

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



قسم الهندسة المدنية

Département de Génie Civil

Mémoire de Master 2

Spécialité : Génie Civil

Option : Matériaux de Génie Civil

Sujet

**Confection des bétons bitumineux pour les
chaussées souples en zones arides**

Présenté par :

**CHETOUI Mansour
MOKEDDEM Ayoub**

Encadré par :

Dr M.ABDESSEMED

Année Universitaire 2019-2020

Remerciement

On tient d'abord à remercier en premier lieu et avant tous, **الله عزوجل** le tout puissant, qui nous a donnés la force et la patience d'accomplir ce travail dans les meilleures conditions.

A la fin de ce travail, on ne manque d'adresser nos sincères remerciements à tous les personnes qui nous ont aidés à réaliser ce travail.

On a l'honneur d'avoir comme encadreur monsieur **Dr. Mouloud ABDESSEMED**, qui n'a pas hésité à nous faire confiance, sa patience, sa compréhension, et son suivi continu au cours de la réalisation de ce travail.

On tient également à le remercier pour ses conseils et son soutien

On remercie vivement l'ensemble des personnels du département de génie civil.

Si par mégarde, On a oublié quelqu'un, qu'il nous pardonne et qu'il soit remercié pour tous.

Dédicaces

Je dédie ce travail

A mes très chers parents pour leur soutien et leur présence pour moi

A mon oncle et ma tante

A mes frères et sœurs

A ma grand-mère maternelle

A la mémoire de ma grand-mère qui est toujours présente dans mon cœur

A tous mes amis avec qui j'ai partagés de longues années d'amitié surtout Bouyaiche Zakaria et Gathu Darwin.

A mon ami et frère Ayoub.

Mansour.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents qui étaient toujours présents à mes côtés. Et qui m'ont soutenu tout au long de mon parcours universitaire.

A mes sœurs pour leur motivation et leur amour.

A la mémoire de mes grands-parents qui sont toujours présents dans mon cœur.

A mes oncles, mes tantes, mes cousins et cousines.

A tous ceux qui m'ont aidé dans mes études que ce soit de près ou de loin.

A mes amis et frères Mansour et Bouyaiche Zakaria et Gathu Darwin.

AYOUB.

Sommaire

Chapitre I

Généralités sur la structure des Chaussées routières

I.1 La structure des chaussées routières.....	1
I.1.1 Introduction.....	1
I.1.2 Généralité sur les chaussées.....	1
I.1.3 La structure des chaussées.....	1
I.1.3.1 Constitution d'une structure de chaussée.....	1
I.1.3.2 Les différents types de structure de chaussée.....	3
I.2 Dégradation des chaussées.....	8
I.2.1 Condition d'observation.....	8
I.2.2 Fissuration thermique.....	10
I.2.3 Propagation des fissures vers la couche de roulement.....	12
I.2.4 Classification des routes.....	15
I.3 Conclusion	16

Chapitre II

Les bétons bitumineux

II.1 Introduction.....	17
II.2 Les bétons bitumineux	17
II.3 Les types des bétons bitumineux.....	18
II.4 Composition de béton bitumineux	18
II.4.1 Liants hydrocarbonés	19
II.4.2 Bitume	20
II.4.3 Granulats	25
II.5 Composants minéraux	29
II.6 Formulation des bétons bitumineux.....	29
II.7 Paramètres influençant le choix d'une Formulation	30
II.8 La compacité	31
II.9 Les propriétés mécaniques des bétons bitumineux.....	32
II.9.1 Essai Marshall.....	32
II.9.2 Essai Duriez.....	33
II.10 Conclusion	34

Chapitre III

Notions sur les matériaux géosynthétiques

II.1 Introduction.....	35
III.2 Que sont les géo synthétiques ?.....	35
III.3 Types des Géo synthétique.....	36
III.3.1. Géotextiles.....	36
III.3.2. Géocomposite.....	39
III.3.3. Géogrille.....	39

III.4.Rôles et les fonctions des géo synthétiques.....	39
III.4.1. Rôles mécaniques.....	39
III.4.2. Rôles hydrauliques.....	42
III.5.Fonctions des géo synthétiques dans les chaussées routières.....	43
III.6.Mécanismes de renforcement.....	45
III.6.1.Mécanisme de confinement latéral de la couche de base.....	45
III.6.2.Mécanisme de surface de rupture modifiée et augmentation de la capacité portante.....	46
III.6.3.Mécanisme de membrane tendue.....	46
III.7.Renforcement des chaussées à l'aide des géo synthétiques.....	47
III.7.1.Renforcement des chaussées à l'aide géotextile.....	47
III.7.2.Renforcement des chaussées à l'aide Géo grille.....	49
III.8.Quels géo synthétiques utilisé ?.....	50
III.8.1.Classement par propriétés des géo synthétiques.....	50
III.8.2.Positionnement.....	51
III.9 Conclusion.....	52

Chapitre IV

Calcul par ANSYS et interprétation des résultats

IV.1 Introduction.....	53
IV.2 Présentation de la chaussée considéré.....	53
IV.3.Entrée des données dans le logiciel ANSYS.....	55
IV.3.1.Le type d'analyse.....	55
IV.3.2.Maillage.....	55
IV.3.3.Condition aux limites.....	56
IV.3.4.Chargement appliqué dans ANSYS.....	56
IV.4.L'influence de la charge sur la chaussée.....	57
IV.4.1.Chaussée souple sans géotextile.....	57
IV.4.2.Chaussée souple avec géotextile.....	59
IV.4.3.Interprétation des résultats.....	63
IV.5.Influence de la température sur le comportement de la chaussée.....	63
IV.5.1.Chaussée souple sans géotextile sous l'effet de la température (Chaussée 1).....	64
IV.5.2.Chaussée souple avec géotextile sous l'effet de la température.....	67
IV.5.3.Interprétation des résultats.....	70
IV.5.4.Modélisation avec l'augmentation des épaisseurs des couches (Chaussée 2).....	70
IV.6.Conclusion.....	73

Listes des figures

Figure 1 Constitution d'une structure de chaussée type.....	2
Figure 2 Chaussées souples.....	3
Figure 3 Fonctionnement d'une chaussée souple.....	3
Figure 4 Chaussée bitumineuse épaisse.....	4
Figure 5 Chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques.....	4
Figure 6 Fonctionnement d'une chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques.....	4
Figure 7 Chaussées à structure mixte.....	5
Figure 8 Chaussées à structures inverse.....	6
Figure 9 Dalles non goujonnées avec fondation.....	6
Figure 10 Dalles goujonnées avec fondation.....	7
Figure 11 Dalle sans fondation.....	7
Figure 12 Béton armé continu 1.....	7
Figure 13 Béton armé continu 2.....	7
Figure 14 Béton de ciment mince collé.....	8
Figure 15 Béton armé continu sur grave bitume.....	8
Figure 16 Fissuration longitudinale sur une chaussée.....	9
Figure 17 Manège de fatigue du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées à Nantes.....	10
Figure 18 Effet du gel et du dégel sur une route.....	13
Figure 19 Effet du gel et du dégel sur une route.....	13
Figure 20 Mode I : ouverture, Mode II : Cisaillement, Mode III : Déchirement.....	14
Figure 21 Mode I : Retrait thermique ; Mode I+II : Passage des charges de véhicule.....	14
Figure 22 Composition de béton bitumineux.....	17
Figure 23 Types de Liants hydrocarbonés.....	19
Figure 24 Séparation d'un bitume en asphaltènes, résines et huiles.....	20
Figure 25 Fabrication des bitumes par raffinage du pétrole.....	23
Figure 26 Principe de l'essai de pénétrabilité.....	24
Figure 27 Principe de ramollissement.....	24
Figure 28 Les deux familles de granulats.....	26
Figure 29 Machine d'essai Marshall.....	32
Figure 30 Machine d'essai Duriez.....	33
Figure 31 Géo cellules.....	36
Figure 32-A Structure géo composite.....	36
Figure 32-B Géo membranes.....	36
Figure 33 Géotextile non tissé.....	37
Figure 34 Géotextile tissé.....	38
Figure 35 Géotextile tricoté.....	38
Figure 36 Pose des géo grille de séparation.....	39
Figure 37 Pose de géotextiles de renforcement.....	40
Figure 38 Utilisation dans la protection.....	41
Figure 39 Utilisation contre l'érosion.....	41
Figure 40 Utilisation pour filtration.....	42
Figure 41 Utilisation pour drainage.....	42
Figure 42 Utilisation pour Étanchéité.....	43
Figure 43 Distribution des contraintes dans une chaussée souple.....	44
Figure 44 Effet de l'amplitude d'un chargement au niveau de la couche de sol.....	45
Figure 45 Confinement latéral.....	45

Figure 46	Modification surface de rupture augmentation de la capacité portante.....	46
Figure 47	Membrane tendue.....	47
Figure 48	Comportement mécanique du géotextile.....	48
Figure 49	Géotextile déformé.....	49
Figure 50	Géométrie du modèle étudié.....	53
Figure 51	Logiciel de calcul ANSYS Mechanical (Workbench).....	55
Figure 52	Représentation de maillage.....	55
Figure 53	Chargement constant : étude statique.....	56
Figure 54	Déplacement total.....	57
Figure 55	Déformation élastique normale (axe Z sens de circulation)	57
Figure 56	Déformation élastique normale (axe Y sens de la profondeur).....	58
Figure 57	Contrainte normale (axeY).....	58
Figure 58	Contrainte de cisaillement (Plan XZ surface de roulement).....	59
Figure 59	Géométrie du modèle étudié avec géotextile.....	59
Figure 60	Déplacement total.....	60
Figure 61	Déformation élastique normale (axe Z sens de circulation).....	60
Figure 62	Déformation élastique normale (axe Y sens de la profondeur).....	61
Figure 63	Contrainte normale (axeY).....	61
Figure 64	Contrainte de cisaillement (Plan XZ surface de roulement).....	62
Figure 65	Déplacement total.....	64
Figure 66	Déformation élastique normale (axe Z sens de circulation).....	65
Figure 67	Déformation élastique normale (axe Y sens de la profondeur).....	65
Figure 68	Contrainte normale (axeY).....	66
Figure 69	Contrainte de cisaillement (Plan XZ surface de roulement).....	66
Figure 70	Déplacement total.....	67
Figure 71	Déformation élastique normale (axe Z sens de circulation).....	67
Figure 72	Déformation élastique normale (axe Y sens de la profondeur).....	68
Figure 73	Contrainte normale (axeY).....	68
Figure 74	Contrainte de cisaillement (Plan XZ surface de roulement).....	69
Figure 75	Déplacement total.....	70
Figure 76	Déformation élastique normale (axe Z sens de circulation).....	71
Figure 77	Déformation élastique normale (axe Y sens de la profondeur).....	71
Figure 78	Contrainte normale (axeY).....	72
Figure 79	Contrainte de cisaillement (Plan XZ surface de roulement).....	72

Liste des graphes

Graphe 1	Variation de E en fonction de la température.....	64
----------	---	----

Liste des tableaux

Tableau 1	Fractions granulaires 0/14 des BB.....	30
Tableau 2	Caractéristiques des couches.....	54
Tableau 3	Caractéristiques des fibres de carbones.....	54
Tableau 4	Différence des résultats obtenus pour les deux analyses.....	62
Tableau 5	Valeur du module E mesuré en fonction de la température de béton bitume et grave bitume.....	63
Tableau 6	Différence des résultats obtenus pour les deux analyses.....	69
Tableau 7	Résultats obtenus pour les deux analyses.....	73

ملخص

استخدام جيوساتنيك اصبحت تستخدم على نطاق واسع في مجال الهندسة المدنية (اعمال الارض، بناء الطرق، السكك الحديدية والمطار، جدران وسدود عمودية شديدة الانحدار).

تقدم مواد التعزيز هذه حلاً اقتصادياً ومستقبلياً، مادة مركبة (سول_ جيوتكستيل او سول_ جيوكريل) تحسن مقاومة التحميل وتقليل حجم اثر الهيكل (الطريق) في هذا العمل الحالي، نحن مهتمون بالطرق الخرسانة الاسفلتية المرنة، مع ادخال نوعين مختلفين من جيوتكستيل. تم اجراء المقارنة لنوعين من الحالات: النوع الاول من الطريق بدون جيوتكستيل والنوع الثاني من الطريق بالجيوتكستيل.

الاعدادات التي تؤخذ على انها تؤثر على سلوك الطريق المقوى هي: تغيير درجة الحرارة، تدهور تغيير معامل "يونغ" واختلاف في سمك الطبقة نظراً لقلّة الوسائل للقيام بحملة تحليل عددي يعتمد على طريقة العناصر المحدودة باستخدام البرنامج "ANSYS_ WORBENCH"

اظهرت النتائج ان التعزيز يعتمد على هذه الاعدادات خاصة درجة الحرارة وكذلك طريقة التمركز جيوتكستيل، والتي يمكن ان توفر نظرة ثاقبة لسلوك هذه الطرق في المناطق الحارة والجافة.

Résumé

L'utilisation des Géo synthétiques est devenue très répandue dans le domaine de Génie civil (terrassment, constructions routière, ferroviaire et aéroportuaire, murs de soutènement et talus très abruptes). Ces matériaux de renforcement offrent des solutions économiques et orientées vers l'avenir. Le matériau composite (sol-géotextile ou sol-géo grille) améliore la résistance au chargement et réduit le volume de l'emprise de l'ouvrage (route).

Dans ce présent travail, nous nous sommes intéressé à la chaussée souple en béton bitumineux, avec insertion deux types différents de géotextiles. La comparaison est faite pour deux types de cas : premier type de chaussée sans géotextile et deuxième type chaussée avec géotextile. Les paramètres pris comme influençant sur le comportement de la chaussée renforcée sont : la variation de température, la dégradation (changement du module de Young) et la variation des épaisseurs des couches. Vu le manque de moyens pour réaliser la campagne expérimental, une analyse numérique basée sur la méthode des éléments finis avec l'utilisation du logiciel "Ansys- Workbench". Les résultats montrent que le renforcement dépend de ces paramètres, surtout la température, ainsi que la manière (positionnement) de la nappe géotextiles. Ce qui peut donner un aperçu sur le comportement de ces chaussées en zones chaudes et arides.

Abstract

The use of geosynthetics has become very widespread in the field of civil engineering (earthworks, road, rail and airport constructions, retaining walls and very steep slopes). These reinforcing materials offer economical and future-oriented solutions. The composite material (soil-geotextile or soil-geo-grid) improves resistance to loading and reduces the volume of the footprint of the structure (road). In this present work, we are interested in the flexible asphalt concrete pavement, with insertion of two different types of geo-textiles. The comparison is

made for two types of cases : first type of roadway without geotextile and second type of roadway with geotextile. The parameters taken as influencing the behavior of the reinforced pavement are : temperature variation, degradation (change in Young's modulus) and variation in layer thicknesses. Given the lack of means to carry out the experimental companion, a numerical analysis based on the finite element method with the use of "Ansys-Worbench" software. The results show that the reinforcement depends on these parameters, especially the temperature, as well as the manner (positioning) of the geo-textile web. This can provide insight into the reaction of these pavements in hot and arid areas.

Abréviations et symboles

LCPC : Laboratoire centrale des ponts et chaussés, France

LRPC : Laboratoire régional des ponts et chaussés, France

LAVOC : Laboratoire des voies et circulation

BB : Béton bitumineux.

GB : Grave bitume

GNT : Graves non traitées

SS : Sol support

LA : Coefficient Los Angeles

MDE : Coefficient micro Deval humide

CA : Coefficient d'aplatissement

ES : Equivalent de sable

C : Compacité

γ_b : La densité du bitume

γ_{app} : la densité apparente

ϵ : L'élongation

E : Module de young

U : Coefficient de poisson

ρ : Masse volumique

Introduction générale

Le réseau routier de l'Algérie est l'un des plus importants du Maghreb et d'Afrique, d'une longueur de plus de 108302 Km, répartie sur des routes nationales et des chemins de wilayas et des routes secondaires. L'Algérie a développé ce réseau grâce au programme de modernisation des transports routiers et ferroviaires qui prévoit la réalisation de l'autoroute est-ouest de 1216 Km, l'autoroute des hauts plateaux de 1330 Km et la réalisation de 1900 Km de routes, ainsi que la finition de la route transsaharienne (nord-sud). Ce réseau atteint au total 112969 Km à l'année 2014. Les routes dans les régions Sahariennes sont des ouvrages stratégiques pour le développement du sud Algérien. En effet le réseau routier est le seul moyen de liaison dans ses différentes régions, que ce soit pour le transport des voyageurs que celui des marchandises malgré les gros efforts mis en oeuvre par les autorités Algériennes, le transport routier reste le seul moyen de communication au Sahara. Ces routes se dégradent sous l'effet, principalement, du gradient thermique et du trafic lourd. Il est donc impératif, de trouver des remèdes (solutions) pour leur sauvegarde.

Les géo synthétiques sont des produits plans fabriqués à partir de polymères synthétiques tels que le polypropylène, le polyester, le polyéthylène, le PVC, etc. Ces matériaux sont fortement résistants à la dégradation biologique et chimique et même thermique. Les polymères synthétiques sont employés depuis plus de 35 ans avec le sol, la roche, ou autre matériau lié à la géotechnique (géo), ou ce qui explique l'appellation géo synthétiques qui signifie application du synthétique dans la géotechnique, en tant qu'un élément d'un projet ou d'un système de Génie Civil. Comme pour l'acier avec le béton, le synthétique est un produit qui travaille principalement en traction et son incorporation dans le sol devient utile si ce dernier est soumis à des déformations de traction et des cisaillements.

L'objet de ce mémoire, est de faire une étude comparative entre deux types de chaussée souple, la première chaussée sans géotextile et la deuxième avec géotextile sous l'influence de plusieurs paramètres (variation de température, dégradation du module de Young, variation des épaisseurs des couches ...etc.)

Dans le premier chapitre on passe en revue des généralités et les différents types de chaussées existants.

Le deuxième chapitre est consacré à définir les bétons bitumineux, constitution et sollicitations engendrées ainsi que les connaissances actuelles sur les enrobés bitumineux.

Le troisième chapitre est consacré pour présenter les divers types de géo synthétiques (géotextiles, géo grilles, géo composites, géo membranes, etc.) et les fonctions principales des géo synthétiques avec leurs domaines d'application.

Le quatrième chapitre est dédié à l'analyse du comportement d'une structure de chaussée souple sans et avec géotextile en tenant compte de plusieurs paramètres à savoir, la variation de la température, dégradation, la variation de l'épaisseur des couches avec logiciel ANSYS.

Enfin nous avons terminé notre travail par une conclusion générale et recommandation.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA STRUCTURE DES CHAUSSEES ROUTIERES

I.1. LA STRUCTURE DES CHAUSSEES ROUTIERES

I.1.1. INTRODUCTION :

Chaque type d'enrobé est définie : premièrement par sa nature et le dosage de ses composants, deuxièmement par ses performances particulières et troisièmement par la couche de la chaussée à laquelle il est destiné.

Dans le présent chapitre, nous allons parler des généralités sur les chaussées et aussi sa structure qui comprennent (les couches de surface et d'assise), nous allons discuter à propos de couche de roulement ; couche de liaison ; et de définir le rôle de chaque composant. Et les types de chaussées routière avec ses composants et caractéristique.

Juste comme l'étude de la formulation des enrobés bitumineux à chaud (mélange à chaud de granulats séchés et de bitume pur) a pour but :

- De déterminer les caractéristiques adéquates des constituants en fonction de trafic et du climat considérés.
- De définir les teneurs des différents constituants qui permettent l'obtention des mélanges bitumineux les plus performants, selon leur utilisation dans un structure de chaussée (couche de base ou couche de roulement) en tenant compte de paramètres trafic et climat.

I.1.2. GENERALITE SUR LES CHAUSSEES :

La chaussée est la partie d'une voie de communication affectée à la circulation des véhicules elle assure les déplacements des usagers et le transport des marchandises.

Une chaussée est constituée d'une superposition de couches de matériaux différents dont l'ensemble est appelé superstructure et reposant sur une infrastructure. Dans l'infrastructure nous avons le sol de plate-forme et une couche de forme en cas de remblai, pour la superstructure nous avons la couche de fondation, la couche de base et la couche de surface ou le revêtement.[1]

I.1.3. LA STRUCTURE DE CHAUSSEE :

I.1.3.1. Constitution d'une structure de chaussée :

Une chaussée est une structure multicouches constituée de trois parties principales qui ont chacune un rôle bien défini (figure 1). [2]

Tout d'abord le sol terrassé ou sol- support est surmonté généralement d'une couche de forme.

L'ensemble sol-couche de forme représente la plate-forme support de la chaussée. La couche de forme a une double fonction. Pendant les travaux, elle assure la protection du sol support,

permet la qualité du nivellement ainsi que la circulation des engins. En service, elle permet d'homogénéiser les caractéristiques mécaniques des matériaux constituant le sol ou le remblai, et d'améliorer la portance à long terme.

Puis viennent la couche de base et la couche de fondation formant ainsi les couches d'assise.

Les couches d'assise apportent à la chaussée la résistance mécanique aux charges verticales induites par le trafic et répartissent les pressions sur la plate-forme support afin de maintenir les déformations à un niveau admissible.

Enfin, la couche de surface se compose de la couche de roulement et éventuellement d'une couche de liaison entre la couche de roulement et les couches d'assise. Elle a deux fonctions.

D'une part, elle assure la protection des couches d'assise vis-à-vis des infiltrations d'eau.

D'autre part elle confère aux usagers un confort de conduite d'autant plus satisfaisant que les caractéristiques de surface sont bonnes.

Selon les matériaux granulaires liés (enrobés, béton,...) ou non liés composants les couches des chaussées, nous distinguons plusieurs types de structures. Dans la suite, nous allons présenter les classifications des chaussées françaises. [2]

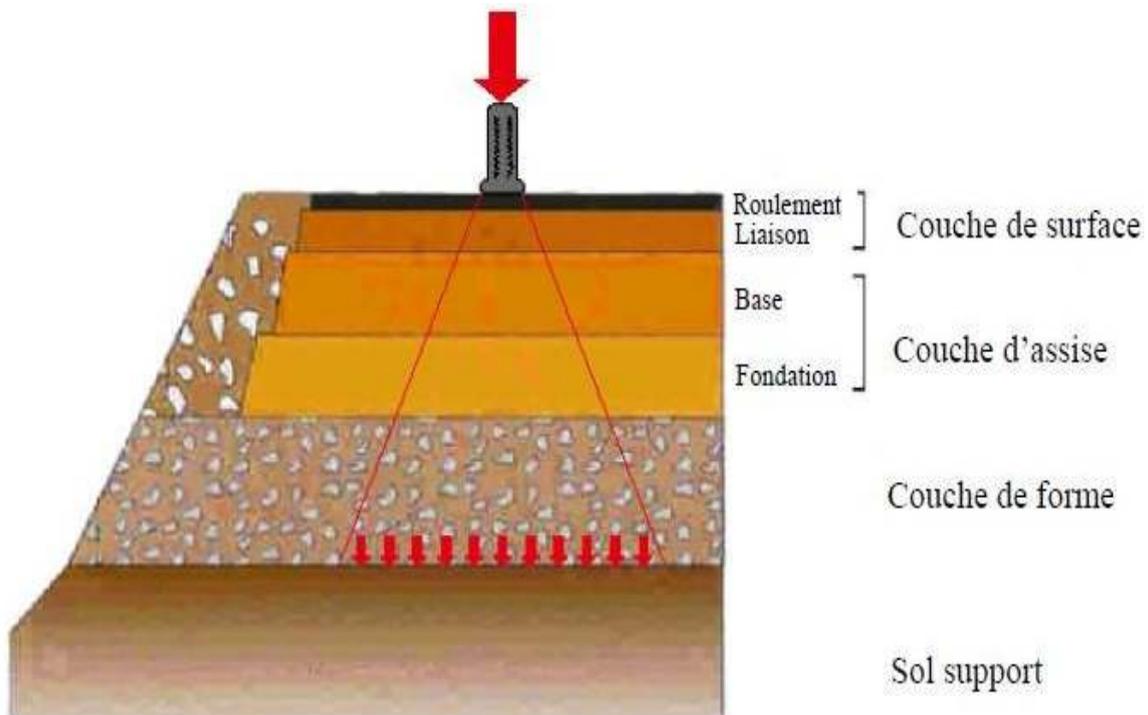


Figure 1. Constitution d'une structure de chaussée type

I.1.3.2. Les différents types de structures de chaussées :

L'une des caractéristiques du réseau routier est l'existence d'une grande diversité de structures de chaussées, que l'on classe dans les familles ci-dessous. [2]

- **Les chaussées souples :**

Ces structures comportent une couverture bitumineuse relativement mince (inférieure à 15 cm), parfois réduite à un enduit pour les chaussées à très faible trafic, reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités. L'épaisseur globale de la chaussée est généralement comprise entre 30 et 60 cm.

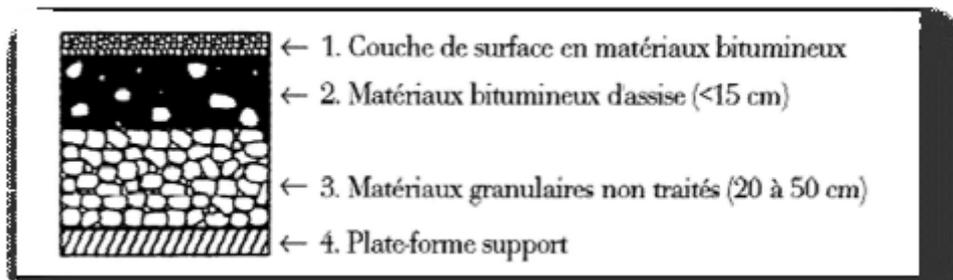


Figure 2. Chaussées souples [LRPC, 1994] [2].

Les matériaux granulaires constituant l'assise de la chaussée ont un module de rigidité relativement faible. Comme la couverture bitumineuse est mince, les efforts verticaux sont transmis au support avec une faible diffusion. Les contraintes verticales élevées engendrent par leur répétition des déformations plastiques qui se répercutent en déformations permanentes à la surface de la chaussée. La couverture bitumineuse subit à la base des efforts répétés de traction flexion.

L'évolution la plus fréquente des chaussées souples se manifeste d'abord par l'apparition de déformations de type orniérage et affaissements qui détériorent les qualités des profils en travers et en long.

Les sollicitations répétées de flexion alternée dans la couverture bitumineuse entraînent une détérioration par fatigue, sous forme de fissures d'abord isolées, puis évoluant peu à peu vers le faïençage.

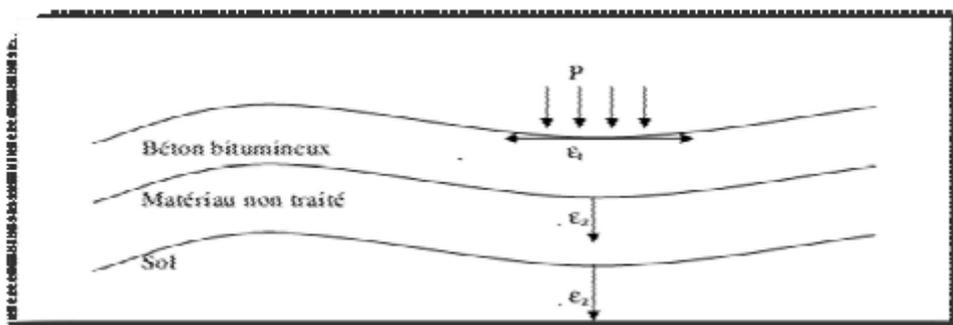


Figure 3. Fonctionnement d'une chaussée souple

- **Les chaussées bitumineuses épaisses :**

Ces structures se composent d'une couche de roulement bitumineuse sur un corps de chaussée en matériaux traités aux liants hydrocarbonés, fait d'une ou deux couches (base et fondation). L'épaisseur des couches d'assise est le plus souvent comprise entre 15 et 40 cm.

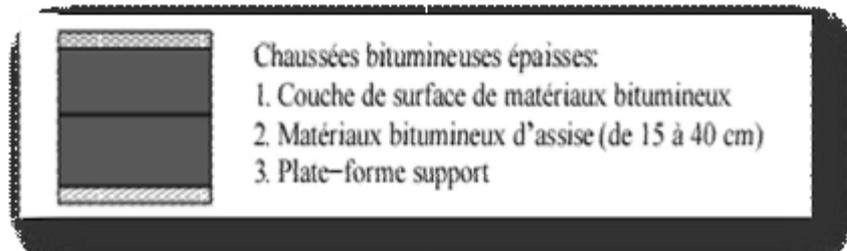


Figure 4. Chaussée bitumineuse épaisse [LCPC, 1994] [1].

La rigidité et la résistance en traction des couches d'assise en matériaux bitumineux permettent de diffuser en atténuant fortement les contraintes verticales transmises au sol.

La qualité des interfaces a une grande importance pour ce type de chaussée ; en effet : si les couches bitumineuses sont liées, les allongements maximaux se produisent à la base de la couche liée la plus profonde ; par contre, lorsqu'elles sont décollées, chaque couche se retrouve sollicitée en traction, provoquant la ruine prématurée de la structure.

- **Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques :**

Ces structures sont qualifiées couramment de "semi-rigides". Elles comportent une couche de surface bitumineuse sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposés en une ou deux couches (base et fondation) dont l'épaisseur totale est de l'ordre de 20 à 50 cm.

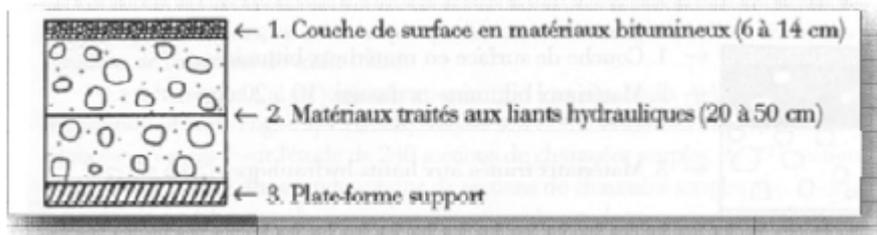


Figure 5. chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques [LCPC, 1994] [1].

Le fonctionnement de ces structures peut être schématisé comme suit :

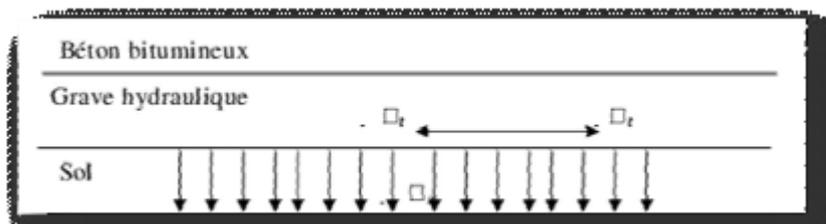


Figure 6. Fonctionnement d'une chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques

Compte tenu de la très grande rigidité des matériaux traités aux liants hydrauliques, les contraintes verticales transmises au sol support sont très faibles. En revanche l'assise traitée subit des contraintes de traction-flexion σ qui s'avère déterminantes pour le dimensionnement.

L'interface couche de surface-couche de base est aussi une zone sensible car elle est souvent soumise à de fortes contraintes normales et de cisaillement à l'horizontal et les centimètres supérieures de l'assise traitée sont souvent de faible résistance.

Ces assises sont sujettes à des retrait (phénomène thermique et de prise de béton). Le retrait bien qu'empêché par le frottement de la couche d'assise sur son support, provoque des fissures transversales qui remontent au travers de la couche de roulement.

- **Les chaussées à structure mixte :**

Ces structures comportent une couche de roulement et une couche de base en matériaux bitumineux (épaisseur de la base : 10 à 20 cm) sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm). Les structures qualifiées de mixtes sont telles que le rapport de l'épaisseur de matériaux bitumineux à l'épaisseur totale de chaussée soit de l'ordre de 1/2.

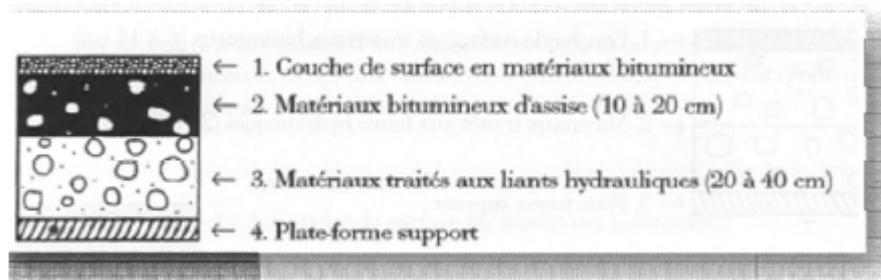


Figure 7. Chaussées à structure mixte [LCPC, 1994] [1]

La couche de fondation est traitée aux liants hydrauliques diffus et atténue les efforts transmis au sol support.

Les couches bitumineuses ralentissent la remontée des fissures transversales de la couche sous-jacente et réduisent les contraintes de flexions à la base de la structure tout en assurant les qualités d'uni et de continuité.

L'adhérence entre les couches bitumineuses et les couches traitées aux liants hydrauliques est le point faible de la structure. Elle peut être rompue par suite de dilatation différentielle entre les deux couches et de l'action du trafic, entraînant alors une forte augmentation des contraintes de traction à la base de la couche bitumineuse, qui peut ainsi périr par fatigue

- **Les chaussées à structure inverse :**

Ces structures sont formées de couches bitumineuses, d'une quinzaine de centimètres d'épaisseur totale, sur une couche de grave non traitée (environ 12 cm) reposant elle-même

sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques. L'épaisseur totale atteint 60 à 80 cm

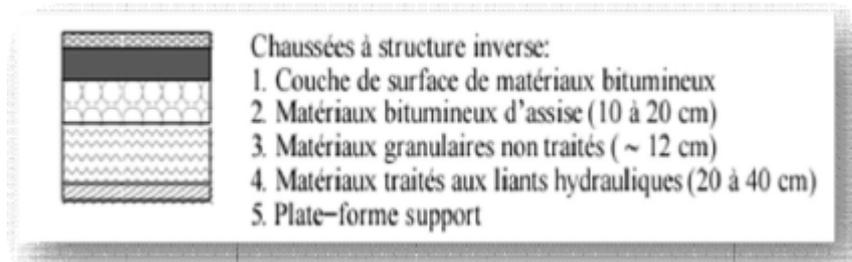


Figure 8. Chaussées à structures inverse [LCPC, 1994] [1]

- **Les chaussées en béton de ciment :**

Ces structures comportent une couche de béton de ciment de 15 à 40 cm d'épaisseurs qui sert de couche de roulement éventuellement recouverte d'une couche mince en matériaux bitumineux. La couche de béton repose soit sur une couche de fondation (en matériaux traités aux liants hydraulique ou en béton de ciment), soit sur une couche drainante en grave non traitée, soit sur une couche d'enrobé reposant elle-même sur une couche de forme traitée aux liants hydrauliques.

La dalle de béton peut être continue avec un renforcement longitudinal ("béton armé continu"), ou discontinue avec ou sans élément de liaison aux joints. Ci-dessous nous présentons les structures de chaussée en béton de ciment (cf. figure 9 à 13).

- **Les chaussées composites :**

Afin d'offrir une solution concurrente aux chaussées classiques, deux nouvelles structures se développent depuis les années 1990 aux Etats Unis [Cole et al. 1998] [2] et sont employées depuis moins d'une dizaine d'années en France [CIM béton, 2000] [3]. Ces structures combinent une couche de béton de ciment (pour leurs propriétés de durabilité et leur haut module) avec des couches en matériaux bitumineux (pour leurs bonnes propriétés d'adaptations). L'intérêt technique et économique de ces structures dépend essentiellement de la qualité et de la pérennité de l'adhérence mécanique du collage avec interface entre ces couches [Pouteau et al. 2004] [4]. Ci-dessous deux types de structures composites sont présentés : le béton de ciment mince collé [Silwerbrand, 1998] [6] et le béton armé continu (BAC) sur grave bitume (GB).

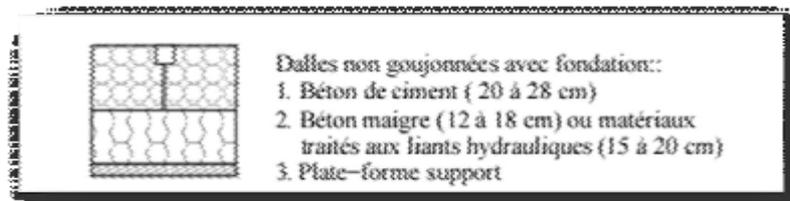


Figure 9. Dalles non goudronnées avec fondation [LCPC, 1994] [1]

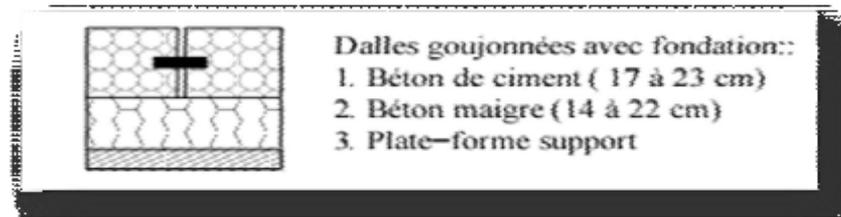


Figure 10. Dalles goudonnées avec fondation [LCPC, 1994] [1]

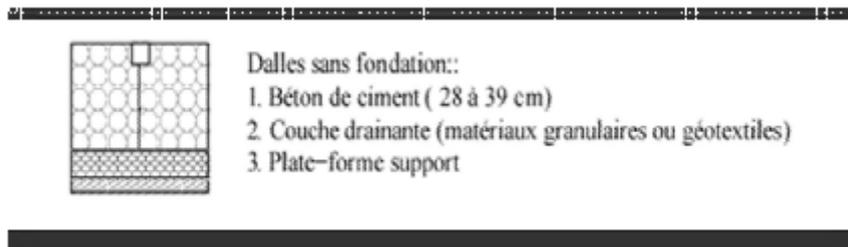


Figure 11. Dalle sans fondation [LCPC, 1994] [1]

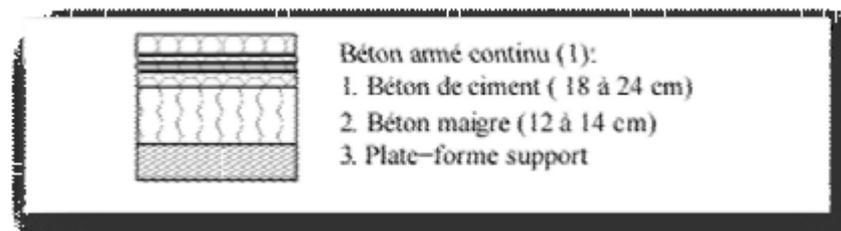


Figure 12. Béton armé continu 1 [LCPC, 1994] [1]

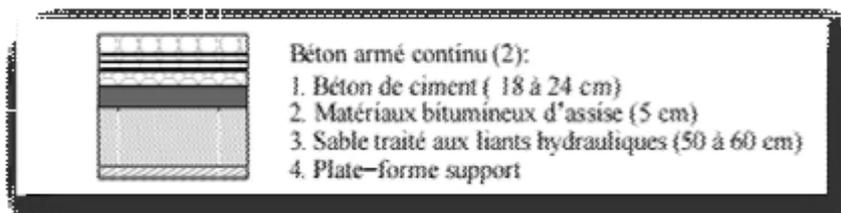


Figure 13. Béton armé continu 2 [LCPC, 1994] [1]

La structure du béton de ciment mince collé (BCMC) est connue en France depuis 1996 [CIM béton, 2000] [4].

Elle consiste à réaliser des dalles minces (de 10 à 15 cm d'épaisseur) ou très minces (de 5 à 10 cm d'épaisseur) en béton sur un matériau bitumineux (cf. figure 14).

La structure BAC sur GB est une structure composite qui se compose des couches suivantes : BBTM (Béton Bitumineux Très Mince)/ ES (Enduit Superficiel)/ BAC/ GB [Guidoux, 2000] (cf. figure 15). Toutes ces chaussées après dimensionnement, sous l'influence du chargement du trafic, sous l'effet de la température ou d'autres raisons (mauvais dimensionnement, déshydratation des matériaux...), subissent des dégradations de différents types. Pour le problème de redimensionnement et de réparation des chaussées, il est nécessaire de comprendre l'origine et les types de ces dégradations.

Dans la partie suivante, nous allons décrire de façon générale ces phénomènes.

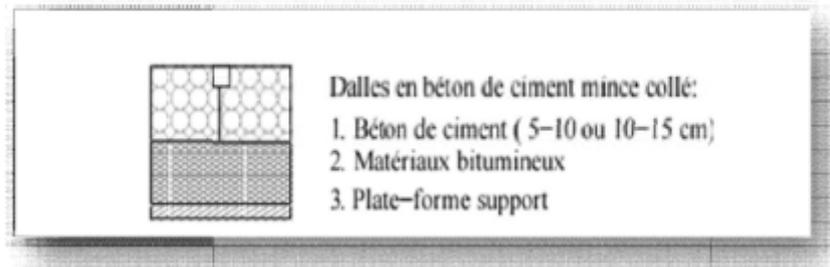


Figure 14. Béton de ciment mince collé (BPMC) [1]

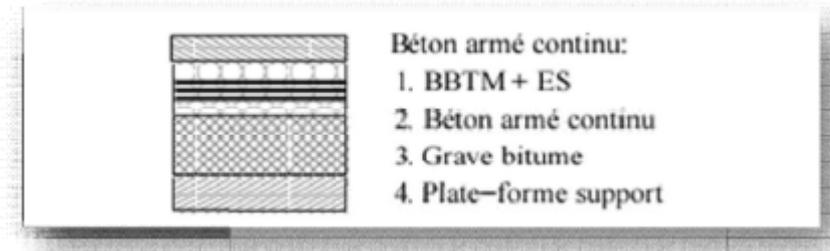


Figure 15. Béton armé continu sur grave bitume (BAC/GB) [1]

I.2. Dégradations des chaussées :

I.2.1 Conditions d'observation :

Au passage d'une charge roulement, une chaussée subit des efforts normaux et transversaux qui conduisent à divers types de dégradations dont les principales sont l'orniérage et la fissuration.

L'orniérage est une déformation irréversible transversale apparaissant sous le passage des roues qui concerne d'assez grandes longueurs de chaussée. Son origine est le plus souvent un fluage de la couche de roulement due à l'utilisation d'un bitume trop « mou » (cas des ornières à faible rayon (Jeuffroy, 1983)). Les ornières à grand rayon traduisent quant à elles une fatigue de la structure par tassement des couches inférieures de la chaussée et du sol support.

La fissuration est une famille de dégradation caractérisée par une ligne de rupture apparaissant à la surface de la chaussée.

- **Deux familles de fissuration sont à distinguer :**

La fissuration des couches inférieures est principalement due à la fatigue de la structure qui se caractérise par la rupture de l'enrobé après application répétée d'un grand nombre de sollicitations, dont l'amplitude est inférieure à celle conduisant à la rupture au premier chargement.

La fatigue des enrobés bitumineux constitue l'un des principaux modes de rupture des chaussées bitumineuses épaisses. L'évaluation du comportement à la fatigue est donc à la base des méthodes de dimensionnement dans de nombreux pays.

La fissuration dans les couches supérieures se manifeste dans la chaussée par des fissures transversales régulièrement espacées de 5 à 20 mètres et des fissures longitudinales (figure 16) qui peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres. Leur ordre d'apparition et leur origine ne sont pas clairement établis, car l'expérience de terrain est parfois en désaccord avec les guides pratiques et techniques qui définissent un répertoire des déformations et préconisent des solutions d'entretien. Après plusieurs années, ces fissures peuvent atteindre 20 mm de large.

A moins d'être remplies par un enduit d'étanchéité, elles permettent à l'eau d'infiltrer la chaussée et de réduire sa capacité structurelle. Cette fissuration peut être le résultat d'un seul passage d'une charge roulante mais peut être aussi dû à un phénomène de fatigue.



Figure 16. Fissuration longitudinale sur une chaussée

I.2.2. Fissuration thermique :

Les sollicitations thermiques sont également à l'origine d'un grand nombre de dégradations, et sont souvent un facteur important de vieillissement des chaussées.

- **Amplitudes thermiques :**

En ce qui concerne les sollicitations sous trafic aux températures de service extrêmes, les déformations permanentes et la fissuration des chaussées après vieillissement accéléré, du aux effets thermiques, demeurent une préoccupation majeure des maitres d'ouvrages.

Cette fissuration est principalement liée aux grandes amplitudes thermiques. Une température ambiante élevée est un facteur de vieillissement du bitume car elle a pour effet d'augmenter sa rigidité ce qui le rend plus résistant à la déformation permanente.

En revanche, lorsque la température ambiante devient très basse ($< 20^{\circ}\text{C}$), le matériau se fragilise.

La fissuration à basse température est ainsi l'un des premiers mécanismes de détérioration dans les climats froids.

De forts gradients thermiques entre le jour et la nuit sont une autre cause possible de fissuration. Cette dégradation a été observée sur le manège de fatigue du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Nantes (figure 17).



Figure 17. Manège de fatigue du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées à Nantes.

- **Autoréparation :**

A la surface de certaines chaussées, on a pu constater que des fissures existantes avaient disparu après l'été. Un phénomène analogue a pu être observé sur les chaussées du manège de fatigue du LCPC : les valeurs de déflexion diminuent entre la fin d'une période circulée et le démarrage de la phase suivante d'essais quelques mois plus tard (de La Roche, 1996).

Il semblerait donc que les enrobés aient la faculté sous certaines conditions de récupérer au moins partiellement leurs caractéristiques mécaniques (Roth, 2000).

L'autoréparation a fait l'objet d'études sur l'endommagement des enrobés bitumineux en fatigue avec des temps de repos (Breysse *et al.* 2002).

Ces observations conduisent à l'hypothèse que le bitume est apte à recoller une fissure dans certaines conditions de sollicitations thermiques et mécaniques (entre -20°C et 50°C). Cet essai peut aussi être pratiqué à grande déformation, pour déterminer la perte de linéarité du module à la température de 0°C.

- **Détermination du coefficient de dilatation thermique :**

La détermination du coefficient de dilatation thermique en fonction de la température permet d'apprécier l'aptitude d'un matériau à se déformer face aux variations de température.

Pour cet essai, l'éprouvette d'enrobé (80 mm de hauteur et 40 mm de diamètre) est suspendue, son axe étant en position horizontale pour éviter tout frottement. Ainsi, l'éprouvette est libre de ses mouvements, se contracte et se dilate selon la variation de la température.

Caractérisation du comportement à basse température :

Pour étudier le comportement des enrobés bitumineux à basse température, il n'y a pas encore de méthodologie d'étude bien codifiée. Des enseignements peuvent être obtenus à partir d'essais visant à caractériser la résistance mécanique ou la capacité de l'enrobé à relaxer les contraintes. La résistance à la fissuration thermique fragile des enrobés est généralement appréhendée par la détermination du coefficient de dilatation thermique et par une combinaison d'essais de retrait thermique empêché, de traction et de relaxation à basse température.

Détermination du module en traction directe :

Il s'agit de suivre l'évolution de la résistance en traction directe de l'enrobé en fonction de la température, pour des valeurs de plus en plus basses. Cet essai est pratiqué sur des éprouvettes cylindriques, de diamètre compris entre 50 et 160 mm et d'élancement 2 à 3.

Les éprouvettes, maintenues à température constante, sont sollicitées en traction directe suivant une loi de déformation de la forme $q(t) = at^n$. L'essai est réalisé à plusieurs degrés de températures.

- **Retrait thermique empêché :**

L'essai de retrait empêché permet d'évaluer le comportement jusqu'à la rupture du matériau. Dans cet essai, un gradient de température est appliqué à une éprouvette cylindrique de 80 mm de haut et de 40 mm de diamètre, collé entre les plateaux d'une presse hydraulique, en maintenant sa déformation longitudinale nulle (Maia *et al.* 1999).

Ce retrait thermique empêché engendre dans le matériau des contraintes de traction pour une descente en température à vitesse constante qui peuvent être comparées à la résistance à la rupture en traction directe de l'éprouvette. La vitesse doit cependant être suffisamment faible pour que les conditions restent uniformes au sein de l'éprouvette (en général -10°C/heure).

Les caractéristiques retenues sont :

- la contrainte à la rupture.
- la température à la rupture (en général autour de -50°C)
- la température $T_{1,0MP}$ pour laquelle la contrainte atteint 1,0 MPa.

- **Essai de relaxation :**

Pour résister à la fissuration thermique, un enrobé doit garder un module de rigidité suffisamment faible et relaxer les contraintes : ces caractéristiques sont obtenues à partir de l'essai de relaxation. Après avoir soumis l'éprouvette à une rampe rapide de déformation en traction, la déformation axiale ϵ_0 est maintenue constante, tandis que l'on mesure, à température constante, la contrainte

$$\frac{\Delta \sigma (T)}{\Delta T}$$

I.2.3. Propagation des fissures vers la couche de roulement :

La remontée d'une fissure existante, au travers de la couche de roulement, est le résultat de mouvements des lèvres de la fissure qui sont transférés à la base de la couche de surface.

Afin d'identifier correctement le problème de la remontée de fissure, il est bien nécessaire d'identifier les différents paramètres qui peuvent causer ces mouvements.

Les trois types de chargement qui provoquent des mouvements des lèvres de la fissure

- **Trafic** : Les véhicules qui passent au droit de la fissure ou à proximité induisent des mouvements horizontaux et verticaux de la fissure.
- **Variation de température** : Le changement de température entre jour-nuit, hiver-été provoque des dilatations et contractions dans la chaussée. Ces mouvements alternent entre l'ouverture et fermeture de la fissure.

Sous l'effet du froid, la pénétration du gel s'effectue graduellement dans les sols en partant du haut vers le bas (voir figure 18). Ce gel endommage la structure. Dans certaines conditions défavorables, l'eau contenue dans les sols non gelés peut être aspirée vers la zone de gel. Ce pompage de l'eau de la nappe phréatique engendre alors la formation de lentilles de glace qui se traduit par un soulèvement de la chaussée.

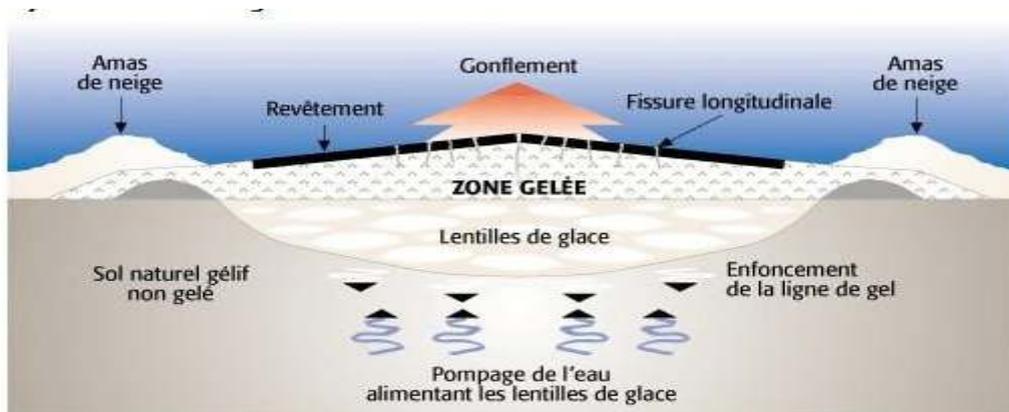


Figure 18. Effet du gel et du dégel sur une route (Gonflement au gel)

À cause de leur taille, ces lentilles peuvent soulever la chaussée jusqu'à 20 cm. Les soulèvements sont souvent inégaux, ce qui explique les creux et les bosses qui sont plus importants à la fin de l'hiver quand la profondeur du gel est au maximum.

Ils ont aussi pour effet de faire plier le revêtement, provoquant l'apparition de fissures de gel plus ou moins longitudinales. De plus, comme tout autre matériau, l'enrobé durcit, se fragilise et se contracte sous l'effet du froid. En rétrécissant sur de grandes longueurs, le revêtement est alors soumis à des efforts de tension qui vont le faire casser, produisant ainsi des fissures transversales.

La chaussée n'est pas au bout de ses peines, car arrive ensuite le dégel printanier qui se fait aussi du haut vers le bas. L'eau provenant de la fonte de la neige en surface et de la fonte des lentilles de glace à l'intérieur se retrouve en quantité importante dans la couche de sol dégelé.

Cette eau est alors emprisonnée dans le sol à cause de la couche gelée du dessous qui est étanche (voir figure 19)

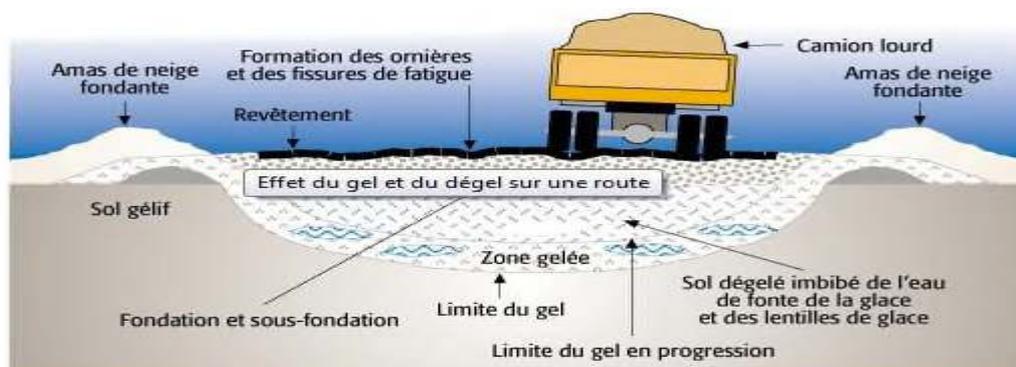


Figure 19. Effet du gel et du dégel sur une route (Affaissement au dégel)

La chaussée ne présente alors que de 30 à 70 % de sa résistance normale en été. C'est pour cette raison que des restrictions de charges sont imposées aux véhicules lourds afin de limiter les dommages en période de dégel.

Ces dommages contribuent à la formation graduelle d'ornières, de fissures de fatigue dans les pistes de roues et parfois de nids-de-poule.

Remarquons que les soulèvements dus au gel se résorbent au dégel. Toutefois, la chaussée ne reprend pas nécessairement sa position initiale, ce qui altère l'uni, donc le confort de roulement.

La chaussée se draine durant l'été et les cycles se répètent chaque année, causant davantage de détériorations. Son endommagement s'accélère avec le temps, car l'apparition de petits défauts crée des zones de faiblesses supplémentaires qui laisseront pénétrer plus d'eau, qui s'aggraveront et se propageront plus rapidement d'une fois à l'autre. Ainsi, même pour une chaussée, la vie dans le nord n'est pas de tout repos.

Variation de teneur en eau du sol : La variation de teneur en eau du sol se traduit par un changement de la portance du sol qui se répercute aussitôt sur la fissure par une ouverture ou une fermeture.

Les trois mouvements possibles des lèvres de fissure sont classés selon un schéma conventionnel de [Irwin, 1957] [21] (Voir figure 20)

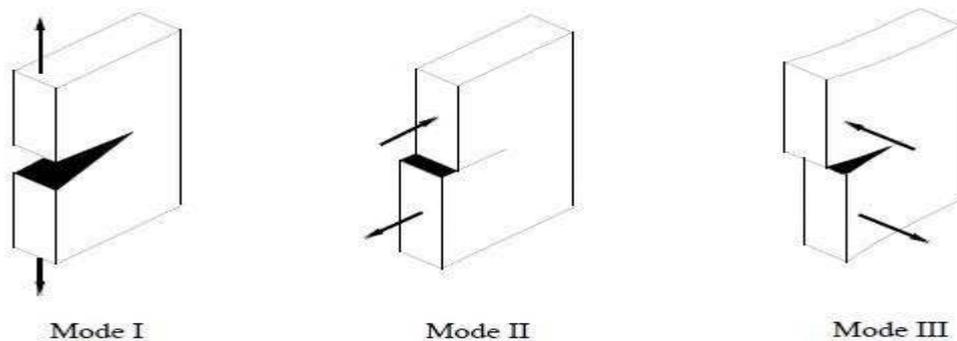


Figure 20. Mode I : ouverture, Mode II : Cisaillement, Mode III : Déchirement

Dans la chaussée, ces trois types de mouvements vont causer la rupture de la couche de surface selon une combinaison comme suit (cf. figure 21) [Vanelstraete et Francken, 1997] [22] Et [Colombier, 1989]) [23] :



Figure 21. Mode I : Retrait thermique ; Mode I+II : Passage des charges de véhicule

I.2.4. Classification des routes :

Définitions :

La route est une voie de communication qui permet de relier tous les points d'un territoire, elle assure la liaison et la continuité des transports entre les autres voies de communication.

Classification des routes :

a) Chemins communaux :

Dépendant de la commune. On distingue 2 types, l'un appelé chemin rural : et qui par définition assure la liaison, entre habitations rurales et les propriétés agricoles. L'autre appelé chemin urbain et qui par définition est la voie à l'intérieur de l'agglomération urbaine.

b) Chemins nationaux :

Une route nationale est, principalement dans plusieurs pays d'Afrique, d'Amérique ou d'Europe, une route importante qui traverse tout ou une partie du pays.

Sa construction et son entretien relèvent de la responsabilité du ministère des travaux publics.

c) Chemins de wilaya :

Sa construction et son entretien relevant de la responsabilité de la wilaya.

d) Les autoroutes :

Une autoroute est une voie de communication routière à chaussées séparées, réservée à la circulation à vitesse élevée des véhicules motorisés (automobiles, motos, poids lourds). Elle ne comporte aucun croisement à niveau et les deux sens de circulation sont séparés par un terre-plein central ou une glissière de sécurité, délimités par une bande d'arrêt d'urgence (BAU) et est accessible grâce à des points aménagés à cet effet¹ appelé échangeur, qui permet de raccorder une autre autoroute.

Catégorie des routes :

a- catégorie exceptionnelle d'une vitesse $V = 120 \text{ km/h}$: c'est une route avec deux chaussées séparées.

b- Voirie primaire d'une vitesse $V = 100 \text{ Km/h}$: c'est un tracé en terrain facile et peu accidenté avec quelques agglomérations croisements.

c- Voirie secondaire d'une vitesse $V = 80 \text{ Km/h}$: c'est une voirie qui est développée en terrain accidenté ou vallonné.

d- Voirie tertiaire d'une vitesse $V = 40 \text{ Km/h}$ à 60 Km/h : c'est une voirie qui présente des sections très difficiles, et dont le relief ne permet pas de réaliser une route.

I.3 Conclusion :

En conclusion dans ce chapitre, on a revis les différentes chaussées, leur constitution, leur résistance ainsi que les éventuelles dégradations aussi vu leur classification dans différents pays ainsi que les types de chaussées réaliser en Algérie.

CHAPITRE II : LES BETONS BITUMINEUX

II.1.Introduction :

Dans ce chapitre nous allons définir les enrobés bitumineux. Tout d'abord nous présentons brièvement quelques généralités sur l'enrobé bitumineux et ses composants (bitume et granulats) avec les caractéristiques appropriés de chacun d'eux.et quelques types de bétons bitumineux utilisés dans la couche de roulement.

Ensuite, nous étudions la formulation de l'enrobé en considérant les paramètres suivant : la teneur du bitume, la dureté du bitume et la grosseur des granulats, qui ont des influences sur la compacité, la mise en œuvre et la durabilité..., ainsi que les principaux essais de caractérisation selon les normes pour obtenir un enrobé selon le choix désiré.

II.2.Les bétons bitumineux :

Béton bitumineux est un enrobé riche en bitume constitué d'un mélange de granulats (sable, gravier et fines), utilisé principalement pour les couches de roulement, c'est-à-dire pour les couches supérieures de la chaussée. Les bétons bitumineux se classent en fonction de leur granulométrie. Ils sont toujours posés sur une couche de base en matériaux hydrocarbonés ou traités au liant hydraulique ou sur une couche de liaison en enrobés pour les couches minces.[1]

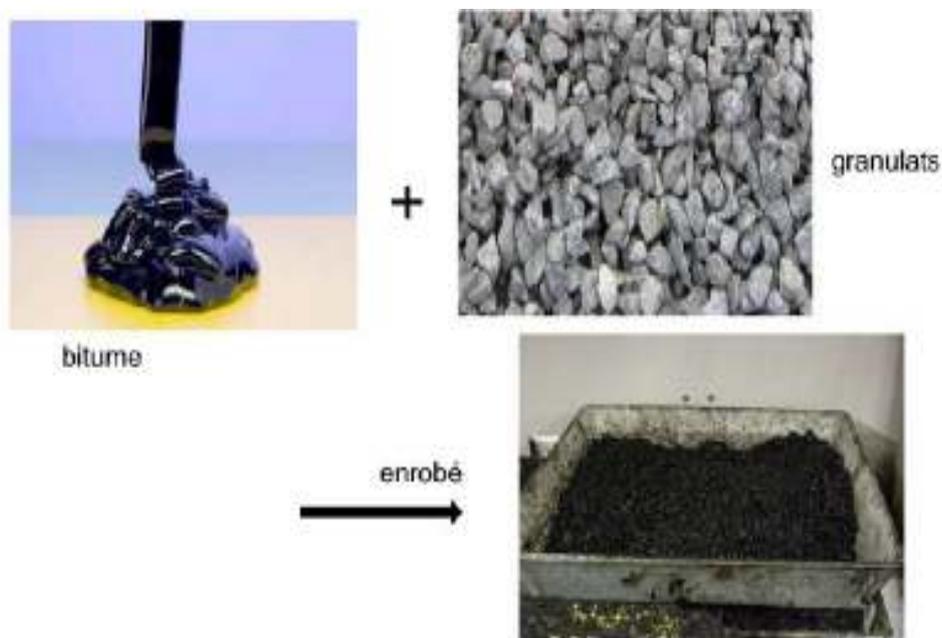


Figure 22. Composition de béton bitumineux [1]

II.3. Les types des bétons bitumineux :

On distingue de nombreux types de béton bitumineux, chacun avec ses caractéristiques et les utilisations propres : [3]

- **Le béton bitumineux mince (BBM)** : possède une granulométrie de 0/10 ou 0/14. Ce béton bitumineux est facilement compactable et parfaitement imperméable. Principalement utilisé pour les parkings ou les trottoirs, son épaisseur varie de 2.5 à 5 cm.
- **Le béton bitumineux très mince (BBTM)** : c'est sans doute l'enrobé le plus intéressant en termes de rapport qualité-prix. En effet, il dispose d'une très bonne durée de vie ainsi que d'une facilité de mise en œuvre. Quelle que soit la granulométrie (0/10 ou 0/6), le BBTM dispose d'une épaisseur comprise entre 1.5 et 3 cm.
- **Le béton bitumineux ultra mince (BBUM)** : destiné à une couche de roulement, c'est-à-dire en contact direct avec les pneumatiques des véhicules, il est tout indiqué pour un parking par exemple. Son épaisseur varie de 1 à 1.5 cm.
- **Le béton bitumineux souple (BBS)** : comme son nom l'indique, ce béton est constitué d'un bitume assez mou pour obtenir un enrobé déformable. Cependant, il possède une faible résistance à l'orniérage.
- **Le béton bitumineux drainant (BBDr)** : l'avantage principal de ce type de béton bitumineux réside dans son excellente adhérence, aussi bien par temps de pluie ou de forte chaleur. De plus, il réduit le bruit de roulement. Pour une allée de jardin, il est alors parfaitement adapté.
- **Le béton bitumineux semi-grenu (BBSG)** : celui-ci est l'enrobé à chaud de référence. En effet, il répond à de nombreux besoins (trottoir, allée...) et est très adapté pour un trafic aussi bien moyen que lourd. Son épaisseur varie de 3 à 9 cm, suivant la granulométrie.
- **Le béton bitumineux à modules élevés (BBME)** : ce béton bitumineux fait partie des enrobés structurants. Il possède une excellente rigidité, une durée de vie importante et une bonne résistance à l'orniérage. Son épaisseur peut varier de 4 à 9 cm par couche.

D'autres aspects seront étudiés avant le choix du BB : le climat de la région sera pris en compte pour le choix du futur revêtement [1] :

- le bitume utilisé peut se ramollir si la chaleur est trop forte.
- le béton peut durcir par trop basses températures.
- la pluie ou la neige tassée sont également des critères à prendre en compte, car le BB peut geler et favoriser la formation de verglas.

II.4. Composition de béton bitumineux :

Le béton bitumineux est composé de différents éléments :

- Gravillons.
- Sable.
- Filer.
- Bitume utilisé comme liant.

Le béton bitumineux crée généralement la couche supérieure des chaussées appelée couche de surface. [1]

II.4.1.Liants hydrocarbonés :

Les liants hydrocarbonés est d'une manière générale un matériau adhésif (un liant) contenant du bitume, du goudron ou les deux, cet élément agrégé avec des granulats fournit des « matériaux enrobé », la masse volumique du bitume est prise égale à 1.03 t/m³, également qui jouent un rôle important dans la technique routière moderne, sont connus et utilisés depuis longtemps.

On distingue trois familles de liants hydrocarbonés : [1]

- **Asphalte** : roche calcaire imprégnée de bitume. Expression qui désigne le revêtement des routes.
- **Bitume** : composé de carbone et d'hydrogène, d'où le nom d'hydrocarbure. Il peut être d'origine naturel ou provenir de la distillation du pétrole.
- **Goudron** : Produit provenant de la distillation de diverses substances : charbon, bois, tourbe. Il est moins soluble que le bitume.

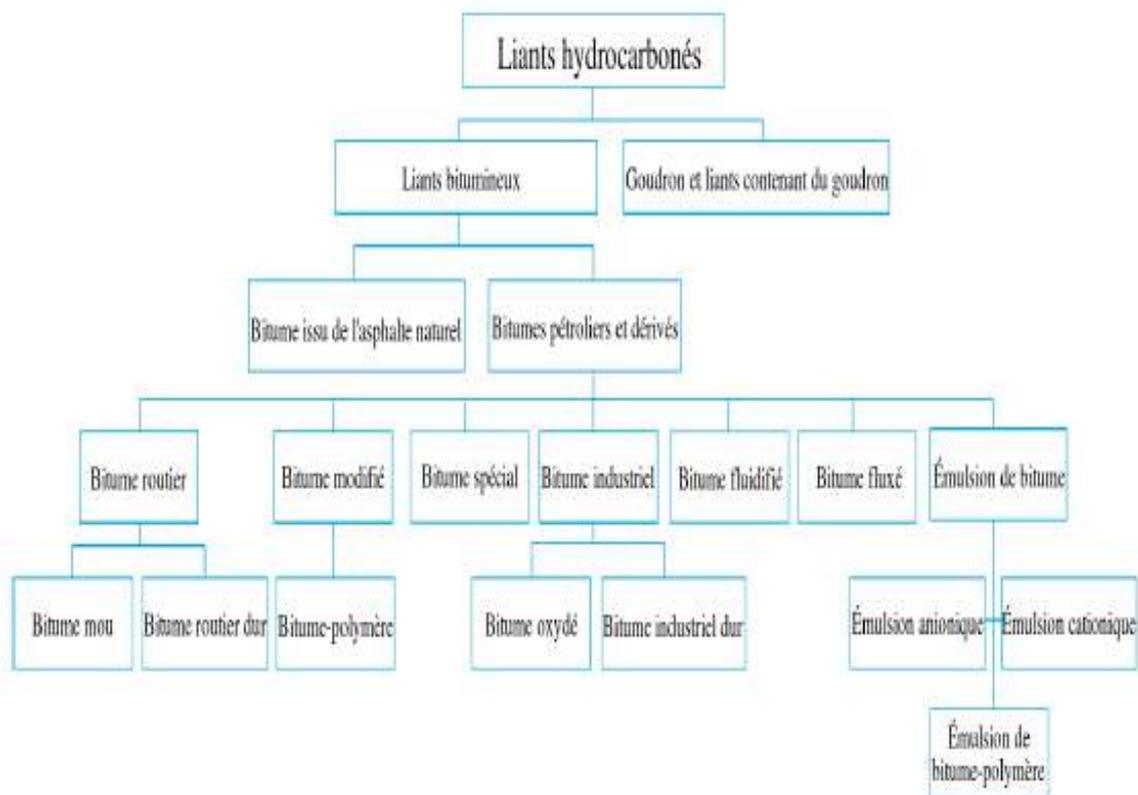


Figure 23. Types de Liants hydrocarbonés [1]

II.4.2.Bitume :

Les bitumes sont des sous-produits d'hydrocarbures lourds, résidus noirs de pétrole brut obtenus soit par distillation naturelle, soit par distillation en raffinerie. Les bitumes dedistillation directe sont utilisés pour la confection d'enrobés à chaud. [1]

- Historique :

On distinguera, très schématiquement, les périodes suivantes :

- De 1900 à 1930 : Goudron de houille.
- De 1930 à 1950 : Emulsions de bitumes.
- Les années 70 : les bitumes polymères.
- Les années 80 : les liants modifiés et les additifs.
- Les années 90 : les bitumes spéciaux.

- Composition du bitume :

A température ordinaire, les bitumes se présentent comme des corps visqueux ou des solides susceptibles de fluer sous leurs poids propre. [1]

La séparation du bitume par solvant permet de séparer les bitumes en **asphaltènes** et en **maltènes** : les asphaltènes représentent 10 à 30% des bitumes, ils constituent la partie insoluble des bitumes dans les solvants de type n-alcanes et se présentent sous la forme d'un solide dur friable, brun-noir qui contribue largement à la couleur noir du bitume. Les maltènes, partie soluble correspondent à l'association des résines et des huiles ; les résines ont un rôle essentiel vis-à-vis la stabilité colloïdale du bitume, les huiles représentent 40% à 60% du bitume. [1]

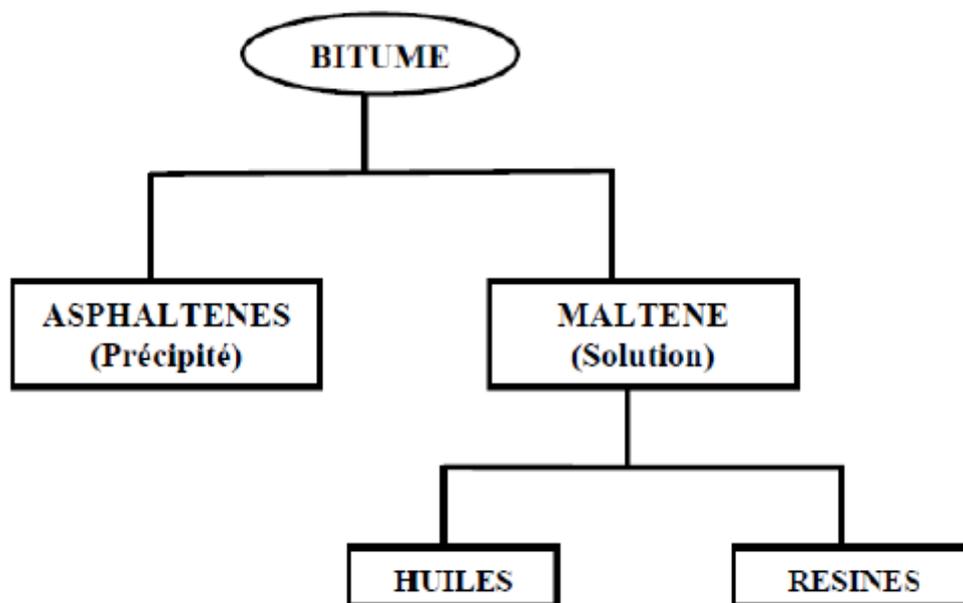


Figure 24. Séparation d'un bitume en asphaltènes, résines et huiles [1]

- **Différents types de bitume :**

Le bitume utilisé dans les enrobés confère des propriétés viscoélastiques aux revêtements de chaussées. Un bitume ayant les caractéristiques appropriées assure des performances élevées sur le plan de la résistance à l'orniérage, à la fissuration thermique, à la fissuration de fatigue et l'arrachement ; ses caractéristiques contribuent à la réalisation de revêtements sécuritaires, durables et économiques.

On rencontre les types suivants de liants à base de bitume :

• **Les bitumes purs :**

Ils sont obtenus par raffinage de bruts pétroliers et ne comportent aucun ajout. D'après leur mode de fabrication, on peut obtenir des bitumes dont la consistance est variable. Les conditions climatiques et le type de projet déterminent le choix du type approprié. On distingue ainsi cinq principaux types de bitume allant du plus dur aux plus mous identifiés par les classes : 20/30 ; 35/50 ; 50/70 ; 70/100 et 180/220.

• **Les cut-backs :**

Ce sont des bitumes fluidifiés obtenus par un mélange de bitume pur soit avec des fractions légères de distillation du pétrole telles que le kérosène, soit avec des huiles légères provenant de la distillation de la houille afin de réduire leur viscosité. À leur exposition aux conditions atmosphériques, les solvants s'évaporent et laissent le bitume semi-dur remplir sa fonction. On utilise les cut-backs pour des enrobés pour couches de scellement et couches d'accrochage.

On distingue ainsi :

- **Les cut-backs à prise rapide (RC) :** Cut-backs composés d'un ciment bitumineux et d'un diluant de haute volatilité comme l'huile de naphte ou de gazoline.
- **Les cut-backs à prise moyenne (MC) :** Cut-backs composés d'un ciment bitumineux et d'un diluant de volatilité moyenne comme le kérosène.
- **Les cut-backs à prise lente (SC) :** Cut-backs composés d'un ciment bitumineux et d'huiles de volatilité lente.

• **Les bitumes fluxés :**

Ce sont des bitumes purs dont on a diminué la consistance par incorporation de produits provenant de la distillation du pétrole pour au moins cinquante pour cent des ajouts, et de la distillation de goudron de houille.

• **Les bitumes composés :**

Mélanges comportant au moins cinquante pour cent de bitume pur. On utilise comme additifs du brai de houille ou du goudron de houille.

• **Les bitumes modifiés :**

Ce sont des bitumes composés avec ajout de substances ; le plus souvent macromoléculaires autres que les fines minérales ou additifs d'adhésivité.

- **Les émulsions de bitume :**

Les émulsions de bitume sont des dispersions de fines particules de bitume dans l'eau au moyen généralement d'un agent émulsif qui est un type de savon résineux qui stabilise le produit. L'une des particularités des émulsions est qu'ils éliminent les dangers d'incendie et l'effet toxique ; ce qui n'est pas le cas pour les cut-backs.

On distingue également plusieurs types d'émulsions suivant la teneur en agent émulsif :

- Les émulsions à prise rapide (RS).
- Les émulsions à prise moyenne (MS).
- Les émulsions à prise lente.

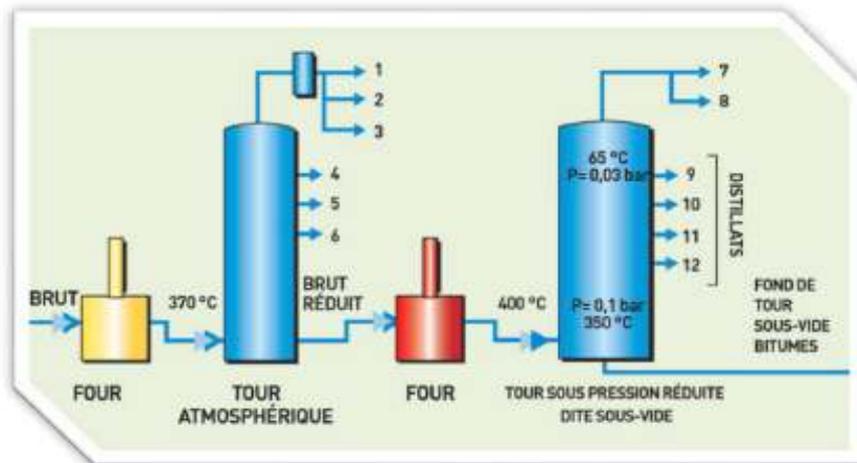
- **Origine du bitume :**

Tous les bitumes sont des produits du pétrole brut où ils se trouvent en solution. Ils sont le résultat de l'élimination des huiles servant de solvant par évaporation ou distillation du pétrole brut. Sachant que de tels processus pourraient se produire dans la nature, au niveau des couches souterraines, les bitumes proviennent en conséquence de deux sources : naturelle ou industrielle. [4]

- Origine naturelle : La production mondiale est très faible puisqu'elle ne dépasse pas 200 milles tonnes.
- Origine industrielle.

Ce dernier compose deux parties :

- **Distillation direct** : Distillation atmosphérique : Ce mode de raffinage consiste à chauffer en continu par passage dans un four, le brut préalablement décanté et dessalé. Ce brut, porté à une température voisine de 340 °C, est envoyé dans une colonne de fractionnement maintenue à la pression atmosphérique. Le produit récupéré en fond de tour est le brut réduit. [4]
- **Distillation sous vide** : A ce stade, le brut réduit provenant de la distillation atmosphérique est, après réchauffage aux alentours de 400 °C, envoyé dans une colonne où règne une pression réduite à quelques dizaines d'hPa². Il est possible, dans ce type d'unité, de fabriquer directement toutes les classes de bitumes du 20/30 au 160/220. [4]



- | | | |
|-------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 1. Gaz | 5. Carburateur | 9. Gasoil sous -vide |
| 2. Essence légère | 6. Gasoil | 10. 1 ^{er} Sous -vide |
| 3. Essence | 7. Vers éjecteurs de vapeur | 11. 2 ^e Sous -vide |
| 4. White-spirit | 8. Gasoil entraîné | 12. 3 ^e Sous -vide |

Figure 25. Fabrication des bitumes par raffinage du pétrole. [4]

- **Propriétés mécaniques et rhéologiques du bitume :**

Le bitume confère à l'enrobé sa flexibilité et sa capacité à résister à certaines dégradations causées par plusieurs facteurs dont le trafic, les conditions climatiques du site, etc. A température de service élevée, le bitume doit demeurer suffisamment visqueux afin d'éviter que ne se produise le phénomène d'orniérage. A l'opposé, à basse température, le bitume doit conserver une certaine élasticité pour éviter le phénomène de fissuration par retrait thermique et la fragilisation de l'enrobé. Aux températures intermédiaires, il doit être résistant à la fatigue sous l'effet du trafic répété. [5]

- **Essais de caractérisation des bitumes :**

- **Essai de pénétrabilité à l'aiguille (NF T66 – 004) :**

Définition :

La pénétrabilité est exprimée étant la profondeur, en dixième de millimètre, correspondant à la pénétration verticale d'une aiguille de référence dans un échantillon d'essai du matériau, dans des conditions prescrites de température, de charge et de durée d'application de la charge.

Principe d'essai :

Mesurer la pénétration d'une aiguille de référence dans l'échantillon d'essai conditionné (bitume). Les conditions opératoires qui s'appliquent aux pénétrations inférieures ou égales à (500 x 0,1mm), sont : Température 25 °C, Charge appliquée 100g, Durée d'application de la charge 5s. Pour les pénétrations supérieures à cette limite, la température d'essai doit être de 15 °C, alors que la charge appliquée et sa durée d'application restent inchangées.

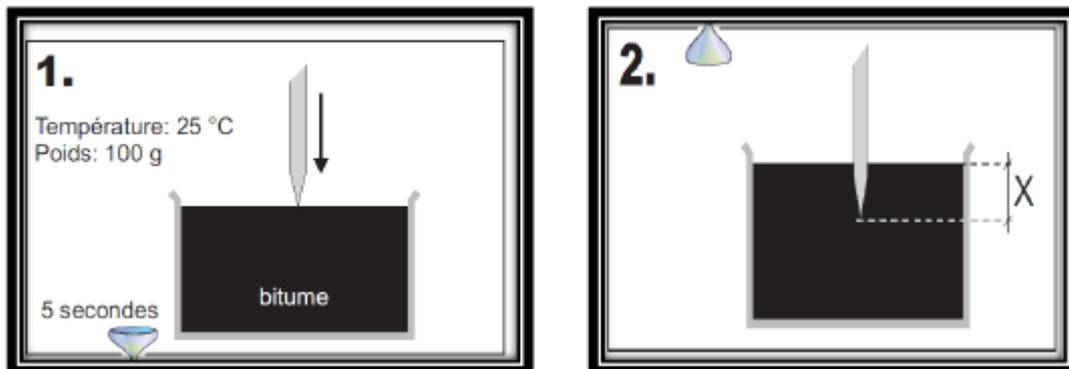


Figure26.Principe de l'essai de pénétrabilité. [6]

- **Essai de point de ramollissement bille et anneau (NF T66 – 008) :**

Définition :

Température de ramollissement c'est à laquelle le matériau dans les conditions de référence de l'essai atteint une certaine consistance. Donc cet essai concerne à déterminer la température du ramollissement des bitumes et des liants bitumineux, dans la plage de températures de 30 °C à 200 °C.

Principe d'essai :

Deux disques horizontaux de bitume, moulés dans des anneaux de laiton à épaulement, sont chauffés dans un bain liquide avec un taux d'élévation de la température contrôlé, alors que chacun soutient une bille d'acier. La température de ramollissement notée doit correspondre à la moyenne des températures auxquelles les deux disques se ramollissent suffisamment pour permettre à chaque bille, enveloppée de liant bitumineux, de descendre d'une hauteur de 25mm.

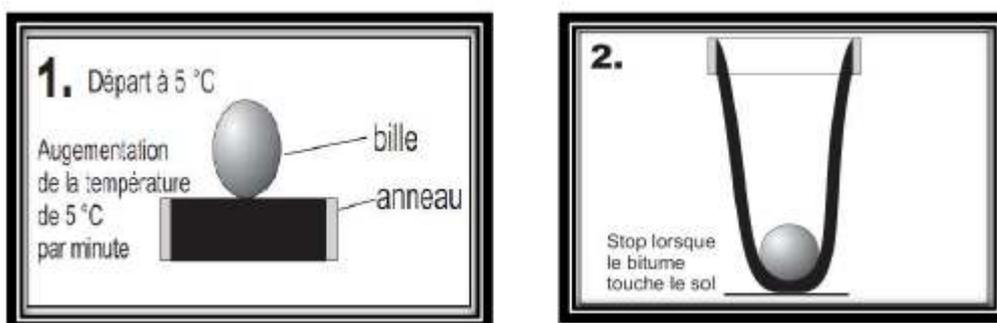


Figure 27. Principe de ramollissement. [6]

II.4.3.Granulat :

Les granulats proviennent de carrières où les roches massives sont concassées, ou bien sont d'origine alluvionnaire. [4]

Les granulats sont répartis en différentes classes granulaires normées qui sont définies par le diamètre minimal et le diamètre maximal du granulat.

L'intégration des granulats dans le mélange bitumineux nécessite de connaître différentes caractéristiques :

- Celles qui tiennent à la nature de la roche d'origine (dureté, résistance au polissage, résistance aux chocs).
- Celles qui résultent de la fabrication des granulats (propreté, forme, granularité, angularité, homogénéité).

En outre les essais mécaniques permettent d'établir un classement selon :

- La résistance à la fragmentation par les essais Los Angeles.
- La résistance à l'usure et à l'attrition par l'essai Micro -Deval humide. [4]

Types des granulats et leur classification :

Les granulats utilisés pour composer un béton sont soit d'origine naturelle, artificielle [4]

- **Granulats Naturels :**

Les granulats naturels d'origine minérale sont issus de roches meubles (alluvions) ou de roches massives, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage). Ceux issus des gisements alluvionnaires, dits roulés, dont la forme a été acquise par érosion. Ce sont surtout des dépôts alluvionnaires trouvés dans un lit de rivière ou en mer éventuellement. [4]

Géologiquement parlant, les granulats naturels sont de nature :

- Éruptives : granites, basaltes porphyres.
- Sédimentaires : calcaires, grès, quartzites.
- Métamorphiques : gneiss, amphibolites.

- **Granulats Artificiels :**

Les granulats artificiels sont soit des sous-produits de l'industrie sidérurgique, soit fabriqués en vue d'obtenir un produit particulier. Ils proviennent de la transformation à la fois thermique et mécanique des roches ou des minerais. Les plus employés sont le laitier cristallisé concassé, obtenu par refroidissement lent à l'air ; le laitier granulé de haut fourneau, obtenu

par refroidissement rapide dans l'eau et les granulats allégés par expansion ou frittage (l'argile ou le schiste expansés). Les granulats artificiels peuvent être employés pour réaliser des bétons à usage spécifique. [4]

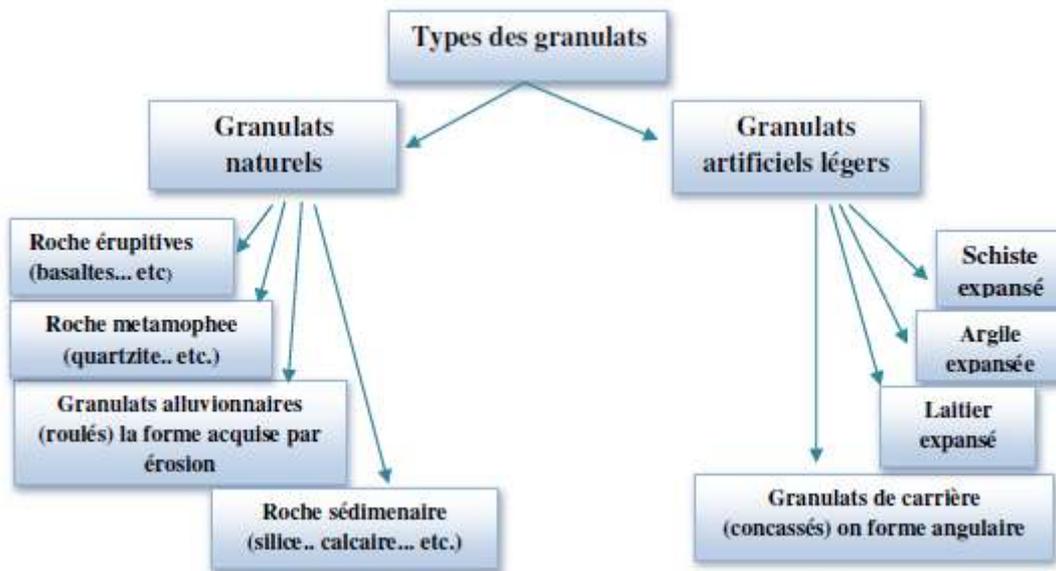


Figure 28. Les deux familles de granulats [4]

- Généralités sur les granulats routiers :

D'une manière générale, les granulats destinés à la fabrication des bétons bitumineux peuvent avoir des origines différentes : [7]

- Carrières de roches massives.
- Carrières de matériaux alluvionnaires (ballastières).

La fabrication des granulats est assurée par des installations de concassage-criblage dont la taille et la nature des différents composants varient selon l'importance des chantiers et la nature des matériaux bruts à traiter. [7]

Les équipements standards communs à toutes les installations de concassage-criblage sont :

- Trémies d'alimentation et trémies tampon.
- Concasseurs primaires à mâchoires.
- Des concasseurs giratoires à cône (secondaire ou tertiaire).
- Des cribles vibrants.
- Des convoyeurs ou sauterelles.

L'assemblage et le nombre de ces différents équipements est défini par la nature et les caractéristiques des granulats à produire, la nature du matériau brut à traiter. [7]

Les stations de concassage-criblage sont souvent caractérisées par leur capacité de production exprimée en Tonne/heure, toutes catégories confondues. [7]

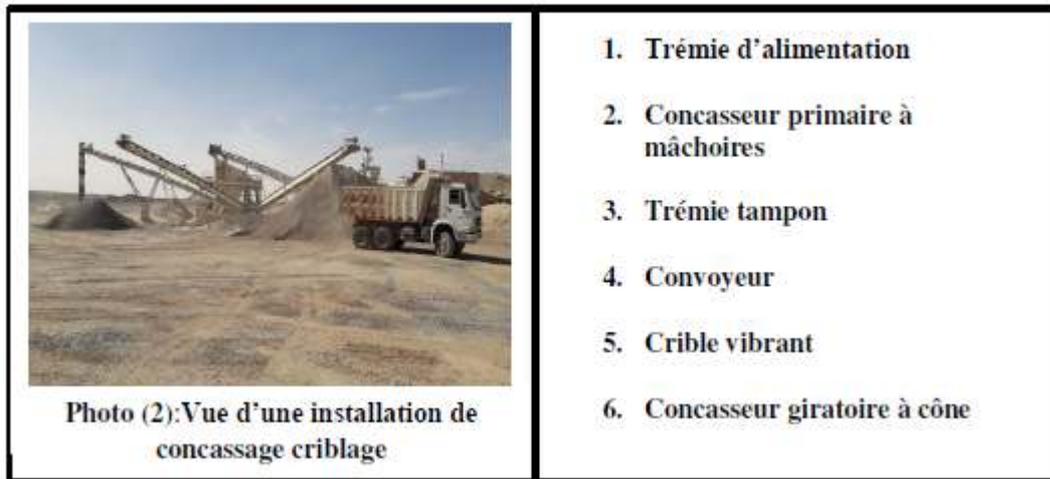


Photo (2): Vue d'une installation de concassage criblage

Les installations de production de granulats concassés varient en fonction de la nature de la roche exploitée et du débouché commercial des granulats produits qui couvre une large gamme : 0/3, 3/8, 8/15, 15/25, 25/40 et les tout-venants de concassages 0/25, 0/40, 0/60. [7]

- Caractéristiques et spécifications des granulats :

Le comportement mécanique et la rhéologie des bétons bitumineux dépendent étroitement des caractéristiques physiques et mécaniques des granulats qui les constituent. On distingue deux types de caractéristiques : [7]

- **Caractéristiques intrinsèques** : elles sont liées à la nature minéralogique de la roche ou des matériaux bruts ayant servi à la fabrication des granulats. On citera l'exemple de la dureté.
- **Caractéristiques extrinsèques** : elles sont liées au mode de fabrication des granulats (granularité, propreté, forme et angularité).

- Dureté :

Elle est caractérisée par deux principaux coefficients : [7]

- **Coefficient Los Angeles (LA) :**

Il caractérise la résistance aux chocs des granulats. L'essai consiste à faire subir à un échantillon de granulats une série de chocs avec des boulets en acier de nuance Z 30 C13, de 47 mm de diamètre et d'un poids de 420 à 445 g, et de déterminer la quantité de fines (éléments <1,6 mm) qui se sont produites au cours de l'essai. Le coefficient Los Angeles est calculé selon la formule suivante :

$$LA = (m / M) \times 100 \text{ où}$$

m = masse des fines produites au cours de l'essai
M = masse de l'échantillon avant essai (M=5000g)

- **Coefficient micro Deval humide (MDE) :**

Il caractérise la résistance à l'usure des granulats. L'essai consiste à faire subir à un échantillon de granulat de masse $M= 500$ g, un total de 12 000 tours dans un cylindre en acier en présence d'une charge abrasive et de l'eau. La charge abrasive est constituée de 2 à 4 Kg de billes de diamètre 10 mm, en acier inox de nuance Z 30 C13. Après essai, on procède à la détermination de la masse des fines (éléments $< 1,6$ mm) qui se sont produites au cours de l'essai. Le coefficient MDE est calculé par la formule suivante :

$$\text{MDE} = (m/M) \times 100 \text{ où}$$

m= masse des fines produites au cours de l'essai
M= masse initiale de l'échantillon (M= 500 g)

- **Forme :**

La forme d'un granulat est caractérisée par le coefficient d'aplatissement (CA) qui représente le pourcentage d'éléments tels que $G/E > 1,58$ avec : [7]

G : grosseur du granulat
E : épaisseur du granulat

En pratique, l'essai consiste à fractionner un échantillon du matériau à tester au moyen d'une série de tamis et de passer le retenu de chaque tamis dans une grille à fentes parallèles. On détermine ensuite la masse des passants par chaque grille. Le coefficient d'aplatissement est alors calculé par la formule :

$$\text{CA} = \Sigma m_i / M \text{ où}$$

m_i = masse des passant à la grille i
M= masse de l'échantillon soumis à l'essai

- **Propreté :**

Elle est appréciée par les essais d'équivalent de sable : [7]

- **L'essai d'équivalent de sable :**

Consiste à faire flocculer les particules fines contenues dans un échantillon de sable au moyen d'une solution lavante et de mesurer, après un temps de repos, la hauteur du sable sédimenté (h) et la hauteur totale sédimentée du sable et du flocculat (h'). L'équivalent de sable est donné par la formule :

$$\text{ES} = (h / h') \times 100$$

- **Granularité :**

Il s'agit de définir la classe granulaire du granulat en procédant à l'essai d'analyse granulométrique par tamisage. L'essai consiste à fractionner le matériau à tester au moyen d'une série de tamis et de déterminer par suite les pourcentages cumulés des passants à chaque tamis. [7]

Un granulat est dit de classe granulaire d/D lorsqu'il satisfait aux conditions suivantes :

- Le refus au tamis d'ouverture D est inférieur à x %
- Le tamisât au tamis d'ouverture d est inférieur à x %
- Le tamisât au tamis d'ouverture d/2 est inférieur à y %

Avec :

- $x = 10$ si $D/d \geq 2$ et $x = 15$ si $D/d < 2$
- $y = 3$ %

Pour les sables 0/D, la dénomination d'une telle classe est valable si le refus au tamis d'ouverture D est inférieur à 10 %.

- **Angularité :**

Elle définit le pourcentage d'éléments concassés contenus dans un matériau donné. Elle est caractérisée par l'indice de concassage ou le rapport de concassage. [7]

L'indice de concassage (IC) d'un matériau d/D est égal au pourcentage de passants au tamis d'ouverture D contenus dans le matériau brut utilisé pour sa fabrication.

Le rapport de concassage (RC) d'un matériau d1/D1, fabriqué à partir d'un matériau d2/D2 est égal au rapport d2/D1 un matériau est dit concassé pur lorsque son rapport de concassage est supérieur à 4. [7]

II.5.COMPOSANTS MINERAUX :

Les composants minéraux constituent environ 95% de la masse d'un enrobé bitumineux (80-85% du volume). Cette prépondérance des matériaux granulaires dans le mélange a une influence sur les caractéristiques mécaniques et sur les performances du matériau bitumineux. [1]

Les granulats sont l'ensemble des sables, gravillons ou pierres concassées qui proviennent du creusement d'un gisement ou d'une extraction à partir d'une roche mère compacte. Les granulats sont utilisés soit comme matériaux en vrac, soit après transformations (criblage, concassage, tamisage, dépoussiérage, lavage...). Les granulats sont désignés par d et D, qui représentent respectivement la plus petite et la plus grande des dimensions demandées. [1]

II.6.FORMULATION DES BETONS BITUMINEUX :

Formuler un enrobé hydrocarboné est déterminer le meilleur mélange de granulats de diverses dimensions et d'un liant (le bitume) permettant d'atteindre des performances visées :impermeabilité, rugosité, résistance mécanique (à l'orniérage et la fatigue). Donc l'objectif de formulation est de déterminer un mélange de différentes classes granulaires qui constitue un squelette granulaire ayant un pourcentage de vides ni trop faible ni trop élevé. Un faible pourcentage de vide empêche l'introduction d'une quantité du liant suffisante pour enrober l'ensemble des grains sans saturer le mélange, et un pourcentage de vides élevé favorise le développement des déformations permanentes par post-compaction. [1]

Une étude de formulation d'un enrobé bitumineux comporte deux phases principales, à savoir la composition granulométrique et le dosage en liant optimale à l'aide des résultats de l'essai Marshall. [1]

II.7. PARAMETRES INFLUENÇANT LE CHOIX D'UNE FORMULATION :

Les principaux caractères consistent à choisir les granulats, le liant et les ajouts utilisés pour la fabrication de l'enrobé. Ceci sur la base des considérations suivantes : [8]

- Trafic ; volume, pourcentage de poids lourds, charge par essieu.
- climat : pluviométrie, gel-dégel, température, ensoleillement.
- position de la couche : roulement, base, fondation liée.
- fonction de la couche : adhérence, perméabilité, bruit, ombrage, etc...

- Méthodologie de formulation en Algérie :

La formulation en Algérie est basée sur la vérification des caractéristiques des composants ainsi que sur les essais Duriez et Marshall en fonction des matériaux granulaires. On choisit une formule qui donne un mélange ayant la meilleure aptitude au compactage et qui pourrait donner une meilleure stabilité au mélange hydrocarboné. Les fractions granulaires sont choisies parmi les suivantes : 0/3, 3/8, 8/15, les caractéristiques des granulats sont représentés comme suit : [1]

• Fuseau granulométrique :

Passant Tamis (mm)	BB 0/14
20	/
14	94-100
10	72-84
6.3	50-66
2	28-40
0.08	7-10

Tableau 1. Fractions granulaires 0/14 des BB

• Déterminations de la teneur en bitume :

On appelle teneur en bitume la masse de liant sur la masse des granulats secs exprimé en pourcentage, pour cela on utilise la formule suivante : [1]

$$\text{teneur en liant} = \alpha \cdot k^5 \sqrt{\Sigma}$$

Avec :

k: module de richesse pouvant prendre les valeurs suivantes :

- 2 à 2,6 pour les graves bitumes (GB)
- 3,3 à 3,9 pour un béton bitumineux (BB)

α : coefficient correcteur destiné à tenir compte de la masse volumique des granulats,

D'où :

$$\alpha = 2,65 / \text{MVRg}$$

MVRg : Masses Volumiques réelles des agrégats

Σ : Surface spécifique du granulat calculée par la formule :

$$100.\Sigma = 0,25.G + 2,3.S + 12.s + 135.f$$

Avec :

G : pourcentage en poids des éléments de dimensions supérieur à 6,3 mm.

S : pourcentage en poids des éléments de dimensions comprises entre 6,3 et 0,315 mm.

s : pourcentage en poids des éléments de dimensions comprises entre 0,315 mm et 0,08 mm.

f : pourcentage en poids des éléments de dimensions inférieurs à 0,08 mm.

II.8.LA COMPACITE :

La compacité "C" est une conséquence directe de la formulation : [1]

$$C = 100 - \% \text{ vides}$$

Pour ce calcul, il faut connaître la densité apparente de l'éprouvette, la densité du bitume, la densité de chacun des agrégats, les pourcentages en poids de chacun des constituants rapportés à 100 (liant et filler compris).

Soit :

- γ_{app} : la densité apparente de l'éprouvette.
- γ_b : la densité du bitume.
- γ_{G1} : la densité de l'agrégat 1.
- $\gamma_{G2}, \gamma_{G3}, \dots$ celles des agrégats 2, 3... etc.
- P_b : le pourcentage en poids du bitume.
- $P_{G1}, P_{G2}, P_{G3} \dots$ ceux des agrégats.

Donc la densité réelle γ_{rel} du matériau enrobé est :

$$\gamma_{rel} = \frac{100}{(P_b / \gamma_b) + (P_{G1} / \gamma_{G1}) + (P_{G2} / \gamma_{G2}) + \dots}$$

Le pourcentage volumétrique des vides V_v de l'éprouvette est :

$$V_v = \frac{100(\gamma_{rel} - \gamma_{app})}{\gamma_{rel}}$$

La compacité **C** :

$$C = 100 - V_v$$

II.9. Les propriétés mécaniques des bétons bitumineux : [1]

Pour connaître les propriétés mécaniques d'un enrobé bitumineux, on fait un essai ou le plus souvent une série d'essais normalisés.

II.9.1. Essai Marshall (NF P98-251-2) :

L'essai Marshall est un essai destructif, effectué en laboratoire selon un mode opératoire bien précis. L'essai permet de déterminer pour une température et une énergie de compactage données le "pourcentage de vides", la "stabilité" et le "fluage" dits Marshall d'un mélange hydrocarboné à chaud.

- Domaine d'application :

L'essai s'applique aux mélanges hydrocarbonés à chaud fabriqués en laboratoire ou prélevés sur chantier (grave bitume, béton bitumineux, et autres mélanges hydrocarbonés à chaud).

- Principe de l'essai :

L'essai consiste à compacter des éprouvettes d'enrobés par choc dans un moule cylindrique de 101,6 mm de diamètre à l'aide de chocs (cinquante coups par face) produits par la chute d'une dame de poids normalisé tombant d'une hauteur bien définie selon un procédé opératoire déterminé, puis à les soumettre à un essai de compression suivant une génératrice dans des conditions bien définies. Sur les éprouvettes ainsi confectionnées, on détermine entre autre :

- La stabilité Marshall : C'est la résistance à l'écrasement de l'éprouvette à la température de 60°C.
- Le fluage Marshall : C'est l'affaissement de la même éprouvette au moment de la rupture.



Figure 29. Machine d'essai Marshall [9]

II.9.2.Essai Duriez (NF P98-251-1) :

- Domaine d'application :

L'essai Duriez est appliqué essentiellement aux matériaux denses ou demi-denses enrobés avec du bitume, dont les agrégats passent en totalité au tamis de 20 mm (maille carrée).

- Principe de l'essai :

Cet essai consiste à déterminer la résistance à la compression d'une éprouvette d'enrobé de poids et de section déterminés. Il permet également de définir la tenue en eau dans l'enrobé à partir du rapport des résistances à la compression après et avant immersion de l'éprouvette dans un bain d'eau thermostatique.

L'essai Duriez diffère de l'essai Marshall par deux caractéristiques importantes :

- Température de l'essai, qui est de 18°C au lieu de 60°C dans l'essai Marshall.
- Mode d'application de la contrainte, qui est diamétrale dans l'essai Marshall, elle est axiale dans l'essai Duriez.



Figure 30.Machine d'essai Duriez [10]

II.10.CONCLUSION :

Comme nous avons vu précédemment, le béton bitumineux est constitué de deux éléments principaux, les granulats et le bitume. La liaison entre ces deux composants est très complexe et pour formuler un enrobé convenable plusieurs critères sont à prendre en considération telle que le trafic, les conditions climatiques et les matériaux existants...etc.

Le mélange bitume-agrégat obtenu doit avoir :

- Suffisamment de bitume pour donner un pavage durable.
- Une stabilité suffisante pour satisfaire les exigences de trafic.
- Suffisamment de vides pour pallier aux phénomènes d'expansion liés aux propriétés spécifiques du bitume (dilatation thermique).
- Une maniabilité suffisante pour permettre une mise en place efficace du mélange.

Par ailleurs les essais de caractérisation et de contrôle des bétons bitumineux nécessitent du matériel spécifique et une technicité propre, surtout dans les régions où les conditions d'exploitation sont particulièrement sévères (à l'exemple des régions sahariennes : trafic intense des poids lourds et température élevée).

CHAPITRE III : NOTIONS SUR LES MATERIAUX GEOSYNTHETIQUE

III.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 100 ans)

III.2.Que sont les géo synthétiques ?[11] :

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, utilisé en contact avec le sol ou avec d'autres matériaux dans les domaines de la géotechnique et du génie civil.

Les polymères synthétiques sont employés depuis plus de 40 ans avec le sol, la roche ou autre matériau lié à la géotechnique, ou ce qui explique l'appellation géo synthétique qui signifie application du synthétique dans la géotechnique.

Les géo synthétique peuvent être produits à partir de différents polymères, polyester (PET) polyvinyle alcool (PVA), polypropylène (PP). Ces matériaux sont fortement résistants à la dégradation biologique et chimique, mais ne supportent pas les rayons ultraviolets contre lesquels ils sont protégés par le sol d'enrobage.

Les produits se distinguent par leurs propriétés géométriques en :

- Bandelettes, filaments
- Produits plans, avec des dimensions typiques de l'ordre de 3-5m de largeur et d'environ 50-300m de long, tandis que l'épaisseur de l'ordre de quelques millimètres ;
- Produits volumétriques, dans ce groupe, nous pouvons inclure principalement :

Les géo cellules, qui ont la troisième dimension (hauteur) dans la fourchette comprise entre environ 0,1 et 0,25 m ; très souvent ils sont fabriqués à partir de bandes qui sont localement connectées et une fois étirées les cellules 3D sont créés, par exemple, sous la forme de nid d'abeilles.

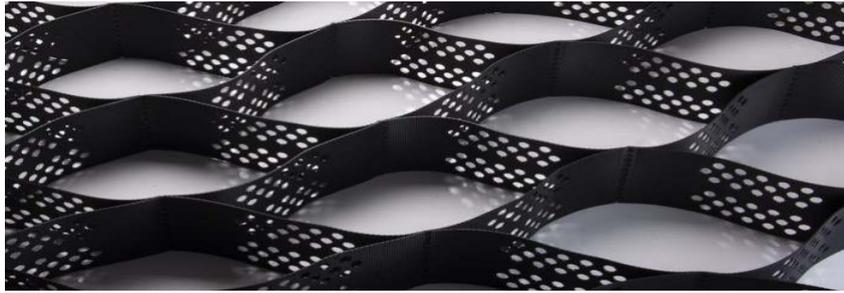


Figure 31. Géo cellules

De la classification ci-dessus les plus souvent utilisés sont les produits plans et parmi eux, il est possible de distinguer : les géotextiles, les géo membranes (membrane plane imperméable à partir de polymères d'épaisseur entre environ 0,5 et 3 mm), les géo grilles, les géo composites (produits créés par la combinaison de plus d'un géo synthétique).

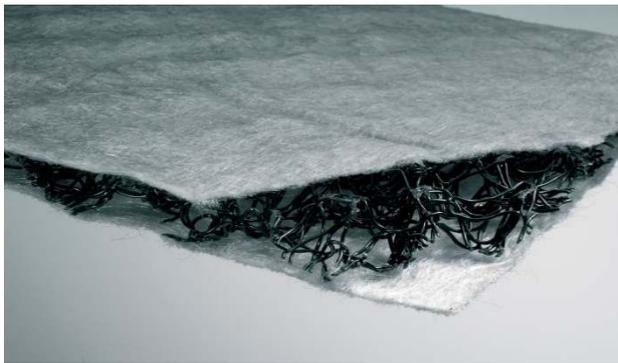


Figure 32-A. Structure géo composite

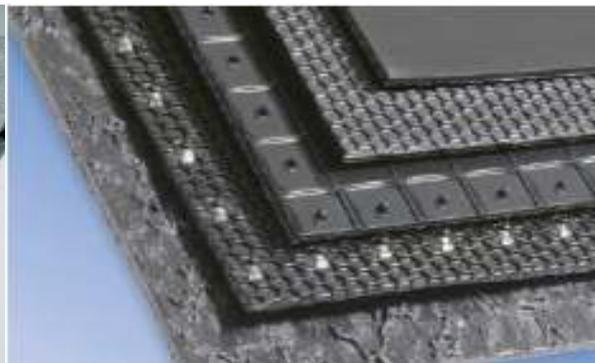


Figure 32-B. Géo membranes

Le bon fonctionnement du renforcement exige de la part du géo synthétique, un faible allongement sous sollicitation, et un choix judicieux doit être réalisé en fonction du type de sol. Pour des sols graveleux et non cohésifs (par exemple sables et graviers), les géo grilles conviennent mieux, tandis que les géotextiles tissés et les géo composites sont plus adaptés aux sols fins et homogènes (argiles,...).

III.3.Types des Géo synthétique :

III.3.1.Géotextiles :

Les géotextiles sont des produits tissés, non tissés, ou tricotés, perméables, fabriqués à base de polymères et utilisés dans les domaines de la géotechnique et du génie civil.

- **Géotextile non tissé :**

Ce sont des nappes constituées de filaments continus (ou de fibres coupées) disposés de façon aléatoire et liés par différents procédés mécaniques, thermiques ou chimiques.

L'aiguilletage est un procédé de liaison purement mécanique dans lequel un grand nombre d'aiguilles hérissées d'ergots traversent le filament ou de fibres dans un mouvement alternatif rapide. Les aiguilles enchevêtrent les fibres qu'elles rencontrent, ce qui donne à la nappe une cohésion importante.

Le thermo-sondage consiste à comprimer à chaud la nappe de fibres en la faisant passer entre deux rouleaux, il en résulte une soudure superficielle des fibres entre elles. La liaison chimique qui consiste à imprégner la nappe de fibre d'un liant est actuellement peu utilisée en raison de son coût.



Figure 33. Géotextile non tissé

- **Géotextiles tissés :**

Ce sont des produits par entrelacement, habituellement à angle droit, de deux ou plusieurs faisceaux de fils, de filaments, de bandelettes ou d'autres éléments.

Les géotextiles tissés sont largement utilisés avec une grande variété de sols, cohérents et non cohérents, pour contribuer à la formation d'un filtre naturel. Cela permet la diffusion des surpressions interstitielles, de plus, grâce à ses caractéristiques de résistance et à un allongement contrôlé, ils facilitent les constructions utilisant des sols.

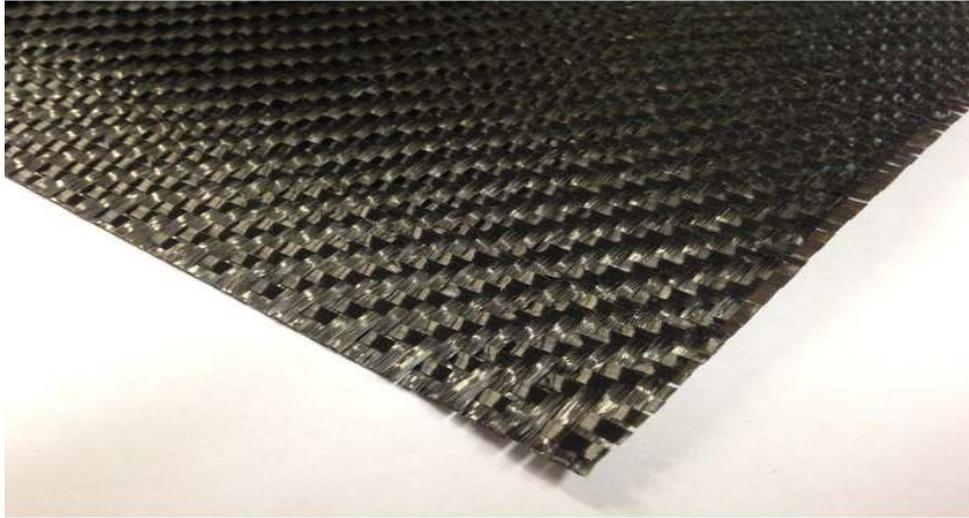


Figure 34. Géotextile tissé

- **Géotextile tricoté :**

Ils sont constitués de mailles successives disposées en colonnes et en rangées. Ils sont très déformables. Ces produits sont très peu utilisés en génie civil.



Figure 35. Géotextile tricoté

III.3.2.Géocomposite :

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 combinée avec un géotextile non-tissé. Il peut être utilisé, soit en géotechnique (fonctions de séparation et renforcement), soit pour les couches de chaussée (fonction de renforcement, particulièrement en réfection).

III.3.3.Géogrille :

Les géo grilles sont classées parmi les produits géo synthétiques et dont la fonction est le renforcement des sols. Ils sont le plus souvent utilisés pour le renforcement des sols incohérents et des corps du sol à gros grains. Les Géo grilles ont une haute rigidité et force plus que les autres géotextiles.

III.4.Rôles et les fonctions des géo synthétiques[12] :

III.4.1. Rôles mécaniques :

- **Séparation :**

Ils sont insérés entre deux matériaux de nature différente, les empêchant de se mélanger. C'est la prévention contre le mélange de deux sols ou matériaux de remplissage adjacents de nature différente par l'emploi d'un géotextile ou d'un produit apparenté. Exemple : pose d'un géotextile de séparation entre l'arase terrassement, de mauvaise qualité, et le remblai routier en matériau noble.

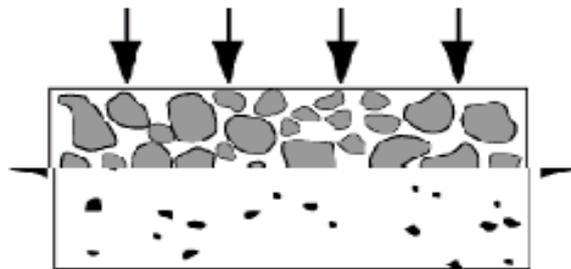


Figure 36.Pose des géo grille de séparation.

- **Renforcement :**

Dans l'application de renforcement la plus commune, les géo synthétiques particulièrement les géotextiles tissés et géo grilles sont placées au-dessous ou entre des couches de sol, le géo synthétique agit l'un sur l'autre avec le sol par les forces d'adhérence.

L'élément de renforcement doit absorber les forces de tension ou de cisaillements produits exogènes aux déformations acceptables dans le long terme pour empêcher le mouvement excessif de la structure renforcée, de ce fait jouer le rôle d'armature dans un massif de sol.

L'insertion de géotextile de renforcement ou de géo grille s'avère donc, selon le cas, une solution idéale pour accroître la capacité portante des matériaux naturels en place.

L'utilisation des structures de solo renforcées par géo synthétique a été maintenant avec succès pratiquée pour plus de 30 ans.

L'introduction d'un géo synthétique au module d'élasticité élevé permet par exemple de renforcer un sol faible en tension mais fort en compression, en répartissant les charges sur une plus grande surface, les produits géo synthétiques augmentent la résistance au cisaillement des sol adjacents, ainsi que la stabilité des couches de roulement de charge dans la route et construction ferroviaires, aussi bien que pour les systèmes couvrants sur les sols très pauvres, réduisent la formation d'ornièrè.

Dans certains cas particuliers, l'utilisation de ces produits permet même de réduire l'épaisseur des couches granulaires.

Exemple : renforcement utilisé en nappe horizontale pour la construction d'un massif de remblai renforcé ou renforcement horizontal sur un sol insuffisamment portant.

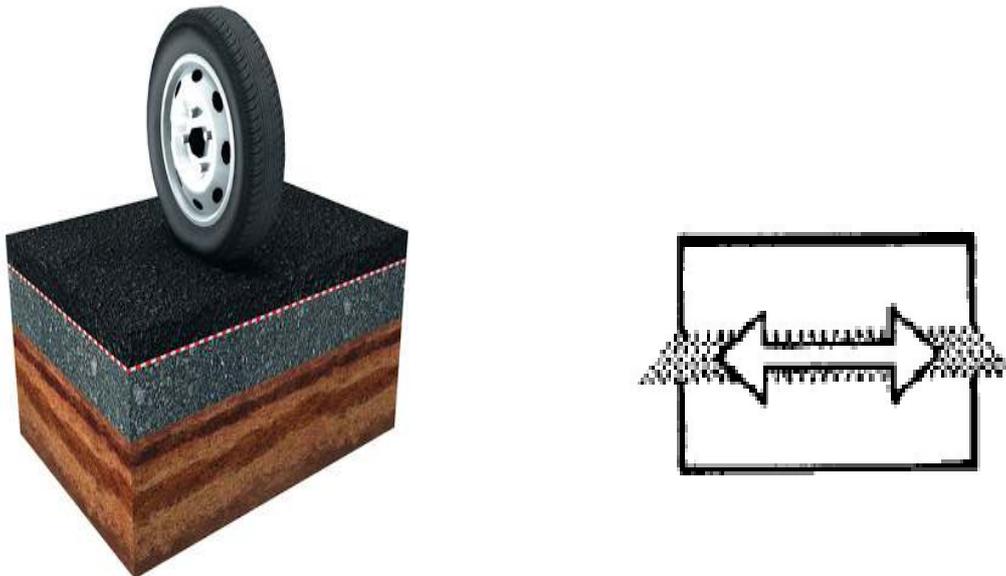


Figure 37. Pose de géotextiles de renforcement.

- **Protection :**

On peut en particulier citer la protection par la géo membranes lors de la conception de bassins de rétention (collecte des ruissellements routiers). Dans de tels ouvrages, les géotextiles, placés entre le sol et la géo membrane, protègent celle-ci de la perforation. On retrouve également ce type de dispositif dans les tunnels, où les géo membranes isolent la paroi en béton des infiltrations.



Figure 38.Utilisation dans la protection

- **Anti-érosion :**

Utilisation d'un géotextile ou d'un produit apparenté aux géotextiles, afin d'éviter ou delimiter les mouvements du sol ou d'autres particules à la surface, par exemple d'une pente.



Figure 39.Utilisation contre l'érosion.

III.4.2.Rôles hydrauliques :

- **Filtration :**

Maintien du sol ou d'autres particules soumis(es) à des forces hydrodynamiques tout en permettant le passage de fluides à travers ou dans un géotextile ou un produit apparenté aux géotextiles.



Figure 40. Utilisation pour filtration

- **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.



Figure 41. Utilisation pour drainage.

- **Barrière : Étanchéité :**

Utilisation d'un géo synthétique afin de prévenir ou de limiter la migration de fluides.



Figure 42. Utilisation pour Étanchéité

III.5. Fonctions des géo synthétiques dans les chaussées routières :

On s'intéressera ici à l'action de renforcement des géo synthétiques dans les chaussées souples. En effet, les bénéfices dus à l'utilisation des géo synthétiques sont moins marqués dans le cas d'une chaussée rigide. Une chaussée souple plus susceptible de se déformer permettra d'observer plus nettement la capacité de renforcement d'une géo grille ou d'un géotextile.

Également, le renforcement de sols mous est efficace pour de grandes déformations, il permet donc de faciliter la construction sur sol mou, il sera donc plus efficace pour des chaussées sans revêtements (plus apte à se déformer).

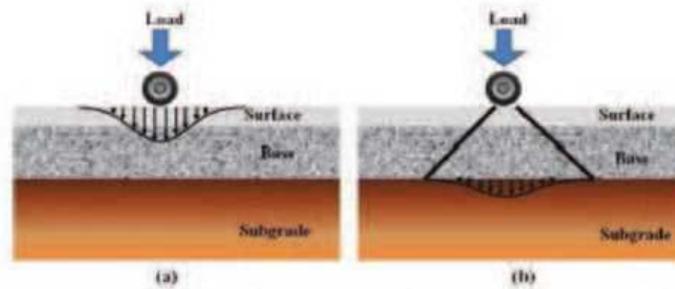
L'effet du renforcement est imperceptible pour des sols raides.

Les chaussées souples permettent une transmission des efforts de chargements de la couche de surface jusqu'aux couches inférieures.

Deux points sont essentiels lors de la conception de la chaussée :

- Les efforts de traction horizontaux sous la couche d'asphalte (à réduire afin d'éviter les risques de fissuration du fait de la fatigue)
- La pression verticale au-dessus de la couche de forme qui doit être réduite pour minimiser les déformations permanentes.

Cette pression est liée à la résistance au cisaillement de la couche de forme.



Distribution des contraintes dans une chaussée souple

Zornberg, J.G. ; Gupta, R. , *Geosynthetics in pavements: North American contributions*

Figure 43. Distribution des contraintes dans une chaussée souple

Les géo synthétiques peuvent être utilisés pour limiter la propagation des fissures en scellant la couche d'asphalte lorsqu'il est utilisé dans le revêtement de la chaussée.

Le renforcement d'une chaussée se traduit par l'introduction d'un géo synthétique dans l'une des couches de la chaussée.

Dans les couches granulaires non liées, le renforcement à l'aide de géo synthétiques a pour but de :

- Augmenter la résistance aux déformations élastiques en augmentant les efforts horizontaux dans la structure
- Augmenter la capacité portante de la chaussée en redistribuant le chargement sur une plus grande section du sol sous-jacent
- Réduire par ailleurs la sollicitation du sol sous-jacent en réduisant les contraintes de cisaillement transmises au terrain naturel.
- Accroître la résistance à la déformation permanente du matériau en limitant les mouvements horizontaux des particules granulaires.

Tandis que (comme dit précédemment) l'utilisation de géo synthétiques dans la couche de roulement permet une :

- Réduction des efforts de traction dans l'asphalte par la sollicitation de contrainte de traction dans les armatures.
- Relaxation des contraintes entre les couches pour éviter le transfert des efforts de traction aux couches sous-jacentes.



Figure 44. Effet de l'amplitude d'un chargement au niveau de la couche de sol

III.6.Mécanismes de renforcement[13] :

Trois mécanismes rentrent en compte dans le renforcement via les géosynthétiques :

- La contrainte latérale
- L'augmentation de la capacité portante
- L'effet de la membrane sous tension

III.6.1.Mécanisme de confinement latéral de la couche de base :

S'explique par le fait que le matériau de l'agrégat de la couche de base interagit avec la géo grille principalement en s'imbriquant dans les ouvertures de la géo grille. Les nervures de la géo grille confinent l'agrégat et résistent au mouvement latéral de l'agrégat quand la couche de base est chargée en surface. En retenant latéralement le sol, quatre mécanismes de renforcement sont potentiellement réalisés, comme représentés sur la **figure 45** Ces mécanismes incluent :

- Empêchement de l'étalement latéral de l'agrégat de la couche de base ;
- Confinement croissant et ainsi résistance croissante de la base à proximité du renforcement.
- Amélioration de la distribution verticale des contraintes sur le sol de fondation.
- Réduction de la contrainte de cisaillement dans le sol de fondation.

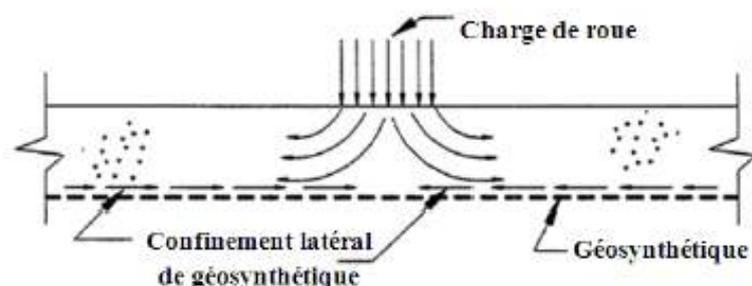


Figure 45.Confinement latéral

III.6.2.Mécanisme de surface de rupture modifiée et augmentation de la capacité portante :

Se traduit par le fait que le géo synthétique force la surface de rupture potentielle à se développer selon une surface alternative qui a une plus grande résistance totale (**figure 46**).

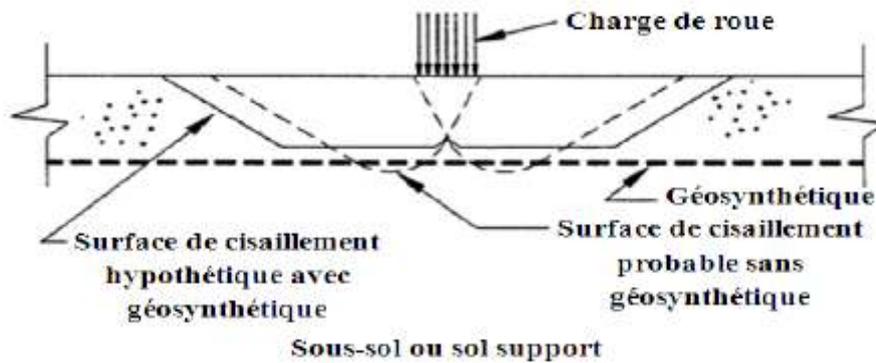


Figure 46.Modification surface de rupture augmentation de la capacité portante

III.6.3.Mécanisme de membrane tendue :

Comme décrit d'abord par Giroud et Noiray, est plus approprié quand une ornière ou une large déformation verticale (plus grande que 25 mm) est permise. Ainsi ce mécanisme est approprié aux routes non revêtues. Des forces de tension sont installées dans le renforcement par les contraintes de cisaillement agissant à l'interface avec le sol. Pendant le chargement lourd ou répété, la couche d'agrégat déforme sensiblement, créant les ornières de surface qui forcent le géotextile à déformer **figure 47**. Si les forces de tension coïncident avec une courbure appréciable du renforcement, alors les contraintes normales dans le sol agissant de part et d'autre du renforcement sont inégales. Ce phénomène est connu sous le nom de l'effet de membrane tendue.

Sous la roue, dans le creux de l'onde, la membrane tendue porte une partie de la charge de la roue et réduit la contrainte normale sur le sol de fondation. En dehors de la surface chargée, au-dessus des crêtes adjacentes de l'onde, la membrane tendue s'appuie sur le sol de fondation et augmente la contrainte normale (pression de confinement) où elle sert à résister à la rupture par cisaillement. Une membrane tendue de ce fait permet de diminuer les contraintes appliquées et d'augmenter la capacité portante. L'effet de membrane tendue est significatif seulement si les charges de la circulation sont canalisées et les profondeurs d'ornière sont relativement grandes.

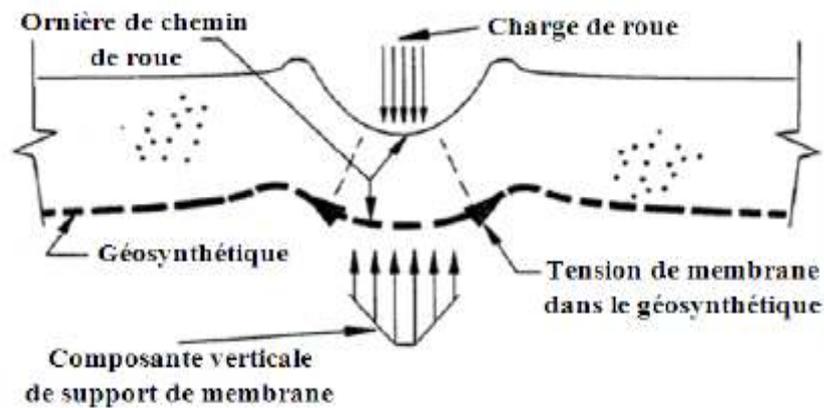


Figure 47. Membrane tendue

Le géo synthétique de renforcement (géo grille ou géotextile) est généralement placé entre la couche de base et la couche de fondation, entre la couche de fondation et la couche de forme ou encore dans la couche de base elle-même.

III.7. Renforcement des chaussées à l'aide des géo synthétiques[14] :

Pour savoir quel type de renforcement utilisé il faut connaître le mécanisme de rupture prédominant, les variations de température, les propriétés de la chaussée et des matériaux granulaires, l'état de la chaussée existante s'il y a, les propriétés du géo synthétiques, l'interaction entre le géo synthétique et la couche de roulement, les équipements et procédures mis en œuvre lors de la construction, etc...

III.7.1. Renforcement des chaussées à l'aide géotextile :

Les géotextiles présentent l'avantage de pouvoir jouer aussi bien le rôle de renforcement que de séparateur au sein de la chaussée ce qui constitue un atout important.

Grâce à son rôle séparateur il permet d'empêcher la migration des fines des couches granulaires (vers la couche de sol) ce qui aurait pour effet de fragiliser la couche granulaire et donc l'assise de la chaussée.

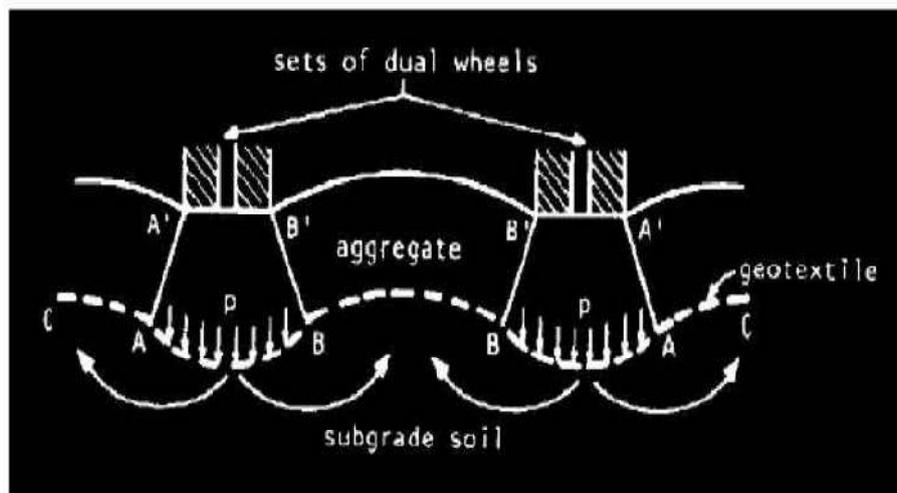
Le géotextile utilisé en renforcement améliore la résistance mécanique d'un massif de sol dans lequel il est inclus. Il améliore à la fois la résistance à la traction du massif et sa capacité à se déformer avant la rupture.

Dans son guide sur les systèmes de renforcement des chaussées, le constructeur Tensar nous explique également que l'emploi de géotextile peut permettre de construire un radier sur sol mou. En effet, la réalisation d'un radier en sol renforcé par des nappes de géotextiles et destiné à supporter un remblai sur sol compressible permet d'éviter les cisaillements dans le remblai et de maîtriser son poinçonnement dans le sol compressible.

Dans le cas de corps de chaussée construit sur des terrains susceptibles de comporter des karsts ou autres cavités souterraines non repérées, la réalisation d'un radier renforcé par des nappes de géotextiles permet de diminuer le risque de rupture brutale, voire de maintenir le niveau de service de la chaussée en cas d'apparition de fontis.

- **Comportement mécanique :**

Lors du passage de roues, il y a comme un « gonflement » du sol autour des roues, or avec la mise en place du géotextile, ce dernier qui a été étiré lors de son installation dans la chaussée se déforme également. Avec la contrainte exercée par les roues, le géotextile prend une forme arrondi et sa face concave reprend plus d'effort. Le fait que le géotextile reprenne plus d'effort à la verticale du passage des roues a pour conséquence que la couche d'agrégats reprend moins d'effort.



Giroud, J.P., Noiray, L. (1981)

Figure 48. Comportement mécanique du géotextile

Il y a deux effets bénéfiques lors de la mise en place du géotextile :

- Le confinement de la couche de sol entre et en dessous l'axe des roues.
- La diminution de la pression exercée par les roues sur le sol.

La pression exercée entraîne une déformation de la forme du géotextile dont Giroud (1981) évalue la flèche :

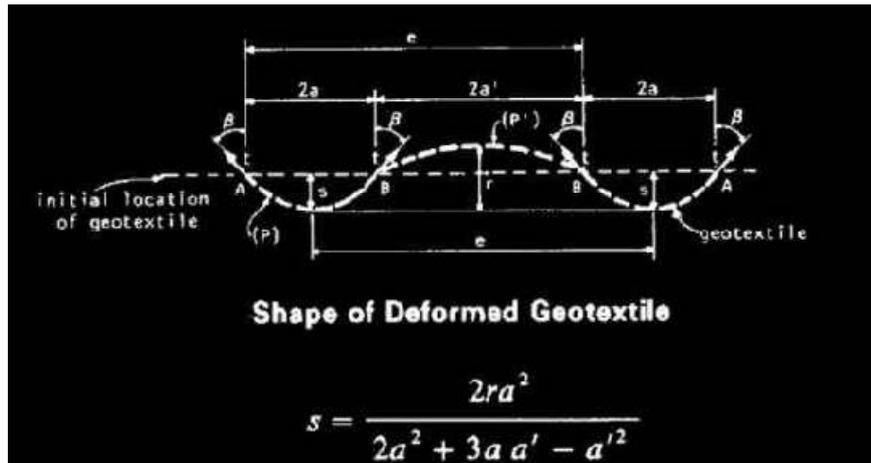


Figure 49. géotextile déformé

Dans la même étude il est observé que l'élongation que subit le géotextile est :

$$\epsilon = [(b+b'/a+a')-1]$$

Où a et a' est la moitié de corde formé par P et P' respectivement, et b b' moitié de la longueur de P et P' respectivement.

Cependant, pour que le géotextile soit efficace il faut qu'il soit prétendu ou bien qu'il présente un fort coefficient de raideur. En effet, la réponse mécanique du matériau géotextile est meilleure lorsque celui travaille déjà en traction.

D'après Hufenusa, R. R. et al, la résistance à la traction du géo synthétique (aussi bien géotextile que géo grille) à 2% tant dans le sens longitudinal que transversal, devrait être de :

$$T_{2\%} > 8 \text{ kN/m.}$$

III.7.2. Renforcement des chaussées à l'aide Géo grille :

La majorité des ouvrages positionnent la géo grille comme le système de renforcement le plus efficace (quand on parle de renforcement pur et non de combinaison des fonctions de renforcement et séparation).

Dans les applications de renforcement du sol, la résistance et la rigidité d'un matériau géo synthétique n'ont d'importance que si elles peuvent être transférées efficacement au sol environnant.

Parmi les désavantages des géotextiles dans le renforcement des routes, on peut mentionner : Leur extrême flexibilité qui peut causer des « tortillements » même après l'installation. Par conséquent, les avantages liés à « l'effet de membrane » ne sont obtenus qu'après une déformation importante de la route pour mettre en tension le géotextile. Cela peut entraîner l'affaiblissement de la chaussée et nécessiter des travaux d'entretien précoces.

Il faut prévoir des bandes plus longues de géotextile pour permettre leur ancrage à l'extérieur de la zone routière soumise à la charge.

L'emplacement du passage des roues doit être fixe pour assurer le rendement à long terme des routes renforcées par géotextiles. Compte tenu que les géotextiles ne sont généralement pas prétendus, il faut que des ornières se forment dans le sol support avant que le trafic lourd ne puisse circuler. Il est essentiel que ces ornières soient maintenues et que d'autres ornières ne se forment pas dans les zones adjacentes le long de l'interface entre le sol support et la fondation.

La formation d'ornières dans le sol support entraîne l'accumulation d'eau. Il en résulte une détérioration accélérée de la route. En raison de tous les désavantages énumérés ci-dessus, l'utilisation efficace des géotextiles dans le renforcement routier est généralement limitée aux routes de pénétration étroites et non pavées.

III.8. Quels géo synthétiques utilisé ?

Le choix du géo synthétique se fait en fonction de différents critères qui sont :

- Propriétés mécaniques minimales requises.
- Type de chaussée (chaussée non revêtue ou flexible).
- Résistance du sol support.
- Position du renforcement au sein de la chaussée.
- Compatibilité en filtration entre le sol support et la fondation de la chaussée.
- Expériences antérieures avec les renforcements géo synthétiques.

III.8.1. Classement par propriétés des géo synthétiques :

D'un point de vue mécanique il convient également de considérer quatre critères lors de la sélection d'un géo synthétique : la résistance à la flexion, à la traction, à l'arrachement et au glissement.

- **Résistance à la flexion :**

La rigidité en flexion des géo synthétiques est un paramètre utile pour évaluer leur aptitude à supporter les ouvriers durant l'installation du matériau (effet raquette). Une rigidité à la flexion élevée est recommandée lorsque le sol support est de faible portance.

- **Résistance à la traction :**

Il s'agit d'un critère important car la mesure de la résistance à la traction permet d'obtenir les courbes contraintes-déformations du matériau. A partir de ce critère on pourra savoir quelle contrainte le matériau pourra reprendre afin déformation plastique ou bien rupture.

- **Résistance à l'arrachement :**

Cette propriété peut être définie comme la force requise pour extraire un géo synthétique enfoui dans un massif de sol et sera utile pour évaluer les longueurs d'ancrage requise des renforcements qui seront soumis à de forts orniérages. La résistance à l'arrachement dépend de plusieurs paramètres dont la nature du sol et du renforcement et l'état de contrainte dans le plan du géo synthétique.

- **Résistance au glissement :**

La résistance au glissement peut être définie comme la force requise pour faire glisser un massif de sol sur l'élément de renforcement. Cette propriété est également utile pour évaluer les longueurs d'ancrage des renforcements dans un contexte où ce dernier agit pour le confinement latéral.

III.8.2.Positionnement [15] :

La position du géo synthétique de renforcement au sein de la chaussée exerce une influence notable sur le comportement mécanique de cette dernière.

À titre d'exemple, pour les chaussées non revêtues construites sur des sols peu portants, le renforcement est usuellement mis en place directement sur le sol support. Cependant, au-delà d'une certaine épaisseur de la couche de fondation, l'influence du renforcement sur les performances de la chaussée devient négligeable.

Aussi suivant la position du renforcement au sein de la chaussée, un géo synthétique n'aura pas la même efficacité.

Dans le cas des chaussées souples, il existe différents placements du géo synthétique dans la chaussée :

- renforcement sur le sol support
- renforcement au sein de la fondation
- renforcements sur le sol support et dans la fondation
- renforcement dans la couche d'asphalte pour les chaussées revêtues

L'emplacement optimal du renforcement dépend de nombreux facteurs dont l'épaisseur finale de la couche de fondation de la chaussée renforcée, la charge de la circulation et la résistance du sol support. Pour la configuration du géo synthétique dans la couche de surface Lugmayr et al ont montré que les routes faites en bitume ont une durée de vie qui dépend de la capacité portante de la chaussée existante, des propriétés mécaniques des couches ainsi que leur mise en place, de l'épaisseur et la qualité de la couche de revêtement et enfin des liaisons entre les couches. Aussi, les tests montrent que la partie faible d'une chaussée est la liaison entre les couches. La liaison entre la couche d'asphalte et la couche d'assise est primordiale afin d'éviter la propagation de fissures d'où l'emploi d'un renforcement. Cette couche doit avoir une raideur effective la plus haute possible.

III.9.Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté les divers types de géo synthétiques (géotextiles, géo grilles, géo composites, géo membranes, etc.) et les fonctions principales des géo synthétiques avec leurs domaines d'application et les critères utilisé pour choisir notre géo synthétiques.

CHAPITRE IV : CALCUL PAR ANSYS ET INTERPRETATION DES RESULTATS

IV.1.Introduction :

La première partie de ce travail sera constitué de deux types d'analyse, la première analyse portera sur le comportement d'une chaussée souple sous l'effet d'une charge tandis que la deuxième sera basée sur le comportement d'une chaussée souple on introduisant à l'intérieur entre la couche roulement et la couche base un tissu de géotextile (fibre de carbone) sous l'effet de la même charge que la 1^{er} analyse avec une température égale a 22°C.

La deuxième partie de cette analyse consiste a étudié le comportement de la même chaussée sous l'effet de la température (30°C)

IV.2.Présentation de la chaussée considéré :

La structure étudiée est une chaussée souple composée de plusieurs couches. En ce qui concerne les paramètres géométriques et matériaux de la structure présenté dans la figure 50, les données sont résumées dans le Tableaux 2 et 3. Le tableau 2 présente pour les paramètres géométriques la longueur (L), la largeur (d) et la hauteur (h) de chaque couche constituant la chaussée. En ce qui concerne les paramètres matériaux, les données d'entrée correspondent au module élastique (E), au coefficient de Poisson (U), et la masse volumique.

- Couche de roulement en enrobé bitumineux (BB 0/16) de 10 cm d'épaisseur.
- Couche de base en Grave bitumineux (GB 0/20) de 20 cm d'épaisseur.
- Couche de fondation en Grave Non Traité (GNT 0/60) de 30 cm d'épaisseur.
- Couche de sol support (SS) de 500 cm d'épaisseur.

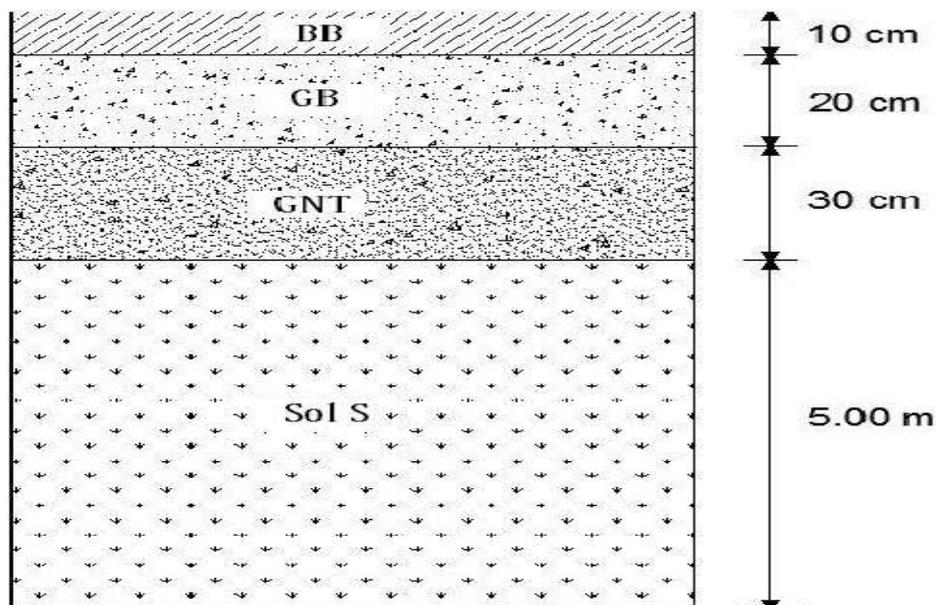


Figure 50.Géométrie du modèle étudié

	Couche de surface	Fondation	Sol support	Sol support
Paramètre géométrique	L=1,6 d=1,0 h=0,10	L=1.6 d=1,0 h=0.20	L=1,6 d=1,0 h=0.30	L=1,6 d=1,0 h=5.00
Paramètre de matériaux	E=7000 U=0,35 $\rho=2100$	E=4000 U=0,35 $\rho=2300$	E=125 U=0,25 $\rho=2200$	E=50 U=0,35 $\rho=2200$

Tableau 2. Caractéristiques des couches

Caractéristiques	Valeur	Caractéristiques	Valeur
ρ	1632,9	Uyz	0,4
Ex	$2,3 \times 10^{11}$	Uxz	0,2
Ey	$2,3 \times 10^{10}$	Module de cisaillement xy	9×10^9
Ez	$2,3 \times 10^{10}$	Module de cisaillement yz	$8,2143 \times 10^9$
Uxy	0,2	Module de cisaillement xz	9×10^9

L, d et h en (m) E en (Mpa) ρ en kg/m^3

Tableau 3. Caractéristiques des fibres de carbonées

IV.3. Entrée des données dans le logiciel ANSYS :

IV.3.1. Le type d'analyse :

Le logiciel de calcul ANSYS Mechanical (Workbench) propose plusieurs type de l'analyse. Notre étude se limite au cas **statique**.

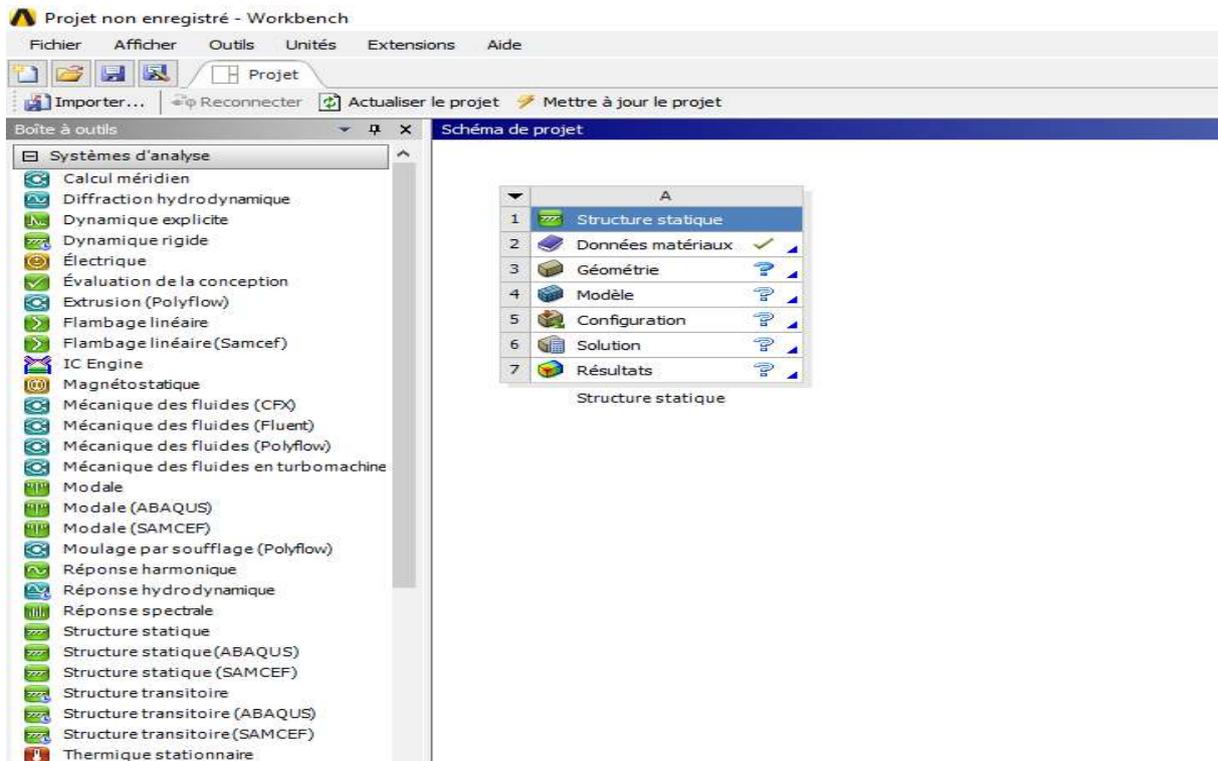


Figure 51. Logiciel de calcul ANSYS Mechanical (Workbench)

IV.3.2. Maillage :

Une modélisation 3-D a été utilisée pour analyser la réponse de la chaussée. Des éléments rectangulaires à 8 nœuds ont été utilisés dans la modélisation, pour raisons des symétries, on a modélisé la moitié de la chaussée. La taille des éléments utilisés pour le maillage est de 30 mm, ce qui permet de décomposer la plus petite épaisseur de la couche de la chaussée.

Afin d'avoir accès à plus d'informations (l'état de contrainte et de déformation). La Figure 52 représente le maillage du modèle numérique.

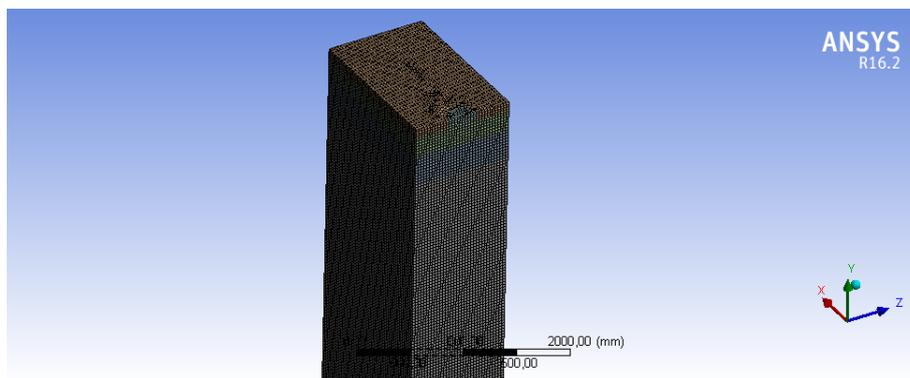


Figure 52. Représentation de maillage

IV.3.3. Condition aux limites :

Le calcul par élément finis est réalisé en déformation plane. Les conditions aux limites imposées à notre modèle sont :

- sur la face inférieure, le déplacement vertical est bloqué,
- sur les côtés droite et gauche latérales, le déplacement horizontal est bloqué.

IV.3.4. Chargement appliqué dans ANSYS :

On a choisi un type de pneu, pneu super single avec une pression de gonflage de 800 KPa (11.5 tonnes par essieu), température d'environnement de 22 degrés. La valeur de la charge appliquée à la surface est basée sur des mesures d'empreinte réelles réalisées au LAVOC (laboratoire des voies et circulation) [15].

On considère un seul type de chargement dans notre étude qui est constant $P = 800$ KPa, représentée sur la figure 53.

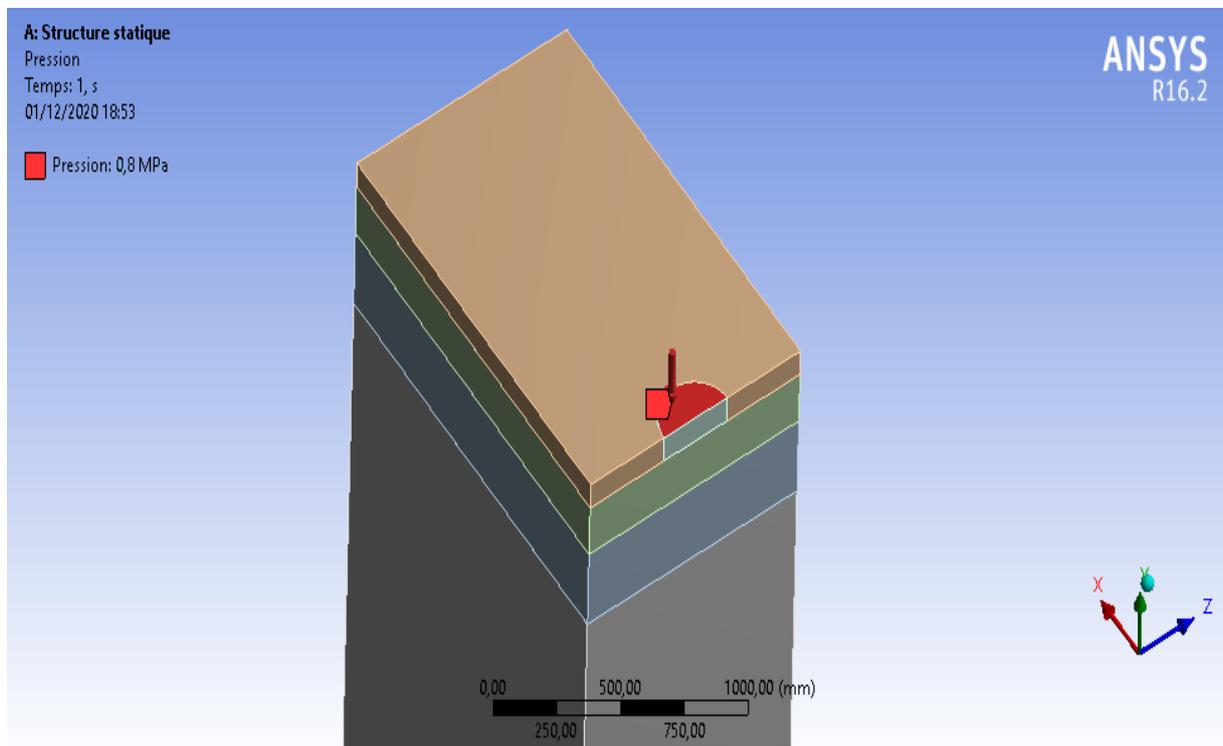


Figure 53. Chargement constante : étude statique

IV.4.L'influence de la charge sur la chaussée :

IV.4.1.chaussée souple sans géotextile :

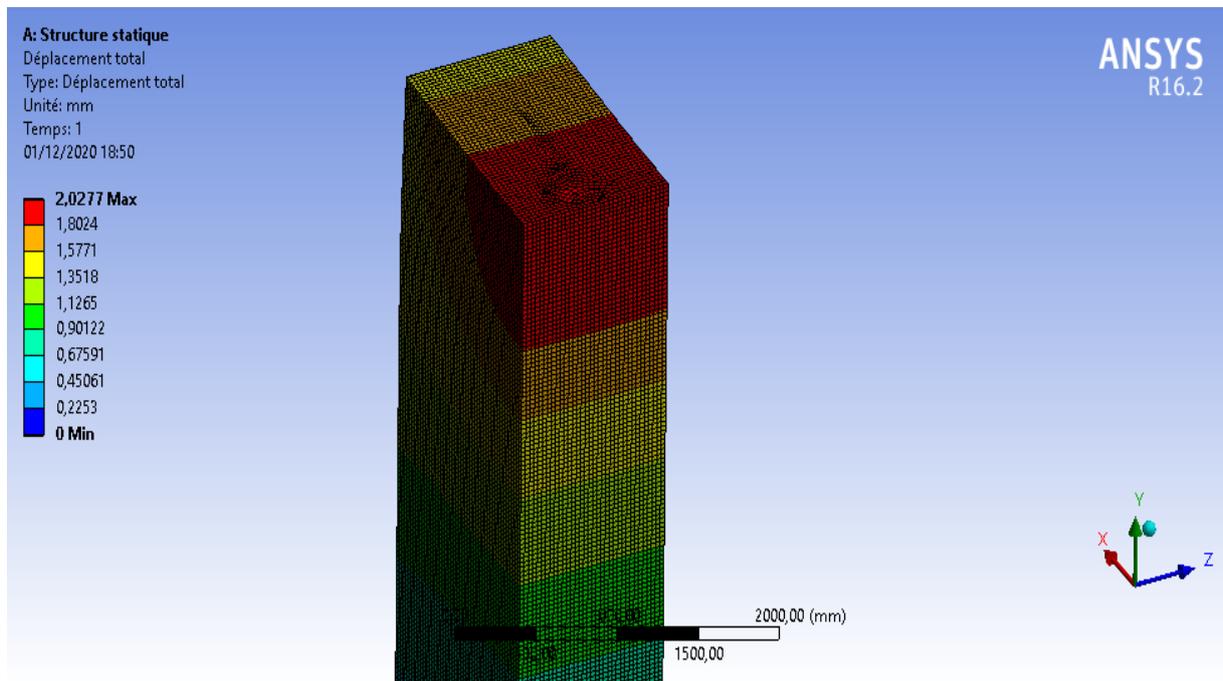


Figure 54.Déplacement total

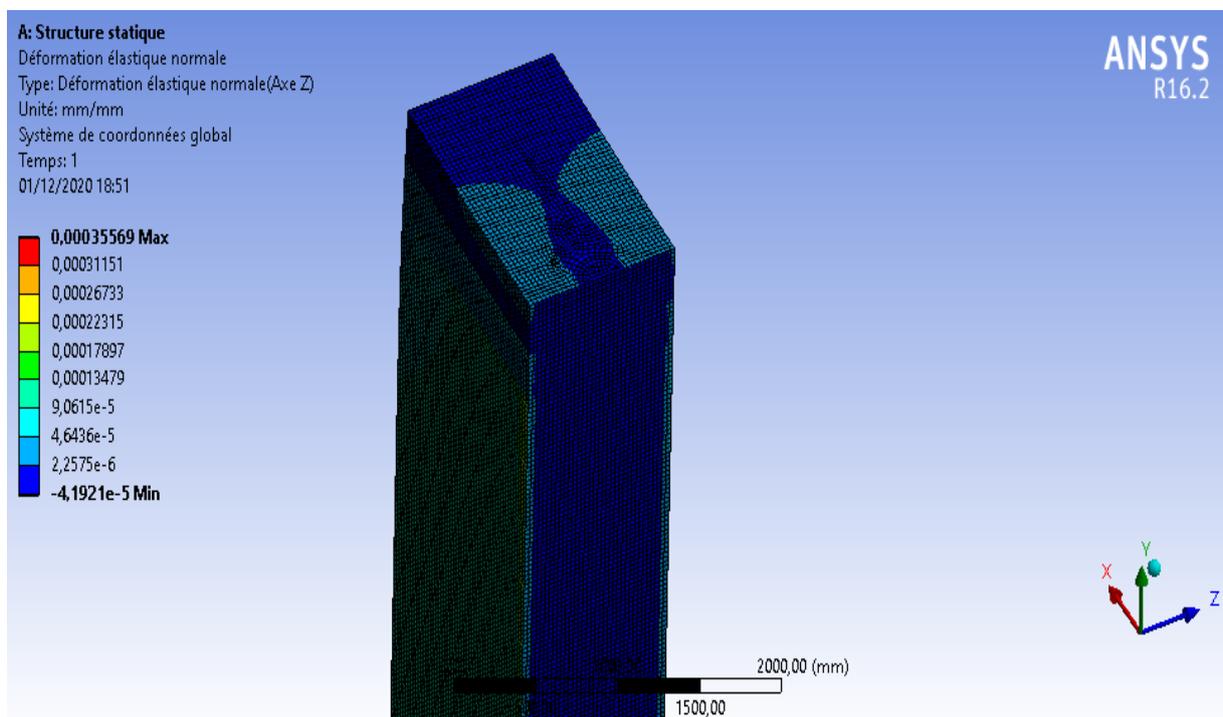


Figure 55.Déformation élastique normale (axe Z sens de circulation)

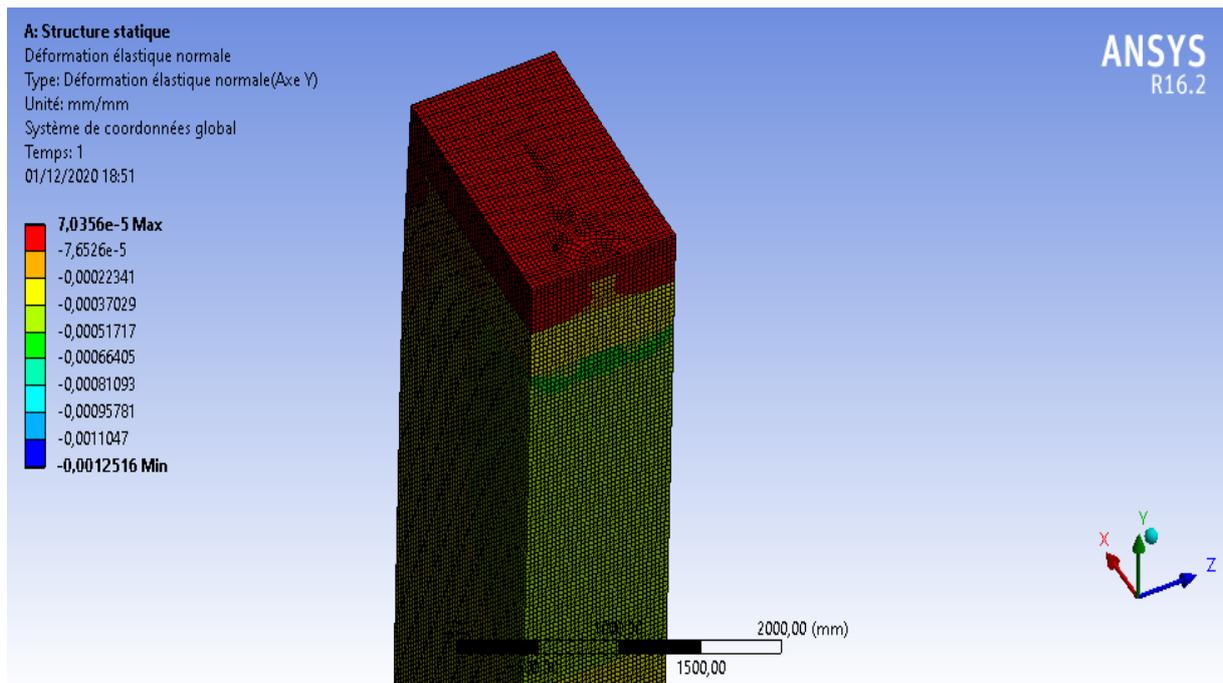


Figure 56. Déformation élastique normale (axe Y sens de la profondeur)

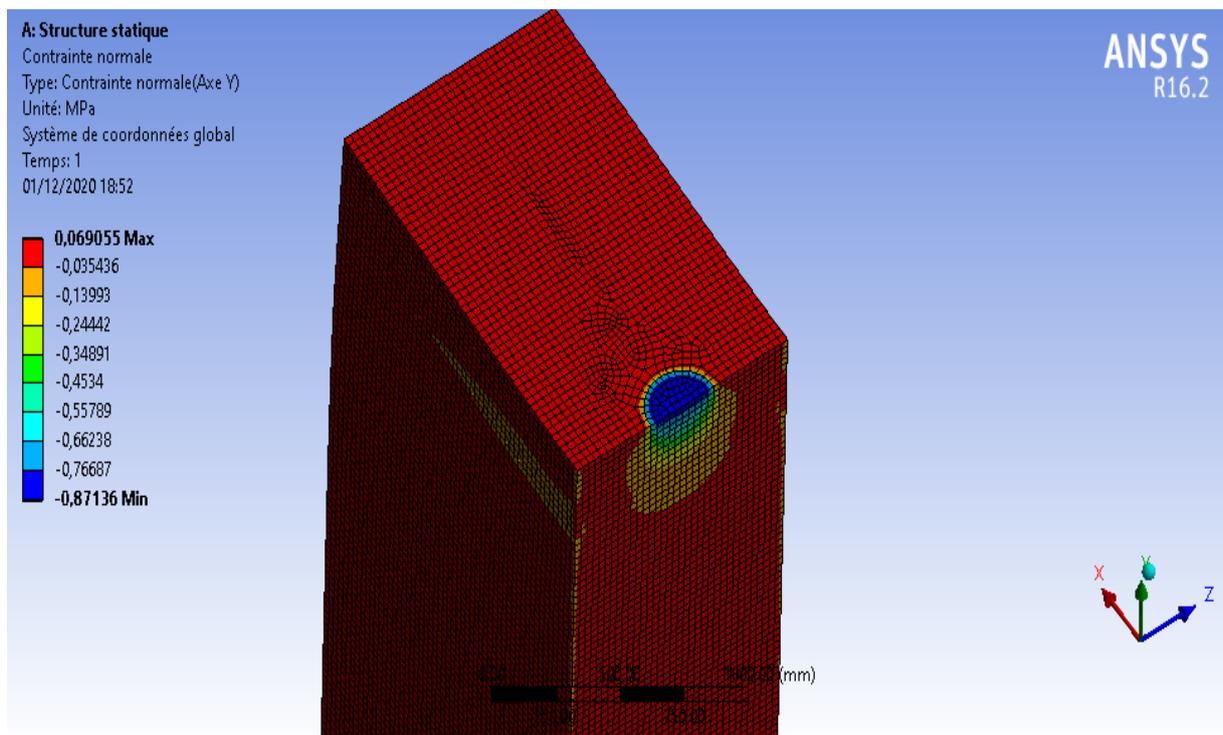


Figure 57. Contrainte normale (axe Y)

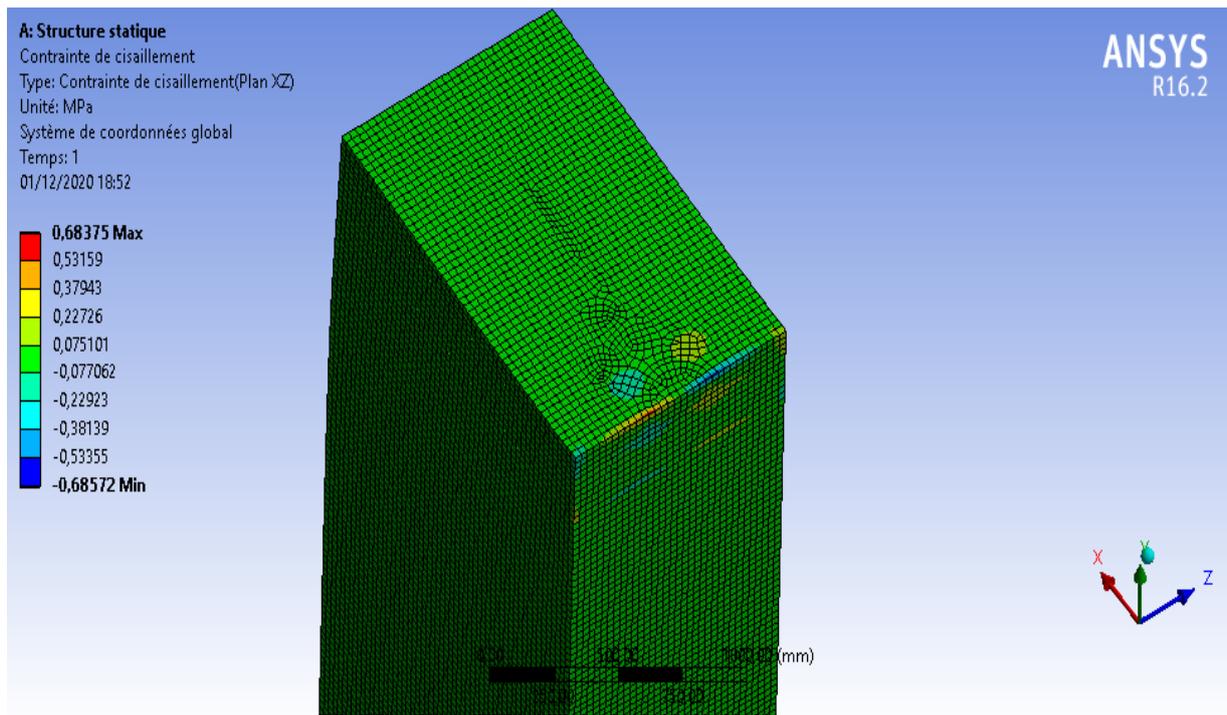


Figure 58. Contrainte de cisaillement (Plan XZ surface de roulement)

IV.4.2.chaussée souple avec géotextile :

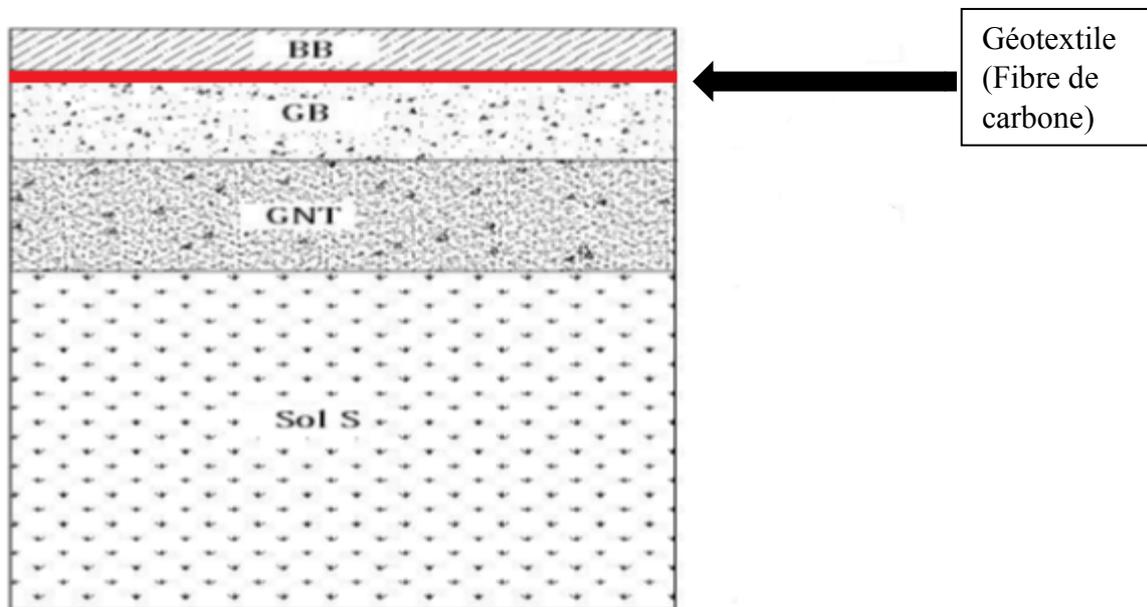


Figure 59.Géométrie du modèle étudié avec géotextile

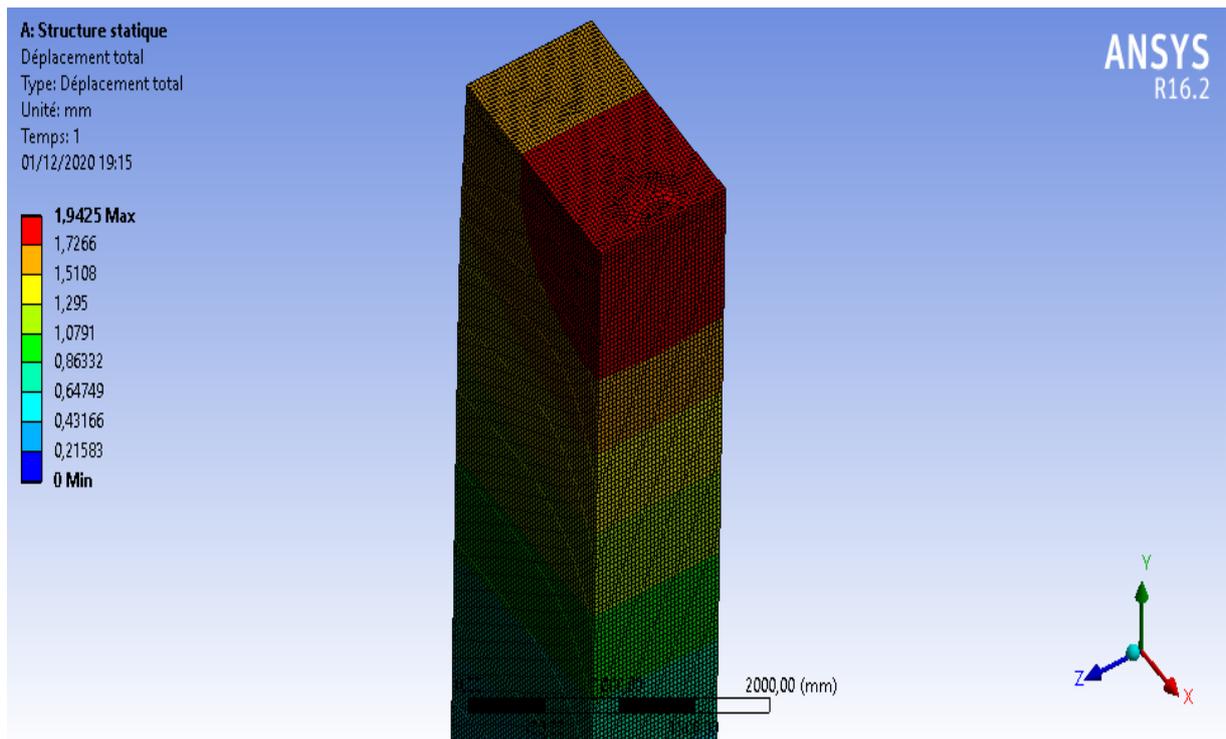


Figure 60. Déplacement total

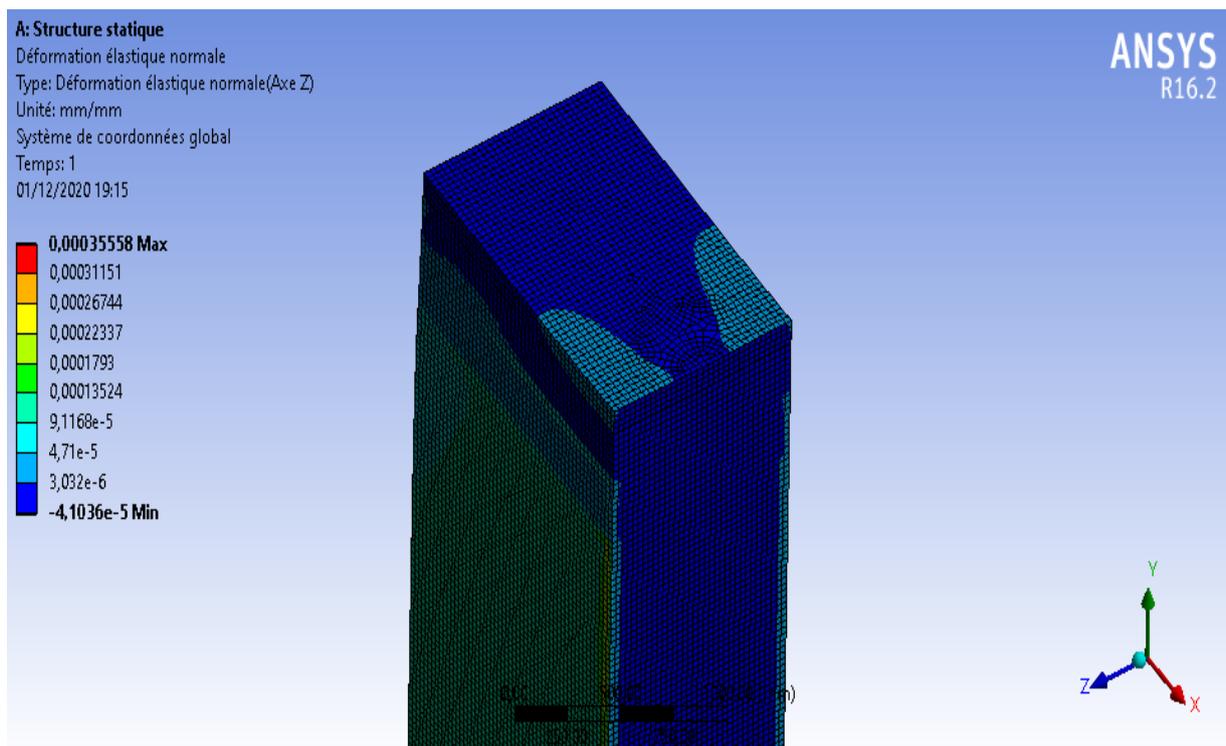


Figure 61. Déformation élastique normale (axe Z sens de circulation)

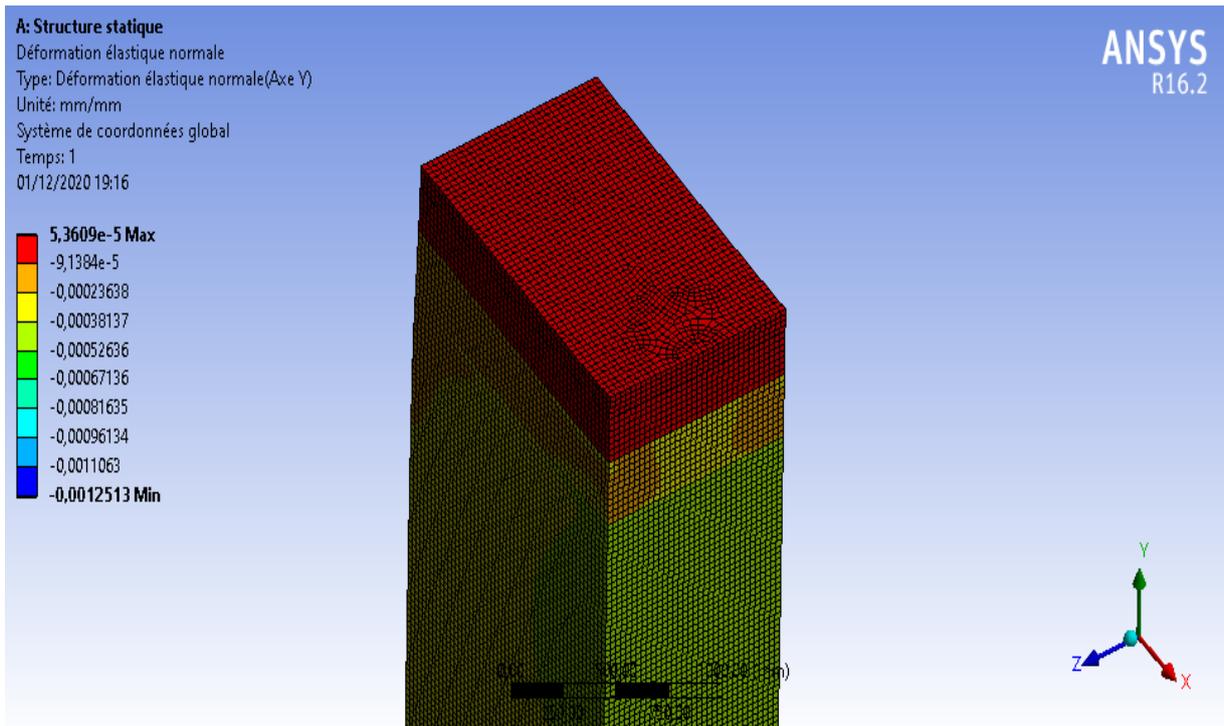


Figure 62. Déformation élastique normale (axe Y)

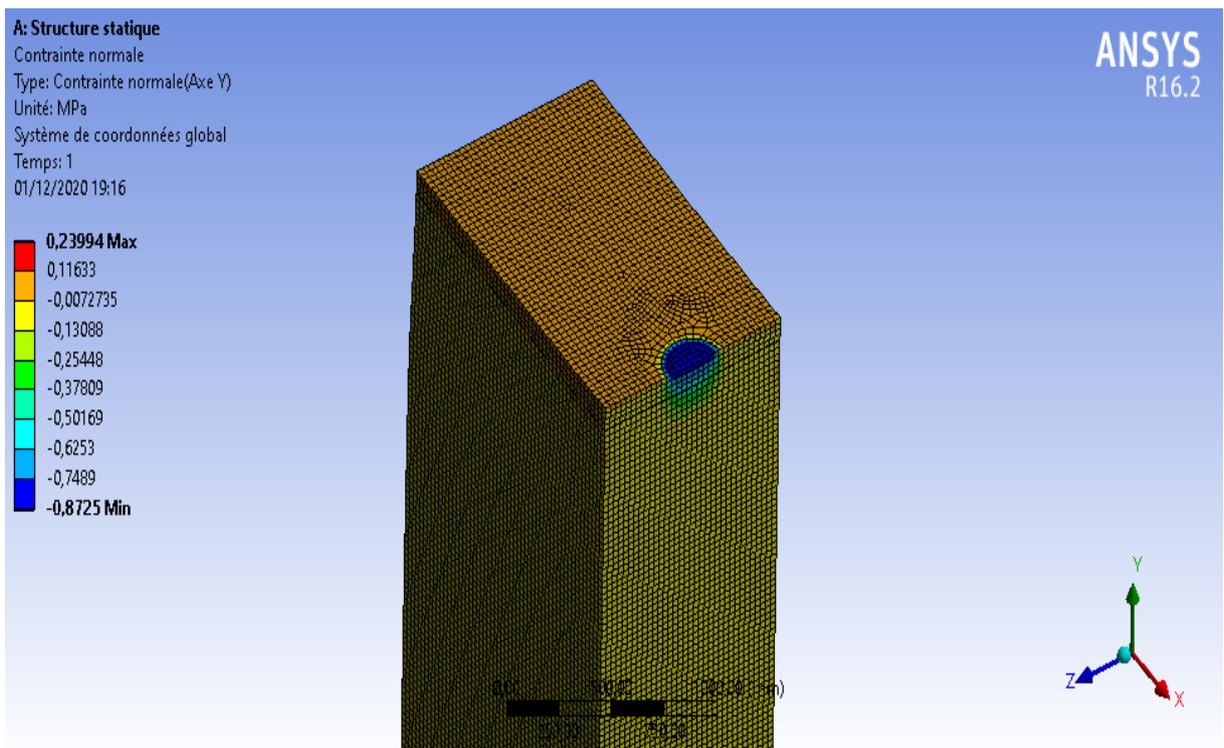


Figure 63. Contrainte normale (axe Y)

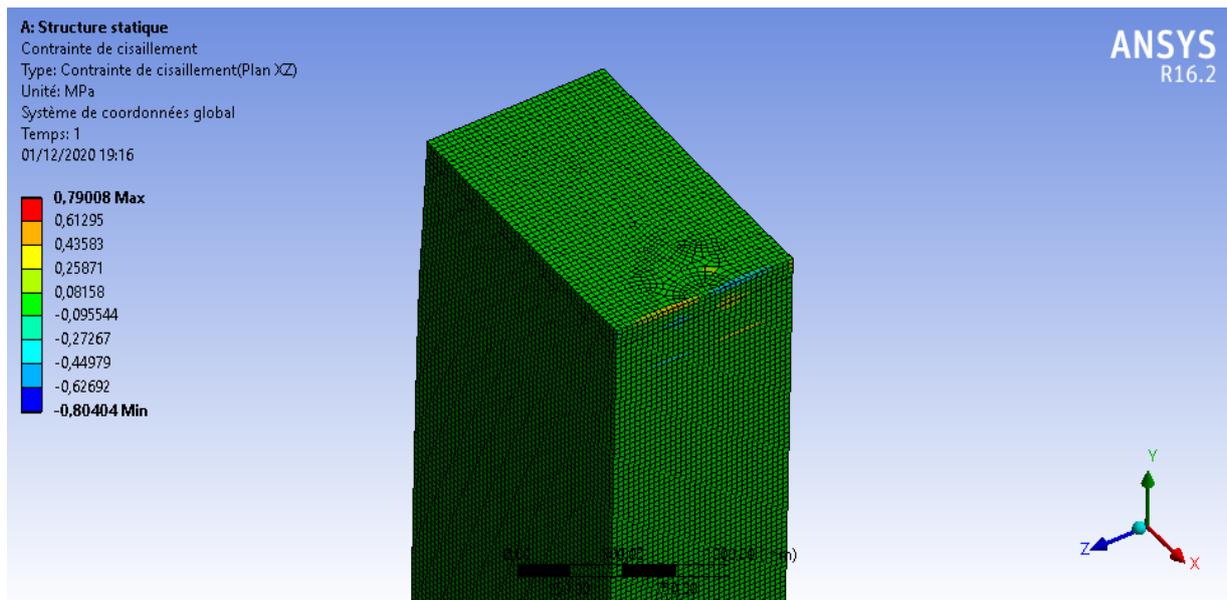


Figure 64. Contrainte de cisaillement (Plan XZ)

	Sans géotextile	Avec géotextile	Différence
Déplacement total (mm)	2.03	1.94	0.09
Déformation élastique normale Z (mm/mm).10 ⁻⁴	3.56	3.11	0.45
Déformation élastique normale Y (mm/mm).10 ⁻⁵	7.03	5.36	1.67
Contrainte normale Axe Y (MPa) en compression	0.87	0.87	0
Contrainte de cisaillement Plan XZ (MPa)	0.68	0.79	-0.11

Tableau 4. Différence des résultats obtenus pour les deux analyses

IV.4.3. Interprétation des résultats :

Les figures 55 à 64 montrent les cartographies des déplacements, déformations et des contraintes qui sont obtenues à partir d'une simulation 3-D du comportement de la chaussée souple (sans/avec géotextile) sous l'effet d'une charge constante par le code de calcul ANSYS.

Les différents résultats obtenus sont résumés dans le tableau (4).

L'analyse de ces résultats montre que la chaussée souple avec géotextile donne de bons résultats par rapport à la chaussée souple sans géotextile sauf pour la contrainte de cisaillement qu'on a remarqué qu'elle augmente de 0.11 Mpa en la comparant avec la chaussée souple sans géotextile.

IV.5. Influence de la température sur le comportement de la chaussée :

Dans cette étude ; nous avons présenté la variation de module de Young en fonction de la température. Pour prendre en compte l'influence de la température sur la partie viscoélastique, nous avons utilisé les mesures avec la même pression (800 KPa) aux températures 0 à 30°C

Les résultats des essais réalisés au LAVOC à différents températures ont permis de déterminer le module d'élasticité E. L'influence de la température sur le module d'élasticité est prise en compte à l'aide de l'équation suivant :

$$E^*(i\omega) = |E^*|e^{i\varphi} = E_1 + iE_2$$

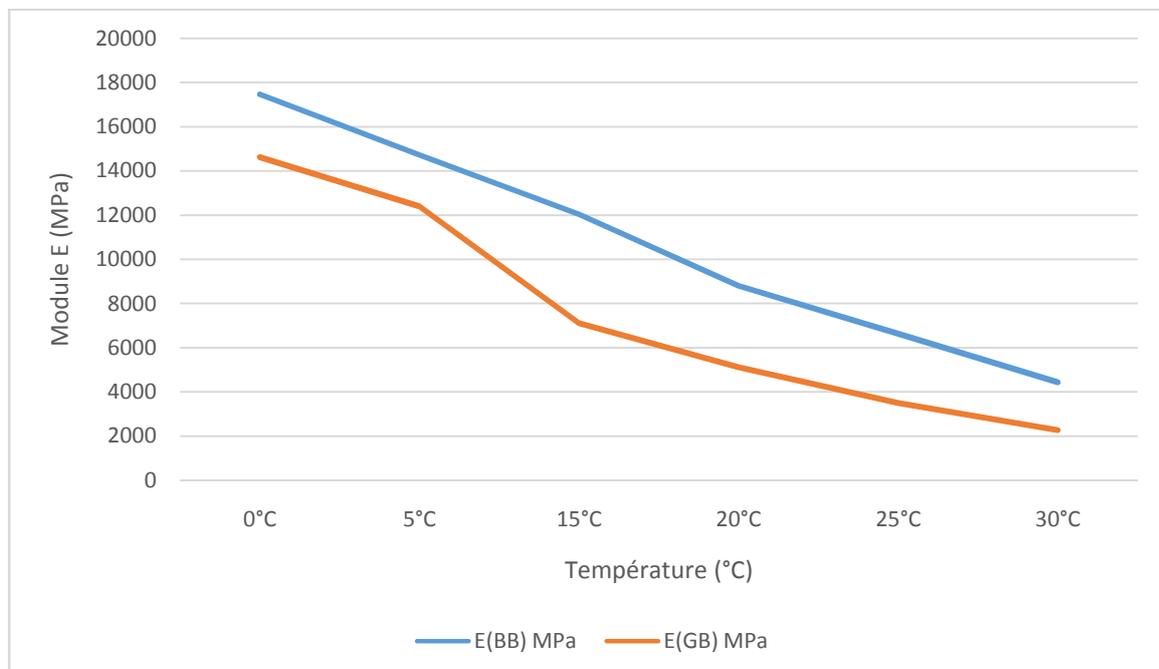
Ce module complexe peut être caractérisé par deux composantes :

$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$ appelé module de rigidité

φ appelé angle de phase, qui caractérise le caractère visqueux.

	0°C	5°C	15°C	20°C	25°C	30°C
E_{BB} (MPa)	17468	14728	12035	8800	6629	4438
E_{GB} (MPa)	14620	12387	7107	5108	3492	2259

Tableau 5. Valeur du module E mesuré en fonction de la température de béton bitume et grave bitume.[15]



Graph 1. Variation de E en fonction de la température

D'après les résultats obtenus des essais réalisés au LAVOC, on remarque que quand la température augmente le module E diminue.

Donc on va prendre les Modules E de BB et GB a la température 30°C et on recommence notre modélisation pour voir l'effet de la température sur le comportement de la chaussée souple avec la même pression.

IV.5.1. Chaussée souple sans géotextile sous l'effet de la température (Chaussée 1) :

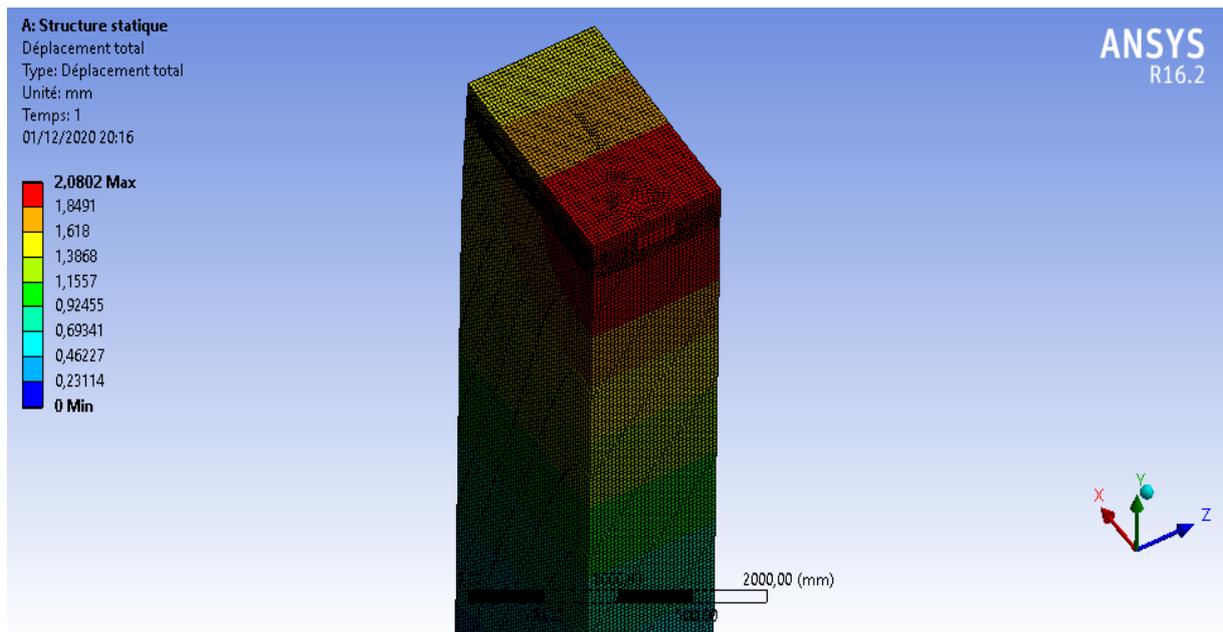


Figure 65. Déplacement total

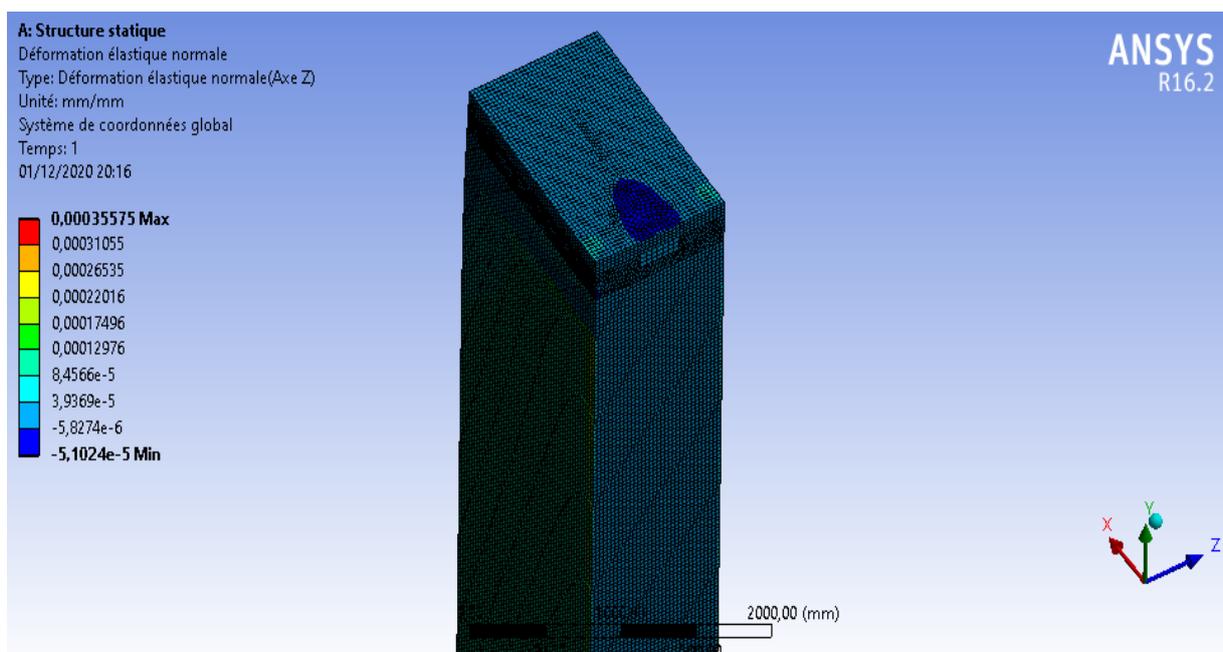


Figure 66. Déformation élastique normale (axe Z sens de circulation)

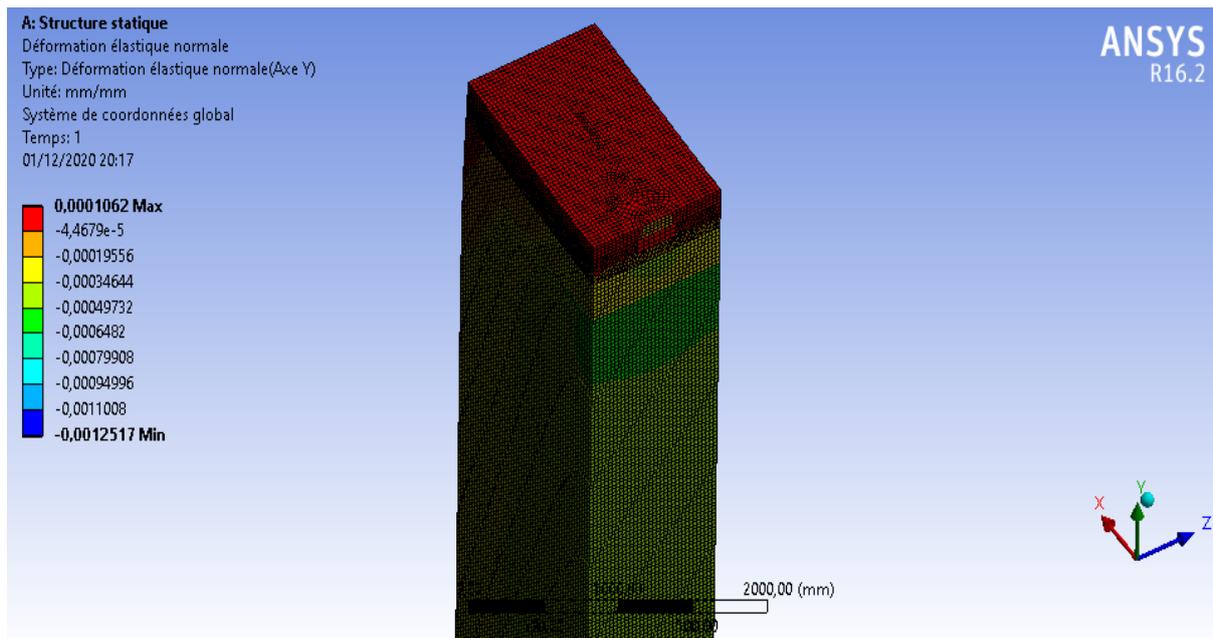


Figure 67. Déformation élastique normale (axe Y)

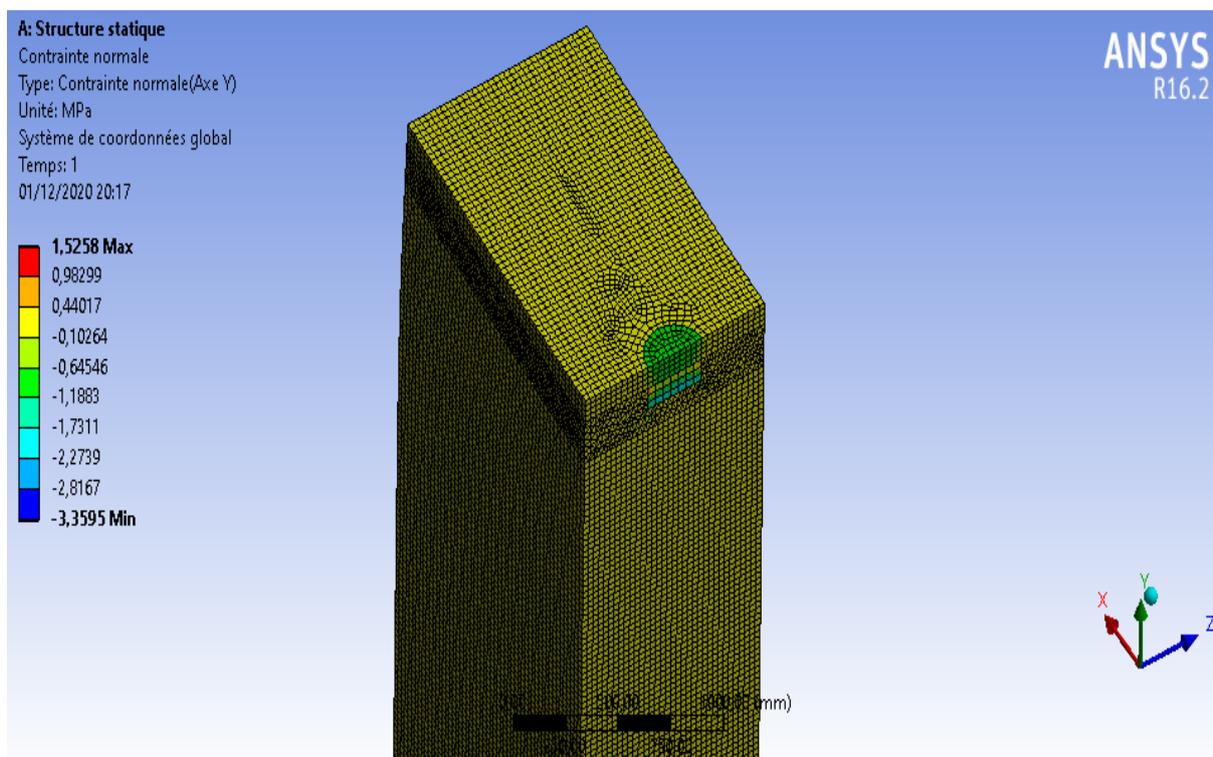


Figure 68. Contrainte normale (axe Y)

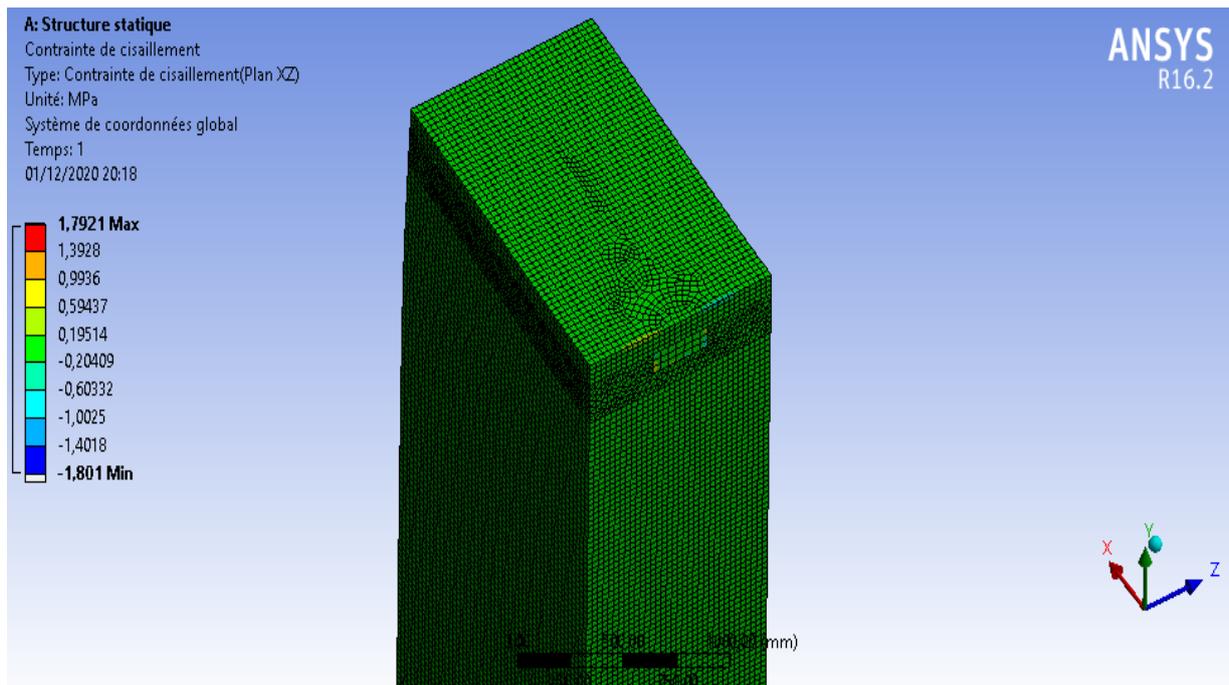


Figure 69. Contrainte de cisaillement (Plan XZ)

IV.5.2. Chaussée souple avec géotextile sous l'effet de la température :

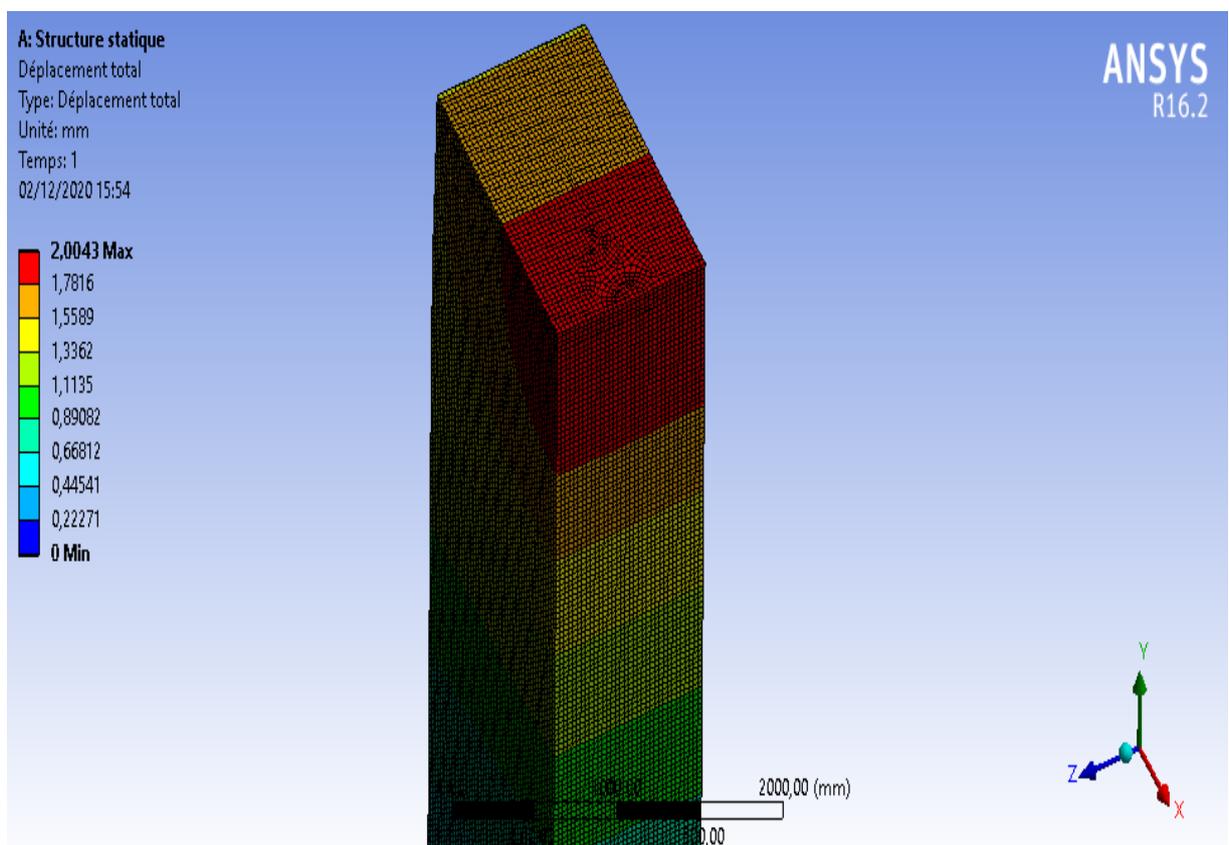


Figure 70. Déplacement total

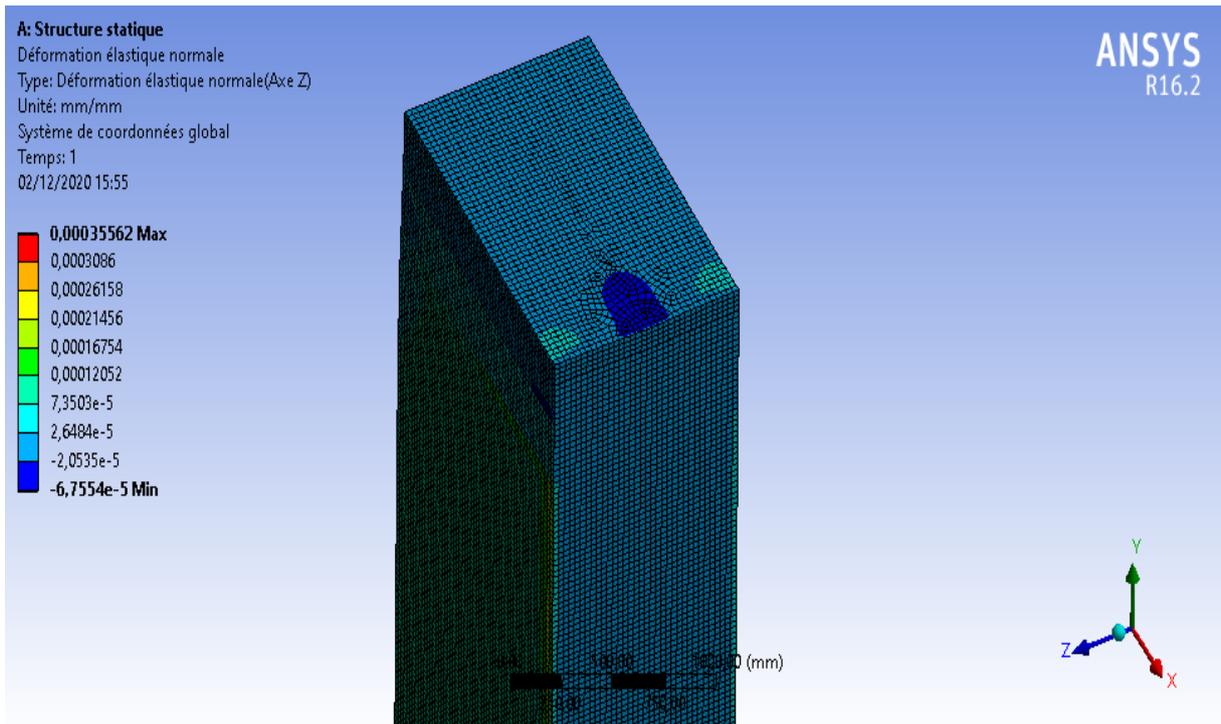


Figure 71. Déformation élastique normale (axe Z sens de circulation)

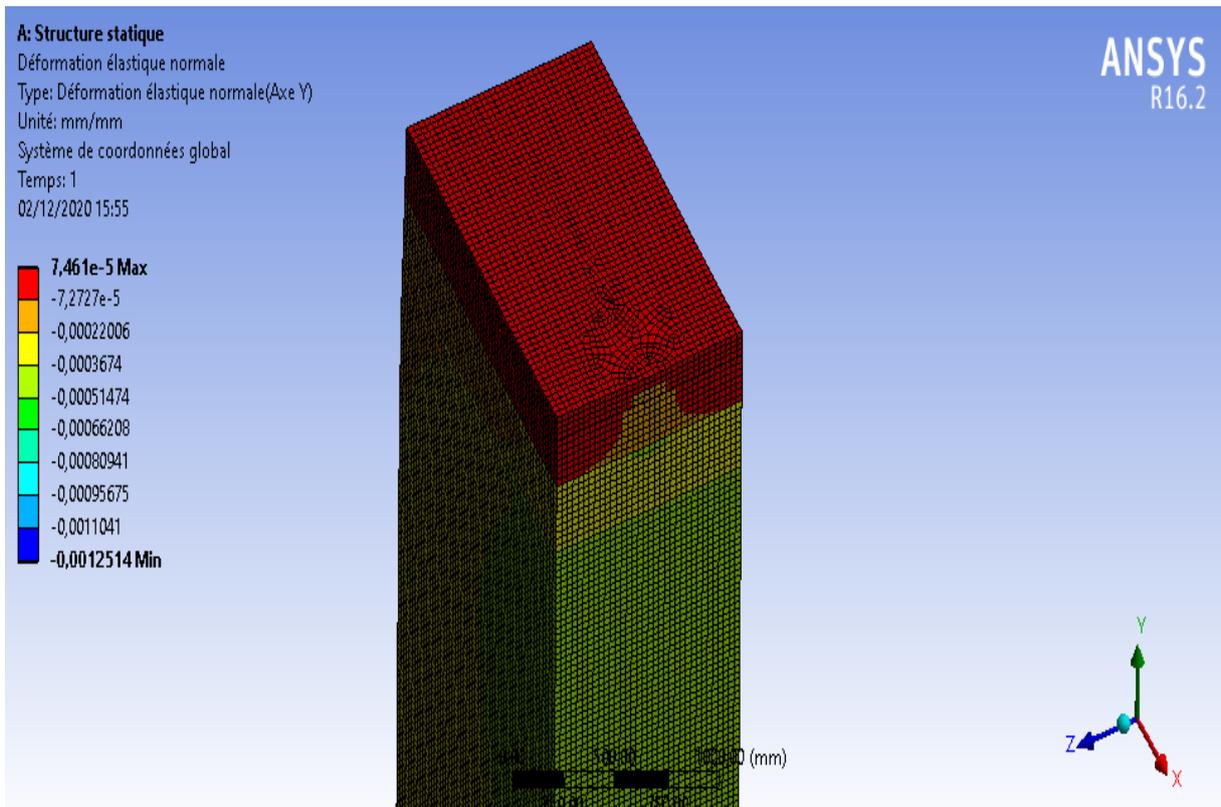


Figure 72. Déformation élastique normale (axe Y)

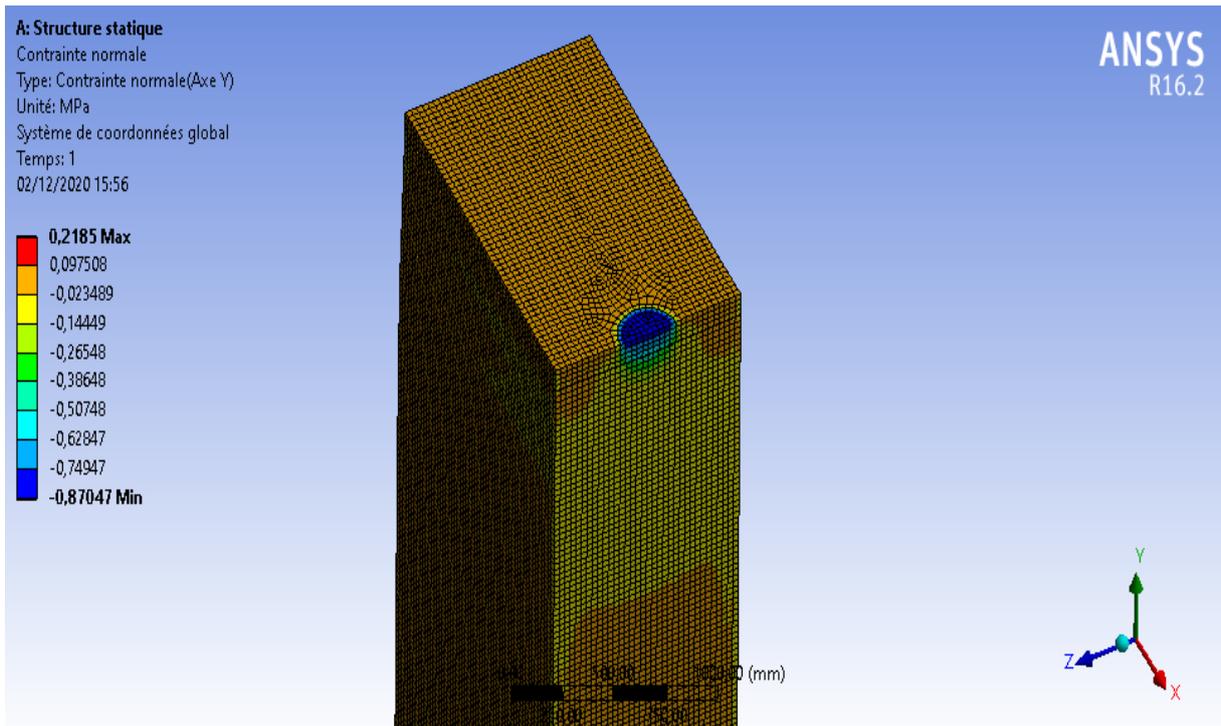


Figure 73. Contrainte normale (axe Y)

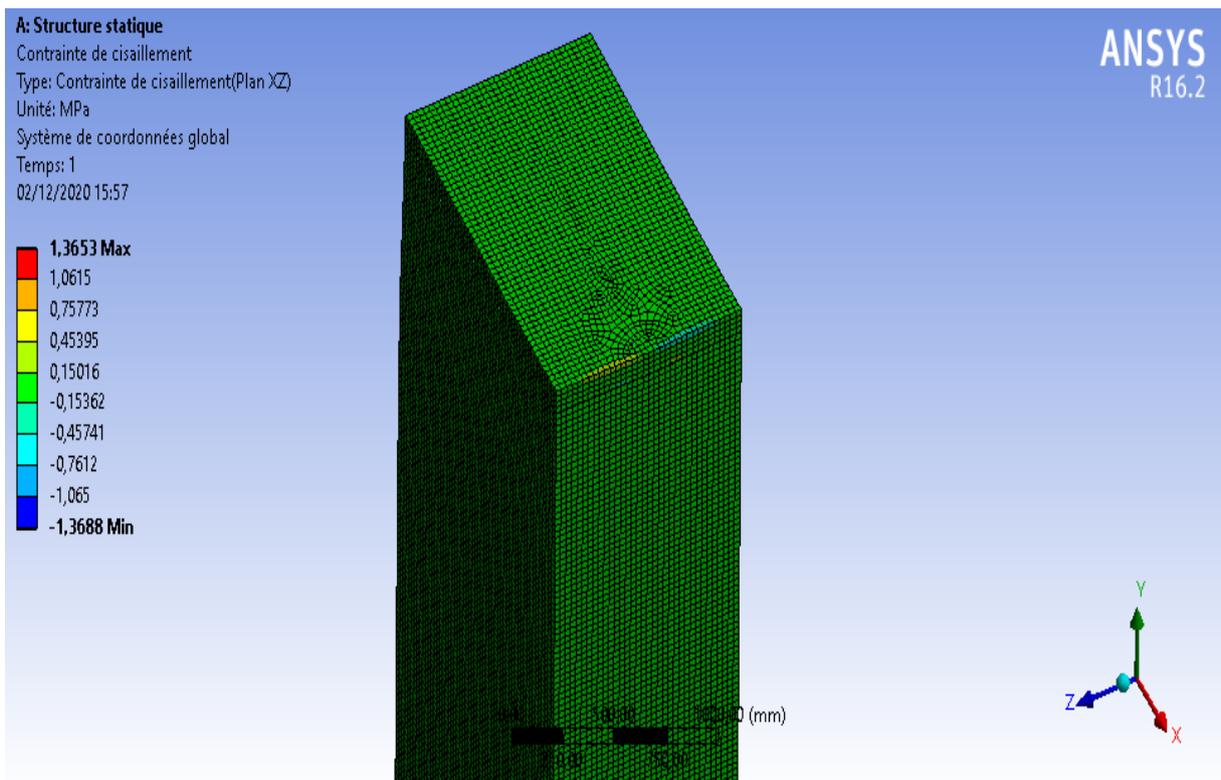


Figure 74. Contrainte de cisaillement (Plan XZ)

	Sans géotextile	Avecgéotextile	Différence
Déplacement total (mm)	2.08	2	0.08
Déformation élastique normale Z (mm/mm).10⁻⁴	3.55	3.55	0
Déformation élastique normale Y (mm/mm).10⁻⁵	10.62	7.46	3.16
Contrainte normale Axe Y (MPa) en compression	3.36	0.87	2.49
Contrainte de cisaillement Plan XZ (MPa)	1.79	1.37	0.42

Tableau 6. Différence des résultats obtenus pour les deux analyses

IV.5.3.interprétation des résultats :

Les figures 65 à 74 montres les cartographies des déplacements, déformations et des contraintes qui sont obtenues à partir d'une simulation 3-D du comportement de la chaussée souple (sans/avec géotextile) sous l'effet d'une charge constante et une température élevée (30°C) par le code de calcul ANSYS.

Les différents résultats obtenus sont résumés dans le tableau (6).

L'analyse de ces résultats montre qu'il y'a une augmentation de la dégradation de la chaussée souple par rapport à la 1^{er} analyse celle avec une température de 22°C.

Donc on constate que la température influe sur la dégradation de notre chaussée souple.

On essaye de refaire notre modélisation de la chaussée souple en augmentant l'épaisseur de la couche de BB, GB et GNT, après on va voir si la dégradation de la chaussée diminue.

IV.5.4. Modélisation avec l'augmentation des épaisseurs des couches (Chaussée 2) :

On a augmenté les épaisseurs des couches et ils sont devenus comme suit :

- Couche de roulement en enrobé bitumineux (BB 0/16) de 20 cm d'épaisseur.
- Couche de base en Grave bitumineux (GB 0/20) de 30 cm d'épaisseur.
- Couche de fondation en Grave Non Traité (GNT 0/60) de 40 cm d'épaisseur.
- Couche de sol support (SS) de 500 cm d'épaisseur.

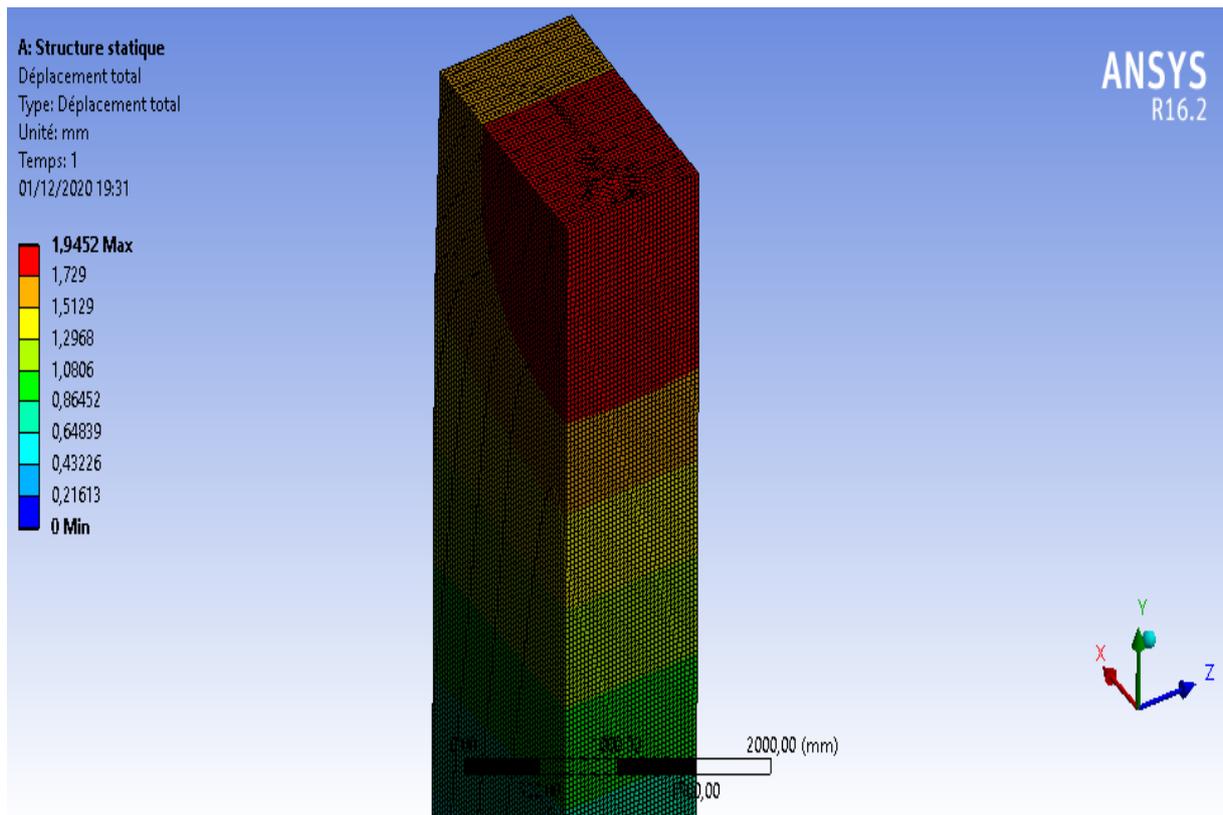


Figure 75. Déplacement total

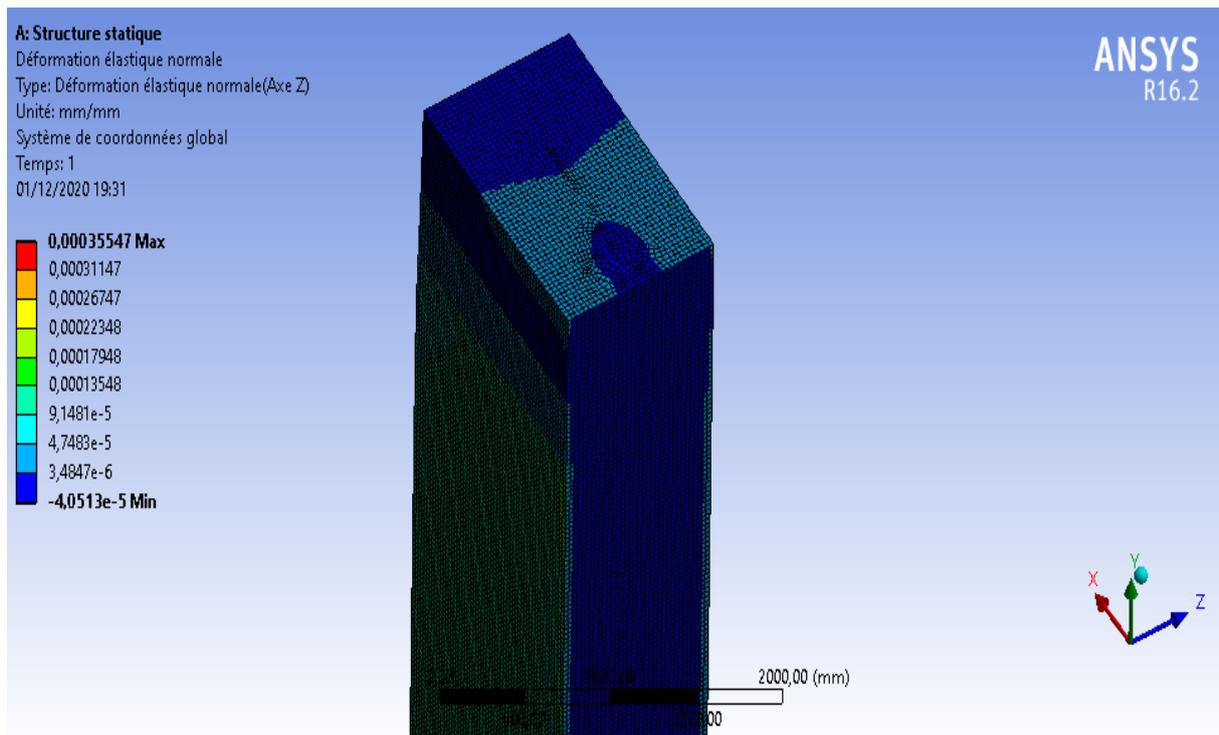


Figure 76. Déformation élastique normale (axe Z sens de circulation)

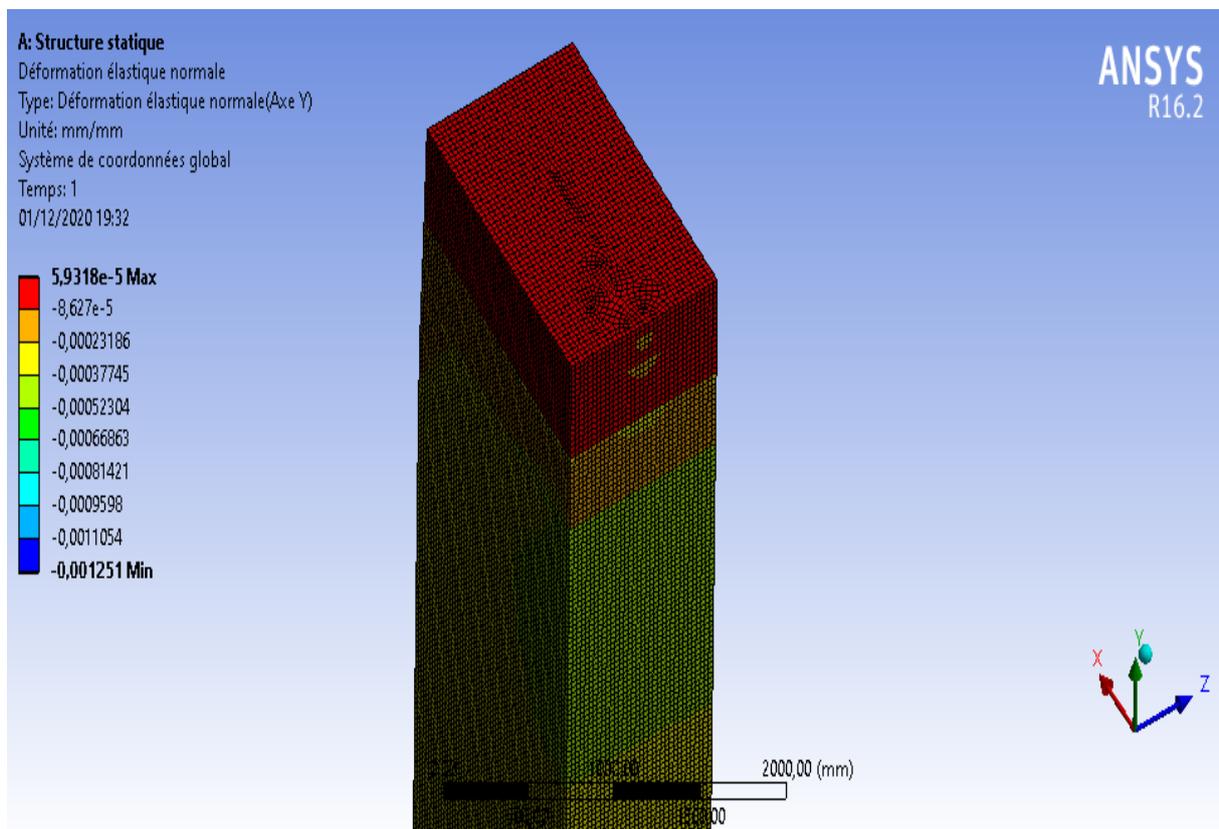


Figure 77. Déformation élastique normale (axe Y)

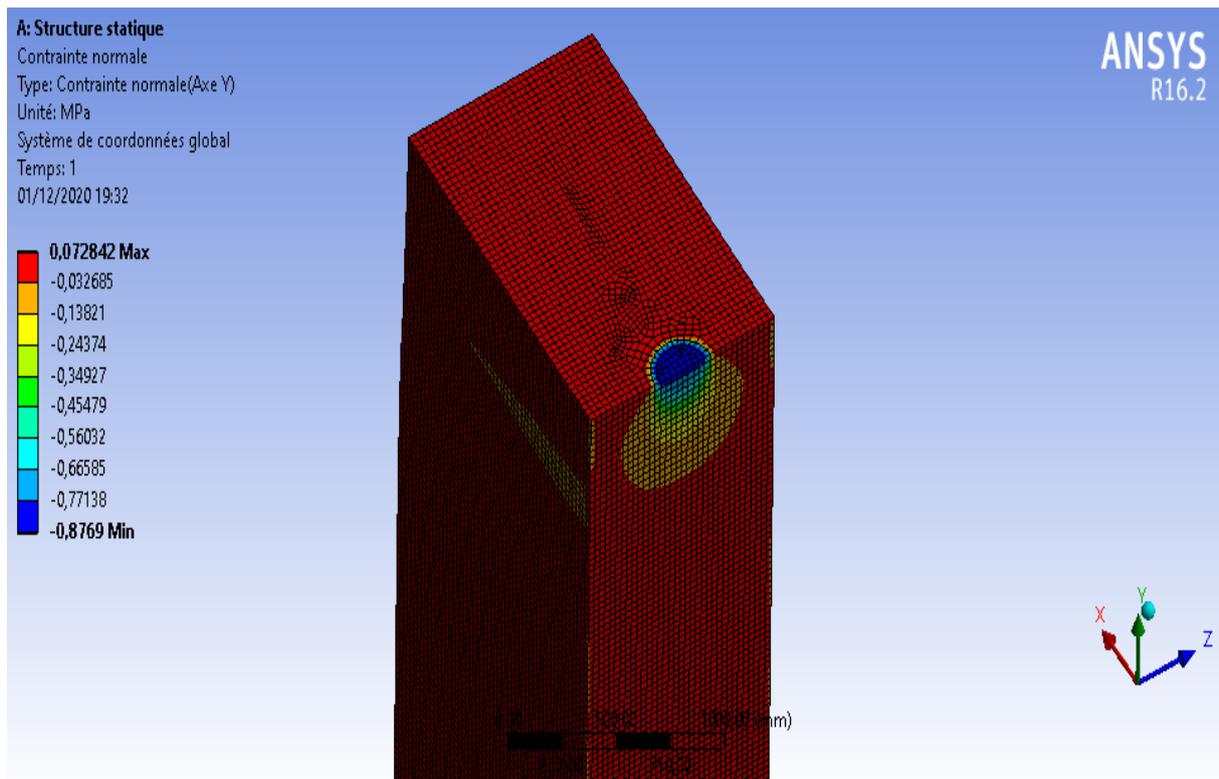


Figure 78. Contrainte normale (axe Y)

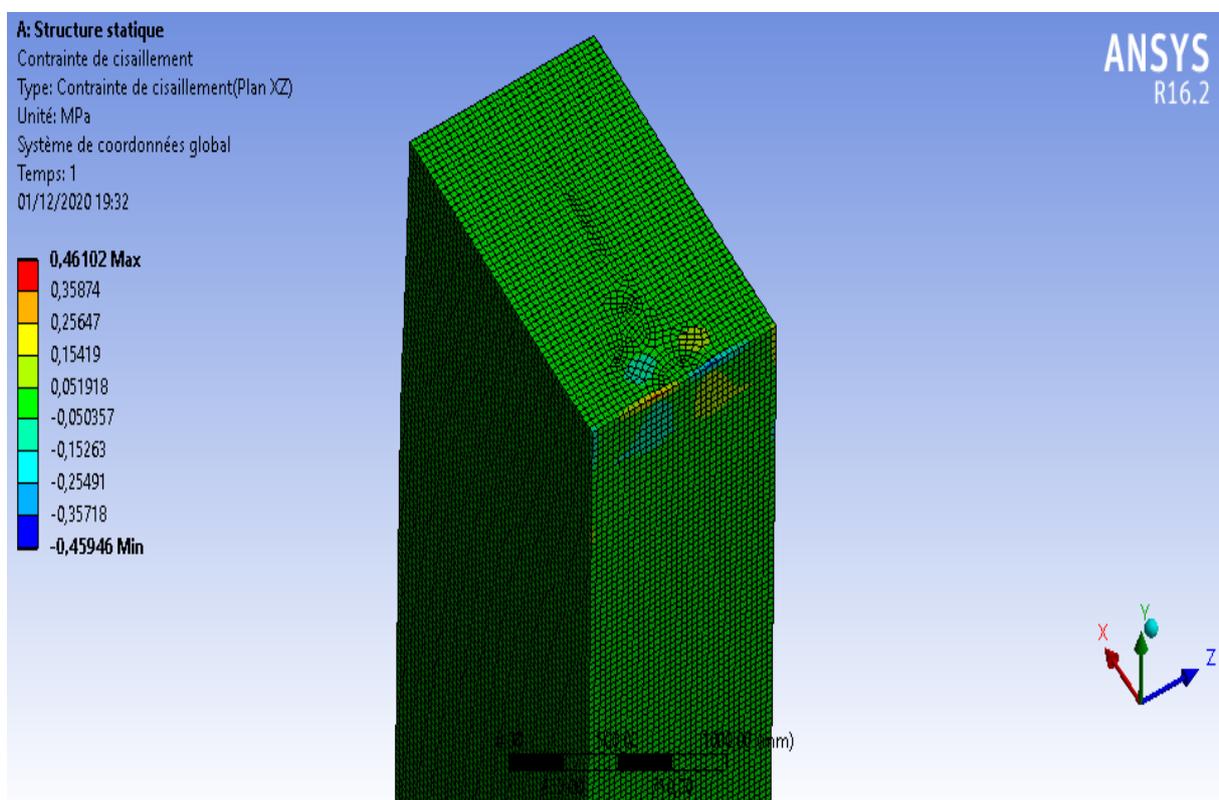


Figure 79. Contrainte de cisaillement (Plan XZ)

	Chaussée 1	Chaussée 2
Déplacement total (mm)	2.08	1.94
Déformation élastique normale Z (mm/mm).10⁻⁴	3.55	3.55
Déformation élastique normale Y (mm/mm).10⁻⁵	10.62	5.93
Contrainte normale Axe Y (MPa) en compression	3.36	0.87
Contrainte de cisaillement Plan XZ (MPa)	1.79	0.46

Tableau 7. Résultats obtenus pour les deux analyses

- D'après les résultats trouvés avec l'augmentation des épaisseurs de BB, GB et GNT on remarque qu'il y'a une diminution de déplacement et de la déformation élastique normale et une diminution de la contrainte de cisaillement alors on constate que dans une zone aride l'augmentation de l'épaisseur des couches nous aide à diminuer la dégradation de notre chaussée souple.

IV.6.Conclusion :

Dans ce chapitre on a essayé d'analyser le comportement d'une chaussée souple au travers d'un certain nombre de paramètres.

L'effet de la pression de contact est étudié en considérant deux types d'analyse sans et avec géotextile. On a remarqué que la chaussée renforcée avec le tissu de géotextile donne de bons résultats par rapport à la chaussée sans géotextile.

Nous avons ensuite analysé l'effet de la variation de la température et ses conséquences sur le comportement de la chaussée en réduisant le module de Young dans le logiciel, en particulier la couche bitumineuse qui est très sensible aux gradients des températures, on a constaté que l'effet de la température sur la chaussée a provoqué une augmentation de déplacement, déformation, la contrainte normale et de cisaillement. Donc on a opté pour une augmentation des épaisseurs des couches.

Enfin après l'augmentation des épaisseurs des couches on a trouvé des résultats acceptables.

Conclusion générale

Les routes et les autoroutes contribuent d'une manière considérable au 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 attendue.

Dans ce sens, les géo synthétiques peuvent être efficacement utilisés pour :

- réduire ou éviter la remontée des fissures ;
- fonctionner comme barrière pour éviter le pompage des fines du sol ;
- réduire l'épaisseur du revêtement bitumineux ;
- réduire l'épaisseur de la chaussée ;
- augmenter la durée de vie de la chaussée.

Les matériaux et les techniques de construction utilisés dans le domaine des infrastructures routières évoluent pour pouvoir répondre aux nouvelles conditions de circulation, à la conception des chaussées, à la politique de l'entretien et aux conditions économiques. Aujourd'hui, le résultat de cette évolution est l'utilisation de deux à plusieurs matériaux qui complètent leurs qualités pour former un matériau aux performances globales améliorées appelé « matériaux composites ».

L'étude des chaussées renforcées par les matériaux géo synthétiques exige une large connaissance au domaine de la géotechnique, mécanique des sols, sciences des matériaux...etc.

Notons qu'enfin ce projet, qui représente pour nous une première expérience, nous a permis de transposer nos connaissances théoriques et pratiques. En particulier l'utilisation du code de calcul en éléments finis **ANSYS** qui est indispensable pour les simulations numériques.

Référence bibliographie

[1] **HELIL.H ; KHOUDJA.N, 2017** : « MEMOIRE DE MASTER en Génie Civil » (Etude d'un béton bitumineux à base de sables de dunes).

[2] [LCPC, 1994] LCPC. *Conception et dimensionnement des structures de chaussées*. Guide Technique, LCPC-SETRA, 1994.

[3] **bétons bitumineux** : [www.guidebeton.com/beton-bitumineux]

[4] **CTTP** : LES CARACTERISATION D'UN ENROBE A BASE DE SABLE DE DUNE PAR LES ESSAIS DES 4 NIVEAUX DE FORMULATION.

[5] **M.MERBOUH, (2010)** :«Contribution à la modélisation du comportement rhéologique des enrobés bitumineux, Influence des conditions extrêmes de température et de trafic en fatigue», (Thèse Doct. Université BORDEAU 1, sciences technologies).

[6] Hauptstrasse 591 CH-4625 Oberbuchsiten Solothurn Schweiz. www.impbautest.ch

[7] **A.BOUMADIANE : [Ingénieur Expert routier]** « Les bétons bitumineux, Formulation ; Exécution ; Contrôle de qualité » (Le Laboratoire d'Expertise d'Essais et d'Etudes L3E).

[8] [www.google.com/enrobés bitumineux/PDF](http://www.google.com/enrobés_bitumineux/PDF) ; « les enrobés bitumineux», les éditions le griffon d'argile, mise à jour 2002.PP117.

[9] www.hoskin.qc.ca.com

[10] **ANOUAR-ABDELAZIZ** : ZEMMIRI ENTPE de Lyon - Certificat d'études supérieures 2008. www.memoireonline.com

[11] Mémoire de Magister 2012 Boulfoul Khalifa, étude numérique sur l'effet de l'espacement des géo grilles sur les mécanismes de rupture des murs en sol renforcé.

[12] Lamara Samia Mémoire de Magister Etude numérique d'une fondation circulaire reposant sur un sable renforcé par géo grilles.

[13] Thèse doctorat BERRABAH Fouad 2015 « Évaluation numérique de l'effet du renforcement par nappes de géo synthétique sur la stabilité et le tassement des remblais sur sol compressible ».

[14].Revue littéraire Robin Guilbaud 2011 « Utilisation des matériaux géo synthétiques dans le renforcement des chaussées ».

[15]. Bassem ALI Modèle numérique pour comportement mécanique des chaussées : application à l'analyse de l'orniérage, thèse de doctorat préparé au laboratoire de mécanique