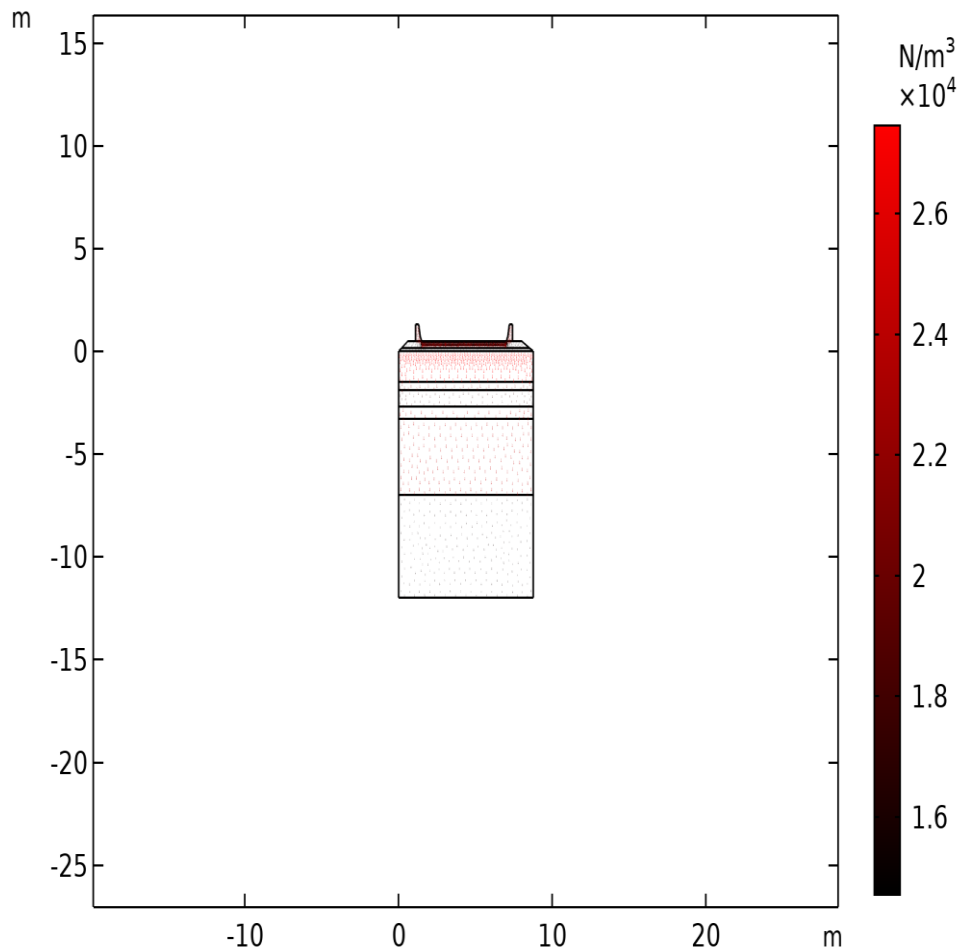


Figure 5.3: Charges volumiques

5.5. Pressions de model HM :

La figure 5.4 présente le pression interstitielle distribution pour le modèle (HM) elle vaut 10^5 Pa . Toujours concentrée en bas de schéma de calcul.

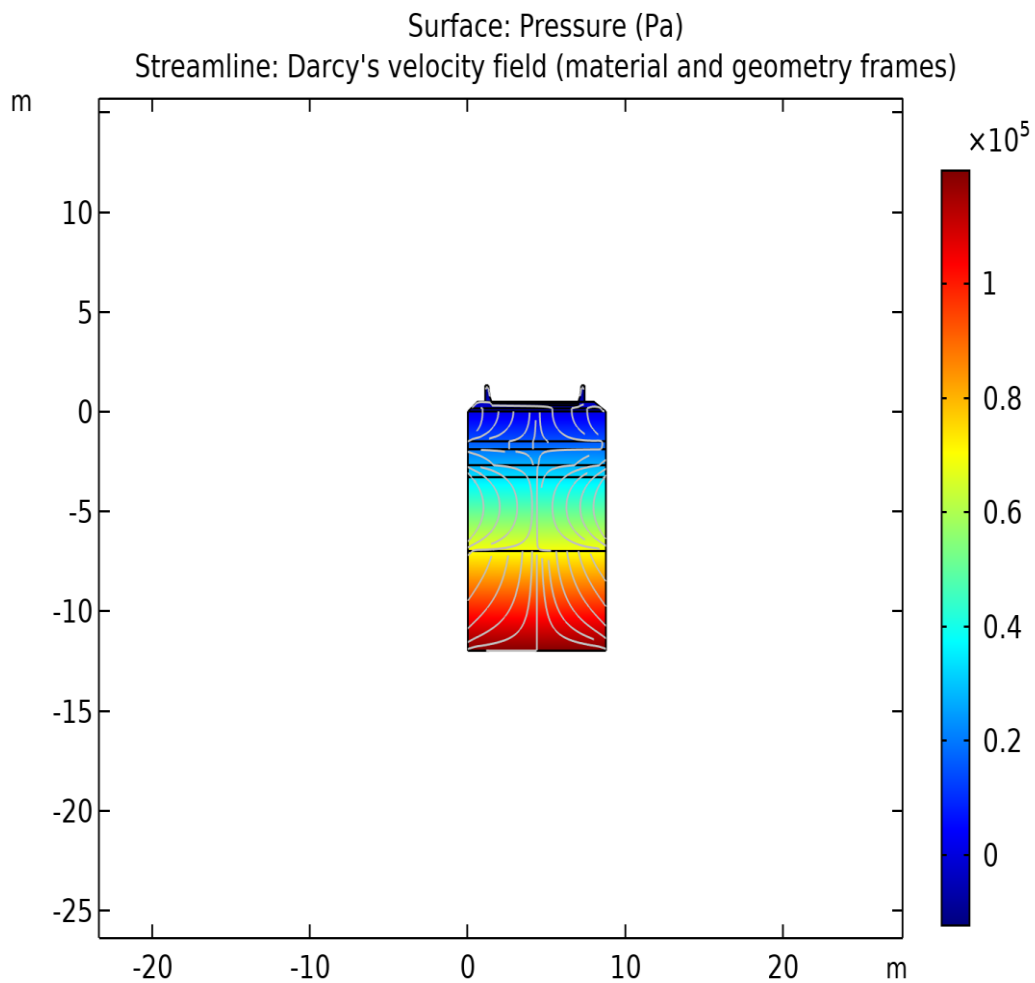


Figure 5.4: Pression interstitielle distribution de couplage HM

5.6. Chargements appliqués sur la chaussée :

Dans cette étude de mécanique, la chaussée est soumise à deux types de chargement, un convoi de tandem Br exerce une pression de $1,2 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ sur la voie en plus d'un chargement hydraulique due aux précipitations. Ces charges peuvent affecter la stabilité et la résistance de la chaussée. La figure 5.5 montre ce schéma de chargement.

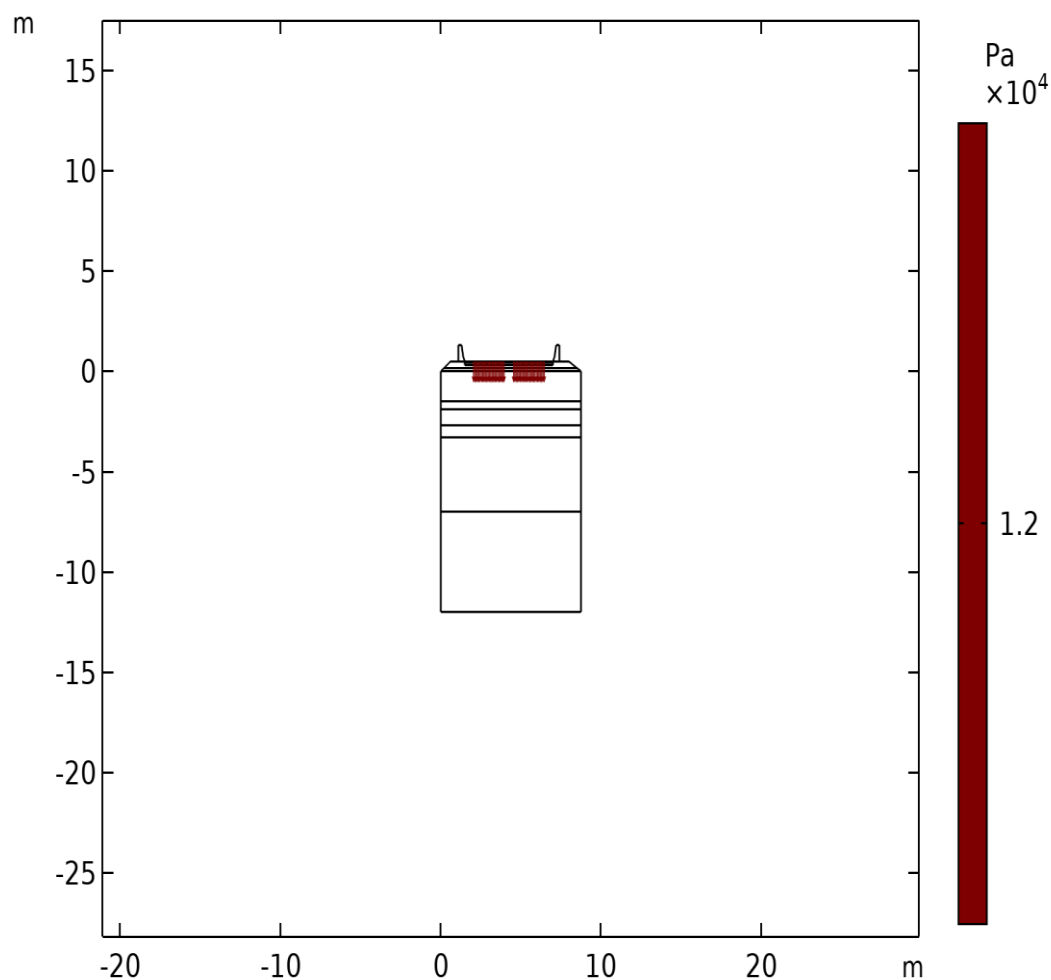


Figure 5.5: les chargements appliqués sur la chaussée.

5.7. Conclusion

Dans cette section, nous avons examiné les résultats des simulations numériques menées avec Comsol, ainsi que ceux obtenus à partir d'un programme utilisant la méthode des éléments finis, en les comparant avec une solution exacte pour une géométrie bidimensionnelle. Ces résultats démontrent une acceptabilité raisonnable du modèle proposé.

Notre approche a reposé sur le couplage hydromécanique des aspects mécaniques et hydrauliques, facilitant ainsi une comparaison directe entre la solution exacte et celle fournie par Comsol. Cette méthode nous a permis d'évaluer la précision des résultats de nos simulations numériques en les confrontant à une solution théorique.

Les résultats obtenus mettent en évidence la capacité du modèle Comsol à capturer de manière satisfaisante les interactions entre les différentes composantes du système étudié, tout en fournissant des résultats cohérents avec la solution exacte. Cela témoigne de la robustesse de l'approche multiphysique utilisée et de sa pertinence dans l'étude de phénomènes complexes impliquant plusieurs aspects physiques.

En conclusion, cette étude confirme la fiabilité et l'utilité de la simulation multiphysique, notamment lorsqu'elle est réalisée avec des outils avancés tels que Comsol. Les résultats obtenus offrent des informations précieuses pour la conception, l'analyse et l'optimisation de systèmes complexes, tout en ouvrant la voie à de futures recherches dans le domaine de l'hydromécanique et au-delà.

Conclusion générale

&

Perspectives

En conclusion, la simulation multiphysique se révèle être une approche essentielle et puissante pour comprendre le comportement complexe des chaussées semi-rigides sous différentes conditions de charge et d'environnement. À travers ce travail, nous avons exploré en détail les différentes facettes de cette méthode d'analyse avancée, mettant en lumière ses avantages et ses applications spécifiques dans le domaine de l'ingénierie routière.

L'utilisation de cet outil a permis d'intégrer efficacement les aspects hydrauliques, mécaniques et autres phénomènes physiques pertinents pour la modélisation des chaussées semi-rigides. En combinant des modèles de matériaux précis avec des conditions de charge réalistes, nous avons pu obtenir des résultats précieux sur le comportement de ces infrastructures routières dans des scénarios variés.

La prise en compte des précipitations dans le modèle étudié a permis de simuler ce qui peut se passer réellement en cas de pluie.

Nos analyses ont permis de mieux comprendre les interactions complexes entre les différentes couches de la chaussée, ainsi que l'impact des variations de température et des charges de circulation sur sa performance structurelle. Ces informations sont cruciales pour la conception, la maintenance et l'amélioration continues des chaussées semi-rigides, contribuant ainsi à la durabilité et à la sécurité de nos réseaux routiers.

En outre, cette étude a souligné l'importance de la collaboration entre les ingénieurs, les chercheurs et les décideurs pour tirer pleinement parti des avantages de la simulation multiphysique dans le domaine de l'ingénierie routière. En combinant des données empiriques avec des analyses numériques avancées, nous pouvons développer des stratégies plus efficaces pour optimiser les performances des chaussées semi-rigides et répondre aux défis futurs liés à la mobilité et à la durabilité.

En définitive, ce travail a contribué à élargir notre compréhension des chaussées semi-rigides et de leur comportement sous des conditions variées, tout en soulignant le rôle crucial de la simulation multiphysique dans l'amélioration continue de nos infrastructures routières.

Cette conclusion résume les principaux résultats et implications de notre travail, tout en soulignant l'importance de la simulation multiphysique dans le domaine de l'ingénierie routière.

Références bibliographiques




- [1] Schweizerische Nationalstrassen/Routes nationales suisses, INFO 1998, Office fédéral des routes, H. von Allmen, 1998.
- [2] COST 324, Long Term Performance of Road Pavements, Final report of the Action, European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research, Luxembourg 1997
- [3] COST 324, Long Term Performance of Road Pavements, Final report of the Action, European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research, Luxembourg 1997
- [4] Norme Suisse VSS SN 640 925a, Relevé et évaluation de l'état des routes, avril 1997
- [5] COST 324, Long Term Performance of Road Pavements, Final report of the Action, European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research, Luxembourg 1997
- [6] Norme Suisse VSS SN 640 925a, Relevé et évaluation de l'état des routes, avril 1997
- [7] J.-D. Zuffrey, D. Monsch, I. Scazziga, Projet de recherche 31/84, Développement de modèles de comportement pour systèmes de gestion de l'entretien, 1ère partie : Modèles pour la déformation permanente, rapport OFROU n° 196, Juillet 1990
- [8] J.-D. Zuffrey, D. Monsch, I. Scazziga, Projet de recherche 31/84, Développement de modèles de comportement pour systèmes de gestion de l'entretien, 1ère partie : Modèles pour la déformation permanente, rapport OFROU n° 196, Juillet 1990
- [9] J.-D. Zuffrey, D. Monsch, I. Scazziga, Projet de recherche 31/84, Développement de modèles de comportement pour systèmes de gestion de l'entretien, 1ère partie : Modèles pour la déformation permanente, rapport OFROU n° 196, Juillet 1990
- [10] PARIS (Performance Analysis of Road Infrastructure), Transport research fourth framework, program road transport, Luxembourg, november 1998
- [11] HDM-4 : Highway Design and Maintenance Standards Model, Banque mondiale, 1998

- [12] I. Scazziga, Projet de recherche 31/84, Développement de modèles de comportement pour systèmes de gestion de l'entretien, 2ème partie : Modèles pour routes en béton, rapport OFROU n° 320, Décembre 1993
- [13] République et canton de Neuchâtel/Service des Ponts et Chaussées, Office des Routes cantonales, Développement d'un système de gestion pour le réseau des routes nationales, Rapport N°952404, septembre 1996
- [14] Office Fédéral des Routes, Cantons de Neuchâtel et du Valais, Projet PMS NE-VS, Application VIAPMS, décembre 1997
- [15] Viaconsult AG, Vergleich der Zustandserfassung 1988/1991 mit dem ARAN-Gerät, Ergänzende Untersuchungen, Rapport du 1.11.1991 pour le Canton des Grisons
- [16] Viaconsult AG, Vergleich der Zustandserfassung 1988/1991 mit dem ARAN-Gerät, Ergänzende Untersuchungen II, Rapport du 6.1.1992 pour le Canton des Grisons
- [17] H. Dudli, Praktische Anwendung der systematischen Zustandserfassung aus der Sicht des Bauherrn, Revue Route et Trafic 1/1992
- [18] E. Simond, Service des Routes nationales VD, Relevé visuel des dégradations I1, Essai croisé réalisé sur 10 tronçons des routes nationales vaudoises, Rapport interne, février 2000
- [19] A.-G. Dumont, M. Huet, E. Simond, B. Schwery, S. Aebbersold, Planches comparatives avec bitumes modifiés et ajouts, Rapport n°1 : chaussée et liants, rapport OFROU n°313, octobre 1994
- [20] Rapport n°1 : chaussée et liants, rapport OFROU n°313, octobre 1994
- [21] A.-G. Dumont, M. Tille, M. Fontana, Gestion de la maintenance des infrastructures de transport, LAVOC – EPFL, édition mars 2000
- [22] A.-G. Dumont, M. Tille, M. Fontana, Gestion de la maintenance des infrastructures de transport, LAVOC – EPFL, édition mars 2000
- [23] M. Tille, Choix de variantes d'infrastructures routières, méthodes multicritères, Thèse de doctorat présentée au département de Génie civil, Lausanne EPFL, 2000
- [24] I. Scazziga, Beobachtung des Verhaltensauserwählter Strassenabschnitte, Rapport OFROU n°365, janvier 1996

- [25]** Ouahbi T., Saouab A., Breard J., Ouagne P. and Chatel S. Modelling of Hydro-Mechanical Coupling in Infusion Processes. *Composites Part A, Applied Science and Manufacturing*. Volume: 38, Issue 7, July 2007, pp.:646-1654
- [26]** Darcy H. "Les fontaines publiques de la ville de Dijon" Dalmont, Paris, 1856.
- [27]** Terzaghi, K. V. Stress conditions for the failure of saturated concrete and rock. volume 45, 1945. Pages 777-801.
- [28]** Terzaghi, K. V. Stress conditions for the failure of saturated concrete and rock. volume 45, 1945. Pages 777-801
- [29]** Toll S., Manson J. A. E. An analysis of the compressibility of fiber assemblies. In: *Proceeding of the sixth International Conference on Fiber-Reinforced Composites*, Institute of Materials, Newcastle upon Tyne, UK, 1994, p. 25/1–25/10.

Annexes

Annexe A : Fiche de forage

  		RAPPORT DE FORAGE Sondage : SC 03											
Projet : MODERNISATION DE LA RN 22 Endroit : MANSOURAH / W. TLEMCEH		Dossier N° : G 150120 Client : BET DERGHAM AEK											
Date début : 04/06/2015 Date fin : 04/06/2015 Profondeur forée (m) : 12 Niveau d'eau (m) :		Coordonnées GPS : X : 0649350 Y : 3852547 Z : 1158											
Boue de forage : EAU Type forage : CAROTTE Foreuse : SEDIDRILL		Bat des échantillons : Intact <input type="checkbox"/> Remanié <input type="checkbox"/> Paraffiné <input type="checkbox"/> Roche <input type="checkbox"/>											
Echelle (m)	Élévation (m) Profondeur (m)	Récupération 25 50 75 100	SPT (N1 + N2)	RQD	Tubage	Carottier	État	Profondeur Échantillon	Niveau d'eau	Symboles	DESCRIPTION	ESSAIS DE LABORATOIRE	
1.0	1157,00 0,40	57 %									TERRE VEGETALE		
2.0	1156,50 1,00	57 %									CONGLOMERAT		
3.0	1155,30 2,70	57 %									MARNE GRISATRE A MARRON		
4.0		53 %									GRES FRIABLE DE COULEUR BEIGE A BLANCHATRE		
5.0		100 %									MARNE COMPACTE DE COULEUR VERDATRE A GRISATRE A ASPECT SCHISTEUX DEVENANT DURE A ASPECT ROCHEUX VERS LA FIN DE L'INTERVALL		
7.0	1151,00 7,00	57 %											
8.0		57 %											
9.0		50 %									ARGILE COMPACTE DE COULEUR MARRON RENFERMANT DES FRAGMENTS DE MARNE DURE.		
10.0		57 %											
11.0		57 %											
12.0	1146,00 12,00										Fin du forage à une profondeur de 12 m.		
REMARQUES : R.A.S.										TYPE D'ECHANTILLON : CF : Carottier à vide TM : Tête à paroi lisse PS : Tête à position fixe CR : Tête carottier TO : Tête ouverte		ABREVIATIONS : AD : Analyse granulométrique S : Sédiments L : Unités d'Allenberg (AL, LP) W : Teneur en eau PV : Poids volumique (Gd, Gh) AC : Analyse chimique CB : Cisaillement rectiligne TR : Cisaillement Triaxial Rc : Résistance à la compression OEB : Essai oedométrique QL : Gonflement libre R : Retus à l'enfoncement	
Préparé par : BOUREGUA					Vérifié par : MESBAH					04/06/2015		Page : 1 de 1	

Annexe B :
Résultats des essais de laboratoire effectués sur
des échantillons récupérés du sondage

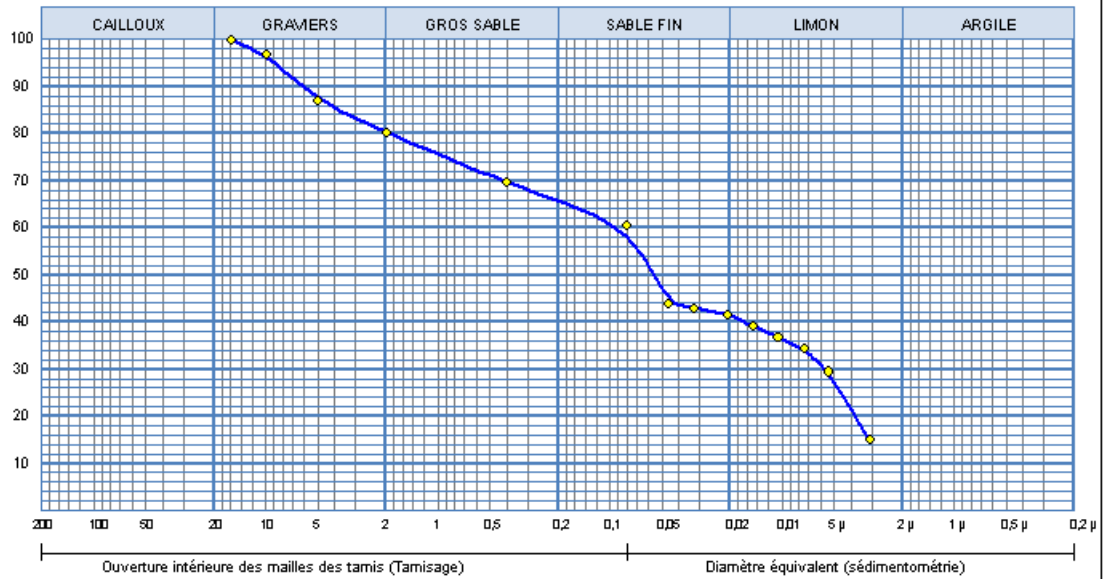


Client : **BET DERGHAM AEK**
Projet : **MODERNISATION DE LA RN 22**
Endroit : **MANSOURAH**

N° Projet : **G 150120**

Sondage n° : **SC 03**
Profondeur : **1.50-2.80**
Matériaux : **ARGILE**
Provenance :
Date essais : **22/07/2015**

—◆— Sondage: SC 03 : 1.50-2.80



Analyse Granulométrique		Analyse sédimentométrique	
Tamis (mm)	Tamisat (%)	Diamètre équivalent	Tamisat (%)
16,00	100,00	45,90 μm	44,05
10,00	96,94	32,40 μm	42,84
5,00	87,13	20,70 μm	41,63
2,00	80,15	14,80 μm	39,21
0,40	69,68	10,60 μm	36,79
0,08	60,52	7,50 μm	34,37
		5,40 μm	29,53
		3,10 μm	15,02

Echant	< 80 μ	LIMITES D'ATTERBERG			Classificat ⁿ
		W.L (%)	W.P (%)	I.P (%)	
—◆—	60,52 %	35,09 %	15,40 %	19,69 %	Ap

© Solsets 2017

Remarque :
R. A. S.

Préparé par :
EL-BACHIR

Approuvé par :
HAMAL

Date :
30/07/2015



Client : **BET DERGHAM AEK**

N° Projet : **G 150120**

Projet : **MODERNISATION DE LA RN 22**

Endroit : **MANSOURAH**

Sondage n° : SC 03

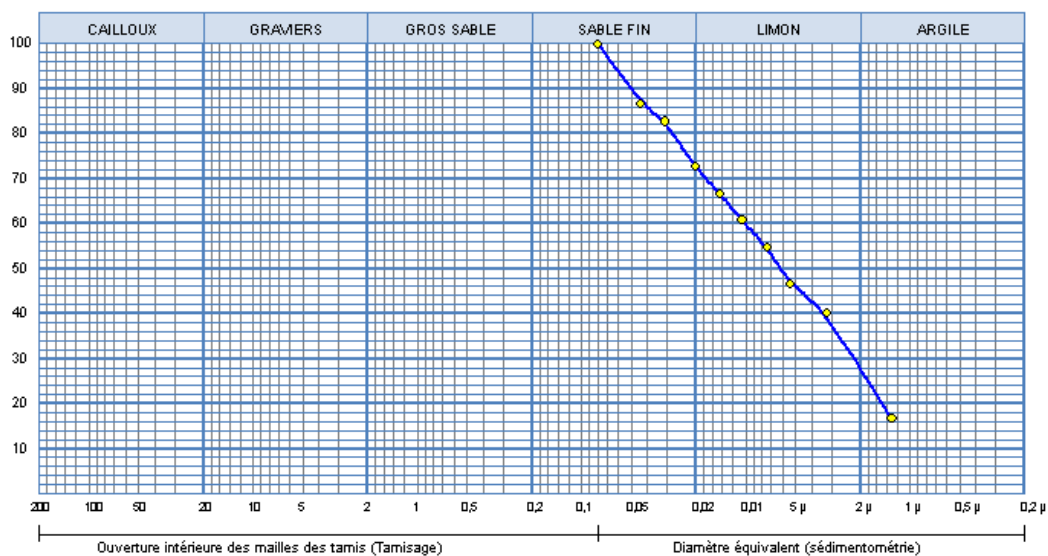
—●— Sondage: SC 03 : 3.00-3.40

Profondeur : 3.00-3.40

Matériaux : MARNE

Provenance :

Date essais : 12/07/2015



Analyse Granulométrique		Analyse sédimentométrique	
Tamis (mm)	Tamisat (%)	Diamètre équivalent	Tamisat (%)
0,08	100,00	43,80 µm	86,80
		31,30 µm	82,80
		20,50 µm	72,80
		14,80 µm	66,80
		10,80 µm	60,80
		7,50 µm	54,80
		5,40 µm	46,80
		3,20 µm	40,08
		1,30 µm	16,80

Echant	< 80 µ	LIMITES D'ATTERBERG			Classificat ^o
		W.L (%)	W.P (%)	I.P (%)	
—●—	100,00 %	52,80 %	28,70 %	24,1 %	A*

© Soltech 2007

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 MATÉRIEAUX DE CONSTRUCTION), TRAVAUX
D'EXPERTISES ET D'ÉTUDES GÉOTECHNIQUES DES SOLS



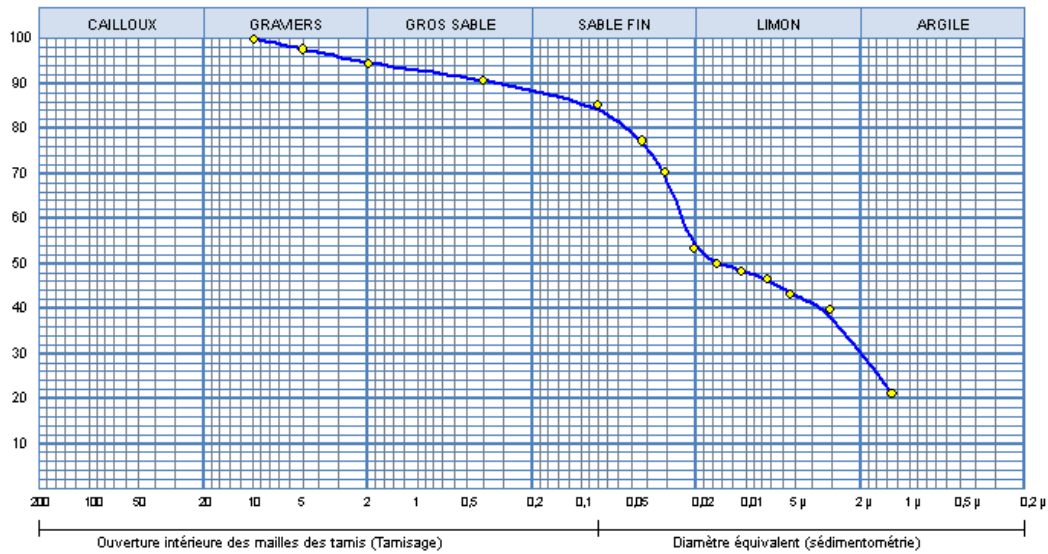
RAPPORT D'ESSAI
ANALYSE GRANULOMETRIQUE
NA 5232 / NA 5251 / NA 16203

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

N° Projet : G 150120

Sondage n° : SC 03
Profondeur : 5.30-5.50
Matériaux : MARNE
Provenance :
Date essais : 15/07/2015

—◆— Sondage: SC 03 : 5.30-5.50



Analyse Granulométrique		Analyse sédimentométrique	
Tamis (mm)	Tamisat (%)	Diamètre équivalent	Tamisat (%)
10,00	100,00	43,30 μm	77,38
5,00	97,73	31,30 μm	70,57
2,00	94,50	20,90 μm	63,52
0,40	90,93	15,00 μm	50,11
0,08	85,23	10,70 μm	48,41
		7,50 μm	46,70
		5,40 μm	43,29
		3,10 μm	39,88
		1,30 μm	21,13

Echant	< 80 μ	LIMITES D'ATTERBERG			Classificat ^o
		W.L (%)	W.P (%)	I.P (%)	
—◆—	85,23 %	45,32 %	22,17 %	23,15 %	Ap

© Soltech 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 03

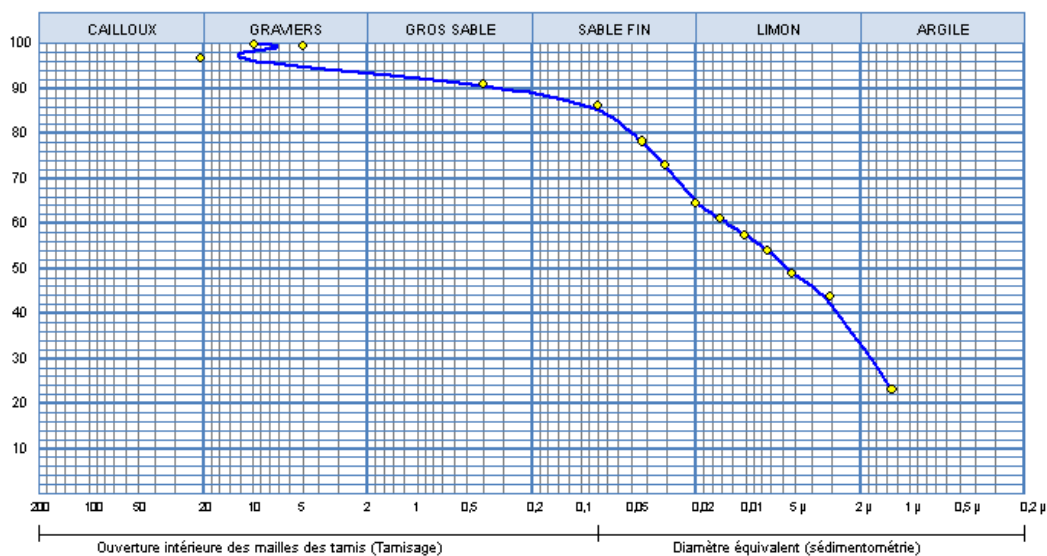
—◆— Sondage: SC 03 : 7.10-7.40

Profondeur : 7.10-7.40

Matériaux : ARGILE

Provenance :

Date essais : 15/07/2015



Analyse Granulométrique		Analyse sédimentométrique	
Tamis (mm)	Tamisat (%)	Diamètre équivalent	Tamisat (%)
10,00	100,00	43,30 μm	78,40
5,00	99,60	31,30 μm	73,22
21,00	96,86	20,30 μm	64,58
0,40	91,05	14,50 μm	61,13
0,08	86,35	10,30 μm	57,88
		7,40 μm	54,22
		5,30 μm	49,04
		3,10 μm	43,86
		1,30 μm	23,14

Echant	< 80 μ	LIMITES D'ATTERBERG			Classificat ^o
		W.L (%)	W.P (%)	I.P (%)	
—◆—	86,35 %	45 %	22,19 %	22,81 %	Ap

© Soltech 2007

Remarque :
R. A. S.

Préparé par :
EL-BACHIR

Approuvé par :
HAMAL

Date :
30/07/2015



Client : **BET DERGHAM AEK**

N° Projet : **G 150120**

Projet : **MODERNISATION DE LA RN 22**

Endroit : **MANSOURAH**

Sondage n° : SC 03

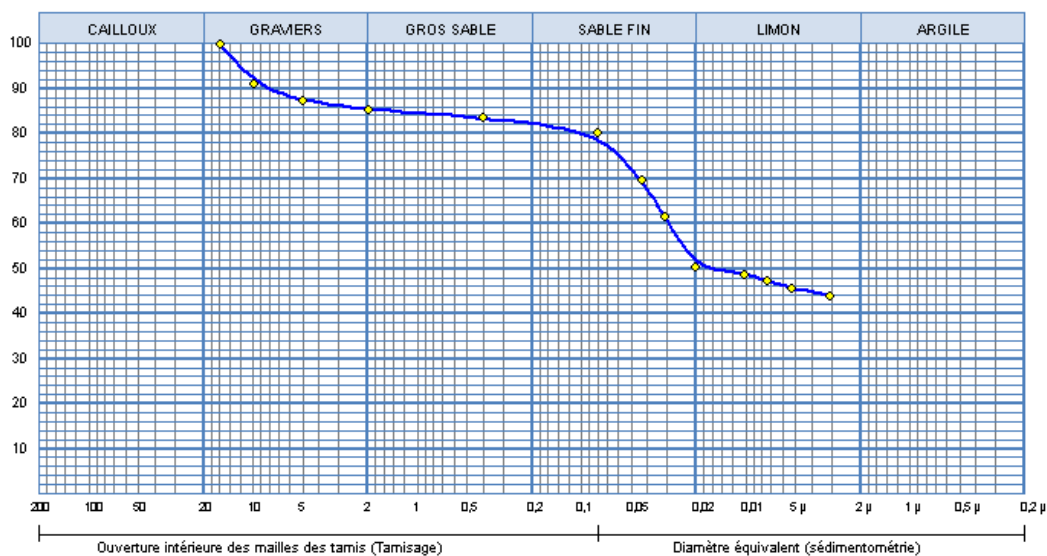
—◆— Sondage: SC 03 : 9.00-9.30

Profondeur : 9.00-9.30

Matériaux : ARGILE

Provenance :

Date essais : 12/07/2015



Analyse Granulométrique		Analyse sédimentométrique	
Tamis (mm)	Tamisat (%)	Diamètre équivalent	Tamisat (%)
16,00	100,00	43,30 µm	69,73
10,00	91,10	31,30 µm	61,70
5,00	87,30	20,30 µm	50,46
2,00	85,28	10,30 µm	48,84
0,40	83,58	7,40 µm	47,23
0,08	80,34	5,30 µm	45,83
		3,10 µm	44,02

Echant	< 80 µ	LIMITES D'ATTERBERG			Classificat ^o
		W.L (%)	W.P (%)	I.P (%)	
—◆—	80,34 %	50 %	26,59 %	23,41 %	A*

© Sofrats 2007

Remarque :
R. A. S.

Préparé par :
CHERFAOUI M.

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



**RAPPORT D'ESSAI
ESSAI DE CISAILLEMENT**

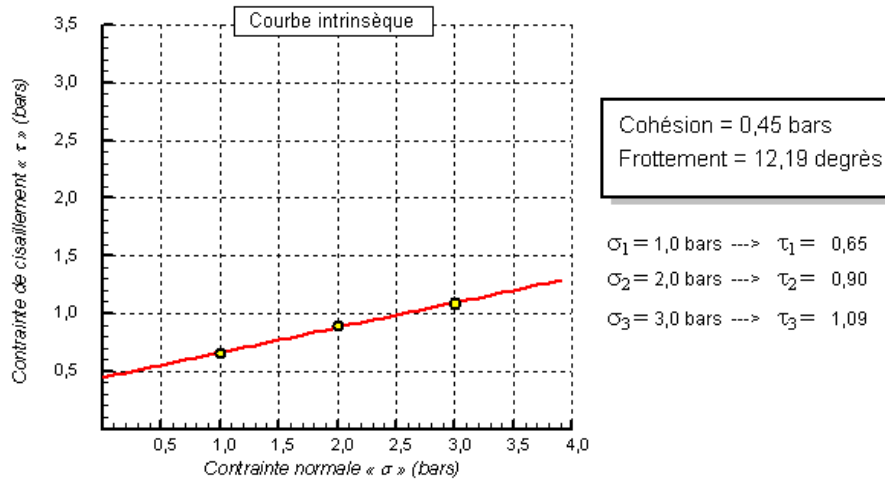
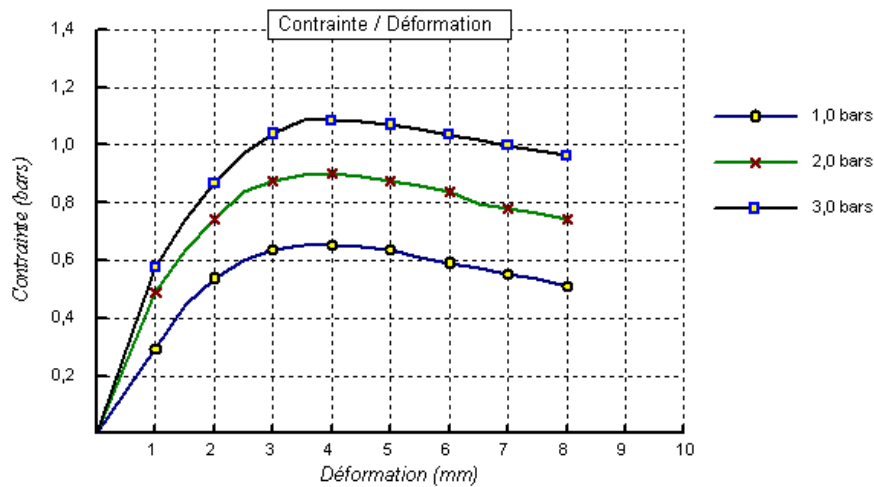
NA 16218

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

N° Projet : G 150120

Sondage n° : SC03
Profondeur : 7.10-7.40
Nature : ARGILE
Date essais : 28/06/2015

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



© SOFRAC 2011

Remarque :
R. A. S.

Préparé par :
HAMAL

Approuvé par :
HAMAL

Date :
22/07/2015



AGRO-HYD Group

LABORATOIRE D'ANALYSE DE LA QUALITÉ
(EAUX, SOLS ET MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION), TRAVAUX
D'EXPERTISES ET D'ÉTUDES GÉOTECHNIQUES DES SOLS

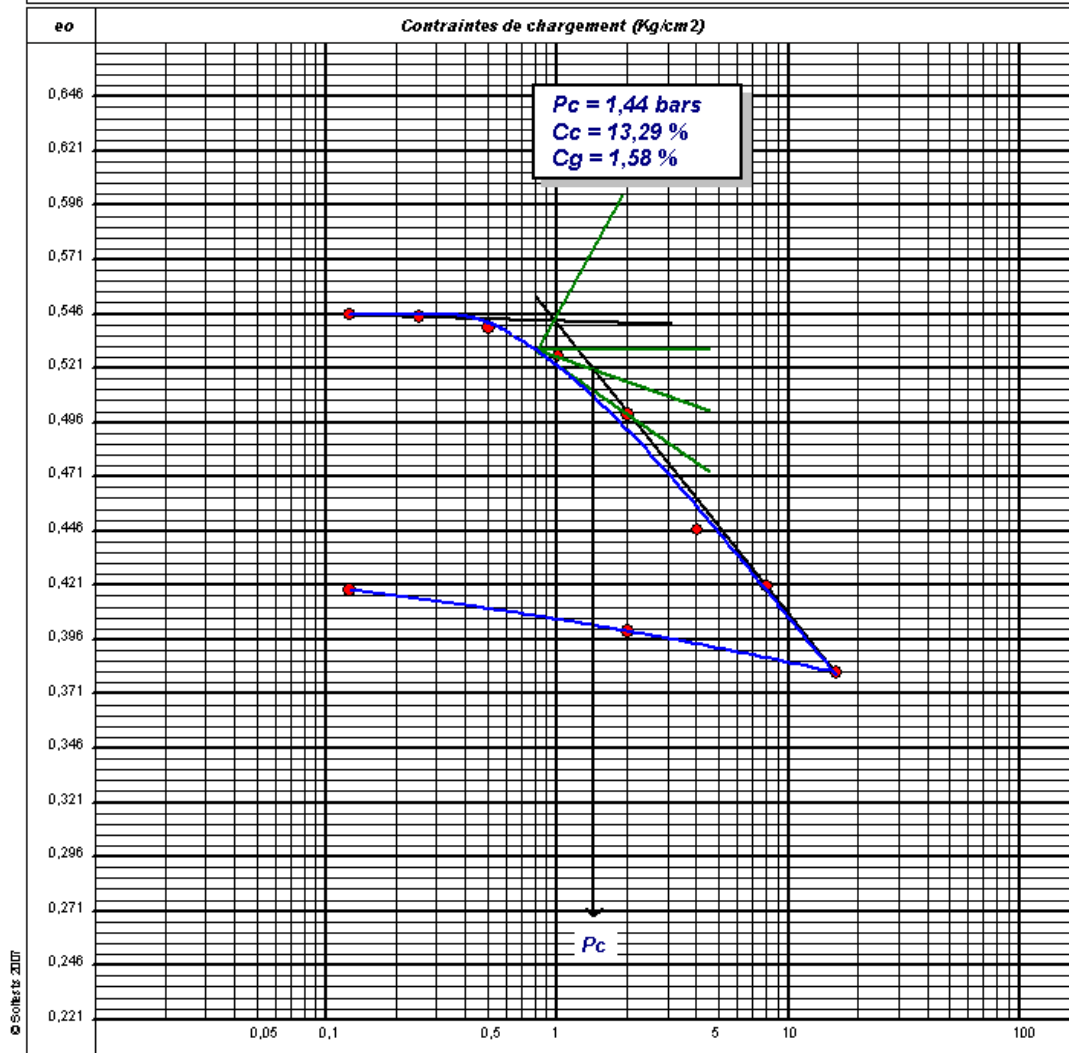


RAPPORT D'ESSAI
COMPRESSIBILITE A L'OEDOMETRIQUE
XP P 94-090-1

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

N° Projet : G 150120

Sondage n° : SC 03
Profondeur : 5,30-5,50
Nature : MARNE
Date essais : 12/07/2015



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

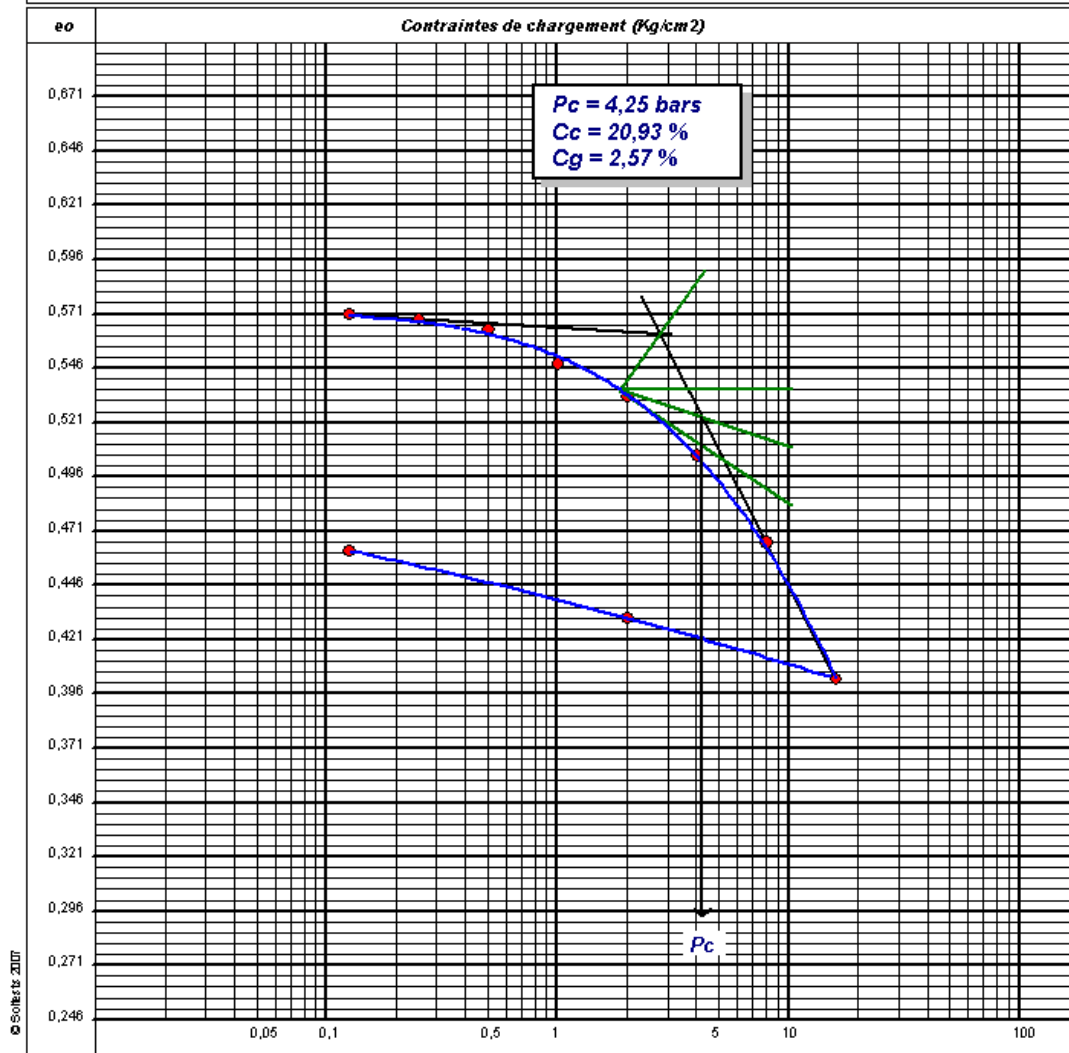


RAPPORT D'ESSAI
COMPRESSIBILITE A L'OEDOMETRIQUE
XP P 94-090-1

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

N° Projet : G 150120

Sondage n° : SC 03
Profondeur : 7,10-7,40
Nature : ARGILE
Date essais : 12/07/2015



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 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	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	
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.



EURL

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 03	1.50-2.80	42840.7	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 C :
Photos du chantier



Travaux sur fouilles

