

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة البليدة 1

Université de BLIDA 1



كلية التكنولوجيا

Faculté de technologie

قسم الهندسة المدنية

Département de Génie Civil

Mémoire de Master

Spécialité : Génie Civil

Option : Géotechnique

Sujet

**Application des matériaux géo-synthétiques
dans les chaussées rigides - Analyse par Ansys**

Présenté par :

**Mlle HadjAllah Faiza
Mlle Aliouat Amel**

Encadré par :

Dr. M. ABDESSEMED

Année Universitaire: 2019-2020

Dédicace

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

A ma chère sœur Sarah pour ses encouragements permanents, et son soutien moral.

A mon cher frère Abdelmadjib pour son appui et son encouragement.

A toute ma famille pour son soutien tout au long de mon parcours universitaire.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible.

Merci d'être toujours là pour moi.

Faiza

Dédicace

Je dédie ce travail à ma mère et à mon père.

A mon grand-père et ma grand-mère et toute ma famille qui m'a toujours soutenue et sans oublier ma chère sœur et ma tante Abir.

Des dédicaces particulières à mon partenaire de vie mon fiancé Amine.

Amel

Remerciements

Nous remercions le Bon Dieu qui nous a donné le courage, la capacité et la patience jusqu'au bout de nos études.

Nous remercions nos chers parents pour leur amour, leurs conseils, leurs patiences ainsi que leur soutien inconditionnel.

*Toutes nos gratitudes à notre encadreur **Dr. Mouloud ABDESSEMED**, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.*

Nos plus vifs remerciements s'adressent également aux membres de jury, qui ont accepté à examiner notre travail, surtout dans ces conditions très pénibles (sanitaires/ Covid19). .

*Nous tenons à saisir cette occasion et adresser nos profonds remerciements et nos profondes reconnaissances Enseignants de notre département de Génie Civil de **l'Université de Blida1**, qui nous ont fourni les outils nécessaires à la réussite de nos études universitaires.*

Notre reconnaissance va également à toute ceux et tous celles qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

ملخص:

المواد التركيبية الجيولوجية عبارة عن منتجات تشتمل على مكون واحد على الأقل قائم على البوليمر، سواء كان اصطناعياً أو طبيعياً تعتمد هذه الدراسة على تطبيق المواد الأرضية الاصطناعية كمادة مبتكرة في إصلاح الأرصفة الصلبة، بعد أن تتدهور بسبب عدة عوامل مثل حركة المرور و المناخ، وكيف ستؤثر هذه المنتجات على سلوك رصيف صلب تم تطوير عمل رقمي باستخدام تطبيقات عملية على الأرصفة الصلبة بتطبيق طريقة العناصر المحدودة من خلال البرنامج الأكاديمي انسيس2016.

كلمات مفتاحية: رصيف صلب, جيو اصطناعية, يصلح, مشوه, تدهور, سلوك, تؤثر.

Résumé

Les géo-synthétiques sont des produits dont au moins un constituant à base de polymère que se soit synthétique ou naturel. Cette étude est basée sur l'application des matériaux géo-synthétique comme matériaux innovants dans la réparation des chaussées rigides et ceux après sa dégradation, qui est due à plusieurs facteurs tel que le trafic et le climat. Nous contribuons, par le biais de ce travail, à comprendre influence de ces produits sur le comportement statique et dynamique d'une chaussée rigide renforcée. Un travail numérique a été élaboré avec des applications pratiques, sur une infrastructure rigide en béton, en appliquant la méthode des éléments finis (MEF), par l'utilisation du logiciel académique Ansys 2016.

Mots clés: Chaussée rigide, géo-synthétique, réparation, numérique comportement, analyse.

Abstract :

Geo-synthetics are products including at least one polymer-based constituent, whether synthetic or natural.

This study is based on the application of geo-synthetic materials as innovative materials in the repair of rigid pavements, after they are degraded due to several factors such as traffic and climate, and how these products will influence the behavior rigid pavement.

A digital work was developed with practical applications, on rigid pavements, by applying the method of finite elements (FEM), through the academic software Ansys 2016.

Keywords: rigid pavement, geo-synthetic, repair, degraded, behavior, affecting.

Table des matières

Dédicaces

Remerciements

Résumés

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles et des abréviations

Introduction générale	1
Partie A : Synthèse bibliographique.....	2
Chapitre I : Généralité sur les chaussées	3
I.1 : Introduction :.....	4
I.2 : Définition des chaussées routières et aéroportuaires :.....	4
I.3 : Constitution de structures des chaussées :.....	4
I.3.1 : Plate-forme support de chaussée :.....	4
I.3.2 : Couche d'assise :	4
I.3.3 : Couche de surface :	5
I.4 : Différents types de structures de chaussée :	5
I.4.1 : Les chaussées souples :.....	5
I.4.2 : Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques :	6
I.4.3 : Les chaussées en béton de ciment (rigides) :.....	6
I.3.4 : Les chaussées bitumineuses épaisses:	7
I.4.5 : Les chaussées à structure mixte :.....	8
I.4.6 : Les chaussées à structure inverse :	8
I.5 : Statistiques :.....	10
I.5.1 : Réseaux routiers :.....	11
I.5.2 : Réseaux aéroportuaire :	11
I.6 : Dégradations des chaussées rigides :.....	12
I.6.1 : Définition de la dégradation :.....	13
I.6.2 : principales causes de dégradation :.....	13
I.6.2.1 : Trafic :.....	13
I.6.2.2 : Conditions climatiques :	13

I.6.2.3 : Mise en œuvre :	13
I.6.3 : Différent types de dégradation :	14
I.6.3.1 : Dégradations de structure :	14
I.6.3.2. Dégradations de surface :	17
I.6.3.3 : Dégradations de joints :	19
I.5.3.4. Autres dégradations :	19
I.6 : Méthodes de réparation :	21
I.6.1: Aperçu :	21
I.6.2: Réparation complète :	21
I.6.2.1 Présentation :	21
I.6.2.2 : Types de détresse de chaussée nécessitant une réparation en profondeur (FDR) :	21
I.6.2.3 : Procédures de réparation en profondeur (FDR) :	22
I.6.3: Réparation de chaussées en béton :	27
I.6.3.1 : Procédures de réparation :	27
I.7 : Expertise et auscultation :	30
I.7.1 : Auscultation des chaussées rigides :	30
I.7.1.1 : Essai HWD :	30
I.7.1.2 : Dimensionnement rigide :	31
I.7.2 : Expertise :	31
Chapitre II : Généralité sur les géo-synthétiques	32
II.2. Définition :	33
II.3. Origine des géo-synthétiques :	33
II.4. Différents types des géo-synthétiques :	34
II.4.1. Géotextiles :	34
II.4.1.1. Géotextile non tissé :	34
II.4.1.2. Géotextile tissé :	35
II.4.1.3. Géotextile tricoté :	35
II.4.1.4. Géotextile tube (géo-tuyaux) :	35
II.4.2. Géo-grille :	36
II.4.2.1. Géo-grille uni-axiale :	36
II.4.2.2. Géo-grille bi-axiale :	36
II.4.3. Géo-filet :	37
II.4.4. Géo-composite :	37
II.4.5. Géo-synthétiques bentonitiques :	37
II.4.6. Géo-synthétique alvéolaire :	38
II.4.6.1. Tissé de bandelette :	38

II.4.6.2. Mattes :	38
II.4.6.3. Géo-conteneurs :	38
II.4.7. Géo-membranes :	39
II.5. Propriétés des géo-synthétiques :	39
II.6. Rôles et les fonctions des géo-synthétiques :	40
II.6.1. Rôles mécaniques :	40
II.6.1.1. Séparation :	40
II.6.1.2. Renforcement :	40
II.6.1.3. Protection :	40
II.6.1.4. Anti-érosion :	40
II.6.2. Rôles hydrauliques :	41
II.6.2.1. Filtration :	41
II.6.2.2. Drainage :	41
II.7. Domaines d'application :	42
II.7.1. Les remblais routiers et ferroviaires :	42
II.7.2. Stabilisation des talus :	42
II.7.3. Les remblais :	43
II.7.4. Les murs de soutènement :	44
II.7.5. Le contrôle de l'érosion :	44
II.7.6. En agriculture :	45
II.7.7. Traitement des eaux usées :	45
II.7.8. Autres applications :	46
Chapitre III : Application des géo-synthétiques dans les chaussées rigides	47
III.1 : Introduction :	48
III.2 : Récentes applications des géo-synthétiques :	48
III.3 : Les géo-synthétiques dans les chaussées rigides :	50
III.4 : Influence des géo-synthétiques sur les chaussées rigides :	50
Partie B : Modélisation numérique	51
Chapitre IV : Méthode des éléments finis et choix du logiciel.	52
IV.1 : Méthode des éléments finis :	53
IV.1.1 Introduction :	53
IV.1.2 Principes de la méthode des éléments finis :	53
IV.1.3 Etapes du calcul de la MEF :	54
IV.1.3.1 Étapes logiques du calcul par éléments finis :	54
IV.1.3.2 Etapes d'un programme d'éléments finis :	55
IV.2 : Principaux produits Ansys :	55

IV.2.1 : ANSYS Structural :	55
IV.2.2 : ANSYS Mechanical :	55
IV.2.3: ANSYS CFX et Fluent :	56
IV.2.4 : Gambit :	56
IV.2.5 : ANSYS AUTODYN et ANSYS LS-DYNA :	56
IV.2.6 : ANSYS Electromagnetics et Ansoft :	56
IV.2.7 : ANSYS Multiphysics :	56
IV.3 : Environnements logiciels	57
IV.3.1 : ANSYS Classic :	57
IV.3.2 : ANSYS Workbench :	57
IV.4 : Logiciel ANSYS :	57
IV.4.1 : Analyse structurelle :	57
IV.5. Conclusion :	58
Chapitre V : Analyse numérique et cas d'étude.	59
V.1. Introduction :	60
V.2. Description du cas d'étude :	60
V.2.1. Caractéristiques géométriques :	60
V.2.2. Caractéristiques géotechniques :	60
V.3. Introduction à ANSYS Workbench :	61
V.3.1. Menu principal du logiciel ANSYS Workbench :	61
V.4. Maillage :	63
V.5 : Chargement de la chaussée :	64
V.6. Conditions aux limites :	65
Chapitre VI : Résultats et discussion	66
VI.1 : Introduction :	67
VI.2 : propriétés des matériaux :	67
VI.3. Résultats numériques du modèle choisi :	68
VI.3.1. Modélisation sans géo-grille :	68
VI.3.2. Modélisation avec géo-grille :	70
VI.4. Comparaison des résultats sans et avec géo-grille :	72
VI.5. Conclusion :	72
Conclusion générale	73
Références bibliographiques :	74

Listes des figures

Chapitre I : Généralité sur les chaussées

Figure I.1 : les couches d'une chaussée souple.

Figure I.2 : les couches d'une chaussée semi-rigides.

Figure I.3 : structure d'une chaussée rigide.

Figure I.4 : structure d'une chaussée bitumineuse épaisse.

Figure I.5 : Les couches d'une chaussée à structure mixte.

Figure I.6 : Les couches d'une chaussée à structure inverse.

Figure I.7 : situation du réseau autoroutier Algérien.

Figure I.8 : Aéroport d'Alger Houari Boumediene, Alger.

Figure I.9 : Avion Airbus A330 de la compagnie Air Algérie.

Figure I.10 : fissures au niveau de la chaussée.

Figure I.11 : cassure d'angle.

Figure I.12 : Fracture.

Figure I.13 : Pompage identifié par les dépôts de fines

Figure I.14 : Décalage.

Figure I.15 : Epaufrure.

Figure I.16 : Faiençage.

Figure I.17: Ecaillage.

Figure I.18 : défaut de joint.

Figure I.19 : Réparation ponctuelle.

Figure I.20 : dépôt de gomme.

Figure I.21 : Punch-out typique dans CRCP.

Figure I.22 : Effritement profond

Figure I.23 : Réparation complète des perforations dans CRCP.

Figure I.24 : Dalle prête à être soulevée.

Figure I.25 : Perçage de trous au joint longitudinal.

Figure I.26 : Dalle déjà réparée.

Figure I.27 : Carte fissurée dans la dalle FDR.

Figure I.28 : Identifiez les limites de réparation.

Figure I.29 : Carottage adjacent à la zone réparée écaillée.

Figure I.30 : Enlever le béton détérioré.

Figure I.31 : Nettoyez les surfaces de réparation.

Figure I.32 : Placez les matériaux de réparation.

Figure I.33 : Terminez la surface.

Figure I.34 : Des fissures de retrait non évolutives

Figure I.35 : Des fissures longitudinales et transversales au milieu des dalles, évolutives

Figure I.36 : Ouvertures des joints transversales avec des grandes ampleurs (plus de 3.5cm)

Figure I.37 : Cette carotte montre que la fissure est superficielle (environ 06cm).

Chapitre II : Généralité sur les géo-synthétiques

Figure II.1 : nappe de géotextile.

Figure II.2 : Géotextile non tissé.

Figure II.3 : Géotextile tissé.

Figure II.4 : Géotextile tricoté.

Figure II.5 : à gauche la forme du géo-tuyaux, à droite la mise en œuvre de géo-tuyaux.

Figure II.6 : à gauche la structure de géo-grille, à droite la mise en place du géo-grille.

Figure II.7 : à gauche un modèle de géo-filet, à droite un géo-filet dans un merlon.

Figure II.8 : la structure d'un géo-composite.

Figure II.9 : Géo-synthétique bentonitique.

Figure II.10 : à gauche la forme d'un géo-synthétique alvéolaire, à droite placement d'une nappe.

Figure II.11 : Géo-membrane à gauche leur forme, et à droite leur mise en place.

Figure II.12: Géotextile de séparation.

Figure II.13 : Géotextile de renforcement.

Figure II.14 : Utilisation contre érosion.

Figure II.15 : Utilisation pour filtration.

Figure II.16 : Utilisation pour drainage.

Figure II.17 : Principales fonctions des géo synthétique.

Figure II.18 : Un géo-synthétique dans une construction routière.

Figure II.19 : Un renforcement d'une pente par un géo-synthétique.

Figure II.20 : un géo-synthétique sous-sol compressible.

Figure II.21 : une nappe géo-synthétique pour une construction d'un remblai.

Figure II.22 : une nappe géo-synthétique dans une construction une pente.

Figure II.23 : un mur de soutènement renforcé par géo-synthétique.

Figure II.24 : à gauche contrôle d'érosion sur pente, à droite travaux achevés.

Figure II.25 : les géo-synthétiques dans les bassins de traitement.

Chapitre III : Application des géo-synthétiques dans les chaussées rigides

Chapitre IV : Méthode des éléments finis et choix du logiciel

Chapitre V : Analyse numérique et cas d'étude

Figure V.1 : La géométrie de la chaussée

Figure V.2 : fenetre d'ouverture

Figure V.3 : Ouverture de nouveau projet d'une structure statique

Figure V.4 : maillage de la chaussée par workbench

Figure V.5 : La pression d'un couple de roues

Figure V.6 : conditions aux limites

Chapitre VI : Résultats et discussion

Figure VI.1 : Déformation élastique normale selon l'axe X

Figure VI.2 : Déplacement directionnel selon l'axe Y

Figure VI.3 : Contrainte de cisaillement selon le plan XY

Figure VI.4 : Contrainte normale selon l'axe X

Figure VI.5 : Déformation élastique normale selon l'axe X

Figure VI.6 : Déplacement directionnel selon l'axe Y

Figure VI.7 : Contrainte de cisaillement selon le plan XY

Figure VI.8 : Contrainte normale selon l'axe X

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralité sur les chaussées

Tableau I.1 : Types de structure de chaussée selon LCPC

Chapitre II : Généralité sur les géo-synthétiques

Tableau II.1 : Caractéristiques de quelques géo-synthétiques

Chapitre III : Application des géo-synthétiques dans les chaussées rigides

Chapitre IV : Méthode des éléments finis et choix du logiciel

Tableau IV.1: Organigramme d'étapes caractéristiques d'un programme d'éléments finis

Chapitre V : Analyse numérique et cas d'étude

Chapitre VI : Résultats et discussion

Tableau VI.1 : propriétés des matériaux de la chaussée

Tableau VI.2 : Comparaison des résultats

Liste des symboles et des abréviations

PF : plate-forme

PST : Partie Supérieure des terrassements

GNT : granulats non traités

MTLH : matériaux traités aux liants hydrauliques

ES : enduit superficiel

BAC : Béton Armé Continu

GRH : graves recomposées humidifiées

GB : grave bitume

BBTM : Bétons Bitumineux Très Minces

SETRA : Le Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements

PCC: Portland Cément Concrete

FDR: Full-Depth Repair

CPCD: Concrete Pavement Contraction Design

CRCP: Continuously Reinforced Concrete Pavements

HDR: Half-Depth Repair

GPR: ground penetrating radar

PSPA: Portable Seismic Pavement Analyzer

FWD: FallingweightDeflectometer

LCPC: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

STAC : Service technique de l'aviation civile

O.A.C.I : Organisation d'aviation Civile Internationale

PEHD : polyéthylène de haute densité

GVB : géo-composite bentonitique

GSB : géo-synthétiques bentonitiques

ISO : International Standards Organisation

EN : Europe Normalisation

GCL :Geosynthetic Clay Liner

AASHTO: Guide for design of pavement structures

HMA : Hot Mix Asphalt

MEF : méthode des éléments finis

FEA : Finite Element Analysis

APDL :Ansys Parametric Design Language

SMART : splitting morphing adaptive remeshing technique

NLAD : La capacité adaptative non linéaire

HPC : High Performance Computing (Calcul haute performance)

f_i : fréquences propres de vibration de la structure

[M] : matrices de masse de la structure

[K] : matrices de rigidité de la structure

Introduction générale

L'Algérie est dotée d'un patrimoine très important d'infrastructures linéaires, tel que les chaussées routières et aéroportuaires, qui sont les moyens qui facilitent la circulation des véhicules (chaussée routière), ou bien des aéronefs (chaussée aéroportuaire). Au fil du temps ces chaussées sont exposées à des dégradations dues à plusieurs effets tels-que le climat, le chargement des poids lourds ...etc. C'est pour cela, on doit entretenir ces infrastructures par l'application des techniques modernes avec l'utilisation de produits innovantes tel que les géo-synthétiques qui sont constituées de : polymère-synthétique tel que, le polyéthylène, le polyester, le polyamide ou polypropylène ou de polymère naturel. Ces produits améliorent la durée de service de la chaussée, garantir le service des usagers (véhicules, piétons, engins, aéronefs,) et assurer une durabilité à moyen et long termes

Dans notre étude on parlera de l'application des produits dans les chaussées rigides et comment analyser numériquement une chaussée rigide renforcée par l'insertion de nappe de ces produits.

Le travail se compose en chapitres répartis de deux grandes parties :

- Une synthèse bibliographique représentée en trois chapitres exposant : des généralités sur les chaussées avec les différents dégradations d'une chaussée rigides, des généralités sur les produits géo-synthétiques et un dernier chapitre qui parle sur l'application des géo-synthétiques et leur influence sur les chaussées rigides.
- Une modélisation numérique, basée sur la méthode des éléments finis, avec l'utilisation du logiciel Ansys version 16.0, avec la prise en compte d'un cas d'étude de piste aéroportuaire rigide de l'aérodrome de Tindouf. Une discussion sera lancée sur l'application de ces géo-synthétiques et leur influence sur le comportement de cette chaussées rigide réparée.

Partie A :
Synthèse bibliographique

Chapitre I :
Généralité sur les chaussées

I.1 : Introduction :

Les chaussées sont les moyens qui assurent la circulation et le déplacement, qui doivent garantir le service des usagers (véhicules,engins,piétons,aéronefs....).

Dans ce chapitre on va parler sur les constitutions et les différents types de chaussées, et les dégradations et méthodes de réparations des chaussées rigides en particularité.

I.2 : Définition des chaussées routières et aéroportuaires :

- Chaussée routière : une chaussée routière est la partie d'une voie de communication, destiné à la circulation des véhicules.
- Chaussée aéroportuaire : une chaussée aéroportuaire est la partie d'une voie de communication, destiné à la circulation des aéronefs.

I.3 : Constitution de structures des chaussées :

Une chaussée routière se présente comme une structure composite réalisée par empilements successifs de couches de matériaux granulaire, le tout reposant sur un sol support.

La structure d'une chaussée non revêtue est constituée généralement de deux groupes de couches, et dans le cas d'une chaussée revêtue les deux groupes précédents sont surmontés par la couche de surface superposée de bas vers le haut :

- la plate-forme support.
- la couche d'assise.

I.3.1 : Plate-forme support de chaussée :

La plate-forme support de chaussée est la couche dont la surface est étendue sous la chaussée et les accotements. Elle sert, comme son nom l'indique, de support de chaussée.

La plate-forme(PF) doit répondre aux objectifs suivant :

- Garantir une portance à court terme, nécessaire à l'obtention de la qualité de compactage ou de densification des matériaux du corps de chaussée, mais également à long terme.
- Permettre la traficabilité nécessaire aux engins de chantier.
- Assure la protection de la partie supérieure des terrassements contre les intempéries lors du chantier de construction de la chaussée.
- Assure la protection du sol naturel contre le gel lors d'hiver rigoureux.

La plate-forme support de chaussée est généralement constituée de bas en haut par :

- a- Partie Supérieure des terrassements(PST) :** Représentée par les sols en place (déblai)ou les matériaux rapportés (remblai).Elle a une épaisseur d'environ 1,00 m. la surface de la PST, est appelée l'arase terrassement.
- b- Couche de forme :** Couche de matériaux destinés à homogénéiser et à améliorer la portance de la couche support. C'est une couche de transition entre l'arase et la chaussée, elle est d'environ 15 à 45cm.

I.3.2 : Couche d'assise :

L'assise de chaussée se décompose en deux sous-couches, couche de fondation surmontée de la couche de base. Elles apportent à la structure de chaussée l'essentiel de sa rigidité.

a- Couche de fondation : Elle est composée de gravier concassé 0/40 d'une épaisseur de 20 cm. Elle répartit les pressions sur le support, afin de maintenir les déformations.

b- Couche de base : Elle est formée de gravier 0/25 et bitume. Elle est d'une épaisseur de 20 cm. Cette couche supporte exactement l'action des véhicules à l'intérieur de laquelle les pressions élevées s'atténuent avant d'être transmise à la couche de fondation.

I.3.3 : Couche de surface :

La couche de surface a globalement une structure bicouche:

a- Couche de roulement : Qui subit directement les actions agressives dues au trafic et au climat, assure la fonction d'étanchéité des couches d'assise vis-à-vis des infiltrations d'eau et des sels de déverglaçage (fusion du verglas), et à travers ses caractéristiques de surface, elle garantit la sécurité et le confort des usagers.

b- Couche de liaison : Assure l'adhérence entre la couche de roulement et la couche de base.[1]

I.4 : Différents types de structures de chaussée :

Les différents types de structures de chaussées sont :

I.4.1 : Les chaussées souples :

Elles sont composées d'un revêtement bitumineux relativement mince (< à 15 cm) réduit parfois à un enduit dans le cas de chaussée à très faible trafic. L'assise est réalisée d'une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités (GNT). L'épaisseur d'ensemble de la structure est en générale comprise entre 30 et 60 cm.

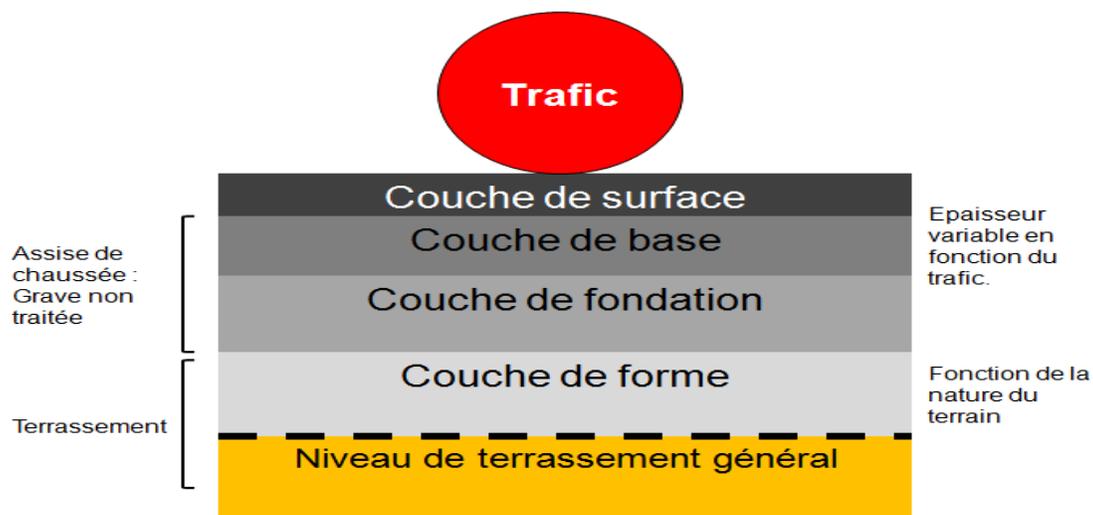


Figure I.1 : les couches d'une chaussée souple [2].

Leur comportement :

Leurs compositions et leurs épaisseurs font que les efforts dus au trafic, sont directement transmis au sol support avec une faible répartition latérale.

La tenue dans le temps est fortement influencée par la qualité du sol support et notamment son comportement en période hivernale ou humide. La qualité de l'étanchéité de la couche de roulement et

du drainage de la PST seront déterminants. Une période de sécheresse prolongée peut aussi entraîner une remontée de fissures.

I.4.2 : Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques :

Elles sont aussi appelées chaussées semi-rigides. La couche de roulement est composée d'un revêtement bitumineux, elle repose sur une assise traitée aux liants hydrauliques dont l'épaisseur totale est d'environ 20 à 50 cm. Ce type de chaussée présente un fort risque de retrait qui fait apparaître, dans la couche de base, des fissures remontant rapidement dans la couche de surface.

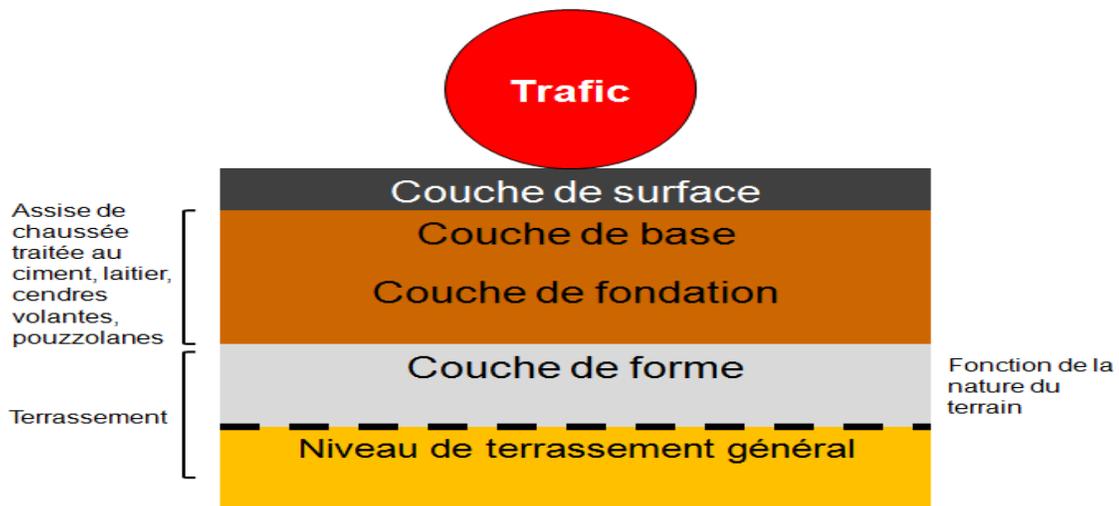


Figure I.2 : les couches d'une chaussée semi-rigides [2].

Leur comportement :

Le traitement des matériaux leur donnent 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 qui créent des fissures, celle-ci remontent 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 portance.

Des solutions ont été mises au point pour contrôler la fissuration et limiter ou ralentir les remontées jusqu'à la couche de roulement (complexes anti fissures).

I.4.3 : Les chaussées en béton de ciment (rigides) :

On rencontre les 4 modèles suivants :

➤ Dalles non goudonnées avec fondation :

Elles sont constituées de dalles de béton de ciment de 20 à 28 cm sans armature, reposant sur une fondation en béton maigre (12 à 18 cm), ou en matériaux traités aux liant hydrauliques (15 à 20 cm).

➤ Dalles goudonnées avec fondation :

Elles sont constituées de dalles béton de ciment de 17 à 23 cm (avec armatures de liaison entre les dalles), reposant sur une fondation en béton maigre (14 à 22 cm).

➤ **Dalles sans fondation :**

Elles sont constituées de dalles de béton de ciment de 28 à 39 cm qui reposent sur une couche drainante en matériaux granulaires ou sur un géotextile.

➤ **Béton armé continu (avec aciers filants sur toute la longueur de voirie) :**

Type A: Dalle de béton de ciment (16 à 24 cm), reposant sur une fondation en béton maigre de 12 à 14 cm.

Type B : Dalle de béton de ciment (18 à 24 cm) reposant sur une assise en matériaux bitumineux de 5cm et une fondation en sable traité aux liants hydrauliques (50 à 60 cm).

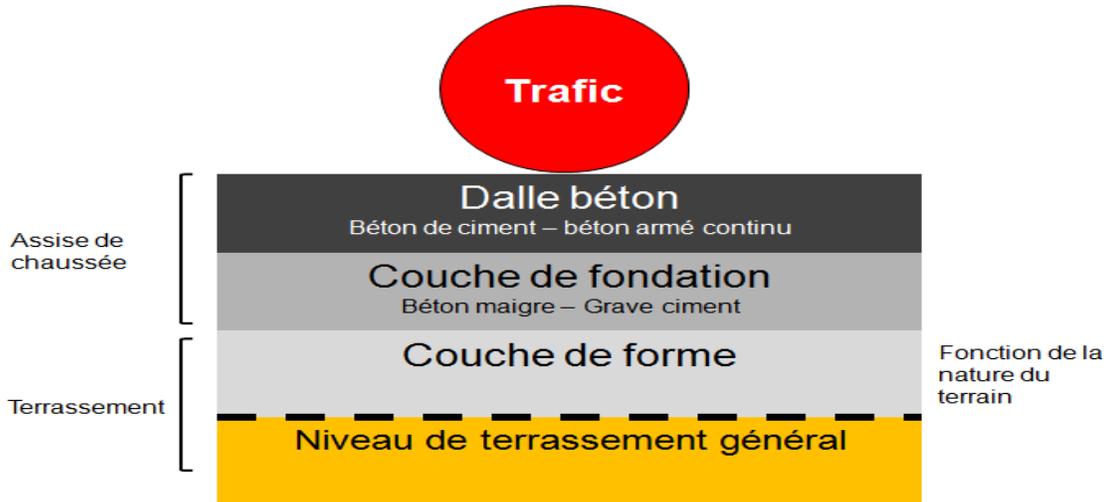


Figure I.3 : structure d'une chaussée rigide [2].

Leur comportement

Ces structures rigides absorbent les efforts et en transmettent peu au sol. Le principal inconvénient est "l'effet de poutre" du béton, dont la partie basse soumise à des efforts de traction peut être fragilisée, sauf si ces efforts sont compensés par des armatures métalliques. La dilatation du béton peut également provoquer des fissures, si le phénomène n'est pas maîtrisé par la mise en place de joints de dilatation ou de pré-fissuration. Enfin l'uni de ce type de chaussées les rendent bruyantes.

I.3.4 : Les chaussées bitumineuses épaisses:

Elles sont composées de revêtements bitumineux. L'assise est réalisée en matériaux traités aux liants hydrocarbonés dont l'épaisseur est le plus souvent comprise entre 15 et 40 cm.

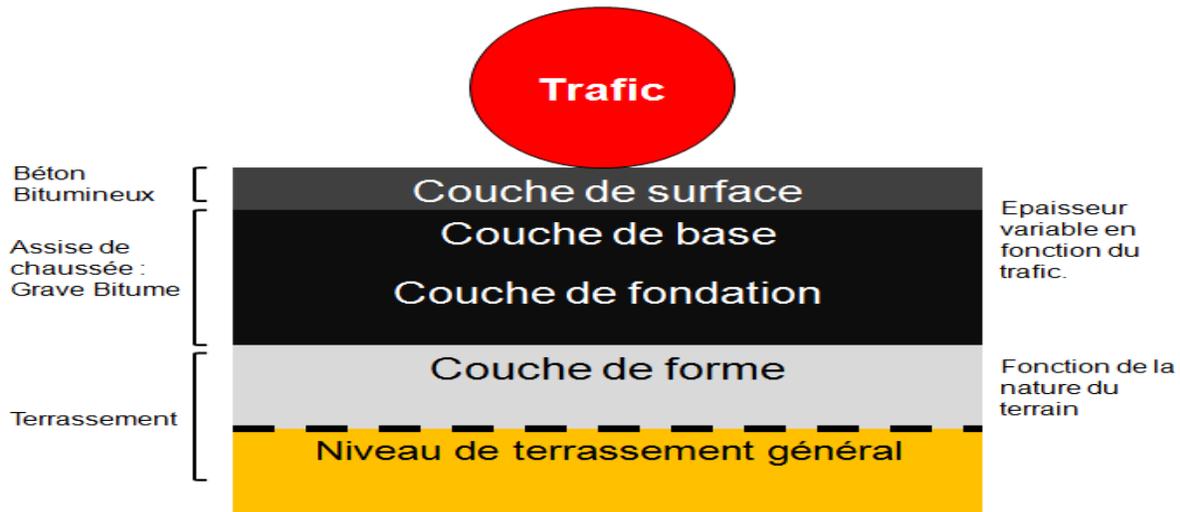


Figure I.4 : structure d'une chaussée bitumineuse épaisse [2].

Leur comportement :

La qualité de ce type de structure tient essentiellement à la qualité du collage entre les différentes couches de matériaux bitumineux. La relative rigidité des matériaux permet de répartir les contraintes verticales ce qui réduit sensiblement les efforts au niveau du sol support.

Les déformations observées en surfaces sont liées pour l'essentiel au fluage, favorisé par de fortes chaleurs et un trafic lourd lent. Les fissures apparaissent après les efforts de tractions en fond de couche engendrés par les contraintes répétées, d'où l'importance du collage qui permet de transmettre les efforts de traction en partie basse de la couche la plus profonde.

I.4.5 : Les chaussées à structure mixte :

La couche de roulement et la couche de base (10 à 20 cm) sont en matériaux bitumineux. La couche de fondation est en matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm). L'épaisseur de matériaux bitumineux doit être de la moitié de l'épaisseur totale de la chaussée. Ce type de chaussée empêche la remontée de fissures entre la couche traitée aux liants hydrauliques (retrait) et la couche de grave bitume.

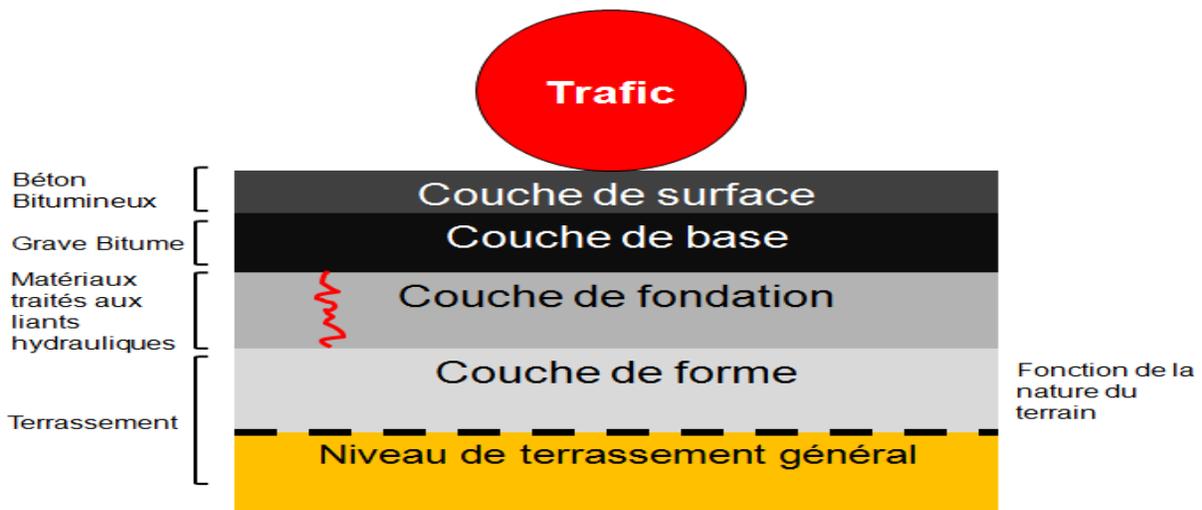


Figure I.5 : Les couches d'une chaussée à structure mixte [2].

Leur comportement

La structure de ces chaussées permet, pour la couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques, de par leurs rigidités, de diffuser les efforts et de les atténuer dans le sol support. Les couches en matériaux bitumineux assurent l'uni de la couche de roulement et ralentissent, grâce à leurs relative souplesse et à leurs épaisseurs, les remontées de fissures.

I.4.6 : Les chaussées à structure inverse :

Cette structure est composée d'une couche de surface en matériaux bitumineux d'environ 15 cm d'épaisseur; d'une couche de base en matériaux granulaires non traités, environ 12 cm; d'une fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques. L'épaisseur totale de la structure est de l'ordre de 60 à 80 cm.

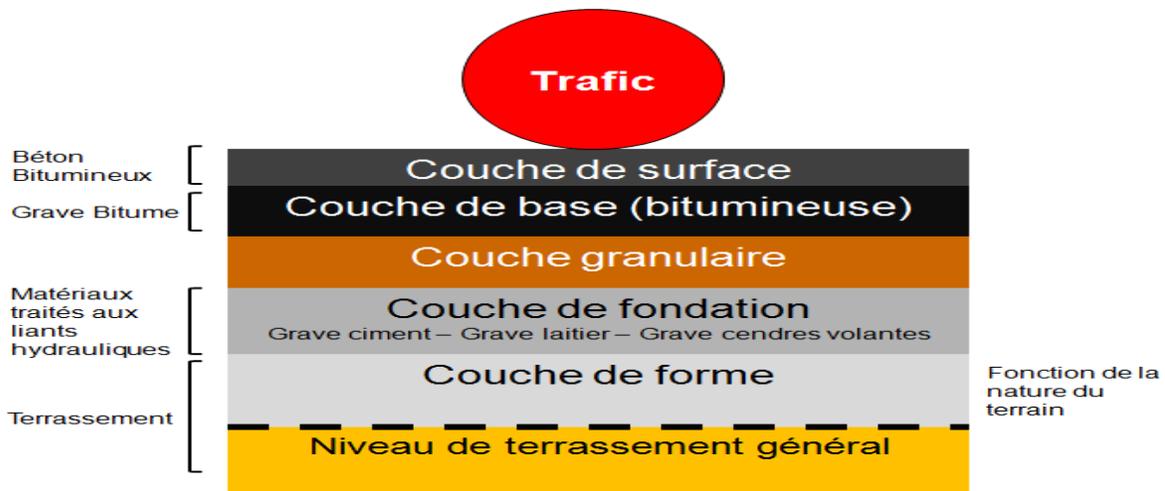


Figure I.6 : Les couches d'une chaussée à structure inverse [2].

Leur comportement :

Les trois couches de ce type de structure ont toutes un rôle spécifique.

La fondation traitée aux liants hydraulique permet de répartir les contraintes sur le sol et d'assurer un support de qualité pour les couches supérieures.

La couche granulaire a pour fonction d'absorber les fissurations de la couche de fondation et ainsi d'empêcher les remontées de fissures jusqu'à la couche de roulement.

La couche de roulement assure l'étanchéité et l'uni de l'ensemble.[2]

Tableau I.1 : Types de structure de chaussée selon LCPC [1]

Structures types	Nature des couches			Commentaires
	Surface	Base	Fondation	
Souples	Bitumineuse	Graves Non Traitées (GNT)		Epaisseur totale de la structure comprise entre 300 et 600mm
Bitumineuses Epaisées	Matériaux bitumineux			Epaisseur des couches d'assise comprise entre 150 et 400 mm
Semi-rigides	Bitumineuse	MTLH		Epaisseur des couches d'assise comprise entre 200 et 500 mm
Rigides	Béton de ciment (150 jà 400 mm d'épaisseur)		Soit en MTLH Soit en GNT Soit bitumineuse	Couche de forme en MTLH Dispositions particulières (dalle goujonnées ou non, béton armé continu, etc.) afin d'assurer une continuité mécanique au franchissement d'une fissure due au retrait du béton
Mixtes	Matériaux bitumineux		MTLH	Rapport de 0,5 entre l'épaisseur de matériaux bitumineux et celle de la structure de chaussée
Inverses	Bitumineuse	GNT	MTLH	Epaisseur de la GRH (environ 120 mm)
Composite	Béton bitumineux	Béton armé	Graves	Epaisseur de GB de 5 à 10cm
	très mince Enduit superficiel	continu	bitumineux (GB)	

I.5 : Statistiques :

I.5.1 : Réseaux routiers :



Figure I.7 : situation du réseau autoroutier Algérien [4].

Un des plus importants du Maghreb et d'Afrique, d'une longueur de 108 302 km, répartie sur 76 028 km de routes nationales/départementales et 32 274 km de routes secondaires, le réseau routier est en plein développement grâce au programme de modernisation des transports routier et ferroviaire qui prévoit la réalisation de l'Autoroute Est-Ouest de (1 216 km) l'autoroute des hauts plateaux de (1 330 km), et la réalisation de 19 000 km de route, ainsi la finition de la route transsaharienne (nord-sud).

L'Algérie sera traversée du Nord au Sud par la route transsaharienne. Cette route est promue par le gouvernement pour accroître le commerce entre les six pays traversés par la route transsaharienne (Algérie, Mali, Niger, Nigeria, Tchad et Tunisie).

Projet d'autoroute des hauts plateaux :

- Longueur : 1330 km
- Début des travaux 2009, achèvement en 2013
- Coût du projet : quelque 11 milliards de dollars

Rocades et voies express :

- Raccordement des autoroutes (est-ouest, hautes-plateaux, transsaharienne nord-sud, Routes du littoral...)
- Début des travaux 2009, achèvement en 2013 [3].

I.5.2 : Réseaux aéroportuaire :

L'Algérie compte 35 aéroports, dont 13 internationaux qui sont tous gérés par l'Établissement de gestion de services aéroportuaire. Le plus important est l'Aéroport d'Alger avec une capacité, depuis 2006, de 6 millions de passagers par an.



Figure I.8 : Aéroport d'Alger Houari Boumediene, Alger[4].

La compagnie aérienne nationale Air Algérie domine quant à elle le marché du transport aérien qui compte depuis son ouverture à la concurrence Huit (08) autres compagnies privées. Elle s'occupe de plusieurs lignes vers l'Europe, l'Afrique, le Canada, la Chine, le Moyen-Orient. Plusieurs compagnies aériennes étrangères ont des vols vers l'Algérie (Tunis air, Royal Air Maroc, Air France, Alitalia, ASL Airlines France, Vueling, Lufthansa, Turkish Airlines, British Airways, etc).

Depuis octobre 2011, le ministère des transports a autorisé la compagnie aérienne algérienne Tassili Airlines filiale de la compagnie pétrolière Sonatrach à effectuer des vols grand public, en plus de ces vols réguliers domestiques et le transport des ouvriers vers les gisements de pétrole et de gaz du Sahara algérien [4].



Figure I.9 : Avion Airbus A330 de la compagnie Air Algérie[4].

I.6 : Dégradations des chaussées rigides :

I.6.1 : Définition de la dégradation :

La dégradation c'est l'ensemble des distorsions de la chaussée causées par de nombreux facteurs tels que : le trafic, le climat, type de sol support...etc. Selon le catalogue des dégradations(2eme édition Avril 2007) une chaussée rigide peut présenter les dégradations suivantes :

- Dégradation de structure.
- Dégradation de surface.
- Dégradation de joints.
- Autres.

I.6.2 : principales causes de dégradation :

Les chaussées évoluent et se dégradent essentiellement sous l'effet du trafic lourd et des conditions climatiques. La rapidité de cette évolution et les désordres qui apparaissent sont également liés à la nature et à l'épaisseur des matériaux utilisés et à leurs conditions de fabrication et de mise en œuvre. Certains désordres consécutifs à l'instabilité du support de la chaussée (remblais ou terrain naturel) peuvent apparaître indépendamment du trafic et du climat [SETRA, 1996]

I.6.2.1 : Trafic :

Au passage d'un véhicule, la chaussée accuse une petite fatigue. De ce point de vue les poids lourds sont particulièrement agressifs.

La répétition des charges entraînent une fatigue générale de la chaussée qui présente alors des dégradations.

Le frottement des pneumatiques en mouvement sur la couche de roulement conduit également par usure à son vieillissement.

Les efforts tangentiels et transversaux notamment pour les chaussées des giratoires peuvent donner lieu à des dégradations de la chaussée

I.6.2.2 : Conditions climatiques :

Le paramètre le plus nuisible sur le corps de chaussée est la présence de l'eau. L'eau pénètre dans le corps de chaussée par infiltration, percolation ou remontée.

Nous savons que la teneur en eau d'un sol si elle est trop élevée peut provoquer des désordres importants en modifiant la portance ou en favorisant l'attrition de certains granulats comme les latérites. En effet, l'eau peut s'interposer entre les granulats et les liants lorsque la qualité du collage entre eux n'est pas suffisante.

En outre, nous savons que les revêtements bitumineux sont très sensibles aux variations de températures. Ainsi, l'exposition à des températures élevées, non prises en compte dans le choix d'un bitume, pourra entraîner un vieillissement rapide de ce dernier

I.6.2.3 : Mise en œuvre :

Même si la qualité du liant et des granulats est excellente, le dimensionnement bienfait, une mauvaise réalisation au cours de la mise en œuvre, de la manutention ou de la consolidation pourra se traduire par un ouvrage fini d'une qualité médiocre. Ainsi, une bonne opération de mise en œuvre devra permettre:

- D'assurer une bonne adhérence entre couches;
- De produire des couches homogènes et compactes;

- D'offrir une surface régulière et uniforme [1].

I.6.3 : Différent types de dégradation :

I.6.3.1 : Dégradations de structure :

A. Fissure (longitudinale, transversale, oblique) :

A.1. Définition :

Rupture de la dalle en deux morceaux sauf si celle-ci concerne un coin de dalle (dans ce cas, voir «fissure en coin »).



Figure I.10 : fissures au niveau de la chaussée [5].

A.2. Causes possibles :

- Portance insuffisante (épaisseur trop faible de la dalle, résistance insuffisante du béton à la traction...);
- Dégradation des conditions d'appui de la dalle (tassement ou érosion du sol de fondation);
- Sciage trop tardif des joints à la mise en œuvre (fissure transversale);
- Saignée pour balisage axial favorisant l'effet d'entaille sous fortes sollicitations,
- Dimensions excessives de la dalle par rapport à son épaisseur donnant lieu à des contraintes thermiques importantes.

A.3. Conséquences et évolution :

- Infiltration d'eau dans le corps de chaussée;
- Modification des conditions de fonctionnement de la dalle (perte de portance);
- Altération de l'uni (fissure transversale);
- Départ de matériaux;
- Fracture.

B. Fissure en coins / Cassure d'angle :

B.1. Définition :

Rupture de la dalle en deux morceaux, les intersections de la fissure avec les bords de la dalle étant situées dans le quart de dalle adjacent au coin considéré.



Figure I.11 : cassure d'angle [5].

B.2. Causes possibles :

- Mauvaises conditions d'appui de la dalle et de transfert de charge combinées à la répétition des charges.
- La présence ou non d'épaufrures;
- L'existence ou non de départ de matériaux.

B.3. Conséquences et évolution :

- Infiltration d'eau dans le corps de chaussée;
- Modification des conditions de fonctionnement de la dalle (transfert de charge) ;
- Affaissement localisé, d'où altération de l'uni et de l'adhérence (rétention d'eau);
- Départ de matériaux.

C. Fracture :

C.1. Définition :

Rupture de la dalle en plus de deux morceaux, les fissures étant longitudinales, transversales ou obliques. Les cassures d'angle ne sont pas à prendre en compte dans le dénombrement des morceaux de dalle.



Figure I.12 : Fracture [5].

C.2. Causes possibles :

- Portance insuffisante (épaisseur trop faible de la dalle, résistance insuffisante du béton à la traction...);
- Dégradation des conditions d'appui de la dalle (tassement ou érosion du sol de fondation).

C.3. Conséquences et évolution :

- Infiltration d'eau dans le corps de chaussée.
- Modification des conditions de fonctionnement de la dalle (transfert de charge).
- Affaissement localisé, d'où altération de l'uni et de l'adhérence (rétention d'eau).
- Départ de matériaux.

D. Pompage :

D.1. Définition :

Remontée d'eau accompagnée éventuellement de fines à travers les joints ou les fissures.



Figure I.13 : Pompage identifié par les dépôts de fines [5].

D.2. Causes possibles :

- Dégradation des conditions d'appui de la dalle en présence d'eau due aux sollicitations dynamiques (les battements de dalles sous charge génèrent des mouvements d'eau sous pression aux interfaces dalles fondation qui provoquent des remontées d'eau et de fines à travers les joints ou les fissures).

D.3. Conséquences et évolution :

- Chute de portance.
- Formation de cavités dans la couche de fondation.
- Altération de l'adhérence.
- Mise en marche d'escalier.

E. Décalage / Marche :

E.1. Définition :

Différence de niveau entre deux dalles successives ou les lèvres d'une fissure. Une épaufrure avec départ de matériaux ne constitue pas une marche.



Figure I.14 : Décalage [5].

E.2. Causes possibles :

- Pompage.
- Tassement différentiel du sol de fondation.

E.3. Conséquences et évolution :

- Altération de l'uni.
- Modification des conditions de fonctionnement de la dalle (transfert de charge).
- Altération de l'adhérence (rétention d'eau).

I.6.3.2. Dégradations de surface :

A. Épaufrure :

A.1. Définition :

Bris du bord de la dalle en coin ou en partie courante à moins de 30 cm du joint; généralement cette dégradation affecte simplement une partie de l'épaisseur de la dalle.



Figure I.15 : Epaufrure [5].

A.2. Causes possibles :

- Présence de matériaux incompressibles dans les joints (défaut d'entretien des joints).
- Faiblesse du béton face aux sollicitations dynamiques amplifiée par le sciage du joint (effet d'entaille).
- Résistance à la compression du béton insuffisante.
- Détérioration locale du béton par un sciage prématuré.

A.3. Conséquences et évolution

- Infiltration d'eau dans le corps de chaussée;
- Départ de matériaux.

B. Faïençage / Écaillage :

B.1. Définition

Faïençage: Ensemble de petites fissures formant un maillage serré affectant la surface de la dalle pouvant évoluer vers l'écaillage.



Figure I.16 : Faïençage [5].

Écaillage: Départ par petites plaques (écailles) de la pellicule de laitance en surface de la dalle.



Figure I.17 : Ecaillage [5].

B.2. Causes possibles :

- Défaut de mise en œuvre (remontées de laitance);
- Effets thermiques (variation de température, gel dégel) ;
- Chocs thermiques (thermo-soufflante, réacteurs);
- Produits déverglaçant.

B.3. Conséquences et évolution :

- Porosité du béton néfaste dans les régions soumises au gel.
- Altération de l'uni.
- Départ de matériaux.

I.6.3.3 : Dégradations de joints :

A. Défaut de joints :

A.1. Définition :

Le joint est défectueux lorsqu'il n'assure plus la fonction d'étanchéité.



Figure I.18 : défaut de joint [5].

A.2. Causes possibles :

- Défaut du produit pour joint (vieillesse, durcissement, mauvaise adhérence, décollement, incompatibilité entre produits...)
- Défaut de mise en œuvre (nettoyage insuffisant du corps de joint avant application du produit, rapport incorrect entre la largeur et la profondeur du joint, absence de fond de joint);
- Actions thermiques, chimiques et mécaniques diverses (souffle des réacteurs d'avions, thermo-soufflage, kérosène, acides...);
- Arrachement du produit pour joint.

A.3. Conséquences et évolution :

- Infiltration d'eau dans le corps de chaussée;
- Accumulation de cailloux, de terre ou de végétation;
- Risque d'épaufrures.

I.5.3.4. Autres dégradations :

A. Réparation ponctuelle dégradée :

A.1. Définition :

Réparation ponctuelle, quelle que soit son origine, à l'exception des scellements de fissures, concernant une fraction de dalle supérieure ou égale à 0,5 m² et présentant des dégradations sur sa surface ou son contour.



Figure I.19: Réparation ponctuelle[5].

A.2. Causes possibles :

- Défaut de mise en œuvre des matériaux d'apport.

L'examen du type des dégradations apparaissant à sa surface permet de mieux cerner la nature du défaut (se référer pour cela au paragraphe « causes possibles » de la dégradation rencontrée).

A.3. Conséquences et évolution :

Elles sont identiques à celles qui prévalent pour les dégradations apparaissant à la surface de la réparation

B. Dépôt de gomme :

B.1. Définition :

Dépôt de caoutchouc localisé dans la zone de toucher des roues.



Figure I.20 : Dépôt de gomme[5].

B.2. Causes possibles :

- Usure des pneumatiques des avions lors de la mise en rotation des roues aux atterrissages.

B.3. Conséquence et évolution :

- Altération de l'adhérence.

- Altération de la visibilité du balisage diurne et nocturne [5].

I.6 : Méthodes de réparation :

I.6.1: Aperçu :

Le revêtement rigide, s'il est conçu et construit correctement, offre d'excellentes performances à long terme avec peu d'entretien requis. Cependant, pour diverses raisons, des détresses surviennent et une réparation ou réhabilitation devient nécessaire. Par rapport à la réparation ou réhabilitation de chaussées souples, la réparation de chaussées rigides coûte plus cher et, si elles ne sont pas effectuées correctement, des problèmes similaires se développeront à proximité, et des réparations supplémentaires seront nécessaires. L'élaboration de stratégies optimales de réparation nécessite la compréhension des causes et des mécanismes de la détresse. Le nombre de types de détresse dans les chaussées rigides est limité et les causes sont assez bien comprises. Dans ce chapitre, les types de détresse des chaussées qui nécessitent des stratégies de réparation spécifiques sont décrits ainsi que les procédures de réparation.

I.6.2: Réparation complète :

I.6.2.1 Présentation :

Dans cette partie, les types de détresse des chaussées en béton de ciment Portland (PCC) qui nécessitent une réparation complète sont abordés, suivis des procédures de réparation.

I.6.2.2 : Types de détresse de chaussée nécessitant une réparation en profondeur (FDR) :

Dans la conception de contraction de chaussée en béton (CPCD), les problèmes suivants nécessitent un FDR : fissures transversales, dalles brisées et cassures de coin.

Les fissures transversales qui s'étendent sur toute la profondeur d'une dalle se produisent en raison des variations de température ou d'humidité et / ou de la charge de la roue et nécessitent un FDR. Les fissures transversales dans le CPCD qui s'étendent sur toute la profondeur d'une dalle sont causées par des problèmes de conception, tels que des longueurs de dalle inappropriées et une épaisseur de dalle déficiente, ou des problèmes de construction, tels qu'un support de base non uniforme ou insuffisant. Des fissures de retrait plastique se produisent lorsque la vitesse d'évaporation de la surface dépasse la vitesse à laquelle l'eau de prélèvement est disponible. Les fissures de retrait en plastique peu profondes (à environ 1 à 2 po de la surface) ne sont pas candidates pour le FDR à moins qu'elles ne se produisent dans toute la dalle. Les dalles brisées et les ruptures d'angle dans le CPCD résultent de problèmes de conception, tels qu'une épaisseur de dalle insuffisante, ou de problèmes de construction / conception, tels qu'un support de base non uniforme ou insuffisant. Dans les chaussées en béton armé en continu (CRCP), les problèmes suivants nécessitent un FDR:

- Punch-out
- Ecaillage profond.

Les perforations dans CRCP sont causées par des problèmes de conception, tels qu'une épaisseur de dalle déficiente, ou des problèmes de construction/conception, tels qu'un support de base non uniforme ou insuffisant. Elle se manifeste par un ou des blocs de béton déprimés bordés de fissures transversales

et longitudinales. Les fissures transversales traversant l'acier longitudinal au niveau des poinçonnages finiront par se rompre, ce qui entraînera une détérioration supplémentaire du poinçonnage.

Les coups de poing sont le type de détresse le plus grave du CRCP. L'amélioration des pratiques de conception et de construction par le ministère au cours des dernières décennies a considérablement réduit la fréquence des perforations. Notez que le patch d'asphalte a été appliqué pour restaurer l'élévation de la surface, ce qui implique que le bloc de béton a été poussé dans la base ou s'est détaché.



Figure I.21 :Punch-out typique dans CRCP [6].

L'effritement est un autre type de détresse dans le CRCP. L'écaillage est la rupture, l'écaillage ou l'effilochage du béton au niveau des fissures. Il existe plusieurs causes à ce type d'éclatement. Au Texas, l'écaillage est plus répandu lorsque des agrégats grossiers à coefficient de dilatation thermique élevé sont utilisés. La profondeur de l'écaillage varie considérablement, de moins d'un demi-pouce à la moitié de l'épaisseur de la dalle. L'écaillage peu profond provoque des problèmes fonctionnels plutôt que structurels dans la chaussée en PCC qui peuvent être réparés par une réparation à demi-profondeur (HDR). Une série d'éclats profonds causent des dommages structurels importants à la chaussée et devraient être réparés par FDR. En fonction de la gravité, de la durabilité et du coût, l'ingénieur déterminera l'utilisation du FDR ou du HDR pour réparer les éclats profonds.

Contrairement aux perforations, il n'est pas facile de distinguer les éclats profonds et peu profonds. Le moyen le plus efficace d'identifier l'écaillage profond consiste à effectuer un carottage ou des tests non destructifs, tels qu'un radar pénétrant dans le sol (GPR), un analyseur sismique portatif de chaussée (PSPA) ou un appareil de tomographie par ultrasons.



Figure I.22 : Effritement profond [6].

I.6.2.3 : Procédures de réparation en profondeur (FDR) :

Une fois qu'il a été identifié que le FDR est nécessaire, les procédures ci-dessous doivent être suivies:

- Identifier les limites de réparation.
- Sciez les périmètres.
- Retirer la dalle de béton.
- Si nécessaire, retirez la base endommagée.
- Percer des trous pour tirants longitudinaux et transversaux ou chevilles.
- Assurer la continuité longitudinale et transversale de l'acier (CRCP uniquement).
- Placer et finir le béton.
- Restaurer les joints existants.

Chaque étape est expliquée plus en détail.

A. Identification des limites de réparation :

Il est important d'identifier correctement les limites du FDR nécessaire. La zone de réparation doit inclure toutes les zones qui ont développé des vides sous la chaussée en béton. Cette zone s'étend généralement au-delà de la limite des zones défailtantes. Il est normal de déterminer les limites de la réparation en évaluant l'étendue de la détresse uniquement par des observations visuelles. Parfois, cette méthode n'inclut pas toute la zone endommagée et entraîne des ruptures de chaussée plus tard.



Figure I.23 : Réparation complète des perforations dans CRCP [6].

Pour le FDR de fissures transversales étendues et de dalles brisées dans CPCD, il est normal de retirer et de remplacer la dalle entière pour faciliter les opérations de sciage et d'enlèvement. Utilisez un bon jugement technique pour déterminer les limites de réparation pour les coupures de coin.

Pour les perforations, l'observation visuelle du pompage ou l'utilisation d'un test de déflectomètre à chute de poids (FWD) peut être utilisée pour déterminer les limites de la réparation. Pour l'écaillage profond, le carottage ou les essais non destructifs est la méthode d'évaluation la plus efficace. Il est recommandé que les limites du FDR soient étendues au-delà des limites déterminées par les évaluations.

B. Scier les périmètres :

Une fois les limites FDR établies, sciez le béton à l'aide de scies à lame diamantée sur toute la profondeur de la dalle de béton. La coupe à la scie avec des scies à lame diamantée donnera une surface de coupe lisse avec peu de dommages au béton environnant. Cette opération coupera toutes les

barres d'armature existantes le long du périmètre. Les scies à roue en carbure peuvent endommager le béton environnant et ne doivent pas être utilisées pour la coupe de scie pour FDR.

Pendant l'été, les coupes à la scie doivent être effectuées le matin alors que la température du béton est relativement basse. Lorsque la température est élevée, le béton est en compression et la scie à lame diamantée peut se coincer.

C. Retirez la dalle de béton :

Une fois que les limites de réparation sont coupées à la scie, le béton est enlevé de deux manières. Une méthode consiste à soulever de gros morceaux de la dalle, et l'autre méthode consiste à briser la dalle.



Figure I.24 : Dalle prête à être soulevée [6].

Une fois les agencements des goupilles de levage terminé, les grues ou les chargeurs frontaux soulèvent la dalle verticalement. Le levage doit être effectué aussi verticalement que possible avec un balancement minimal, car tout écart par rapport à cela peut endommager le béton environnant.

D. Si nécessaire, retirez la base endommagée :

Après le retrait de la dalle, retirez complètement le matériau de base détaché ou endommagé, ne laissant aucun matériau de base détaché. Recompacter les matériaux de base à la satisfaction de l'ingénieur. Lorsque cela est indiqué sur les plans, nivelez la couche de base avec de l'asphalte mélangé à froid à la ligne de fond d'origine et au niveau de la dalle de béton avant de placer le béton de réparation. Placer le béton directement sur la couche de base compactée, sauf indication contraire. De plus, si la détresse dans la base s'étend au-delà du périmètre du FDR, une décision doit être prise si d'autres coupes à la scie et enlèvement de béton supplémentaire sont nécessaires.

E. Percez des trous pour les tirants longitudinaux et transversaux ou les goujons :

Si les tirants installés aux périmètres de réparation ne fonctionnent pas bien, le problème potentiel de séparation des voies au niveau du joint longitudinal ou des déformations au niveau des joints transversaux augmentera.

Pour obtenir une liaison optimale entre le béton et les tirants à l'intérieur des trous percés, les trous doivent être d'une longueur adéquate et toute la poussière et l'humidité à l'intérieur des trous doivent être complètement éliminées. La méthode la plus couramment utilisée pour nettoyer les trous consiste à utiliser une brosse métallique et à appliquer de l'air comprimé. Lors de cette opération, il est important que l'air ne soit pas contaminé par de la graisse ou de l'huile, ce qui affaiblira la liaison entre

le béton et l'époxy. Pour vérifier s'il y a de la vapeur d'huile, projetez de l'air comprimé dans du papier blanc pendant quelques secondes et vérifiez s'il y a des résidus huileux sur le papier.

Une fois les trous percés nettoyés, remplissez complètement d'époxy. L'époxy utilisé dans cette opération a une faible viscosité et il est difficile de remplir complètement les trous.

En CPCD, des chevilles doivent être fournies à tous les joints transversaux lors du retrait de dalles entières. Un minimum de quatre chevilles est recommandé pour chaque chemin de roue. Les barres de cheville peuvent être fournies par perçage et époxy ou en effectuant une procédure de réajustement de la barre de cheville.

Lors du retrait de deux demi-dalles adjacentes, des tirants doivent être fournis au joint de construction transversal par perçage et époxy. Fournir des goujons au nouveau joint de contraction transversal et scier et sceller le nouveau joint.

Quel que soit le type de réparation décrit ci-dessus, prévoir des tirants au niveau du joint de construction longitudinal par perçage et époxy. Dans le CRCP, assurer la continuité de l'acier d'armature au niveau des joints de construction transversaux en perçant et en époxydant les tirants. Fournir des barres de liaison au joint longitudinal par perçage et époxy. L'espacement et la profondeur des trous sont spécifiés dans la norme de réparation des chaussées en béton. Parfois, un système de forage multiple, appelé forage collectif, est utilisé pour une plus grande efficacité.



Figure I.25 : Perçage de trous au joint longitudinal [6].

F. Assurer la continuité longitudinale et transversale de l'acier (CRCP uniquement) :

Pour le FDR du CRCP, cette étape consistant à assurer la continuité longitudinale des tirants est de la plus haute importance. La norme de réparation du béton exige une longueur de recouvrement minimale de 25 po pour les barres no 6. Pour éviter une rupture par arrachement, la longueur d'encastrement en acier doit être au moins 33 fois le diamètre de l'acier d'armature. Cela fonctionnera tant qu'il n'y a pas de fissures près du périmètre transversal de la zone de réparation. Si des fissures se développent près du périmètre transversal, cette exigence ne sera pas satisfaite et la longueur de recouvrement devra être augmentée. La détresse supplémentaire est survenue parce que la continuité de l'acier longitudinal n'était pas assurée dans la réparation d'origine. Les barres dans le cercle rouge montrent les barres de liaison insérées dans les trous percés lors de la réparation précédente. La barre dans le cercle bleu est l'acier longitudinal existant. Il est à noter que les tirants ne sont pas entièrement collés au béton et que

les trous ne sont pas complètement remplis d'époxy. Si un test de retrait avait été effectué, cela aurait indiqué un échec possible.



Figure I.26 : Dalle déjà réparée [6].

G. Placer et finir le béton :

Une fois la mise en place de l'acier terminée, le béton est coulé et fini. La mise en place du béton étant effectuée manuellement dans FDR, la consolidation du béton est réalisée par vibration manuelle. Afin d'assurer une bonne adhérence entre l'acier et le béton, une opération de consolidation de haute qualité est nécessaire. Une texture de surface comparable au béton environnant doit être fournie.

Normalement, la chaussée réparée sur toute la profondeur doit être ouverte le plus tôt possible. Après la mise en place du béton. Étant donné qu'une résistance initiale élevée est requise pour une ouverture précoce à la circulation, il est normal d'utiliser une teneur élevée en ciment ainsi que du ciment de type III. Cette pratique pourrait être bénéfique si les réparations sont effectuées en hiver lorsque la température ambiante n'est pas propice à l'obtention d'une résistance initiale élevée. Cependant, si les réparations sont effectuées en été lorsque la température ambiante est élevée, cette pratique pourrait entraîner une forte chaleur d'hydratation et une détérioration prématurée de la chaussée en raison de problèmes de fissuration thermique. Cette pratique pourrait également entraîner un retrait de séchage plus important du béton, en particulier près de la surface. À mesure que la température du béton augmente, l'évaporation de l'eau de la surface augmente également. Un durcissement approprié est essentiel pour minimiser la fissuration de la carte causée par de grands gradients de température et une forte évaporation.



Figure I.27 : Carte fissurée dans la dalle FDR [6].

Pour les projets FDR, l'utilisation de la maturité, plutôt que des tests de résistance conventionnels, est fortement encouragée. L'estimation précise de la résistance in situ peut être mieux obtenue par la méthode de maturité.

H. Restaurer les joints existants

Restaurer tous les joints existants dans la zone de réparation. Surtout, effectuez une coupe à la scie en temps opportun sur les barres de cheville et restaurez les joints de contraction transversaux pour CPCD.

I.6.3: Réparation de chaussées en béton :

I.6.3.1 : Procédures de réparation :

Les procédures suivantes doivent être suivies lors de la réparation d'une chaussée en béton:

- Identifiez les limites de réparation.
- Retirer le béton détérioré.
- Nettoyez les surfaces de réparation.
- Placez le matériel de réparation.
- Terminez la surface.

Chaque étape est expliquée plus en détail.

A. Identifiez les limites de réparation :

Il est important d'évaluer correctement l'étendue du béton détérioré et de déterminer les limites de la réparation. Par exemple, en cas d'éclatement, les dommages s'étendent souvent au-delà de la zone écaillée visible. Étant donné que la plupart des éclats sont causés par des délaminations, l'étendue des délaminations doit être identifiée. L'un des moyens les plus efficaces d'évaluer l'étendue des délaminations est l'utilisation d'un test de sondage. Un marteau ou une barre d'armature en acier peut être utilisé pour les tests de sondage en tapotant près des éclats. S'il n'y a pas de délaminage, le son sera solide.



Figure I.28 : Identifiez les limites de réparation [6].



Figure I.29 : Carottage adjacent à la zone réparée écaillée [6].

Le matériau de réparation appliqué (côté gauche de l'image) a une couleur verdâtre. Le noyau, éloigné de plusieurs pouces des limites de la réparation d'éclats, a révélé plusieurs délaminations à différentes profondeurs. La partie supérieure du noyau est sortie désintégrée. Si un test de sondage avait été effectué, les zones délaminées auraient été identifiées et les zones auraient pu être incluses dans la réparation. Pour assurer l'enlèvement de tout le béton délaminé, il est bon d'étendre les limites des limites de réparation de plusieurs pouces au-delà des limites déterminées par les tests de sondage. Radar de pénétration du sol (GPR), l'analyseur sismique portable des chaussées (PSPA) et le dispositif de tomographie par ultrasons sont des méthodes supplémentaires qui peuvent être utilisées pour déterminer la limite de détérioration.

B. Enlever le béton détérioré :

Une fois les limites de réparation déterminées, retirez le béton détérioré. Sciez le périmètre de la zone de réparation à une profondeur minimale de 1-1 / 2 pouces, puis découpez le béton à l'aide d'outils pneumatiques légers.



Figure I.30 : Enlever le béton détérioré [6].

C. Nettoyer les surfaces de réparation :

Une bonne adhérence entre la surface de béton exposée et le matériau de réparation est essentielle. Sans une bonne adhérence, le matériau de réparation sera séparé du béton en raison de la charge environnementale et des roues. Une fois le béton détérioré retiré, les surfaces de béton doivent avoir une texture rugueuse. Nettoyez la zone de réparation avec de l'eau pour éliminer toute poussière et améliorer l'adhérence du matériau de ragréage.



Figure I.31 : Nettoyez les surfaces de réparation [6].

D. Placer les matériaux de réparation :

Les caractéristiques générales des bons matériaux de réparation devraient inclure: bonne adhérence, moins de potentiel de changement de volume en raison des variations de température et d'humidité, et résistance et module d'élasticité comparables à ceux du béton existant.

Lors de l'utilisation de béton prêt à l'emploi, la surface de réparation doit être saturée sans accumulation d'eau avant de placer le béton.

Lors de l'utilisation de produits de réparation, avant de placer les matériaux de réparation, lisez attentivement et suivez les recommandations du fabricant pour la préparation de la surface, le mélange, la mise en place et le durcissement.



Figure I.32 : Placez les matériaux de réparation [6].

E. Terminer la surface :

Terminez la surface de réparation pour qu'elle épouse la surface de la chaussée. Faites correspondre la texture de la surface de réparation avec le béton adjacent. Un bon séchage est essentiel. Étant donné que les zones et les profondeurs de réparation sont relativement petites, cela rend le rapport surface, volume du matériau de réparation appliqué plus élevé que celui d'un revêtement en béton normal. Ce rapport surface, volume élevé rend le matériau de réparation sujet à des changements de volume plus importants en raison du retrait au séchage s'il n'est pas correctement durci. La perte d'humidité due à un durcissement médiocre entraîne également une perte de chaleur par évaporation. Le moment optimal pour l'application des produits de cure est lorsque l'eau de prélèvement ne remonte plus à la surface. Cependant, les matériaux de réparation ont de faibles rapports eau-ciment et ont tendance à ne pas saigner. Dans ce cas, les opérations de séchage doivent commencer le plus tôt possible.[6]



Figure I.33 : Terminez la surface [6].

I.7 : Expertise et auscultation :

I.7.1 : Auscultation des chaussées rigides :

I.7.1.1 : Essai HWD :

Descendant du déflectomètre à boulet du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), le Heavy Weight Deflectometer (HWD) est devenu aujourd'hui l'appareil de référence international pour la détermination de la portance des chaussées aéronautiques. Il est composé d'une masse tombante qui engendre à la surface de la chaussée, par l'intermédiaire d'une plaque rigide et d'un système d'amortissement, un chargement de type impulsif, destiné à simuler le passage d'une roue d'avion. Les déflexions engendrées sont mesurées pendant la période de chargement, au moyen de géophones disposés sous et aux abords de la plaque. Leur analyse permet de déterminer les propriétés structurelles des différentes couches de chaussée au moyen d'une procédure d'identification numérique appelée « calcul inverse » qui consiste à :

- 1- Choisir un modèle mécanique pour décrire le comportement de la chaussée sous chargement,
- 2- Identifier les paramètres du modèle permettant le meilleur calage entre les données numériques et expérimentales. Un calcul direct peut alors être réalisé, à partir du même modèle mécanique, et en

tenant compte des paramètres identifiés, pour estimer la capacité portante de la chaussée et/ou sa durée de vie résiduelle

I.7.1.2 : Dimensionnement rigide :

Méthodes rationnelles de dimensionnement et d'auscultation des chaussées aéronautiques rigides

Dans la continuité des travaux sur le dimensionnement et l'auscultation des chaussées aéroportuaires souples, des méthodes rationnelles de dimensionnement et d'auscultation des chaussées rigides sont en cours de développement par le Service technique de l'aviation civile - STAC .

Ces méthodes reposent sur des modèles thermomécaniques aux éléments finis en 3D, prenant en compte la géométrie des dalles béton, y compris les singularités géométriques que constituent les systèmes de transfert de charge entre dalles : joints conjugués sinusoïdaux et/ou goujons.

Deux modes d'endommagement sont considérés :

- 1- la rupture fragile par excès de contraintes dans le béton, sous les effets isolés ou conjugués de chargements mécaniques et thermiques ;
- 2- un endommagement « par fatigue » des joints sinusoïdaux (dégradation progressive et apparition de jeu dans le joint) ou initiation puis propagation de fissures au niveau des zones de concentration de contraintes que constituent les goujons :

Les phases de validation expérimentale du modèle thermomécanique et des modèles d'endommagement s'appuient sur des campagnes d'essais réalisées respectivement sur la planche d'essais instrumentée du STAC et sur des chaussées expérimentales soumises à des tests de fatigue accélérée in situ couplées avec des résultats de caractérisation des matériaux en laboratoire[7].

I.7.2 : Expertise :

Les infrastructures routières et aéronautiques de bonne qualité sont un facteur clé de succès pour le Développement économique et social de nos pays. La maintenance de ces infrastructures pour lesquelles des investissements importants sont consentis est un défi à relever pour les pays, surtout pour ceux du tiers monde. Pour cela, la maîtrise de leur mode l'évolution et de dégradation est un élément incontournable.

Chapitre II :
Généralité sur les géo-synthétiques

II.1. Introduction :

En Génie Civil, les polymères font partie des matériaux qui sont utilisés dans les différents ouvrages géotechniques de soutènement, de protection de bassins d'étanchéité sous les chaussées, dans les tunnels...etc. Leur emploi nécessite la maîtrise de leur comportement à long terme (la durée de vie exigée) et qui est généralement de l'ordre de 100ans.

II.2. Définition :

Un géo-synthétique est le terme générique désignant un produit dont au moins l'un des constituants est à base de polymère synthétique ou naturel, se présentant sous forme de nappe, de bande, ou de structure tridimensionnelle, pour assurer aussi bien un rôle de drain, de filtre, de séparation ou de renforcement, utilisé en contact avec le sol ou avec d'autres matériaux dans des différents domaines, tels que la construction routière, les ouvrages souterrains, les travaux hydrauliques, les chemins de fer, les terrains d'aviations...etc.

II.3. Origine des géo-synthétiques :

Depuis une trentaine années, l'utilisation des matériaux géo-synthétiques est largement étendue à tous types d'ouvrages de génie civil, parce qu'ils sont faciles à mettre en œuvre et assez peu coûteux...etc. La littérature parle d'une première date en 1962, en Caroline du sud (United State of América), où les premières parcelles de route utilisent des tissus de coton. Le résultat est probant, puisque la route reste en bon état jusqu'à ce que le matériel se dégrade.

La deuxième innovation dans ce domaine fut l'utilisation de textile technique comme drain et comme filtre. Le fait que le liquide puisse traverser un matériel poreux tout en retenant une partie ou la totalité du sol adjacent, a permis le développement d'un matériau synthétique plus performant. Ainsi, le géo-synthétique permet de remplacer la couche de sable, drainante et filtrante. La fonction de filtration, autant au niveau de l'eau que des sols a permis aux géo-synthétiques de prendre de l'essor dès 1930. C'est à cette date que les manufacturiers de textiles européens transforment leurs machines traditionnelles et développent de nouvelles gammes de produits orientés vers une utilisation en géotechnique.

Enfin, une troisième application importante des géo-synthétiques fut la réalisation de barrière imperméable permettant d'empêcher le mouvement des liquides sous forme de caoutchouc synthétique vers 1940. Les premières géo-membranes polymériques telles que le polyéthylène de haute densité (PEHD) voient le jour au début des années 80 et n'ont cessé de se développer depuis. À la fin des 80, le mélange d'un support synthétique avec un matériau naturel comme l'argile est utilisé sous le nom de géo-composite bentonitique (GVB).

De nos jours, les fonctions remplies par les géo-synthétiques, spécifiquement dans le domaine du génie civil, sont :

- La séparation des sols.
- Le renforcement des structures (horizontale et verticale).
- Le drainage des liquides.
- La filtration des sols.
- L'imperméabilisation des ouvrages.
- Le contrôle de l'érosion.

- La protection des ouvrages.

Leurs applications sont parfaitement documentées, les caractéristiques techniques maîtrisées et en perpétuelle évolution pour s'adapter aux besoins changeant de la société. De nombreux documents, guides de sélection, plan et coupe type issus du législateur servent désormais de cadre de référence dans le domaine de la spécification des ouvrages utilisant des géo-synthétiques.

II.4. Différents types des géo-synthétiques :

Les géo-synthétiques sont produits sous différentes formes à partir de matières synthétiques sur la base de divers polymères provenant de l'industrie chimique (polyéthylène, polypropylène, polyester, fibres de verre, fibres végétales...). Les centaines de produits géo-synthétiques existant actuellement sur le marché peuvent être classés en 6 groupes, d'après les matières premières utilisées, les modes de fabrication et les domaines d'utilisation :

II.4.1. Géotextiles :

Matière textile, plane, perméable et à base de polymère (naturel ou synthétique), peuvent être non tissé, tissé ou tricoté utilisé en contact avec le sol ou d'autres matériaux dans des divers domaines. Les géotextiles sont utilisés pour des applications en séparation, filtration, drainage, renforcement et contrôle de l'érosion.



Figure II.1 : nappe de géotextile [9].

II.4.1.1. Géotextile non tissé :

C'est un géotextile se présentant sous forme d'une feuille manufacturée, constituée un voile ou d'une nappe de fibre, orientée selon une direction ou distribuée aléatoirement, et dont la liaison peut être de différents types :

- La liaison mécanique : est faite par entrelacement des fibres, à partir d'une série d'aiguilles qui s'enfoncent dans la nappe qui défile (non tissé aiguilles).
- La liaison chimique : est réalisée soit à l'aide de résines soit d'émulsions qui appartiennent à des décomposées proches des caoutchoucs naturels.
- La liaison thermique : est faite par calandrage (effets conjugués de la chaleur et de la pression) entre deux rouleaux presseurs chauffants. On obtient une fusion partielle des points de contacts des fibres (non tissé thermo soudé).

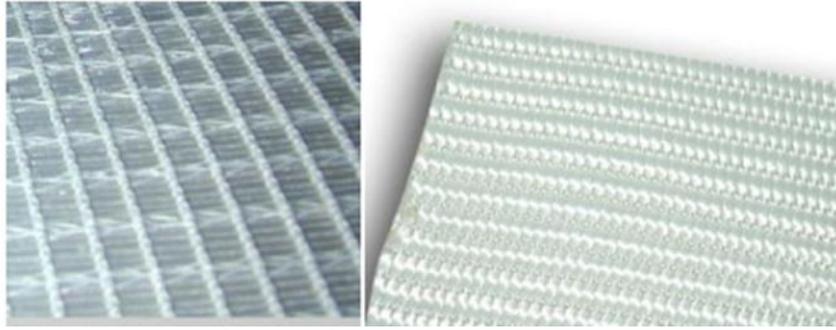


Figure II.2 : Géotextile non tissé [9].

II.4.1.2. Géotextile tissé :

Les tissés sont soit des tissés de fils mono filaments, soit des tissés de fils multifilaments dont chaque fil est constitué de plusieurs brins élémentaires soit des tissés de bandelettes de films extrudés à base de polyéthylène, ou de polypropylène. Le tissage permet d'obtenir un module de traction élevé, une faible déformabilité et une régularité des pores intéressante sur le plan hydraulique cependant il entraîne une anisotropie en plan.

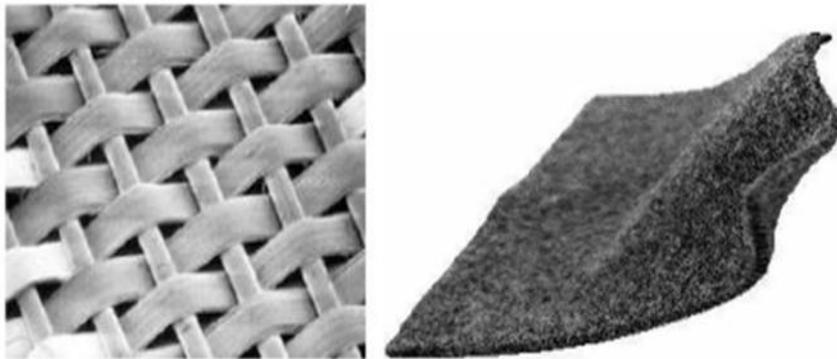


Figure II.3 : Géotextile tissé [9].

II.4.1.3. Géotextile tricoté :

C'est un géotextile produit par assemblage de deux nappes de fils parallèles au moyen d'un fil de liaison, de façon à obtenir la répartition géométrique désirée.

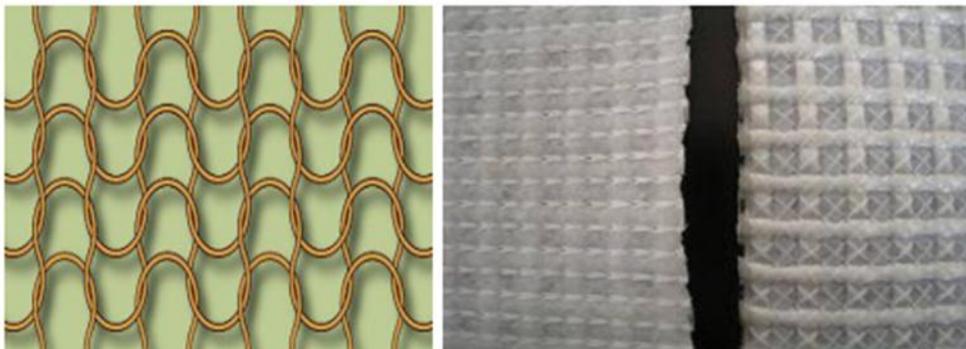


Figure II.4 : Géotextile tricoté [9].

II.4.1.4. Géotextile tube (géo-tuyaux) :

C'est un géotextile en forme de tube tissé sur un métier circulaire. L'emploi d'un géotextile tube présente des avantages pour les fondations sur colonnes ballastées, et sont couramment utilisé en installation de stockage de déchet.



Figure II.5 : à gauche la forme du géo-tuyaux, à droite la mise en œuvre de géo-tuyaux [9].

II.4.2. Géo-grille :

C'est une structure plane, à base de polymère, constituée par un ouvert d'éléments résistants à la traction, reliés entre eux selon un motif régulier, dont les ouvertures sont des dimensions supérieures à celle des constituants. Elles sont utilisées en contact avec le sol pour renforcer les fondations, emblais...etc. Elles sont disponibles avec différentes résistances à la traction (entre 20 kN/m et 1000 kN/m) et différentes ouvertures de maille. Les caractéristiques de traction et d'allongement des géo-grilles ne varient que faiblement sous des variations importantes de température et sous des contraintes permanentes. Elles sont faciles à manier et à mettre en œuvre, car elles peuvent être déroulées et pliées. Elles peuvent être facilement découpées aux dimensions voulues et n'ont pas de bord coupant entraîné des blessures.

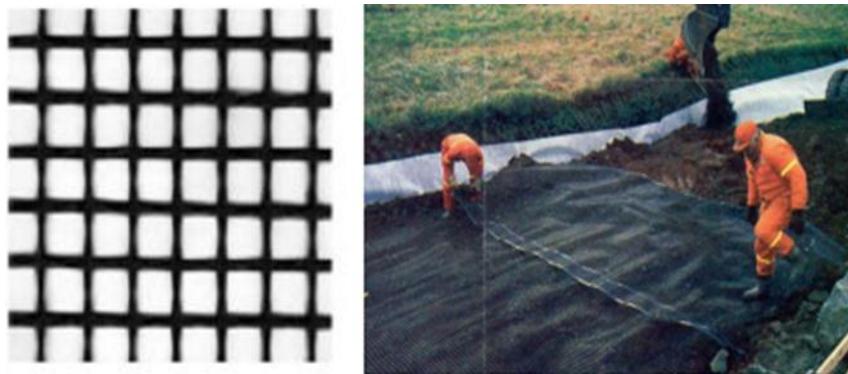


Figure II.6 : à gauche la structure de géo-grille, à droite la mise en place du géo-grille [9].

Il y a deux types de géo-grilles : uni-axiale et bi-axiale

II.4.2.1. Géo-grille uni-axiale :

La résistance à la traction est plus importante dans un sens (longitudinal ou transversal) que dans l'autre sens.

II.4.2.2. Géo-grille bi-axiale :

La résistance à la traction est sensiblement équivalente dans le sens longitudinal et transversal.

II.4.3. Géo-filet :

C'est un géo-synthétique constitué d'ensemble de tiges parallèles et superposés entièrement reliés à d'autres ensembles similaires selon des angles variables. Dans le cas d'un géo-filet le liage est constitué par des nœuds, les filets sont toujours souples, alors que les grilles sont généralement rigides.



Figure II.7 : à gauche un modèle de géo-filet, à droite un géo-filet dans un merlon [9].

II.4.4. Géo-composite :

Un géo-composite est un assemblage manufacturé de matériaux dont au moins l'un des composants est un produit géo-synthétique, par exemple une géo-grille complexée avec un géotextile non-tissé. Il peut être utilisé, soit en géotechnique (fonction de séparation et renforcement), soit pour les couches de roulement. Les géo-composites empêchent dans le même temps l'apparition de fissures et l'élargissement de celles existantes. Ceci grâce à leur capacité d'absorption des forces de cisaillement. Les géo-composites permettent également de renforcer les enrobés, non seulement en travaux neufs, mais aussi en entretien et réparation, La limitation de l'apparition et de l'élargissement des fissures augmente de ce fait la durée de vie des chaussées.



Figure II.8 : la structure d'un géo-composite [9].

II.4.5. Géo-synthétiques bentonitiques :

Sont des géo-composites préfabriqués avec une couche de bentonite incorporée de façon typique entre un géotextile supérieur et un géotextile inférieur ou collée à une géo-membrane ou une couche unique de géotextile. Les géo-synthétiques bentonitiques (GSB) à base de géotextiles sont souvent cousus ou aiguilletés à travers le cœur de bentonite pour augmenter la résistance au cisaillement interne.

Lorsqu'ils sont hydratés, ils sont efficaces comme barrière aux liquides et gaz et sont communément utilisés dans les étanchéités de décharges, souvent en association avec une géo-membrane.



Figure II.9 : Géosynthétique bentonitique [9].

II.4.6. Géosynthétique alvéolaire :

Sont relativement épais, étant constitués de réseaux tridimensionnels réalisés à partir de feuilles de polymères découpées en bandes. Les bandes sont jointes entre elles pour former des cellules interconnectées qui sont remplies de sol et parfois de béton. Dans certains cas des bandes de grilles polyoléfiniques larges de 0,5 m à 1 m ont été attachées ensemble avec des barres en polymères verticales et utilisées pour former des couches épaisses des géosynthétiques alvéolaires appelées géo-matelas.



Figure II.10 : à gauche la forme d'un géosynthétique alvéolaire, à droite placement d'une nappe [9].

II.4.6.1. Tissé de bandelette :

C'est une sorte de tissu résultant de l'entrecroisement de bandelette. Ces produits sont surtout employés comme renforcement et protection contre l'érosion.

II.4.6.2. Mattes :

Elles sont constituées de fils relativement rigides, liées thermiquement à leurs intersections, créant des structures (tridimensionnelles) très ouvertes.

II.4.6.3. Géo-conteneurs :

Ils sont des géosynthétiques à structure tridimensionnelle alvéolaire. Ils sont principalement utilisés jusqu'à présent pour la protection de talus contre l'érosion ou pour la construction de remblais de forte pente ou allégés. De nouvelles applications se présentent pour ces procédés tels que le renforcement de chaussées, la protection de cuves de gaz ou bien la réalisation de mur en sol renforcé.

II.4.7. Géo-membranes :

Ce sont des feuilles étanches, souples, minces et continues, fabriquées à partir de produits synthétiques ou bitumineux, La principale application des géo-membranes est donc de constituer une barrière étanche soit entre un sol et un fluide, soit entre un sol et un gaz, et sont utilisés pour l’installation de stockage de déchets.



Figure II.11 : Géo-membrane à gauche leur forme, et à droite leur mise en place [9].

II.5. Propriétés des géo-synthétiques :

Les géo-synthétiques sont définis par des caractéristiques physiques, mécaniques et hydrauliques selon des essais normalisés, identifiés pour l’essentiel par des normes internationales de type ISO ou européennes de type EN.

Le tableau suivant présente quelques caractéristiques de trois types des géo-synthétiques :[9].

Tableau II.1 : Caractéristiques de quelques géo-synthétiques [9]

Caractéristiques	unité	Géomembrane		Géotextile		Géogridde	
		min	max	min	max	min	max
Épaisseur	mm	1,5	1,59	0,7	1,6	0,6	0,9
Masse surfacique	g/m ²	1380	1463	150	380	125	380
Masse volumique	g/m ³	0,939	0,953	-	-	-	-
Taux de noire de carbone	%	2	3	-	> 2	2	4
Résistance à la traction	kN/m	-	-	8,1	30,1	12	19
Déformation à l’effort parallèle	%	16,7	18,5	50	55	24	28
Résistance au seuil d’écoulement	kN/m	13	15	0,67	1,5	-	-
Déformation au seuil d’écoulement	kN/m	10	11,8	0,4	1,4	-	-
Perméabilité normal au plan	mm/s	impermeable			80	105	250
Ouverture de filtration	µm	-	-	70	90	400	540

II.6. Rôles et les fonctions des géo-synthétiques :

II.6.1. Rôles mécaniques :

II.6.1.1. Séparation :

Prévention du mélange de deux sols ou de matériaux de remblais adjacents de natures différentes.



FigureII.12: géotextile de séparation [10].

II.6.1.2. Renforcement :

Utilisation du comportement en traction déformation d'un géotextile ou d'un produit apparenté, afin d'améliorer les propriétés mécaniques du sol ou d'autres matériaux de construction.



FigureII.13 : géotextile de renforcement [10].

II.6.1.3. Protection :

Prévention ou limitation des endommagements localisés d'un élément ou d'un matériau donné, en utilisant un géotextile ou un produit apparenté.

II.6.1.4. Anti-érosion :

Utilisation d'un géotextile ou d'un produit apparenté aux géotextiles, afin d'éviter ou de limiter les mouvements du sol ou d'autres particules à la surface.



FigureII.14 : utilisation contre érosion [10].

II.6.2. Rôles hydrauliques :

Les fonctions hydrauliques considérées sont les suivantes :

II.6.2.1. Filtration :

Rétention du sol, ou d'autres particules soumises à des forces hydrodynamiques, tout en permettant le passage de fluides à travers ou dans un géotextile, ou un produit apparenté aux géotextiles. Le géotextile permet de créer un auto filtre dans le sol en amont.



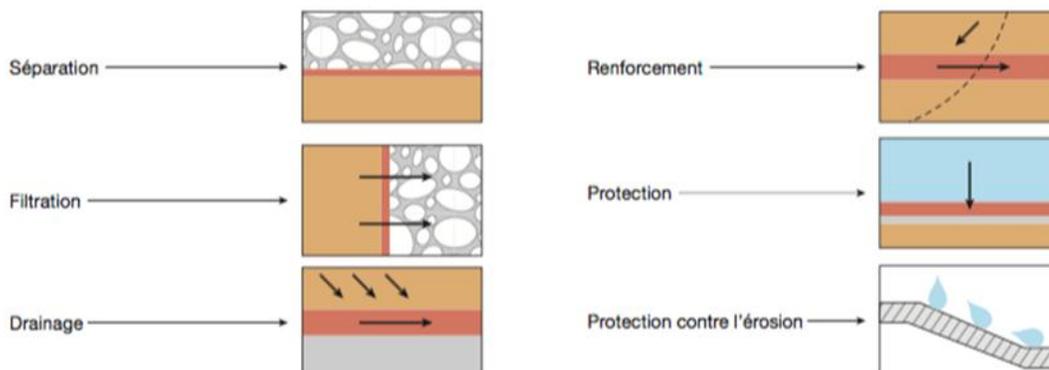
FigureII.15: utilisation pour filtration [10].

II.6.2.2. Drainage :

Collecte et transport des eaux, souterraines et/ou d'autres fluides dans le plan d'un géotextile ou d'un produit apparenté aux géotextiles [10].



FigureII.16 : utilisation pour drainage [10].



FigureII.17 : principales fonctions des géo-synthétique [10].

II.7. Domaines d'application :

II.7.1. Les remblais routiers et ferroviaires :

Les routes et autoroutes sont de la plus haute importance pour le développement d'un pays. Le trafic répété de véhicules lourdement chargés, les conditions climatiques et les propriétés mécaniques des matériaux employés dans ces constructions peuvent entraîner une durabilité bien moindre des chaussées routières que ce qui était attendu. La présence du géo-synthétique dans ce domaine peut apporter les bénéfices suivants :

- Réduction de l'épaisseur du remblai.
- Réduction de la déformation latérale du remblai.
- Amélioration de la distribution des contraintes.
- Amélioration de la propagation des efforts verticaux.
- Réduction de la déformation verticale due à l'effet de membrane.
- Augmentation de la durée de vie de la route.
- Réduction des besoins d'entretien.
- Réduction des coûts de construction et d'entretien de la route.



Figure II.18 : Un géo-synthétique dans une construction routière [9].

II.7.2. Stabilisation des talus :

Les géo-synthétiques de renforcement sont utilisés en couches horizontales pour stabiliser les pentes dans le cas de risques potentiels de rupture profonde. Le massif renforcé peut faire partie du rétablissement d'une pente et/ou renforcer les talus d'un remblai en terre.

Les couches de renforcement permettent de construire des pentes avec une inclinaison plus raide que les pentes non renforcées. Il peut être nécessaire de stabiliser la surface de la pente (particulièrement lors de la mise en place et du compactage du remblai) en utilisant des renforts secondaires relativement courts et moins espacés et/ou en retournant les couches de renfort au parement. Cela peut exiger l'emploi de matériaux géo-synthétiques retenant une fine couche de sol comme des géo-cellules ou des géo-mats relativement légers couramment utilisés pour ancrer temporairement la végétation. La figure ci-dessous montre un exemple de réparation d'une pente par une structure de sol renforcée par un géo-synthétique.



Figure II.19 : un renforcement d'une pente par un géo-synthétique [9].

II.7.3. Les remblais :

La construction des remblais sur sols compressibles constitue un enjeu majeur.

Dans ce contexte, l'utilisation de nappes géo-synthétiques pour améliorer la stabilité de ces remblais est une des techniques de renforcement de sol parmi les plus efficaces et largement éprouvée. Pour ces problèmes, les géo-synthétiques peuvent être efficacement utilisés pour :

- Réduire les déplacements des sols compressibles causés par leurs faibles portances (figure ci-dessous)

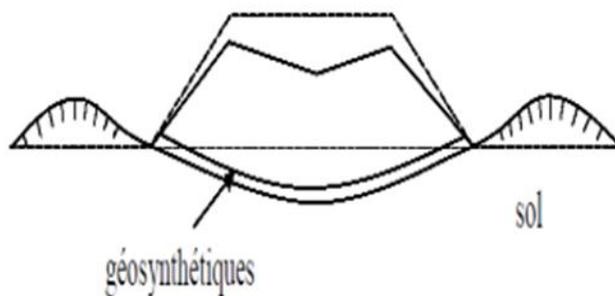


Figure II.20 : un géo-synthétique sous-sol compressible [9].

- Prévenir une rupture d'ensemble du remblai et du sol de fondation.

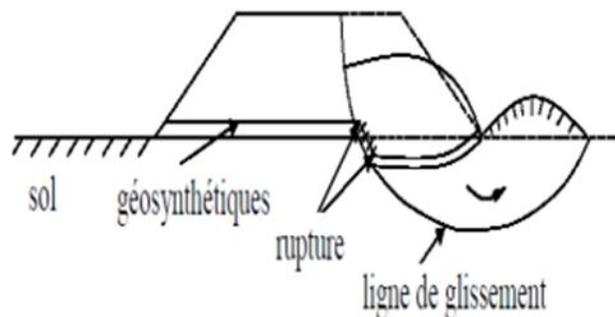


Figure II.21 : une nappe géo-synthétique pour une construction d'un remblai [9].

- Prévenir une rupture par glissement le long de la nappe géo-synthétique.



Figure II.22 : une nappe géo-synthétique dans une construction une pente [9].

II.7.4. Les murs de soutènement :

Des nappes horizontales de géo-synthétiques peuvent être associées à un massif de remblai à parement vertical ou sub-vertical pour constituer un massif en sol renforcé équivalent à un mur poids susceptible de résister à la poussée des terres à l'arrière de l'ouvrage. Les différents types des géo-synthétiques habituellement utilisés sont des nappes de géo-grilles ou de géotextiles tissés ou des bandes polymères. La stabilité locale du talus renforcé en parement est assurée par liaison des nappes ou bandes de renforcement aux éléments de parement. Ces parements ont des formes et des constituants très variés (polymère, béton, bois, etc.)

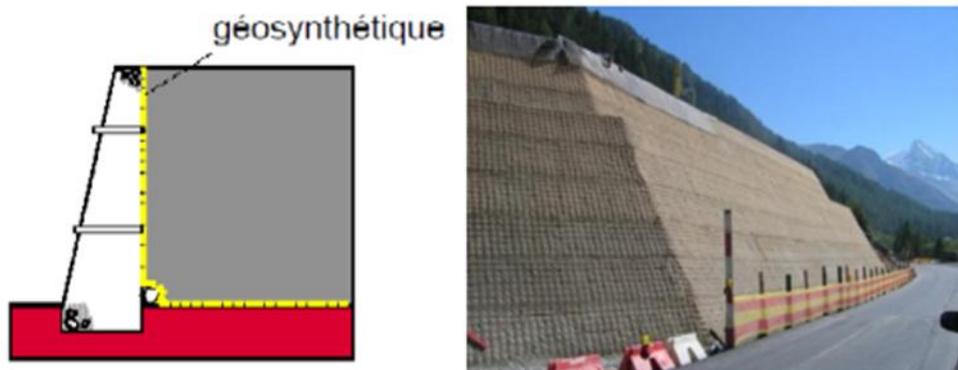


Figure II.23 : un mur de soutènement renforcé par géo-synthétique [9].

II.7.5. Le contrôle de l'érosion :

L'érosion est un processus naturel causé par l'action de l'eau et du vent. Ce processus est influencé par nombreux facteurs tels que la nature du sol, de la végétation et la topographie et il peut être accéléré par l'activité humaine. L'absence de contrôle du processus d'érosion peut causer des dommages importants à l'environnement et aux infrastructures.

Selon le projet et les caractéristiques du site, un ouvrage de maîtrise de l'érosion peut impliquer l'utilisation d'un ou plusieurs produits géo-synthétiques tels que géotextiles, géo-matelas, géo-grille, géo-cellules, géo-tubes.

Quelques exemples d'application de géo-synthétiques dans des travaux de lutte contre l'érosion sont présentés dans les figures suivantes :



Figure II.24 : à gauche contrôle d'érosion sur pente, à droite travaux achevés [9].

II.7.6. En agriculture :

Le domaine agricole est, parmi les marchés des géo-synthétiques, celui connaissant la croissance la plus rapide au niveau international. Les premiers usages concernaient les applications à la ferme et un certain nombre des premières spécifications s'adressaient directement à l'étanchéité de bassins à vocation agricole.

Ces usages pionniers comprenaient l'étanchéité de rigoles contribuant à économiser des ressources en eau précieuses ainsi que l'étanchéité de bassins de fermes et le stockage d'eaux issues de captages dans les régions arides du globe. De nos jours, il existe une large variété d'applications allant de l'étanchéité de rigoles et de bassins couverts ou non à la protection des eaux souterraines et de surface contre leur pollution par les déchets animaux.



Figure II.25 : à gauche végétation à l'aide de géo-grille, à droite un bassin couvé par géo-membrane [9].

II.7.7. Traitement des eaux usées :

Les géo-synthétiques sont utilisés dans de nombreuses applications dans les installations de traitement d'eaux usées. L'utilisation la plus fréquente se situe dans les bassins de traitement aérobies et anaérobies. L'amélioration de l'évaporation des eaux usées ainsi que de la dessiccation des boues peut être réalisées à l'aide de géo-tubes perméables en géotextile. Les utilisations des géo-synthétiques dans ces bassins sont essentiellement associées à la barrière d'étanchéité en fond et à la couverture flottante mais il y a de nombreuses variantes qui peuvent être sélectionnées en fonction des circonstances : barrières d'étanchéité de fond, couvertures, amélioration de l'évaporation, et dessiccation des boues.



Figure II.26 : les géo-synthétiques dans les bassins de traitement [9].

II.7.8. Autres applications :

Les géo-synthétiques peuvent aussi être utilisés pour :

- L'étanchéité des ouvrages hydrauliques.
- L'installation de stockage de déchets et couverture.
- Renforcement des dispositifs d'étanchéité sur pente.
- Drainage des tunnels et des ouvrages souterrains.
- Les ouvrages de protection [9].

Nous avons fourni dans ce chapitre un aperçu global sur les différents types de géo-synthétiques ainsi que leurs domaines d'utilisation, nous allons maintenant faire un zoom sur l'utilisation des géo-synthétiques dans les chaussées rigides.

Chapitre III :

Application des géo-synthétiques dans les chaussées rigides

III.1 : Introduction :

Les chaussées sont influencées par plusieurs facteurs, ce qui diminue leur durée de vie et de service. Pour cela, on utilise les produits géo-synthétiques pour le renforcement et/ou la réparation, et ces produits vont influencer sur le comportement des chaussées.

III.2 : Récentes applications des géo-synthétiques :

Les géo-synthétiques sont de plus en plus utilisés dans l'ingénierie géotechnique et environnementale pour les quatre dernières décennies. Au fil des ans, ces produits ont aidé les concepteurs et les entrepreneurs à résoudre plusieurs types de problèmes d'ingénierie où l'utilisation de matériaux de construction conventionnels serait restreint ou considérablement plus cher. Il existe un nombre important de types géo-synthétiques et applications géo-synthétiques en génie géotechnique et environnemental. En raison des contraintes d'espace, cet article examinera les progrès de l'utilisation de ces matériaux en renforcement et en protection environnementale.

Les types courants de géo-synthétiques utilisés pour le renforcement des sols comprennent les géotextiles (en particulier géotextiles tissés), géo-grilles et géo-cellules. Les géotextiles sont continus, feuilles de fibres ou de fils tissés, non tissés, tricotés ou cousus. Les feuilles sont flexibles et perméables et ont généralement l'apparence d'un tissu. Les géo-grilles ont un tableau uniformément réparti d'ouvertures entre leurs éléments longitudinaux et transversaux. Ces ouvertures permettent un contact direct entre les particules de sol de chaque côté de la feuille. Les géo-cellules sont relativement épaisses, en trois dimensions, réseaux construits à partir de bandes de feuille polymère. Les bandes sont réunies pour former des cellules interconnectées remplies de terre et parfois de béton. Dans certains cas, 0,5 m à 1 m de larges bandes de géo-grilles en polyoléfine ont été reliées avec des tiges polymères verticales utilisées pour former des couches géo-cellulaires profondes appelées géo-maitresses. Une grande variété de produits géo-synthétiques peut être utilisée dans des projets de protection de l'environnement, y compris les géo-membranes, les revêtements d'argile géo-synthétique (GCL), les géo-nets, les géo-composites et les géo-pipes.

Les géo-membranes sont des feuilles flexibles continues fabriquées à partir d'un ou plusieurs matériaux synthétiques.

Ils sont relativement imperméables et sont utilisés comme doublures pour le confinement de fluide ou de gaz et comme vapes barrières. Les revêtements d'argile géo-synthétique (GCL) sont des géo-composites qui sont préfabriqués avec une couche de bentonite d'argile généralement incorporée entre une couche géotextile supérieure et inférieure ou liée à un géo-membrane ou couche unique de géotextile. Lorsqu'ils sont hydratés, ils sont efficaces comme barrière pour les liquides ou gaz et sont couramment utilisés dans les applications de revêtement de décharge souvent en conjonction avec une géo-membrane.

Les géo-nets sont des matériaux en forme de grille ouverte formés de deux ensembles de brins polymères extrudés parallèles grossiers se coupant à un angle aigu constant. Le réseau forme une feuille avec une porosité dans le plan utilisée pour transporter des flux de fluide ou de gaz relativement importants. Les géo-composites sont des géo-synthétiques fabriqués à partir d'une combinaison de deux types géo-synthétiques ou plus. Les exemples incluent: géotextile-géo-net, géotextile, géo-grille, géo-net, géo-membrane, ou un revêtement d'argile géo-synthétique (GCL). Les géo-pipes sont en polymère perforé ou à paroi pleine tuyaux utilisés pour le drainage de liquides ou de gaz.

Dans certains cas, le tuyau perforé est enveloppé d'un filtre géotextile.

Parce que les géo-synthétiques sont des matériaux manufacturés, les développements technologiques du polymère et les industries des plastiques techniques ont été continuellement incorporées dans les produits géo-synthétiques, améliorer les propriétés techniques pertinentes de ces matériaux. Les résultats de la recherche ont également conduit au développement de méthodes de conception et de construction nouvelles et plus puissantes utilisant des géo-synthétiques. La combinaison de matériaux améliorés et de méthodes de conception a permis aux ingénieurs de faire face défis et de construire des structures dans des conditions qui seraient impensables dans le passé. Ce papier décrit les progrès récents sur les géo-synthétiques et sur les applications de ces matériaux dans le sol [11].

III.3 : Les géo-synthétiques dans les chaussées rigides :

Concernant les chaussées en béton de ciment, Barksdale (1991) a résumé plusieurs rapports et papiers et conclu:

Les tissus de pavage et les membranes résistantes peuvent également être utilisés pour retarder fissuration par réflexion dans les chaussées en PCC se superposent d'environ deux à quatre ans dans les conditions assez restrictives suivantes:

- Les mouvements verticaux des joints de poutre Benkelman induits par la charge doivent être entre 0,002 pouces et 0,008 pouces (la Californie a constaté qu'un le tissu pleine largeur retarde la fissuration lorsque ces mouvements de joint sont entre 0,003 et 0,008 pouces. Pour des mouvements articulaires plus importants, un tissu n'a pas aidé; et pour les mouvements moindres, un tissu n'était pas nécessaire.)
- Les mouvements articulaires horizontaux induits thermiquement doivent être inférieurs à 0,05 pouces. Bien que des résultats expérimentaux contradictoires existent, un nombre limité de les preuves suggèrent que les membranes résistantes placées sur les joints peuvent fonctionnent mieux que les toiles de pavage pleine largeur. Articulation induite thermiquement les mouvements augmentent avec la longueur du panneau PCC. Mouvements articulaires peut être réduit par fissuration et assise ou par sciage supplémentaire joints transversaux. Utiliser ensemble des tissus de pavage ou des membranes résistantes avec un espacement réduit des joints de chaussée ne semble cependant pas offrir tout avantage par rapport à la fissuration et à l'assise ou aux joints coupés à la scie.

Les tissus sont utilisés pour réduire les infiltrations d'eau en raison des fissures créées par les techniques de fissuration et d'assise. (Les gravats, bien sûr, pourraient être utilisés à la place des fissures et des sièges.)

Les mouvements à l'épaulement longitudinal de la chaussée et l'élargissement les joints sont généralement inférieurs aux joints transversaux des chaussées en PCC.

Les tissus de pavage et les membranes résistantes ont été utilisés efficacement pour retarder fissures de réflexion lorsque la fissuration longitudinale du joint d'épaulement de la chaussée est problème. Joint longitudinal le mouvement doit être dans les limites indiquées ci-dessus pour les joints transversaux.

Le guide de conception AASHTO (1993) indique que l'efficacité géotextiles dans le contrôle de la fissuration réfléchissante dans les superpositions HMA sur du béton ordinaire joint et les chaussées en béton armé jointes sont discutables. Depuis le mouvement aux fissures dans une chaussée en béton

armé en continu (CRCP) est généralement de petites fissures réfléchissantes à travers une superposition HMA ne sont généralement pas de graves problèmes. Si un géo-synthétique doit être utilisé sur un CRCP, il est conseillé de placer un cours de mise à niveau HMA avant de placer le géo-synthétique et la superposition finale. La théorie (Pickett et Lytton, 1983) et la pratique (Brewer, 1997) ont montré des avantages significatifs en plaçant un parcours de niveau supérieur avant de placer le géo-synthétique [12].

III.4 : Influence des géo-synthétiques sur les chaussées rigides :

Les chaussées en béton de ciment Portland sont continuellement exposées à différentes charges par essieu. Celles-ci les charges produisent des contraintes et des déformations en fonction le montant et le lieu de chargement. Heures supplémentaires, des fissures sévères se produisent progressivement dans le béton trottoirs. En conséquence, le potentiel de durabilité et les problèmes de service seront plus probables.

Renforcement des chaussées en béton par des barres d'acier ou les fils de treillis sont devenus une préoccupation source pour les concepteurs et les opérateurs de transport en raison de problèmes de corrosion.

Pour protéger les fils de treillis d'acier de la corrosion attaque, la plupart des directives de conception ont recommandé de fournir une épaisseur adéquate d'une couverture de béton, à son tour, conduisant à augmenter les coûts de construction.

En plus des charges de véhicules, l'environnement les charges, les changements de température et d'humidité, provoquent fissuration des chaussées en béton grâce à leur service la vie. Au fil du temps, la chaussée en béton a tendance à se contracter ou s'étendre en fonction de la pente d'une température et humidité.

Un poids de béton et des forces de frottement entre la chaussée et la sous-base restreignent le mouvement des chaussées et augmenter le potentiel du béton fissuration. Ainsi, fournir une retenue appropriée des matériaux tels que les géo-grilles peuvent réduire la possibilité de formation de fissures et favoriser la flexion comportement des chaussées en béton.

Aussi connu que, le béton se comporte comme un Matériel. Il peut être fissuré aux faibles proportions des déformations et des contraintes de traction. Ainsi, toutes les études de recherche et travaux expérimentaux précédents visaient pour favoriser la résistance à la traction du béton.

Les produits géo-synthétiques tels que les géo-grilles considérés comme un matériau de renforcement économique pour les sols faibles peuvent être utilisés comme matériaux retenus de formation de déformations du béton. Plusieurs études ont a étudié l'impact de ces produits sur comportement des sous-couches et des sous-couches structures de chaussée flexibles. Ces études ont prouvé que le trafic capacité de charge appliquée et déformation permanente résistance des chaussées flexibles renforcées par géo-grilles peut être extrêmement amélioré.

Le comportement des éléments en béton de ciment Portland tels que les prismes et les cylindres renforcés avec des géo-grilles ont été étudiées.

Les conclusions de ces des études de recherche ont conclu que la résistance à la traction et la ductilité des éléments en béton testés peut augmenter ainsi que la propagation des fissures dans le béton peut être réduit lors de l'utilisation de matériaux de géo-grille comme couche de renforcement[13].

Partie B :
Modélisation numérique

Chapitre IV :
Méthode des éléments finis et choix du logiciel.

IV.1 : Méthode des éléments finis :

IV.1.1 Introduction :

L'analyse aux éléments finis (MEF) est une méthode de calcul utilisée dans les domaines scientifique et technique. Avec les éléments finis, il est possible de calculer des problèmes complexes qui ne peuvent pas être résolus par d'autres méthodes. En effet, la méthode des éléments finis étant une analyse numérique consistant à résoudre des équations différentielles, il est possible de l'utiliser dans divers domaines physiques. Le composant à analyser est subdivisé en un grand nombre de petits éléments finis avec une géométrie simple, qui peuvent être calculés avec les équations initiales connues. Cette subdivision a donné le nom de la méthode numérique: méthode des éléments finis. En ingénierie, la méthode des éléments finis est aujourd'hui une méthode standard dans le calcul assisté par ordinateur des charpentes et structures planes.

IV.1.2 Principes de la méthode des éléments finis :

La MEF est basée sur une idée simple : subdiviser (discrétiser) une forme complexe en un grand nombre de sous domaines élémentaires de forme géométrique simple (éléments finis) interconnectés en des points appelés nœuds. Nous considérons le comportement mécanique de chaque élément séparément, puis nous assemblons ces éléments de telle façon que l'équilibre des forces et la compatibilité des déplacements soient satisfaits en chaque nœud.

La MEF utilise des approximations simples des variables inconnues dans chaque élément pour transformer les équations aux dérivées partielles en équations algébriques.

Les nœuds et les éléments n'ont pas forcément de signification physique particulière, mais sont basés sur des considérations de précision de l'approximation. Elle permet donc de résoudre de manière discrète une EDP dont on cherche une solution approchée « suffisamment » fiable. De manière générale, cette EDP porte sur une fonction u , définie sur un domaine. Elle comporte des conditions aux bords permettant d'assurer existence et unicité d'une solution.

Sauf cas particuliers, la discrétisation passe par une redéfinition et une approximation de la géométrie, on considère donc le problème posé sur la géométrie approchée par un domaine polygonal ou polyédrique par morceaux. Une fois la géométrie approchée, il faut choisir un espace d'approximation de la solution du problème, dans la MEF, cet espace est défini à l'aide du maillage du domaine (ce qui explique aussi pourquoi il est nécessaire d'approcher la géométrie). Le maillage du domaine permet d'en définir un pavage dont les pavés sont les éléments finis. Un élément fini est la donnée d'une cellule élémentaire et de fonctions de base de l'espace d'approximation dont le support est l'élément, et définies de manière à être interpolantes.

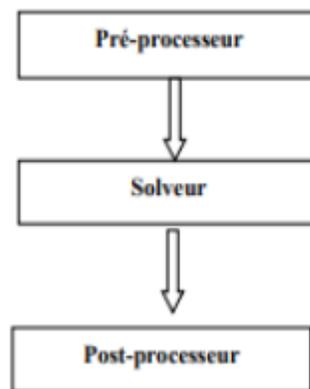
Bien qu'il existe de nombreux logiciels exploitant cette méthode et permettant de « résoudre » des problèmes dans divers domaines, il est important que l'utilisateur ait une bonne idée de ce qu'il fait, notamment quant au choix du maillage et du type d'éléments qui doivent être adaptés au problème posé : aucun logiciel ne fait tout pour l'utilisateur, et il faut toujours garder un œil critique vis-à-vis de solutions approchées. Pour cela il existe des indicateurs d'erreur et des estimateurs d'erreur qui permettent d'ajuster les différents paramètres. La solution trouvée, il reste cependant à déterminer les caractéristiques de la méthode ainsi développée, notamment l'unicité de l'éventuelle solution ou encore la stabilité numérique du schéma de résolution. Il est essentiel de trouver une estimation juste de l'erreur liée à la discrétisation et montrer que la méthode ainsi écrite converge, c'est-à-dire que l'erreur tend vers 0 si la finesse du maillage tend elle aussi vers 0. Dans le cas d'une EDP linéaire avec

opérateur symétrique (comme l'est l'opérateur Laplacien), il s'agit finalement de résoudre une équation algébrique linéaire, inversible dans le meilleur des cas.

IV.1.3 Etapes du calcul de la MEF :

IV.1.3.1 Étapes logiques du calcul par éléments finis :

1. Définir les nœuds et les éléments (Créer le maillage)
2. Pour chaque élément, établir la matrice de rigidité élémentaire $[k_e]$ reliant les degrés de libertés (déplacements) nodaux $\{u_e\}$ et les forces $\{f_e\}$ appliquées aux nœuds : $[k_e] \{u_e\} = \{f_e\}$
3. Assembler les matrices et les vecteurs élémentaires en un système global $[K] \{U\} = \{F\}$ de manière à satisfaire les conditions d'équilibre aux nœuds.
4. Modifier le système global en tenant compte des conditions aux limites
5. Résoudre le système $[K] \{U\} = \{F\}$ et obtenir les déplacements $\{U\}$ aux nœuds
6. Calculer les gradients (flux de chaleur, déformations et contraintes) dans les éléments et les réactions aux nœuds sur lesquels les conditions aux limites sont imposées.



- Pré-processeur :

- Choisir le type d'éléments
- Entrer les propriétés géométriques
- Entrer les paramètres physiques
- Créer le modèle géométrique
- Créer le maillage : définir les nœuds et les éléments
- Appliquer les sollicitations
- Imposer les conditions aux limites

- Solveur :

- Choisir le type d'analyse (statique, dynamique,...)
- Construire la matrice et le vecteur élémentaire $[k_e]$, $\{f_e\}$
- Assembler $[k_e]$ et $\{f_e\}$ dans $[K]$ et $\{F\}$
- Prendre en compte les conditions aux limites
- Résoudre le système d'équations $[K] \{U\} = \{F\}$
- Calculer les variations additionnelles (gradients, réactions, $\epsilon \dots$).

- Post-processeur :

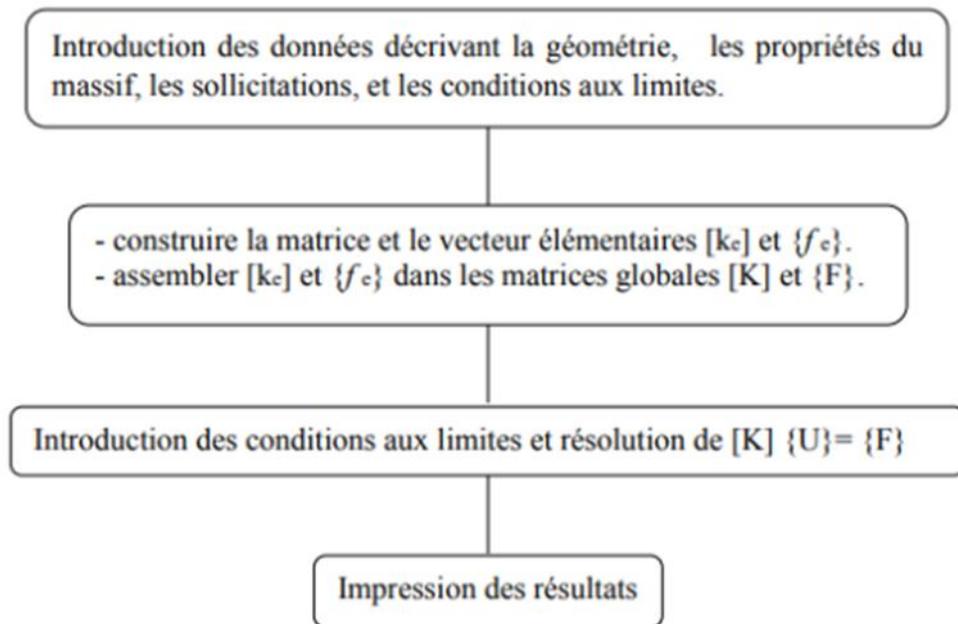
- Présenter les résultats de façon intelligible et synthétique
- Sous forme numérique

- Sous forme graphique
- Effectuer des fonctions complémentaires : combinaisons, interprétations Interpolations, animation.

IV.1.3.2 Etapes d'un programme d'éléments finis :

Le tableau suivant résume les parties de base du programme d'ordinateur pour la résolution complète d'un problème par la méthode des éléments finis.

Tableau IV.1: Organigramme d'étapes caractéristiques d'un programme d'éléments finis



IV.2 : Principaux produits Ansys :

IV.2.1 : ANSYS Structural :

Ce produit permet d'effectuer des simulations mécaniques en calcul de structures. Ses principales capacités sont :

- ❖ L'analyse statique
- ❖ L'analyse modale
- ❖ L'analyse harmonique (réponse forcée)
- ❖ L'analyse temporelle
- ❖ La gestion de différentes situations non-linéaires (contacts, plasticité matériaux, grands déplacements ou grandes déformations).

IV.2.2 : ANSYS Mechanical :

Ce produit dispose des mêmes capacités qu'ANSYS structural, en y ajoutant notamment un solveur thermique, avec modélisation du rayonnement.

IV.2.3: ANSYS CFX et Fluent :

Ces deux logiciels permettent d'effectuer des simulations en matière de mécanique des fluides. Ils portent le nom des compagnies qui les ont développés, rachetés par ANSYS .Inc. respectivement en février 2003 et en février 2006. Fluent est un solveur : il ne comporte pas de mailleur (le maillage doit être réalisé avec un logiciel de maillage, Gambit par exemple, qui est également édité par ANSYS).

Fluent est un solveur très utilisé dans l'industrie et la R&D à travers le monde. Il est souvent considéré comme une référence dans le domaine de la modélisation fluide. Le paramétrage du modèle se fait par une interface graphique. Il dispose d'une interface de scripts pour automatiser les processus de calcul.

L'un des intérêts de ce logiciel de simulation généraliste, est qu'il dispose d'un nombre relativement important de modèles, pouvant faire face à divers aspects de la mécanique des fluides : écoulements diphasiques (miscible, non miscible, cavitation, solidification), turbulence (LES, KE, Kw, SA, Reynolds stress...), combustion (pré-mélangé et non pré-mélangé), transport de particules, écoulements en milieux poreux, maillages mobiles et dynamiques avec reconstruction du maillage, entre autres. Les schémas numériques temporels et spatiaux peuvent être modifiés pour améliorer la convergence. Fluent est parallélisé et permet de tirer parti de systèmes multiprocesseurs aussi bien au sein d'une seule machine qu'en réseau (cluster, dualcore, plateforme multi-CPU).

IV.2.4 : Gambit :

Un logiciel de maillage édité par la société ANSYS depuis 2006 (l'éditeur historique du logiciel était la société Fluent). Ce mailleur permet de créer géométries et maillages avec un grand degré de liberté et une grande précision. Le domaine géométrique peut aussi être importé depuis un fichier CAO. Il assure également le maillage automatique de surfaces et de volumes en parallèle de l'introduction de conditions aux limites. Gambit est souvent considéré comme un mailleur de référence par les modélisateurs utilisant Fluent.

IV.2.5 : ANSYS AUTODYN et ANSYS LS-DYNA :

Ces logiciels possèdent des solveurs utilisant les formulations explicites des équations à résoudre, contrairement aux produits précédemment cités. Leur domaine d'application est réservé aux modélisations mettant en jeu des situations mécaniques aux très larges déformations.

IV.2.6 : ANSYS Electromagnetics et Ansoft :

Ce produit permet de résoudre des modélisations mettant en jeu des phénomènes électromagnétiques.

IV.2.7 : ANSYS Multiphysics :

Ce produit rassemble l'ensemble des capacités d'ANSYS en matière de simulation numérique implicite.

IV.3 : Environnements logiciels

Deux environnements logiciels permettent de mettre en œuvre le code ANSYS :

IV.3.1 : ANSYS Classic :

Première solution logicielle développée par le constructeur. Elle est destinée à la construction de modèles éléments finis à la géométrie simple, facilement constructible à l'aide d'opérations basiques. À partir de cet environnement, l'utilisateur construit directement un modèle éléments finis en utilisant le langage de script APDL (ANSYS Parametric Design Language).

ANSYS classic est donc destiné à des utilisateurs compétents dans le domaine de la simulation numérique.

IV.3.2 : ANSYS Workbench :

Cette plate-forme propose une approche différente dans la construction d'un modèle en ré-utilisant le code ANSYS initial. Elle est particulièrement adaptée au traitement de cas à la géométrie complexe (nombreux corps de pièces) et aux utilisateurs non confirmés dans le domaine du calcul.

Dans cet environnement, l'utilisateur travaille essentiellement sur une géométrie et non plus sur le modèle lui-même. La plate-forme est donc chargée de convertir les requêtes entrées par l'utilisateur en code ANSYS avant de lancer la résolution. Le modèle éléments finis généré reste néanmoins manipulable en insérant des commandes propres au code ANSYS.

IV.4 : Logiciel ANSYS :

IV.4.1 : Analyse structurelle :

Le logiciel d'analyse structurelle d'Ansys vous permet de résoudre des problèmes techniques structurels complexes et de prendre plus rapidement de meilleures décisions en termes de conception. Grâce aux solveurs d'analyse par éléments finis (FiniteElementAnalysis, FEA) disponibles dans la suite logicielle, vous pouvez personnaliser et automatiser les solutions pour vos problèmes de mécanique structurelle ainsi que les paramètres d'analyse de scénarios de conception. Vous pouvez aussi facilement les connecter à d'autres outils d'analyse physique afin de gagner en fidélité. Le logiciel d'analyse structurelle d'Ansys est utilisé dans de nombreuses industries et permet aux ingénieurs d'optimiser la conception de leurs produits et de réduire le coût des tests physiques

a- Capacités avancées :

La simulation des matériaux complexes et du comportement des matériaux peut être réalisée à l'aide des modèles intégrés, des modèles de matériaux définis par l'utilisateur ou du Material Designer (Concepteur de matériaux) dans Mechanical pour créer des éléments de volumes élémentaires représentatifs (RVE). Les modèles soumis à une grande déformation ne doivent pas être simplifiés en passant inutilement à des solveurs explicites. La capacité adaptative non linéaire (NLAD) gère automatiquement les simulations difficiles grâce au remaillage de la solution au cours du processus.

La technologie de fracture SMART « splitting morphing adaptive remeshing technique », technologie de séparation, morphing, adaptation et remaillage) a été ajoutée à Mechanical pour la modélisation de la propagation des fissures dans les structures où la fracture est une préoccupation, de façon à éliminer les processus de maillage complexe et les suppositions.

Ansys :Motion est une solution de conception de nouvelle génération basée sur une dynamique multicorps flexible présente dans l'interface de Mechanical. Elle permet une analyse rapide et précise de corps flexibles et rigides au sein d'un solveur unique.

b- Solution d'analyse structurelle complète :

Une gamme complète d'outils d'analyse est à votre disposition pour analyser les cas de charges uniques ou pour effectuer des analyses transitoires ou de vibration. Vous pouvez également examiner des comportements de matériaux, de joints ou de géométries linéaires et non linéaires. La technologie de solveurs avancée, d'AnsysAutodyn et Ansys LS-DYNA, vous permet d'effectuer des simulations de chute, de choc et d'explosion. Ansys AQWA, avec les capacités de simulation offshore présentes dans Mechanical, fournit des capacités spécifiques à l'industrie pour les ingénieurs évoluant dans la conception d'environnements marins.

c- Applications Analyse structurelle :

- ❖ Analyse de la résistance
- ❖ Vibrations
- ❖ Analyse thermique
- ❖ Durabilité
- ❖ Dynamique des corps rigides
- ❖ Hydrodynamique
- ❖ Matériaux composites
- ❖ Impact
- ❖ Optimisation
- ❖ Hpc pour l'analyse par éléments finis (fea, finiteelementanalysis)
- ❖ Optimization topologique
- ❖ Fabrication additive [14].

IV.5.Conclusion :

Dans le but de modéliser d'un élément structural nous avons choisi la méthode des éléments finis MEF qui est un outil de résolution numérique approchée des problèmes de structures, des problèmes physiques et mécanique régis par des équations différentielles. En général, un logiciel d'analyse se compose de trois modules fondamentaux : préprocesseur, calcul et post-processeur ; qui se résume à l'ANSYS 16.2 version Académique pris en considération lors de notre étude.

Chapitre V :
Analyse numérique et cas d'étude

V.1. Introduction :

Dans cette étude deux model ont été créés, afin d'étudier l'influence de la géo-grille sur le comportement d'une chaussée rigide :

- a. Modélisation de la chaussée sans application de la géo-grille.
- b. Modélisation de la chaussée avec application de la géo-grille.

V.2. Description du cas d'étude :

L'aéroport de Tindouf est un aéroport algérien à vocation nationale, situé à 7 km au nord-ouest de la ville de Tindouf.

C'est un aéroport civil et militaire desservant la wilaya de Tindouf, dans la région désertique du Saoura, à l'extrême ouest du Sahara algérien, à proximité des frontières avec le Maroc, le Sahara occidental et la Mauritanie

L'aéroport dispose de deux pistes en béton bitumineux d'une longueur de 3 000 m chacune, et une aérogare permet l'accueil des passagers.

V.2.1. Caractéristiques géométriques :

- Longueur chaussée: 3000m
- Orientation 09/27
- Largeur chaussée: 45m
- Largeur accotements : (7.5 +7.5) m
- Avion critique : B727
- Partie renforcée par géogrille : (800*45) m

V.2.2. Caractéristiques géotechniques :

Le corps de chaussée : Rigide/béton, composé de :

- Couche de roulement : Béton de ciment (épaisseur 30cm)
- Sous couche de roulement : Grave bitume (épaisseur 20 cm)
- Couche de base : Grave concassée GNT (épaisseur 20cm)
- Couche de fondation : Arène-granitique (épaisseur 20cm)
- Terrain naturel : Sable graveleux
- CBR : 18

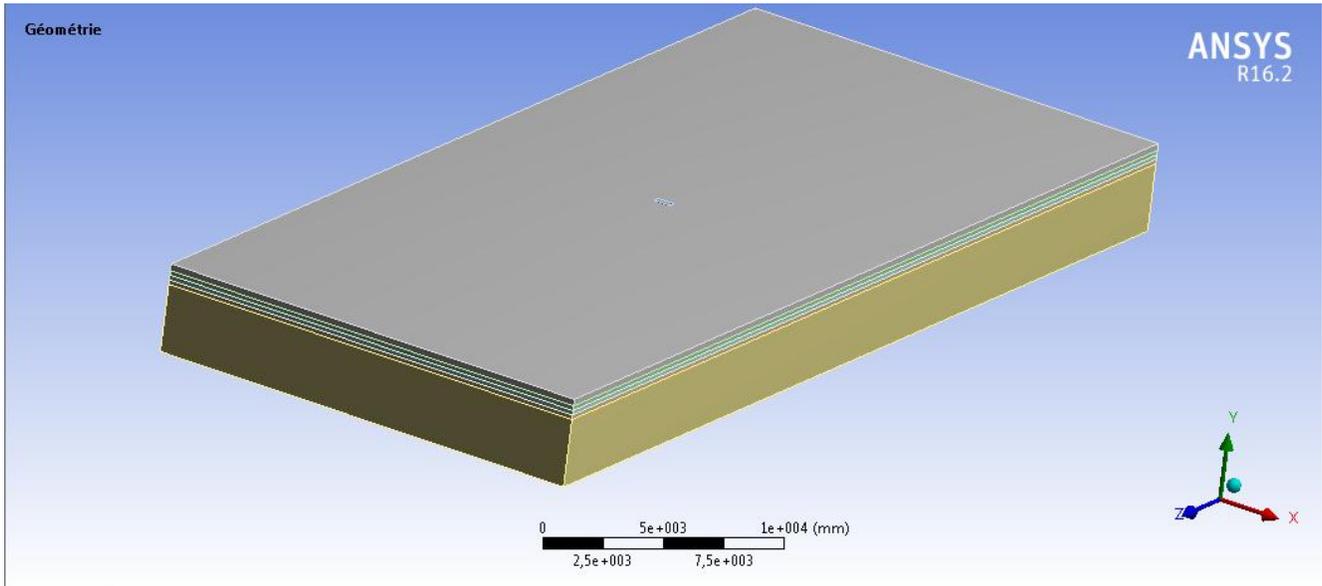


Figure V.1 : La géométrie de la chaussée

V.3. Introduction à ANSYS Workbench :

A fin de faciliter les explications les notations suivantes seront utilisées :

- LMC (Left Mouse Click\Clique gauche de la souris)
- RMC (Right Mouse Click\Clique droit de la souris)

V.3.1. Menu principal du logiciel ANSYS Workbench :

L'ouverture du logiciel fait apparaître le menu principal présenté ci-dessous

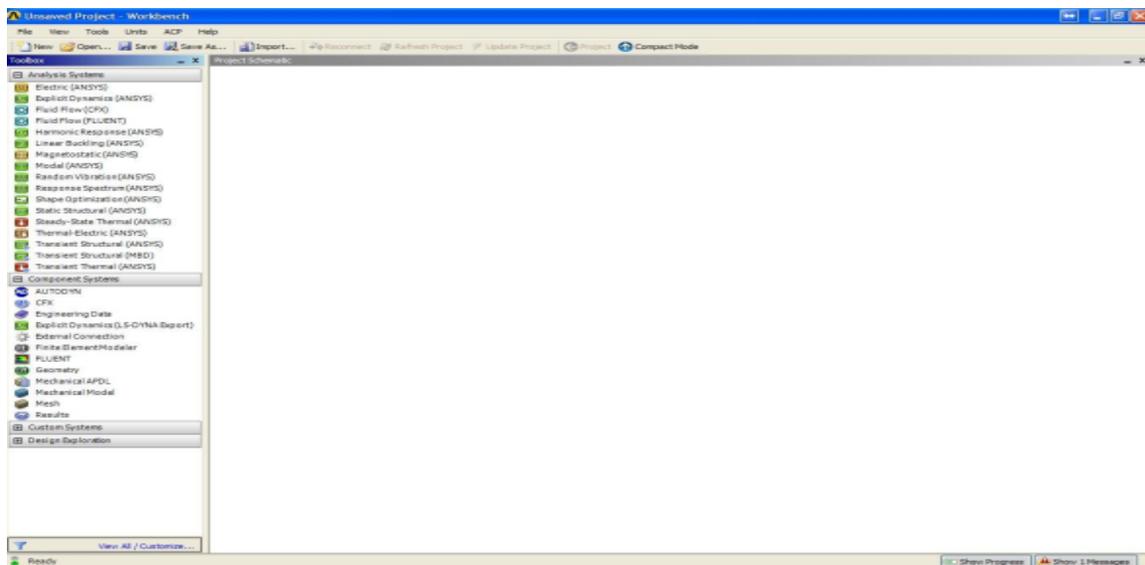


Figure V.2 : fenetre d'ouverture

La barre d'outils Toolbox vous donne accès à plusieurs systèmes d'analyse. Pour débiter une analyse statique, LMC sur Static Structural (ANSYS) et glisser dans Project Schematic.

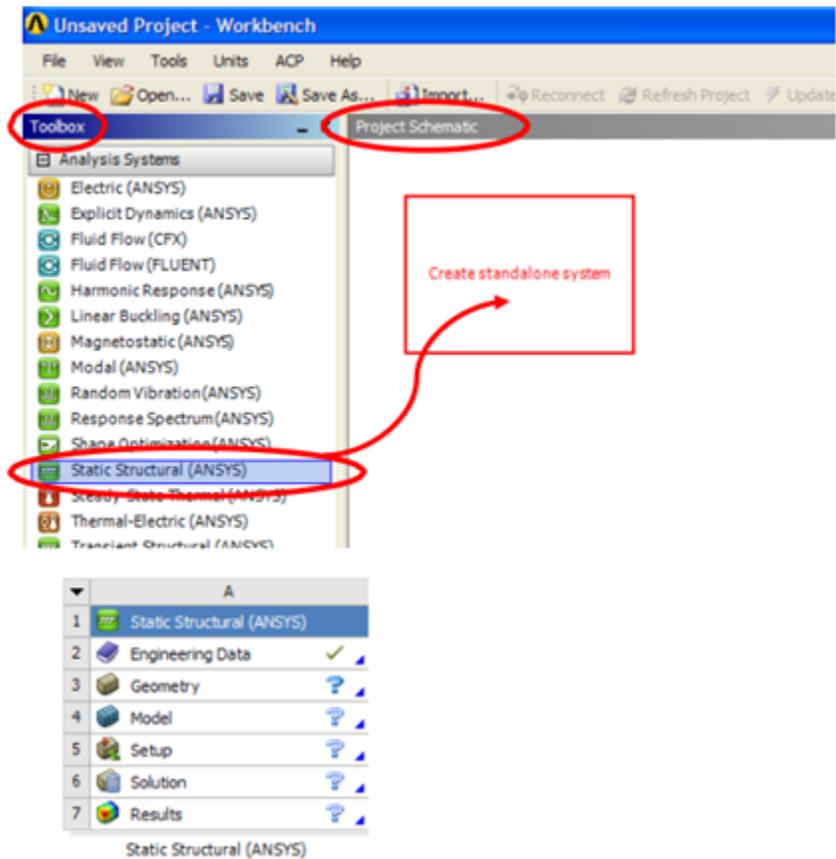


Figure V.3 : Ouverture de nouveau projet d'une structure statique

Le système A est maintenant créé dans Project Schematic.

Le système comporte différentes cellules soit : Engineering Data, Geometry, Model, Setup, Solution, Results. Pour faciliter leurs compréhensions.

- Prétraitement : Engineering Data, Geometry et Model
- Résolution : Setup et solution
- Post-traitement : Résultats

Il est possible d'obtenir une description de chaque cellule dans le fichier d'aide d'ANSYS Workbench.

Engineering Data :

La cellule Engineering Data est utilisée pour définir et accéder à des modèles de matériau pour être utilisé dans une analyse. LMC la cellule Engineering Data ou RMC et choisir Edit dans le menu contextuel qui apparaît pour entrer l'environnement.

Geometry :

Utilisez la cellule Geometrie pour importer, créer, modifier ou mettre à jour un modèle pouvant être utilisé pour une analyse. LMC sur la cellule ou RMC et choisir Edit dans le menu contextuel qui apparait pour entrer l'environnement.

Model/Mesh :

La cellule Model est associée à la définition de la géométrie, des systèmes de coordonnées, des connections et du maillage dans le module de simulation Mechanical.

Setup :

La cellule Setup permet de définir les chargements, conditions frontière et autre configuration de l'analyse

Solution :

La cellule Solution permet d'avoir accès aux données de résolution.

Results :

La cellule Results regroupe les résultats de l'analyse. Celle-ci est souvent référée à une cellule de post-traitement.[15]

V.4. Maillage :

Le maillage est une méthode pour diviser l'élément en question en particules élémentaires ayant les mêmes propriétés et examiner chaque particule séparément, l'assemblage des particules élémentaires nous ramène à l'élément initial. Dans ce modèle on a utilisé pour le maillage (discrétisation de l'élément) [14].

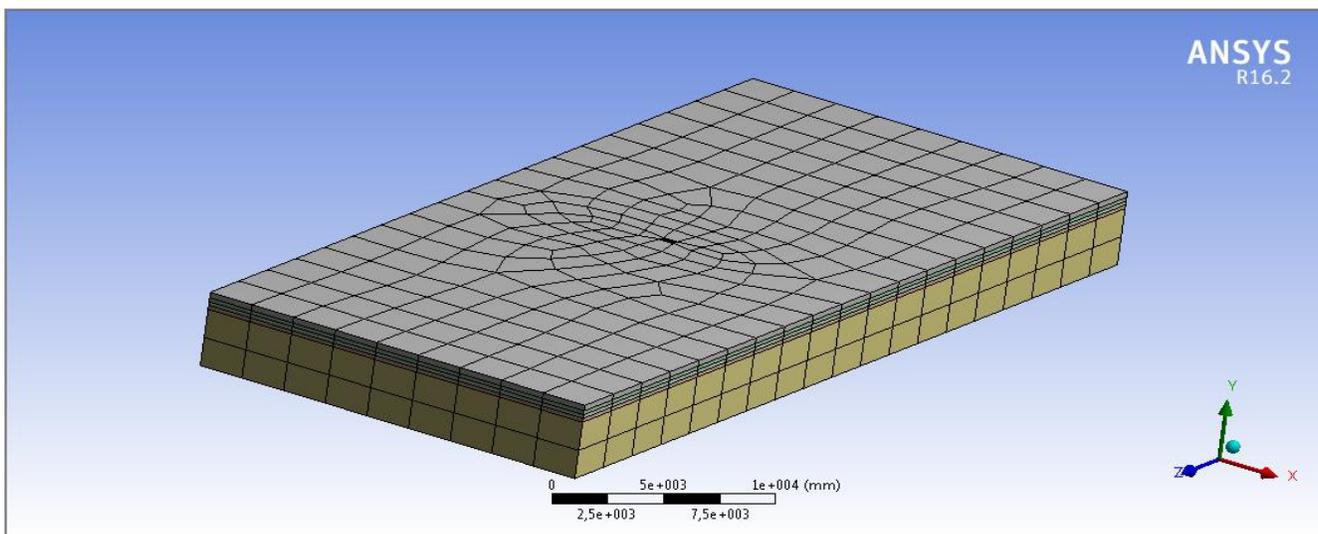


Figure V.4 : maillage de la chaussée par workbench

V.5 : Chargement de la chaussée :

Le poids total de Boing 727 est environ 840 kN, elle se transfère se poids sur 3 couple de roue. chaque couple pèse 280 kN. On dévise ce poids sur la surface de chargement, qu'on a précis dans le logiciel (0.3*0.75) pour donner la pression (P=1.244 MPA).

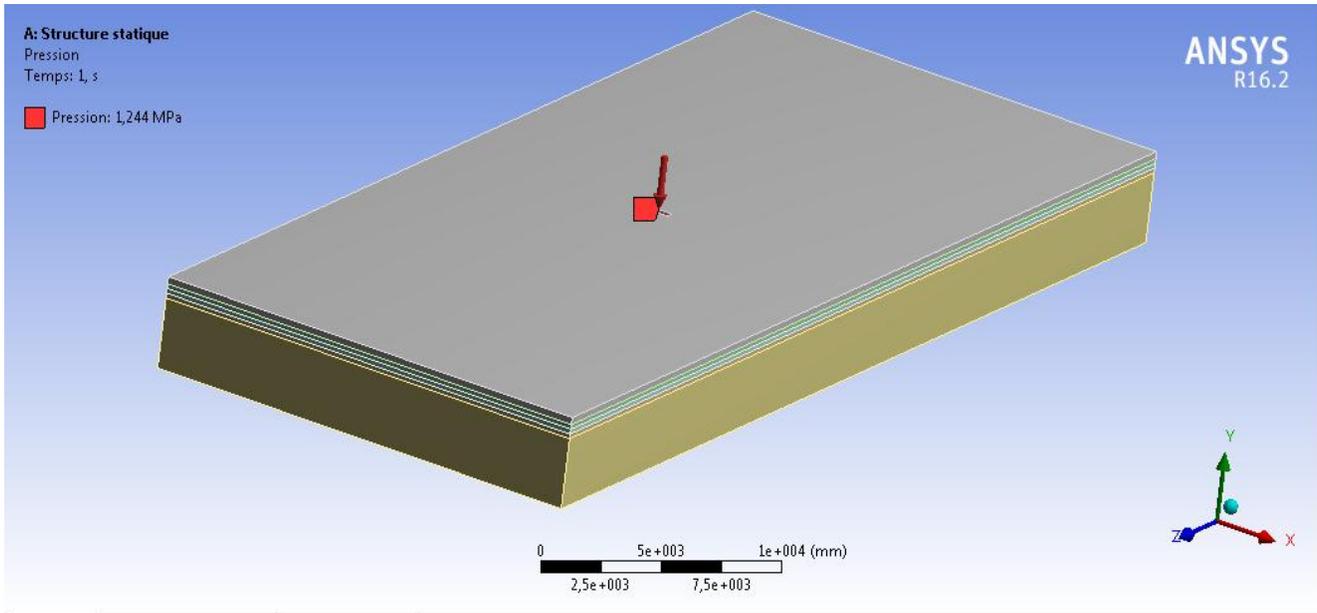


Figure V.5 : La pression d'un couple de roues

V.6. Conditions aux limites :

Dans notre cas, on a choisi un support fixe sous la chaussée comme conditions aux limites.

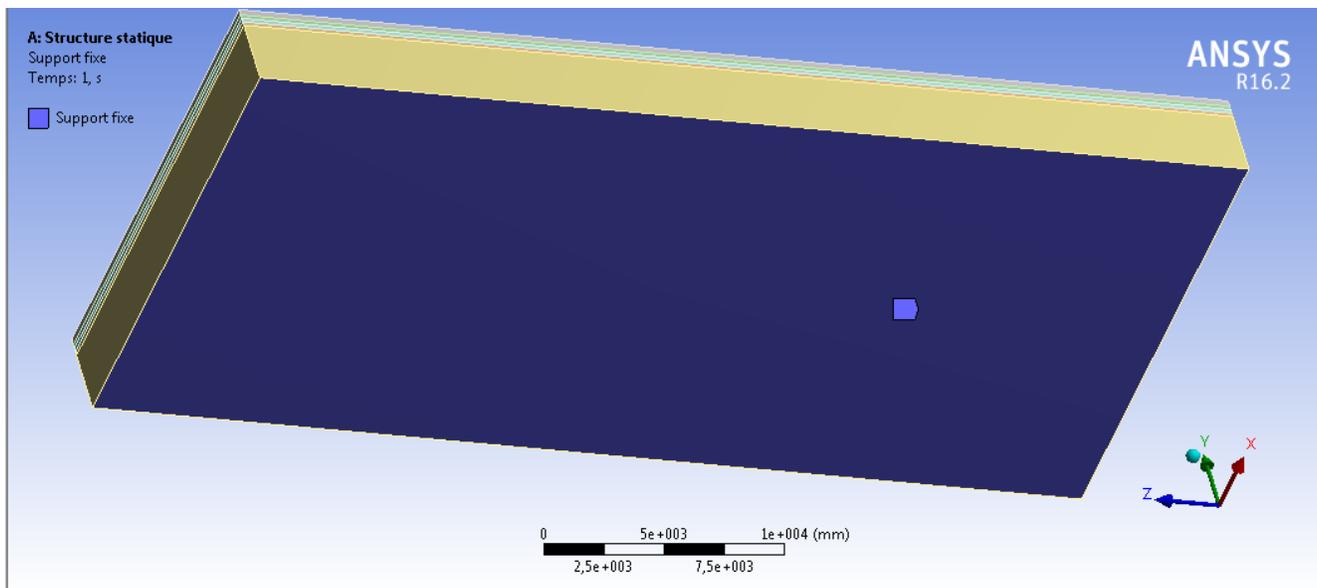


Figure V.6 : conditions aux limites

Chapitre VI :
Résultats et discussion

VI.1 : Introduction :

La simulation numérique de la déformation de la chaussée rigide sous la roue de l'aéronefs, nous donne plusieurs informations tel que : les déplacements, les contraintes et les déformations... de façon rapide et facile.

VI.2 : Propriétés des matériaux :

Tableau VI.1 : propriétés des matériaux de la chaussée

Couches	Matériaux	Epaisseur (cm)	Module de Young E (MPa)	Coefficient de poisson ν	Masse volumique (kg/m^3)
Couche de roulement	Béton de ciment	8	30000	0.25	2500
Sous couche de roulement	Grave ciment	10	18000	0.3	2500
Couche de base	Grave concassé	10	5000	0.23	2200
Couche de fondation	Arène granitique	15	250	0.40	2100
Terrain naturel	Sable graveleux	30	50	0.45	1800
Géo-grille	-	0.09	800	0.3	420

N.B : D'après le tableau II.1 de caractéristiques de quelque géo-synthétiques, pour la géo-grille on a :

$$e_{max} = 0.9 \text{ mm}$$

$$\text{Masse surfacique} = 380 \text{ g}/\text{m}^2$$

On a pour 1 m d'épaisseur 1111.11 feuilles de géo-grille de 0.9 mm d'épaisseur.

D'où :

$$\text{Masse volumique} = 380 * 1111.11 = 422221.8 \text{ g}/\text{m}^3$$

VI.3. Résultats numériques du modèle choisi :

VI.3.1. Modélisation sans géo-grille :

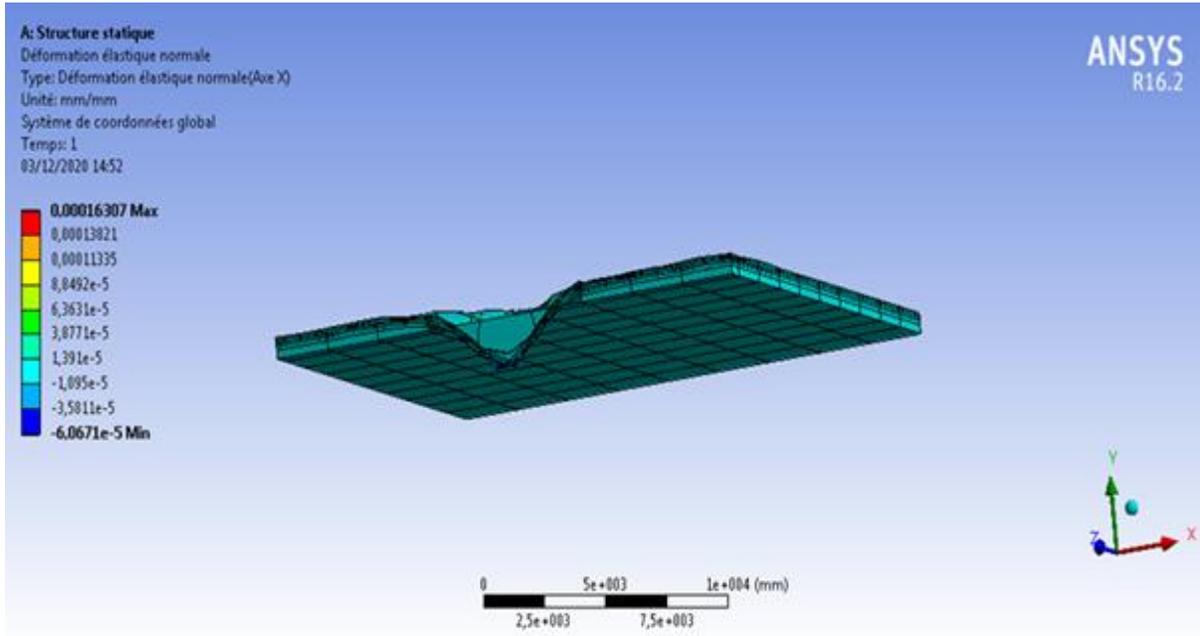


Figure VI.1 : Déformation élastique normale selon l'axe X

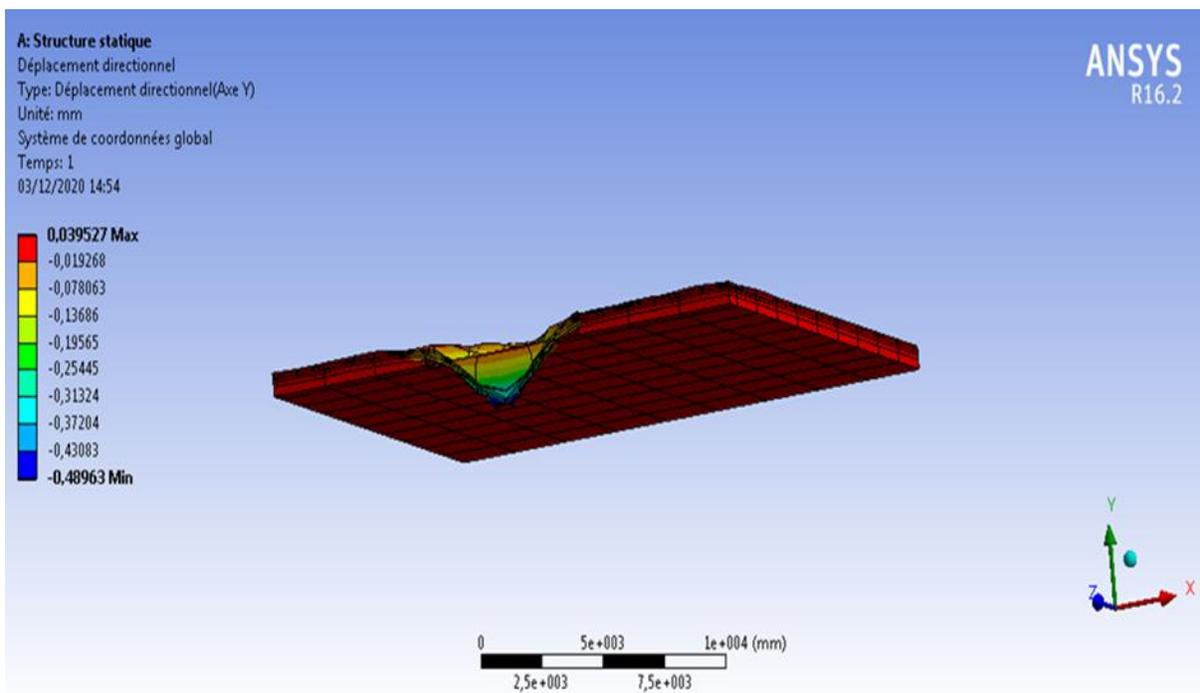


Figure VI.2 : Déplacement directionnel selon l'axe Y

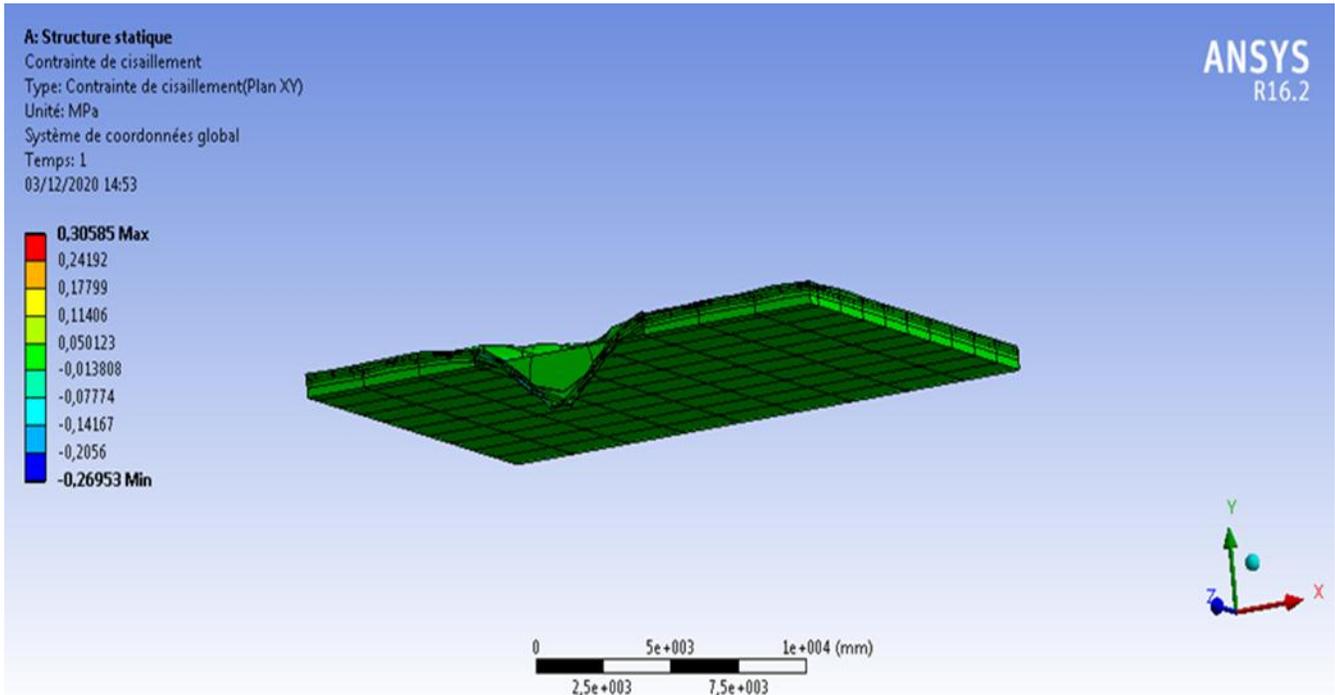


Figure VI.3 : Contrainte de cisaillement selon le plan XY

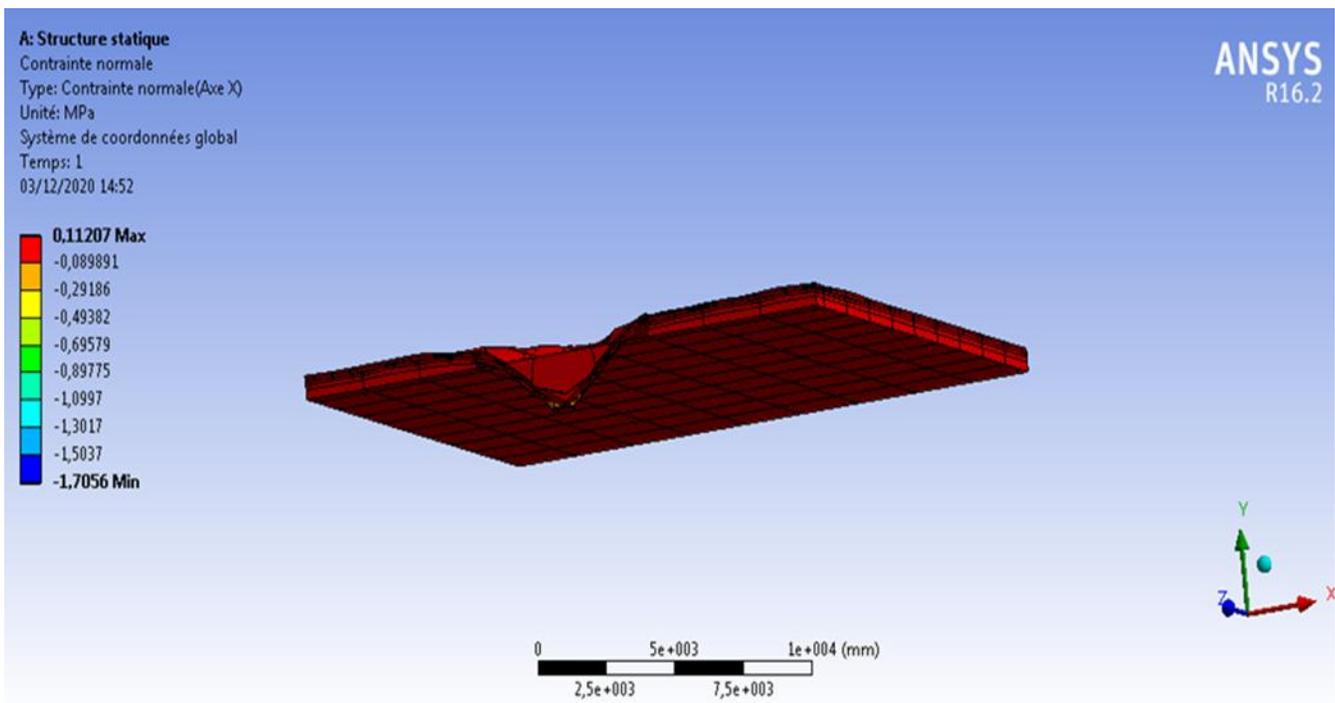


Figure VI.4 : contrainte normale selon l'axe X

VI.3.2. Modélisation avec géo-grille :

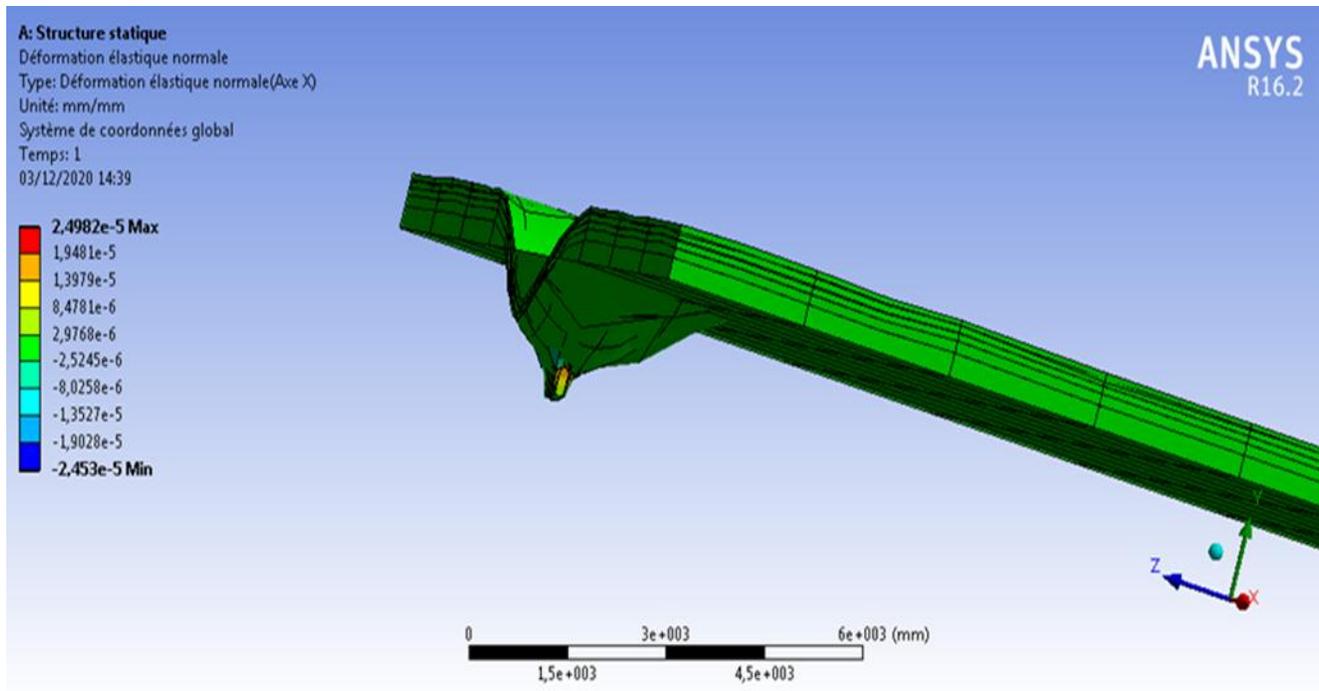


Figure VI.5 : Déformation élastique normale selon l'axe X

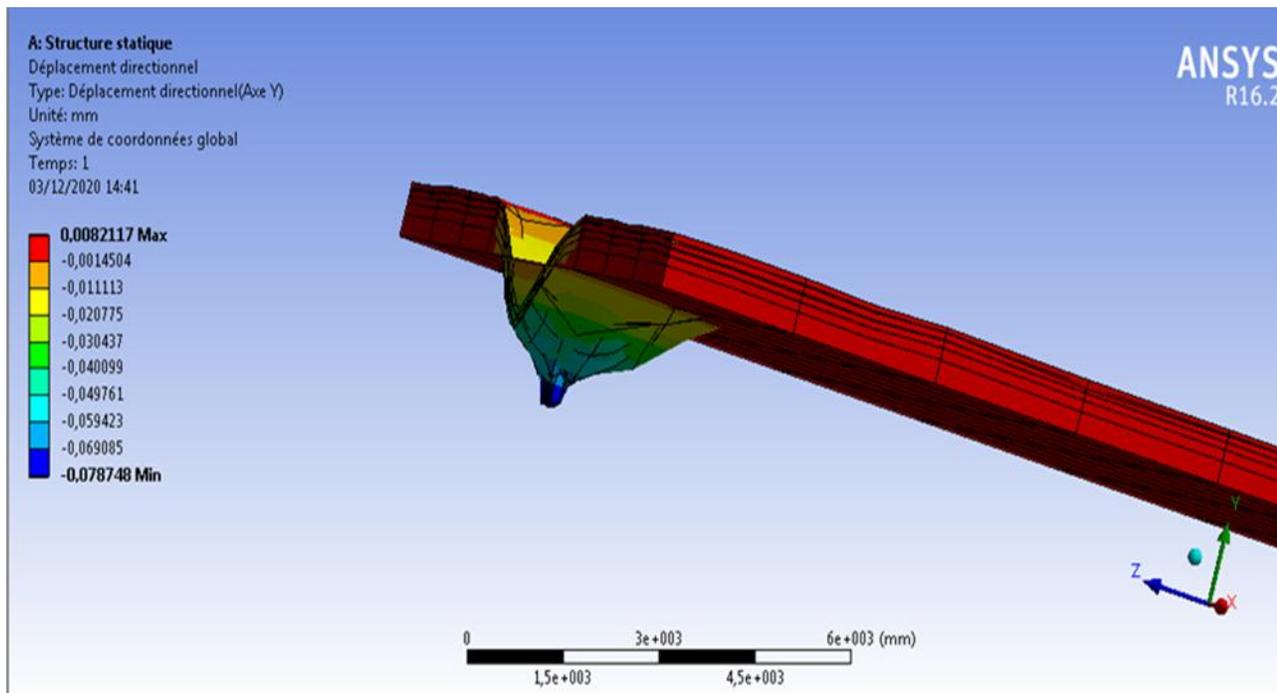


Figure VI.6 : Déplacement directionnel selon l'axe Y

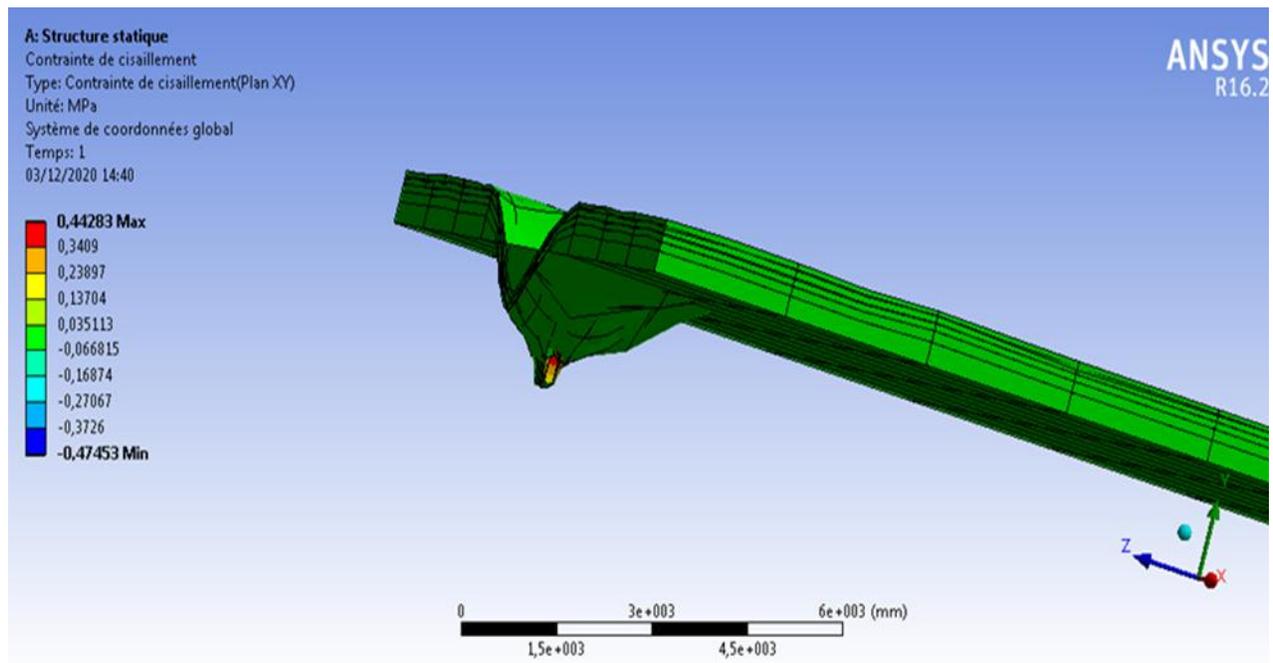


Figure VI.7 : Contrainte de cisaillement selon le plan XY

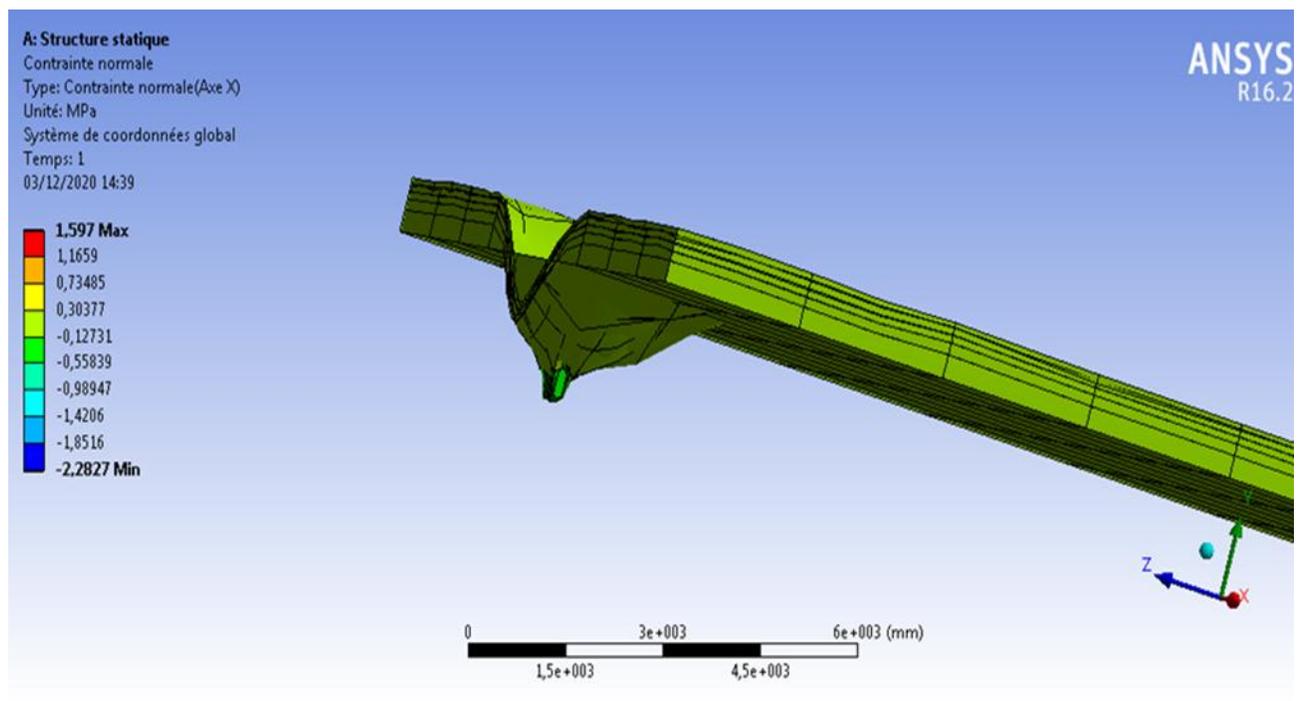


Figure VI.8 : Contrainte normale selon l'axe X

VI.4. Comparaison des résultats sans et avec géo-grille :

Exemple de calcul :

$$\text{Max(\%)} \text{ déplacement normale} = \frac{0.04 - 0.008}{0.04} * 100 = 80\%$$

Tableau VI.2 : Comparaison des résultats

	Sans géo-grille		Avec géo-grille		pourcentage	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Contrainte de cisaillement	-0.51	0.53	-0.56	0.58	-9.80	-9.43
Contrainte normale	-1.34	0.14	-1.94	0.17	-44.78	-21.43
Déplacement normale	-1.42	0.04	-0.26	0.009	81.70	77.50
Déformation élastique normale	-1.56 E-4	1.03 E-4	-5.76 E-5	5.82 E-5	63.08	43.50

VI.5. Conclusion :

La comparaison faite entre les résultats des contraintes et déformations de la chaussée rigide, avant et après renforcement par géo-grille, a donné ce qui suit :

- Pour les déformations : Pour les valeurs maximales, on constate que la différence en gain est en valeur de la chaussée renforcée. En effet le gain de variant entre 80% et 84 %, ce qui donne l'avantage de la géo-grille en tant que nappe de renforcement en plus de son rôle de séparation. Idem, pour les valeurs minimales trouvées qui on gain variant entre de 60%. Et 84%
- Pour les valeurs des contraintes : Un gain variant entre 33 % et 93%, respectivement en min et max. La géo-grille peut réduire les contraintes normales et par conséquent la réduction de dimensionnement.

Conclusion générale

Cette étude nous a permis de conclure que :

- Les dégradations des chaussées sont inévitables vue les conditions climatiques et le trafic intense subit ;
- Les géo-synthétiques sont des produits utilisées pour le renforcement et/ou la réparation des chaussées rigides, grâce à ses avantages tels que :
 - La diminution des tassements sous la chaussée, ce qui va réduire les fissures et ralentit son ascension vers les couches supérieures donc protéger la couche de roulement
 - L'augmentation de la durée de vie de la chaussée
- L'application des produits géo-synthétique comme la géo-grille dans les chaussées rigides joue un rôle très important dans le renforcement et la maintenance de la chaussée.
- La géo-grille donne un gain qui peut aller jusqu'à 85% pour les déformations et 95% pour les contraintes.

Nous recommandons pour les futurs travaux de recherche (master ou doctorat), la prise en charge de qui suit :

- Investigations expérimentales (au laboratoire ou in situ) pour valider le modèle numérique choisi ;
- Positionner la géo-grille a des emplacements divers au niveau du corps de chaussée pour voir son influence sur le comportement dynamique et statique de l'ensemble de la piste renforcée.

Références bibliographiques :

- [1] Bessahraoui.S, Bentria.s(2016) « Les fissures des chaussées souples (types, causes et méthodes de réparations) », Mémoire de fin d'étude Master, Université de KasdiMerbah ,Ourgla.
- [2] <https://www.wikip.fr/structure-de-chausseeacutes/les-differents-types-de-chaussees>.
- [3] https://fr.wikipedia.org/wiki/Transport_en_Alg%C3%A9rie#R%C3%A9seau_routier
- [4] https://www.wikiwand.com/fr/Transport_en_Algerie.
- [5] [STAC, 2007]STAC. Etat De La Surface Des Chaussées Aéronautiques. Catalogue Des Dégradations-STAC, Avril 2007.
- [6]DanielL.Stacks,P.E.,Director,MaintenanceDivision2019.[enligne],
http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/pdm/conc_pave_repair.htm.
- [7][enligne] <https://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/fr/chaussees-aeronautiques/portance/auscultation>.
- [8] Bouzid.A (2018), « Etude d'expertise de la chaussées rigide de l'aérodrome de tindouf », Mémoire de fin d'étude Master, Université de KasdiMerbah, Ourgla.
- [9] Mirech.A (2013) « Utilisation des géo-synthétique en géotechnique routière », Mémoire de Master, Université de Guelma.
- [10]ArnsteinWaten,SINTEF, « Géosynthétique dans les structures routières : expérienceseuropéenes », Norvège, 2011.
- [11]file:///C:/Users/Crash/Downloads/Advances_in_Geosynthetics_Materials_and_Applicatio.pdf.
- [12] Gregory S. Cleveland, Joe W. Button, Robert L. Lytton (2002), «Geosynthetics in flexible and rigid pavement overlay systems to reduce reflection cracking », No:FHWA/TX-02/1777-1, p-p 267.
- [13] Abbas Al-Hedad,Muhammad N.S. Hadi (2016), «Flexural behaviour of concrete pavements reinforced withgeogrid materials».
- [14] Kechouane. F (2020), « Amélioration de performances mécaniques des résinesépoxydiques pour le renforcement par nano composites», Thèse de Master, Université de Blida-1-.
- [15] Fellah .A, Badaoui .A (2016), « Etude de comportement mécanique du béton a l'aide de logiciel ansys », Projet de fin d'études, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent.