



REPUBLIQUE DU BENIN



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE (MESRS)

UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI (UAC)

ECOLE POLYTECHNIQUE D'ABOMEY-CALAVI (EPAC)

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

Option : *Bâtiment et Travaux Publics (BTP)*

MEMOIRE DE FIN DE FORMATION POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR
DE CONCEPTION GRADE MASTER

**Contribution des déchets plastiques composites (matrice polymère +
fibres de renfort) dans l'amélioration des performances mécaniques des
enrobés bitumineux**

Rédigé et soutenu par : AÏDEKON Ernest

Sous la direction de :

Encadreur :

Dr Tiambo Abbas DATCHOSSA

Docteur, Ingénieur en Génie Civil

Assistant à l'EPAC

Maitre de mémoire :

Pr Emmanuel OLODO

Professeur Titulaire du CAMES

Enseignant Chercheur à l'EPAC

Soutenu publiquement le 27 Février 2026 devant le jury composé de :

Président :

Pr GIBIGAYE Mohamed

Professeur Titulaire des Universités de CAMES

Membre :

Pr OLODO Emmanuel

Professeur Titulaire des Universités de CAMES

Membre :

Dr (MA) KOTO TAMOU Chéissou

Collaborateur extérieur

Membre :

Dr DATCHOSSA T. Abbas

Collaborateur extérieur

Année académique : 2024-2025

RÉPUBLIQUE DU BÉNIN

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE (MESRS)

UNIVERSITÉ D'ABOMEY-CALAVI (UAC)

ÉCOLE POLYTECHNIQUE D'ABOMEY-CALAVI (EPAC)

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

DIRECTEUR

Docteur Tamègnon Victorien DOUGNOU

(Professeur Titulaire des Universités du CAMES)

DIRECTRICE ADJOINTE

Docteur Chakirath Folakè Arikè SALIFOU

(Professeur Titulaire des Universités du CAMES)

(Chargé des Etudes et affaires académiques)

CHEF DE DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Docteur HOUANOU Kocouvi Agapi

(Maître de Conférences des Universités du CAMES)

Année Universitaire : 2024-2025

18^{ème} Promotion

**Mémoire de fin de formation pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de conception
grade master**

**LISTE DES ENSEIGNANTS AYANT INTERVENU DANS NOTRE FORMATION DE
2022-2025**

NOMS	PRENOMS	MATIERES ENSEIGNEES
ACODJI	Pamphile	Analyse Economique et Financière Electricité générale
ADEOTI	Guy	Dessin Assisté par l'Ordinateur Atelier de dessin et CAO DAO
ADJOVI	Edmond	Construction bois
AHONONGA	Sylvie	Cours Séminaire
ALE	Georges	Entreprenariat et Leadership Création et Gestion d'entreprise Management des projets
BACHAROU	Taofic	Hydrologie de l'ingénieur Hydraulique Appliquée Assainissement pluvial Collecte et évacuation des eaux usées domestiques
BOSSOU	Anick	Initiation à la recherche
DANHA	Damien	Anglais scientifique approfondi
DATCHOSSA	Tiambo Abbas	Métré et étude de prix
DEGBEGNON	Léopold	Topométrie Générale Topométrie appliquée
DJIBRIL	Farouk	Calcul tensoriel Introduction à la mécanique des milieux continus
DOKO	Valéry	Résistance des Matériaux renforcés Résistance des Matériaux avancée, Structure hyperstatique Dynamique des Structures élastiques Conception et calcul de ponts Eco matériaux de construction
GIBIGAYE	Mohamed	Béton armé avancée Mécanique des solides déformables Béton précontraint Droit des Travaux publics

**Mémoire de fin de formation pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de conception
grade master**

		Projet de construction (BA-CM)
GODONOU	Gildas	Matériaux Innovants et Géotechnique Routières
HOUANOU	Agapi	Matériels de construction Construction métallique initiale Construction métallique avancée Construction mixte acier-béton Introduction aux Eurocodes
HOUINOU SOUROU	Agathe	Mécanique des sols avancée Mécanique des sols approfondie Travaux pratiques spécialisés
MILOHIN	Gladys	Béton armé initiale
OLODO	Emmanuel	Procédés généraux de construction Modélisation des systèmes et simulation
OLORY	Bienvenu	Anglais scientifique approfondi Anglais scientifique initiale Anglais scientifique renforcé
ORLOVA	Hélène	Plomberie sanitaire
SEWANOUDE	Damien	Economie générale Comptabilité générale Générale Marketing et communication
SOLEVO	Achille	Législation du travail
TCHEHOUALI	D. Adolphe	Matériaux de construction
WANKPO	Tonalémi Epiphane	Mécanique des Fluides Appliquée Hydraulique générale
YABI	Crespin	Route Initiale et Topométrie routière Route II
Feu ZINSOU	Codjo Luc	Mécanique des sols initiale Travaux pratiques spécialisés

DEDICACES

À mes chers parents, mes frères et sœurs,

Ce mémoire est l'aboutissement de mes efforts, mais il n'aurait jamais vu le jour sans votre amour, vos prières et votre soutien indéfectible. Vous avez été mes piliers, mes sources de courage et de persévérance. Vos sacrifices, vos encouragements dans les moments de doute et vos conseils éclairés m'ont permis de franchir les étapes de ce parcours. C'est avec une profonde reconnaissance que je vous dédie ce travail, en espérant qu'il soit à la hauteur de l'amour et de l'attention que vous m'avez prodigués.

À mes amis et collègues de promotion,

Votre présence, vos conseils, vos encouragements et vos moments de partage ont rendu ce chemin académique plus léger et plus enrichissant. Merci pour la solidarité, la complicité et l'esprit d'équipe qui ont jalonné notre parcours. Ce mémoire vous est également dédié, comme témoignage de toute mon estime et de ma gratitude.

AÏDEKON Ernest

REMERCIEMENTS

Avant tout propos, nous tenons à remercier **Dieu le Père Tout Puissant**, créateur de toutes choses et par qui toutes choses voient le jour, pour sa protection et son assistance durant tout le parcours de notre formation.

Nous témoignons notre profonde gratitude à notre maître de mémoire **Pr OLODO Emmanuel**, Professeur Titulaire des Universités CAMES et à notre encadreur **Dr Tiambo Abbas DATCHOSSA**, Enseignant-chercheur, pour avoir accepté de diriger ce mémoire. Votre sens du partage, vos conseils et vos apports ont permis à ce que ce document puisse voir le jour. Nos remerciements vont également à l'endroit de :

- ❖ **Dr Tamègnon Victorien DOUGNOU**, Professeur Titulaire des Universités du CAMES, Directeur de l'Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi et **Dr Chakirath Folakè Arikè SALIFOU**, Directrice-Adjointe de l'Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi, pour leur bienveillance et leur expertise ;
- ❖ **Dr HOUANOU Kocouvi Agapi**, Maître de Conférences des Universités CAMES, Ancien Chef du Département de Génie Civil de l'Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi, pour ses orientations et son engagement envers notre formation et la recherche ;
- ❖ Le corps enseignant de l'Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi, en particulier ceux du Département de Génie Civil, pour leur dévouement, leur savoir-faire et leur engagement à transmettre leur passion et leur expertise, contribuant ainsi au développement de notre esprit critique et technique ;
- ❖ Le personnel administratif de l'EPAC, pour l'organisation, les infrastructures et les ressources mises à notre disposition tout au long de notre cursus ;

Une note particulière de reconnaissance à :

- ❖ **Mr Moise ATTAKPA**, mon cher oncle, Ingénieur de conception, spécialiste des ponts et chaussées ; qui a su intervenir de loin auprès de l'entreprise pour le bon déroulement de mon stage ;
- ❖ **Mr Jean-Marie Servais DOVONON**, Directeur du Bureau d'Etudes ACEP pour m'avoir accueilli dans sa structure ;

- ❖ **Mr Moudachirou ADJIBOICHA**, Ingénieur de conception en génie civil, Directeur Technique de ACEP, pour m'avoir accompagné et donné les instructions nécessaires pour ma prise en charge ;
- ❖ **Mr Barthélémy AHOUANDJINO**, ingénieur et contrôleur des travaux de ACEP sur le projet de travaux d'aménagement des voiries primaires, secondaires et tertiaires, dans la ville d'Abomey Calavi (asphaltage phase b1) -lot 10 b1, pour son assistance, ses conseils éclairés et son soutien précieux ;
- ❖ A tout le personnel de ACEP, pour la convivialité et l'accueil chaleureux durant mon stage ;
- ❖ Tous nos proches et camarades de promotion, pour leur solidarité et leur aide mutuelle ;
- ❖ Toutes les personnes, qui d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réalisation de ce travail, recevez notre sincère gratitude.

HOMMAGES

❖ Au Président du Jury

Excellence Monsieur le Président du Jury, nous vous exprimons notre profonde gratitude pour l'honneur que vous nous faites en présidant ce jury de validation. Votre haute expertise et votre riche expérience constituent pour nous une référence et un gage de rigueur scientifique. Vos observations et vos orientations ne manqueront pas d'enrichir ce travail et de lui donner une valeur académique plus affirmée. Nous vous adressons nos hommages les plus respectueux.

❖ Aux membres du Jury

Honorables Membres du Jury, c'est un privilège et un honneur pour nous de bénéficier de votre disponibilité et de votre attention dans l'évaluation de ce mémoire. Vos critiques constructives, vos suggestions et vos recommandations apporteront sans nul doute un éclairage précieux et une amélioration significative à la portée scientifique de ce travail. Veuillez recevoir l'expression de notre gratitude sincère et de nos hommages respectueux.

LISTE DES ABREVIATIONS ACRONYMES ET SIGLES

UAC : Université d'Abomey Calavi

EPAC : Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi

GC : Génie Civil

CEBTP : Centre Expérimental des recherches et d'Etude de Bâtiment et des Travaux Publics

LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

3D : 3ème Dimension

BB : Béton bitumineux

MEF : Méthode des éléments finis

GB : Grave-Bitume

SB : Sable bitume

BBME : Bétons bitumineux à module élevé

EME : Enrobe à module élevé

VEL : Viscoélastique linéaire

PE : Polyéthylène

PP : Polypropylène

PET : Polytéraphthalate d'éthylène

PRF : Plastiques composites renforcés de fibres

DDL : Degrés de liberté

AEF : Analyse des éléments finis

CR : Couche de roulement

CB : Couche de base

CF : Couche de fondation

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Caractéristiques exigées pour les granulats routiers.....	26
Tableau 2: Principales matières plastiques.....	34
Tableau 3: Propriétés des différents types de plastiques	35
Tableau 4: Proportions des constituants des mélanges.....	62
Tableau 5: Propriétés des constituants des mélanges	63
Tableau 6: Propriétés équivalentes associées aux différents taux de plastiques	67
Tableau 7: Récapitulatif des résultats de simulation	71
Tableau 8 : Déplacement U3 aux différentes interfaces de la chaussée	82

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Constitution d'une structure de chaussée	4
Figure 2 : Chaussées souples.....	8
Figure 3 : Chaussées bitumineuses épaisses	8
Figure 4 : Chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques	9
Figure 5 : Chaussées à structure mixte.....	9
Figure 6 : Chaussées à structure inverse	9
Figure 7 : Dalles non goujonnées avec fondation	10
Figure 8 : Dalles goujonnées avec fondation	10
Figure 9 : Dalles sans fondation.....	10
Figure 10 : Béton armé continu.....	10
Figure 11 : Béton armé continu 2.....	10
Figure 12 : Sollicitation en traction et en compression des enrobés lors du passage des véhicules (Doucet & Auger, 2010).....	12
Figure 13: Courbe d'évolution des chaussées.....	14
Figure 14: Classification des enrobés bitumineux (TADJER,2020)	27
Figure 15: Comportement mécanique des enrobés bitumineux à température fixe (Di Benedetto & Corté, 2005)	30
Figure 16: Mécanisme de fissuration par fatigue dans les chaussées bitumineuses (Priest & Timm, 2006).....	32
Figure 17: Les sollicitations induites par le trafic sur une chaussée bitumineuse adaptée de (Di Benedetto & Corté, 2005)	33
Figure 18: Structure des matières plastiques.....	34
Figure 19: Schéma de recyclage du plastique	37
Figure 20: Interface d'utilisateur du logiciel ABAQUS/CAE	46
Figure 21: (a) maillage en 2D (poutre I) ; (b) maillage en 3D (poutre I).....	54
Figure 22 : (a) maillage raffiné (plaque) ; (b) maillage grossier (plaque).....	54
Figure 23 : Formes géométriques 1D.....	54
Figure 24 : Formes géométriques 2D	55
Figure 25 : Formes géométriques 3D	55
Figure 26 : Familles d'éléments	57
Figure 27: Géométrie tridimensionnelle de l'échantillon Marshall modélisé sous Abaqus.....	68
Figure 28: Paramétrage des propriétés élastiques du matériau dans Abaqus	68

Figure 29: Assemblage numérique de l'essai Marshall dans Abaqus	69
Figure 30: Définition des interactions de contact.....	69
Figure 31: Conditions aux limites appliquées à l'éprouvette Marshall.....	70
Figure 32: Maillage par éléments finis de l'éprouvette Marshall	70
Figure 33: Champ de déplacements verticaux (U3) de l'éprouvette Marshall	71
Figure 34 : Chaussée type à modéliser	74
Figure 35 : Différentes couches de chaussée.....	74
Figure 36 : Présentation de la plaque multicouche sur sol élastique.....	75
Figure 37 : Présentation de la plaque maillée et déformée sur le sol solide : charge statique centrée	75
Figure 38: Evolution de la densité apparente du béton bitumineux en fonction de la teneur en granulés plastiques	77
Figure 39 : Evolution de la densité apparente du béton bitumineux en fonction de la teneur en sachets plastiques	77
Figure 40: Evolution de la stabilité Marshall du béton bitumineux en fonction de la teneur en granulés plastiques	79
Figure 41 : Evolution de la stabilité Marshall du béton bitumineux en fonction de la teneur en sachets plastiques	79
Figure 42 : Déplacement U3 de la plaque le long de l'axe X en bas de la couche de roulement conventionnelle sur un sol élastique dans le cas d'une charge statique	80
Figure 43 : Déplacement U3 de la plaque le long de l'axe X en bas de la couche de roulement conventionnelle sur un sol élastique dans le cas d'une charge statique	81

RESUME

Cette étude examine, par simulation numérique, l'influence de l'incorporation de déchets plastiques sur le comportement mécanique des enrobés bitumineux destinés aux couches de roulement en climat tropical. Une attention particulière est portée aux déchets plastiques renforcés de fibres, issus de mobiliers usagés, encore peu considérés dans la conception des enrobés modifiés.

La méthodologie repose sur la simulation par éléments finis sous Abaqus de l'essai Marshall et d'une structure de chaussée multicouche reposant sur un sol élastique, soumise à une pression uniforme de 0,0662 MPa représentative d'un chargement réel. Les taux d'incorporation étudiés varient de 0 % à 20 %, et leur influence est analysée à travers des indicateurs mécaniques critiques, notamment la stabilité Marshall, les déplacements verticaux Δ et la rigidité structurelle effective.

Les résultats mettent en évidence une amélioration significative de la stabilité Marshall, qui augmente de 21,0 kN à 23,3 kN, soit un gain de 11 %. À l'échelle structurelle, l'incorporation de plastiques composites entraîne une réduction mesurable des déplacements critiques. Le déplacement vertical minimal en surface diminue de $4,551 \times 10^{-4}$ mm à $4,305 \times 10^{-4}$ mm à 12 % d'incorporation, tandis que les déplacements maximaux aux interfaces structurelles se stabilisent autour de $2,25 \times 10^{-3}$ mm, traduisant une amélioration de la rigidité effective et une meilleure redistribution des contraintes. Ces résultats démontrent que les plastiques composites renforcés de fibres contribuent à augmenter le module équivalent global de la structure et à améliorer sa capacité portante.

L'analyse couplée des performances mécaniques et volumétriques permet d'identifier une plage optimale d'incorporation comprise entre 10 % et 12 %, correspondant au meilleur compromis entre rigidité, stabilité et durabilité. Cette étude apporte une contribution scientifique originale en démontrant, par simulation numérique, l'efficacité des plastiques composites comme agents de renforcement structurel des chaussées, et ouvre des perspectives prometteuses pour leur utilisation durable dans les infrastructures routières en climat tropical.

Mots-clés : enrobé bitumineux, plastiques composites renforcés, rigidité structurelle effective, stabilité Marshall, modélisation par éléments finis, chaussée multicouche, Abaqus.

ABSTRACT

This paper investigates, through numerical simulation, the effect of plastic waste incorporation on the mechanical behavior of asphalt mixtures used as wearing courses in tropical climates. Particular emphasis is placed on fiber-reinforced plastic waste derived from discarded furniture, which has received limited attention in pavement engineering studies.

The methodology combines finite element simulation using Abaqus of both the Marshall test and a multilayer pavement system resting on an elastic foundation, subjected to a uniform pressure of 0.0662 MPa representative of real traffic loading. Plastic incorporation rates ranging from 0% to 20% were investigated, and their influence was evaluated through key mechanical indicators including Marshall stability, vertical displacement, and effective structural stiffness.

Results demonstrate a significant increase in Marshall stability from 21.0 kN to 23.3 kN, corresponding to an 11% improvement. At the structural level, composite plastic incorporation leads to measurable reductions in critical displacements. The minimum vertical displacement at the pavement surface decreases from 4.551×10^{-4} mm to 4.305×10^{-4} mm at 12% incorporation, while maximum interface displacements stabilize around 2.25×10^{-3} mm, indicating improved stiffness and more efficient stress redistribution. These findings confirm that fiber-reinforced composite plastics enhance the global equivalent modulus and load-bearing capacity of the pavement structure.

The combined mechanical and volumetric analysis identifies an optimal incorporation range between 10% and 12%, corresponding to the best balance between stiffness enhancement, structural stability, and durability. This study provides an original scientific contribution by demonstrating, through advanced numerical modeling, the effectiveness of composite plastic waste as a structural reinforcement material for sustainable pavement design in tropical environments.

Keywords: asphalt mixtures, fiber-reinforced composite plastics, effective structural stiffness, Marshall stability, finite element modeling, multilayer pavement, Abaqus.

SOMMAIRE

LISTE DES ENSEIGNANTS AYANT INTERVENU DANS NOTRE FORMATION DE 2022-2025.....	i
DEDICACES	iii
REMERCIEMENTS.....	iv
HOMMAGES	vi
LISTE DES ABREVIATIONS ACRONYMES ET SIGLES	vii
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES FIGURES	ix
RESUME.....	xi
ABSTRACT	xii
SOMMAIRE	xiii
INTRODUCTION GENERALE	1
Contexte global et justification.....	1
État de l'art et positionnement scientifique	2
Problématique.....	2
Objectif principal	3
Objectifs spécifiques.....	3
Démarche méthodologique	3
Chapitre I : Généralités et revue de littérature	4
1.1. Les chaussées et les enrobés bitumineux	4
1.2. Types de plastiques utilisés et effets sur les propriétés mécaniques.....	33
1.3. Avancées des recherches expérimentales existantes	37
1.4. Justification du recours à une modélisation numérique prédictive	44
Chapitre II : Matériels et méthodologie de simulation numérique	45
2.0. Présentation du matériel de modélisation : le code ABAQUS.....	45
2.1. Méthode de calcul des plaques multicouches	47
2.2. Hypothèses générales de modélisation	61
2.3. Modélisation des matériaux	62
2.4. Cas de modélisation de l'éprouvette Marshall.....	67
2.5. Choix de la plage optimale	73
2.6. Présentation générale de l'ouvrage à modéliser	73
CHAPITE III : Résultats et discussions.....	77

3.1. Résultats de la simulation Marshall.....	77
3.2. Résultats de la simulation de la chaussée complète	80
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	77
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	78

INTRODUCTION GENERALE

Contexte global et justification

La croissance exponentielle de la production de plastiques au cours des dernières décennies constitue l'un des défis environnementaux les plus critiques à l'échelle mondiale. En raison de leur durabilité, de leur faible biodégradabilité et de l'insuffisance des systèmes de gestion des déchets, les plastiques s'accumulent dans les écosystèmes terrestres et aquatiques, entraînant des impacts environnementaux, économiques et sanitaires significatifs. Dans les pays en développement, notamment en Afrique subsaharienne, cette problématique est amplifiée par l'urbanisation rapide, la forte consommation de produits plastiques et les limitations des infrastructures de collecte et de valorisation.

Au Bénin, malgré l'adoption de mesures réglementaires visant à limiter l'utilisation des plastiques non biodégradables [1], leur consommation demeure élevée et leur gestion reste problématique. Ces déchets sont fréquemment abandonnés dans l'environnement, obstruant les réseaux de drainage, aggravant les inondations et compromettant la qualité de l'environnement urbain et naturel [2]. À titre illustratif, la ville de Cotonou génère plus de 14 091,07 tonnes de déchets solides ménagers par mois, mettant en évidence l'ampleur du défi lié à leur traitement et à leur valorisation [3]. Dans ce contexte, la recherche de solutions innovantes pour la valorisation des déchets plastiques constitue une priorité stratégique, à la fois sur les plans environnemental et technique.

Parallèlement, le développement et la durabilité des infrastructures routières représentent un enjeu majeur pour le développement économique et social. Au Bénin, le réseau routier est soumis à des conditions particulièrement sévères, notamment l'augmentation continue du trafic, les charges répétées des essieux lourds et les conditions climatiques tropicales caractérisées par des températures élevées et des cycles alternés de pluie et de sécheresse [4]. Ces facteurs contribuent à la dégradation progressive des chaussées bitumineuses, se manifestant par des phénomènes d'orniérage, de fissuration et de déformations permanentes, réduisant leur durée de vie et augmentant les coûts d'entretien.

Dans ce contexte, l'amélioration des propriétés mécaniques des enrobés bitumineux constitue un enjeu majeur pour la durabilité des infrastructures routières.

État de l'art et positionnement scientifique

L'incorporation de polymères dans les enrobés bitumineux est largement reconnue comme une méthode efficace pour améliorer leurs propriétés mécaniques, notamment leur rigidité, leur résistance à la déformation permanente et leur durabilité. Plusieurs études ont montré que l'ajout de plastiques recyclés permet d'améliorer la stabilité Marshall, de réduire les déformations et d'augmenter la résistance aux sollicitations mécaniques.

Cependant, la majorité des travaux existants se concentre sur des plastiques conventionnels tels que le polyéthylène et le polypropylène non renforcé. Le potentiel des plastiques composites renforcés de fibres, issus notamment de mobiliers plastiques usagés, reste largement sous-exploré. Ces matériaux présentent pourtant des propriétés mécaniques supérieures, notamment une rigidité accrue, une meilleure résistance à la déformation et une capacité améliorée de transfert des contraintes.

En outre, les études expérimentales nécessitent des ressources importantes en termes de temps, de coût et d'équipements, ce qui limite leur mise en œuvre, en particulier dans les contextes où les moyens techniques sont restreints. Dans ce cadre, la modélisation numérique par éléments finis constitue une alternative fiable et efficace pour analyser le comportement mécanique des structures routières et prédire leur performance.

La modélisation numérique permet notamment d'évaluer l'influence des propriétés des matériaux sur la réponse structurelle des chaussées, en termes de déplacements, de contraintes et de rigidité globale.

Problématique

Malgré les avancées dans le domaine des enrobés modifiés, plusieurs questions scientifiques et techniques restent ouvertes, notamment en ce qui concerne l'utilisation des plastiques composites renforcés de fibres dans les enrobés bitumineux. En particulier, leur influence sur la rigidité structurelle, la stabilité mécanique et la réponse globale des chaussées multicouches en conditions tropicales reste insuffisamment documentée.

La question centrale de cette recherche peut ainsi être formulée comme suit :

Dans quelle mesure l'incorporation de déchets plastiques composites renforcés de fibres influence-t-elle la stabilité mécanique et la rigidité structurelle des enrobés bitumineux et des chaussées multicouches, tel qu'évalué par modélisation numérique par éléments finis ?

Objectif principal

Faire une simulation numérique du comportement mécanique d'un béton bitumineux modifié par des granulés issus des déchets plastiques, en particulier des plastiques renforcés de fibres destiné à être utilisé comme couches de roulement des chaussées au Bénin.

Objectifs spécifiques

- Caractériser, à partir d'une analyse approfondie de la littérature scientifique, les propriétés mécaniques et rhéologiques des constituants du mélange bitumineux (bitume, granulats) ainsi que de l'additif plastique destiné à être incorporé.
- Choisir et justifier un essai mécanique pertinent parmi les essais couramment utilisés pour la caractérisation des enrobés bitumineux, en lien avec l'étude du comportement mécanique sous chargement représentatif du trafic.
- Simuler numériquement, à l'aide de la méthode des éléments finis, le comportement mécanique de l'enrobé de référence et de l'enrobé modifié, sous l'essai retenu, afin d'analyser l'influence de l'incorporation du plastique.
- Valider le modèle numérique par confrontation des résultats de simulation aux données expérimentales issues de la littérature ou d'essais de référence, en termes de réponse mécanique.
- Caler les paramètres du modèle afin d'assurer une représentation fidèle du comportement réel des enrobés étudiés et d'améliorer la robustesse et la fiabilité des simulations.

Démarche méthodologique

La méthodologie adoptée repose principalement sur une approche numérique, articulée autour :

- Le premier chapitre présente les généralités sur les chaussées, les enrobés bitumineux et la valorisation des déchets plastiques, ainsi qu'une revue de la littérature sur les enrobés modifiés.
- Le deuxième chapitre décrit la méthodologie adoptée, incluant la modélisation numérique de l'essai Marshall et de la structure de chaussée multicouche sous Abaqus.
- Le troisième chapitre présente les résultats obtenus, leur analyse et leur discussion, ainsi que l'évaluation de l'influence des plastiques composites sur la performance mécanique des chaussées.

Chapitre I : Généralités et revue de littérature

Introduction

Ce chapitre établit le cadre théorique de l'étude sur la modélisation numérique des enrobés bitumineux modifiés aux déchets plastiques composites au Bénin. Il présente successivement les travaux antérieurs sur les enrobés modifiés aux plastiques, les fondements de la modélisation numérique, et la fiabilité des simulations Abaqus, pour aboutir à une synthèse justifiant notre approche méthodologique.

1.1. Les chaussées et les enrobés bitumineux

1.1.1. Constitution d'une chaussée revêtue

La route est avant tout une succession de couches de matériaux devant supporter et répartir les charges des engins.

Les chaussées routières constituent des structures multicouches conçues pour supporter le trafic et transmettre les charges appliquées aux différentes couches de sol de manière progressive.

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

Selon les matériaux granulaires liés (enrobés, béton, ...) ou non, qui composent les couches des chaussées, nous distinguons plusieurs types de structures de chaussées.

Dans la suite, nous allons présenter la constitution d'une structure de chaussée et le rôle des différentes couches.

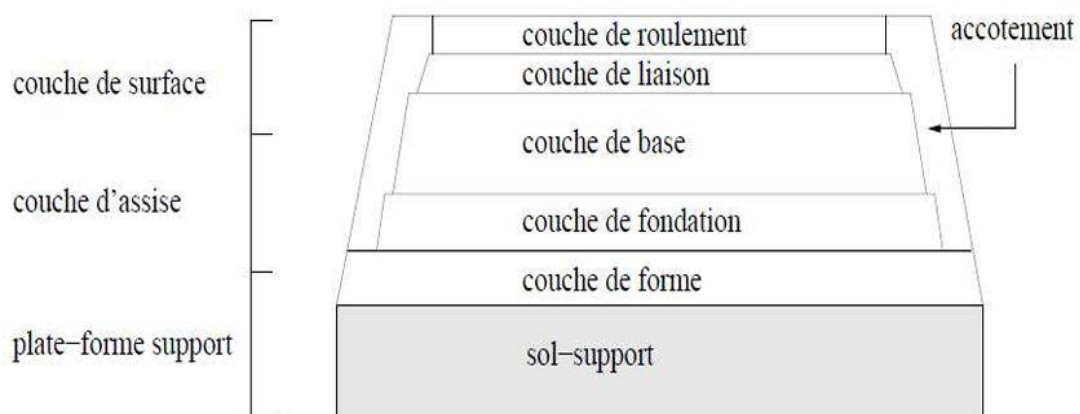


Figure 1 : Constitution d'une structure de chaussée [5]

1.1.1.1. La plate-forme

Les chaussées reposent sur une ou plusieurs couches dont la partie supérieure est appelée plate-forme support de chaussée. Elle est d'une importance capitale car la plupart des méthodes de dimensionnement s'appuient sur la résistance au poinçonnement du sol de plate-forme. Elle est généralement constituée :

- d'un sol support c'est-à-dire le sol terrassé devant recevoir la route et pouvant être en remblai ou en déblai ;
- d'une couche de forme (éventuelle).

1.1.1.2. La couche de forme

La couche de forme est rattachée au terrassement dont elle constitue la partie supérieure. Cette couche de transition entre le sol support et le corps de chaussée, qui ne fait pas partie intégrante de la chaussée n'est mise en place que dans des cas particuliers. La couche de forme a une double fonction :

- pendant les travaux, elle protège le sol support, établit une qualité de nivellement et permet la circulation des engins de chantier (zones marécageuses ou sableuses en l'occurrence) pour l'approvisionnement des matériaux et la construction des couches de chaussée. Elle permet également le compactage de la couche de fondation (qui serait impossible si le support était très compressible) ;
- vis-à-vis du fonctionnement mécanique de la chaussée, elle permet de rendre plus homogènes et éventuellement d'améliorer les caractéristiques dispersées des matériaux de remblai ou du terrain en place ainsi que de les protéger du gel.

1.1.1.3. La sous-couche de fondation

Le rôle de la sous-couche est de constituer, dans un but bien défini, une interface ou un écran entre les matériaux mis en œuvre dans les terrassements et ceux qui sont employés en couche de fondation ou en couche de base. On distingue deux types de sous-couche :

- La sous-couche anti-contaminante

Le but de cette sous-couche est d'empêcher la remontée (contamination) des matériaux fins, l'argile par exemple, de la plate-forme à travers les vides d'une couche de fondation à structure ouverte.

- La sous-couche drainante et anti-capillaire

Elle a le double but, d'une part, assurer un drainage efficace des couches supérieures de la chaussée et d'autre part, empêcher les remontées capillaires au niveau de la forme des

terrassements. Cette sous-couche est le plus souvent utilisée dans les zones marécageuses ou les zones dans lesquelles la nappe phréatique est peu profonde.

La sous-couche drainante et anti-capillaire est généralement constituée de sable grossier et de gravier, mais d'autres matériaux peuvent également être utilisés avec succès ; il s'agit notamment des scories pouzzolaniques ; des mâchefers (résidus ferrugineux) ; des géotextiles qui sont de plus en plus utilisés comme matériaux de sous-couche et présentent par ailleurs des performances mécaniques intéressantes, etc.

1.1.1.4. Les couches d'assise

Encore appelée corps de chaussée, l'assise de la chaussée est généralement constituée de deux couches, la couche de fondation surmontée de la couche de base. Ces couches en matériaux élaborés, le plus souvent liés pour les chaussées à trafic élevé, apportent à la chaussée la résistance mécanique aux charges verticales induites par le trafic. Elles répartissent les pressions sur la plate-forme support afin de maintenir les déformations à ce niveau dans des limites admissibles. Pour les chaussées à faible trafic, le rôle de couche de fondation peut être, dans certains cas, assuré par un traitement du sol en place.

La couche de fondation repose directement sur une sous-couche ou sur la plateforme support. Le corps de chaussée assure la diffusion des contraintes afin de les ramener à un taux compatible avec la portance du sol de forme. Les matériaux de la couche de fondation doivent être de qualité satisfaisante, sinon on doit recourir à un traitement (amélioration ou stabilisation).

La couche de base est soumise à des contraintes verticales de compression plus élevées que dans la couche de fondation, ainsi qu'aux efforts de cisaillement d'autant plus importants que le revêtement est mince. Cette couche est susceptible de présenter des déformations notables, raison pour laquelle, les matériaux utilisés doivent présenter de meilleures performances mécaniques que ceux utilisés en couche de fondation. Par ailleurs, si la couche de base possède une rigidité plus élevée que la couche de fondation, il se produit un effet de dalle et des contraintes de traction se développent au niveau de l'interface base-fondation causant ainsi des fissurations. Ainsi, elle doit avoir un indice CBR élevé. Le matériau utilisé doit présenter en général un CBR supérieur à 80. Sinon il faudra procéder à un traitement soit avec un liant hydraulique, soit avec un liant hydrocarboné.

De ce qui précède, il est aisé de comprendre qu'on se doit d'être beaucoup plus exigeant sur les caractéristiques des matériaux constituant la couche de base que pour ceux qui sont utilisés en couche de fondation.

1.1.1.5. La couche de surface

La couche de surface est constituée de la couche de roulement et éventuellement d'une couche de liaison.

- La couche de roulement est la couche supérieure de la structure de chaussée sur laquelle s'exercent directement les agressions conjuguées du trafic et du climat. Elle a pour rôle essentiel, de procurer aux usagers, la sécurité et le confort, et de maintenir l'intégrité de la structure par la protection des couches d'assise vis-à-vis de l'infiltration des eaux pluviales. Aussi, doit-elle posséder des qualités antidérapantes satisfaisantes. La qualité d'usage de la chaussée dépend pour une large part des caractéristiques de surface de la couche de roulement. Elle peut être en enduit superficiel (monocouche, bicouche ou multicouche) ou en enrobé (enrobés denses, béton bitumineux).
- La couche de liaison, entre les couches d'assise et la couche de roulement, lorsqu'elle existe, assure la liaison entre la couche de roulement et les couches d'assises lorsque ces deux couches sont constituées de matériaux ne favorisant pas une bonne adhérence entre elles.

La couche de liaison peut être soit :

- **une couche d'imprégnation** constituée de liant, généralement en Cut back ou bitume fluidifié. Elle doit imperméabiliser la couche de base et lui donner une bonne liaison par adhérence avec la couche sus-jacente.
- **une couche d'accrochage** qui comme son nom l'indique sert à accrocher la couche de surface. Elle élimine ainsi tout risque de glissement à l'interface des deux couches concernées et assure une continuité de l'ensemble. C'est une pellicule de liant de l'ordre de 2 à 3 cm recevant toujours une couche supérieure en enrobé. C'est à l'interface entre la couche de surface et la couche de base que l'on trouvera éventuellement les dispositifs visant à ralentir la remontée des fissures des couches d'assises traitées aux liants hydrauliques.

Dans le cas particulier des chaussées en béton de ciment, la dalle, qui repose sur une couche de fondation, joue simultanément le rôle de couche de surface et celui de la couche de base.

La couche de surface n'est pas dimensionnée pour résister aux sollicitations du trafic mais elle doit avoir un minimum de résistance pour transmettre les efforts normaux (poids des véhicules) et les efforts tangentiels imposés par les pneumatiques (action des roues tournant, freinage).

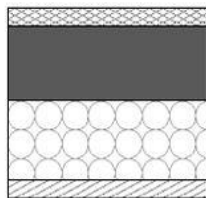
En somme la couche de surface contribue à la pérennité de la structure de chaussée en particulier par la fonction d'étanchéité vis-à-vis de l'assise.

1.1.2. Types de chaussées

Il existe une grande diversité de structures de chaussées, que l'on classe dans les familles ci-dessous [5].

1.1.2.1. 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.



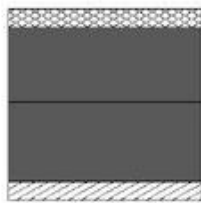
Chaussées souples:

1. Couche de surface de matériaux bitumineux
2. Matériaux bitumineux d'assise (< 15 cm)
3. Matériaux granulaires non traités (20 à 50 cm)
4. Plate-forme support

Figure 2 : Chaussées souples [5]

1.1.2.2. 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.



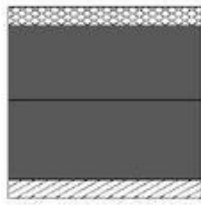
Chaussées bitumineuses épaisses:

1. Couche de surface de matériaux bitumineux
2. Matériaux bitumineux d'assise (de 15 à 40 cm)
3. Plate-forme support

Figure 3 : Chaussées bitumineuses épaisses [5]

1.1.2.3. 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.



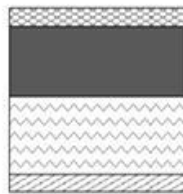
Chaussées bitumineuses épaisses:

1. Couche de surface de matériaux bitumineux
2. Matériaux bitumineux d'assise (de 15 à 40 cm)
3. Plate-forme support

Figure 4 : Chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques [5]

1.1.2.4. 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.



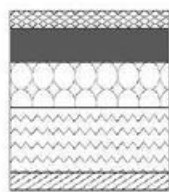
Chaussées à structure mixte:

1. Couche de surface de matériaux bitumineux
2. Matériaux bitumineux d'assise (10 à 20 cm)
3. Matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm)
4. Plate-forme support

Figure 5 : Chaussées à structure mixte [5]

1.1.2.5. 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.



Chaussées à structure inverse:

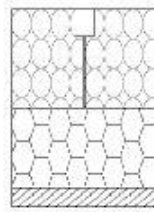
1. Couche de surface de matériaux bitumineux
2. Matériaux bitumineux d'assise (10 à 20 cm)
3. Matériaux granulaires non traités (~ 12 cm)
4. Matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm)
5. Plate-forme support

Figure 6 : Chaussées à structure inverse [5]

1.1.2.6. Les chaussées en béton de ciment

Ces structures comportent une couche de béton de ciment de 15 à 40 cm d'épaisseur 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 hydrauliques 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

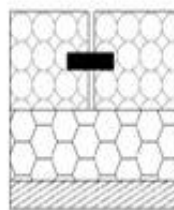
liants hydrauliques. La dalle de béton peut être continue avec un renforcement longitudinal (“béton armé continu”), ou discontinue avec ou sans élément de liaison aux joints. Ci-dessous nous présentons les structures de chaussée en béton de ciment (cf. figures 7 à 11).



Dalles non goujonnées avec fondation::

1. Béton de ciment (20 à 28 cm)
2. Béton maigre (12 à 18 cm) ou matériaux traités aux liants hydrauliques (15 à 20 cm)
3. Plate-forme support

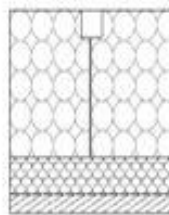
Figure 7 : Dalles non goujonnées avec fondation [5]



Dalles goujonnées avec fondation:

1. Béton de ciment (17 à 23 cm)
2. Béton maigre (14 à 22 cm)
3. Plate-forme support

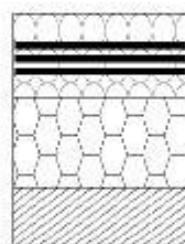
Figure 8 : Dalles goujonnées avec fondation [5]



Dalles sans fondation::

1. Béton de ciment (28 à 39 cm)
2. Couche drainante (matériaux granulaires ou géotextiles)
3. Plate-forme support

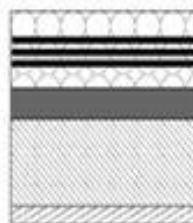
Figure 9 : Dalles sans fondation [5]



Béton armé continu (1):

1. Béton de ciment (18 à 24 cm)
2. Béton maigre (12 à 14 cm)
3. Plate-forme support

Figure 10 : Béton armé continu [5]



Béton armé continu (2):

1. Béton de ciment (18 à 24 cm)
2. Matériaux bitumineux d'assise (5 cm)
3. Sable traité aux liants hydrauliques (50 à 60 cm)
4. Plate-forme support

Figure 11 : Béton armé continu 2 [5]

1.1.3. Propriétés mécaniques recherchées

Pour garantir une performance optimale, la couche de roulement en enrobés bitumineux doit présenter un ensemble de propriétés mécaniques adaptées aux sollicitations liées au trafic et aux conditions environnementales :

- **La stabilité** : Elle correspond à la capacité de l'enrobé à résister aux déformations permanentes sous l'action des charges répétées du trafic. Une bonne stabilité dépend de la nature des granulats, du type de bitume, ainsi que du compactage de l'enrobé.
- **La durabilité** : Elle reflète la résistance du matériau aux effets du vieillissement (oxydation du bitume, variation de température, rayonnement solaire). Une chaussée durable conserve ses propriétés mécaniques et fonctionnelles sur une longue période, réduisant ainsi les besoins d'entretien.
- **L'adhérence** : C'est la capacité de la surface de roulement à maintenir un contact suffisant avec les pneumatiques, garantissant la sécurité des usagers. L'adhérence est assurée par la macro texture et la micro texture de l'enrobé, ainsi que par la nature du liant.
- **La résistance à l'eau** : L'imperméabilité des enrobés est cruciale pour éviter l'infiltration de l'eau dans les couches inférieures, ce qui pourrait entraîner des phénomènes de déstructuration, de décollement bitume-granulats (dépôt de fines), ou de gonflement des sols sensibles.
- **La résistance à la fatigue** : Sous l'effet de sollicitations répétées, les enrobés peuvent développer des fissures dues à la fatigue. Une bonne formulation permet de retarder l'apparition de ces fissurations en améliorant la flexibilité et la résilience du mélange.
- **La résistance à l'orniérage** : L'orniérage est une déformation plastique localisée sous l'effet du trafic lourd, caractérisée par l'apparition de traces longitudinales dans les voies de roulement. C'est l'un des défauts majeurs rencontrés dans les climats chauds. La résistance à l'orniérage est donc une propriété essentielle des enrobés.

Ces propriétés mécaniques déterminent non seulement la performance immédiate de la chaussée, mais aussi sa longévité et ses coûts d'entretien à long terme.

1.1.4. Les sollicitations dans les chaussées bitumineuses

Les structures routières sont soumises aux diverses sollicitations, dont celles dues au trafic lourd et aux effets générés par les changements climatiques. Ces sollicitations sont des causes probables de plusieurs types de dégradation des chaussées. La rapidité de l'évolution des endommagements est liée aux propriétés et aux épaisseurs des matériaux utilisés et de leur mise en œuvre [6].

1.1.4.1. L'effet du trafic

L'accroissement du nombre des véhicules qui empruntent les routes chaque année contribue fortement à l'accélération de mesures des dégradations des chaussées [7]. Sous l'effet des charges roulantes, chaque couche de la chaussée subit des flexions qui entraînent des contraintes de compression en haut de la couche et de traction à la base de la couche (*figure 12*). Les tractions répétées à la base des couches d'enrobés créent des micros fissures qui s'accumulent et se propagent dans tout le revêtement et apparaissent en surface sous forme de fissurations importantes [8] [9] [10].

1.1.4.2. Sollicitations thermiques

Les conditions climatiques rigoureuses s'expliquent par une grande variation de température entre l'hiver et l'été. En raison du comportement thermo susceptible des matériaux bitumineux, ces variations thermiques peuvent engendrer la diminution de la rigidité de l'enrobé et entraîner des contraintes importantes dans les couches liées de la chaussée. Ces contraintes avec celles induites par le trafic pouvant entraîner le phénomène de fissuration thermique.

D'autre part, en hiver le sol gèle à une certaine profondeur, ce phénomène peut conduire à l'augmentation considérable et progressive du volume du sol qui engendrera le soulèvement des couches du revêtement [11].

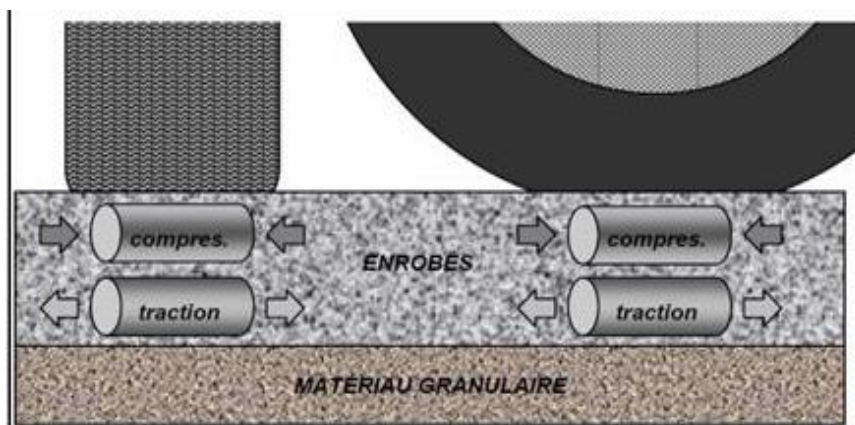


Figure 12 : Sollicitation en traction et en compression des enrobés lors du passage des véhicules [12]

1.1.5. Fonctionnement mécanique des chaussées

Selon le type de structure de chaussée, la transmission des pressions induites par le trafic se fait suivant deux modes. Il s'agit de :

- la transmission verticale des charges sur le sol support,
- la diffusion horizontale des charges.

1.1.5.1. La transmission verticale des charges sur le sol support

Ce mode de fonctionnement est propre aux chaussées souples qui sont composées d'un corps de chaussée en matériaux granulaires souvent non traités. Ces matériaux, ne pouvant résister aux sollicitations en flexions, transmettent verticalement les charges reçues à la surface du revêtement au sol support.

Le critère principal de dimensionnement de ces structures de chaussée réside dans la limitation des sollicitations du sol support à la portance de ce dernier, de manière à éviter sa plastification ou son poinçonnement.

1.1.5.2. La diffusion horizontale des charges

La diffusion horizontale des efforts est caractéristique des chaussées rigides. Ces dernières sont constituées de matériaux traités le plus souvent au liant hydraulique ou de dalle de béton de ciment dotée d'une forte cohésion ou d'une rigidité relative et peuvent mobiliser des efforts non négligeables de traction induite par flexion.

Dans la transmission des efforts, on observe un important étalement desdits efforts au niveau du sol support ; ce dernier n'étant que peu sollicité. Ce faisant le principal critère de dimensionnement d'une chaussée rigide réside dans la limitation des efforts de traction des matériaux à la base des couches de chaussée sous l'effet de la répétition des charges.

1.1.5.3. Etapes d'évolution des chaussées

Sous l'action de sollicitations diverses, les chaussées subissent généralement les trois phases classiques de vieillissement qui sont : la phase élastique, la phase plastique, la phase de rupture. Chacune de ces phases permet d'identifier à première vue le comportement de la chaussée et les différents signes de fatigue ou de désordres constatables.

En effet, les sollicitations créent un désordre entre les granulats des différentes couches de manière à ce que ceux-ci perdent leur cohésion initiale et ne jouent plus efficacement leur rôle de transmetteur de charges à la fondation. De même, cette perte de cohésion entraîne une déformabilité de la chaussée qui se traduit par des désordres importants pouvant conduire celle-ci jusqu'à la rupture localisée ou généralisée.

L'indication d'une zone de rupture implique l'existence d'une déflexion critique qui marque la frontière entre la fin de la phase plastique durant laquelle un renforcement est

encore possible et la phase de rupture où il ne peut s'agir que de reconstruction. Il arrive cependant que la chaussée soit dès l'origine sous dimensionnée. La phase élastique peut être ainsi réduite, voire complètement inexistante, et la chaussée, si elle est constituée de matériaux de bonne qualité se trouvera d'emblée à la limite de la phase plastique. A ce niveau, le renforcement reste encore possible et doit être exécuté sans aucun retard.

Enfin lorsque la chaussée est réalisée avec des matériaux de mauvaise qualité, elle se retrouve très rapidement en phase de rupture et devient à court terme impraticable.

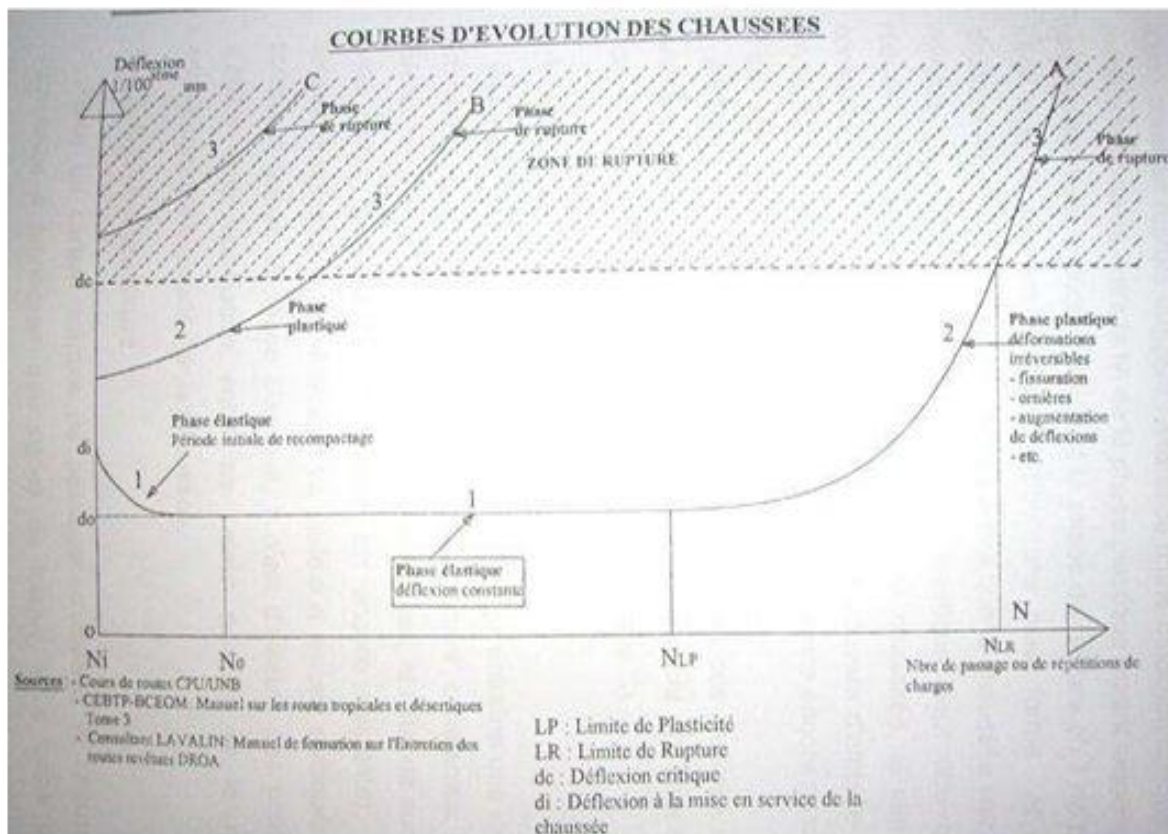


Figure 13: Courbe d'évolution des chaussées [5]

✓ Phase élastique

Après une période initiale de recompactage qui entraîne une légère diminution des déflexions, ces dernières restent constantes. Les déformations rémanentes sont pratiquement nulles, et l'état de surface reste satisfaisant (puisque l'imperméabilité est encore existante), sauf défauts imputables au revêtement. La déflexion restant pratiquement constante durant la phase élastique, il n'est d'ailleurs pas possible d'établir une corrélation entre sa valeur actuelle et le trafic antérieurement supporté par la chaussée.

C'est la période pendant laquelle la route supporte les différentes charges d'essieu sans se dégrader.

✓ **Phase plastique**

Après un certain nombre de passages d'essieux, la chaussée commence par manifester des signes de fatigue sous forme d'un réseau maillé de légères fissurations de revêtement (peau de crocodile ou faïençage) et de l'apparition de faibles déformations permanentes. Simultanément, les déflexions commencent par augmenter avec le temps de manière sensible ; la chaussée entre alors en phase plastique : C'est le début de cette phase plastique.

Si rien n'est fait pour diminuer les contraintes qui s'y manifestent, la chaussée entre en phase plastique et se met à évoluer rapidement. Les fissurations et les déformations irréversibles deviennent de plus en plus importantes. Des ornières profondes apparaissent accompagnées de ruptures de revêtement et d'une perte totale d'imperméabilité et de surcroît de portance. Les déflexions augmentent rapidement avec le temps et la réaction qui s'est amorcée aboutit à sa ruine complète. La chaussée ayant alors perdu toutes ses qualités initiales est désormais très défaillante et une réhabilitation s'impose.

✓ **Phase de rupture**

Les déflexions augmentent rapidement avec le temps et l'on assiste à la ruine complète de la chaussée à brèves échéances. La chaussée ayant perdu toutes ses qualités initiales est désormais très défaillante et une réhabilitation s'impose.

Le vieillissement des chaussées se manifeste par la perte de portance de la structure qui se traduit par des pathologies enregistrées sur la surface ou dans le corps de ces chaussées. Alors, la maîtrise de l'évolution des structures de routes revêtues sera nécessaire à la compréhension des pathologies des chaussées que constituent les dégradations.

1.1.6. Dimensionnement des chaussées

1.1.6.1. Les démarches de dimensionnement

Quelles que soient les techniques de chaussée, la démarche de dimensionnement et l'articulation des différentes étapes sont sensiblement les mêmes. La démarche générale est présentée ici pour l'approche empirique :

Première étape : Prédimensionnement

Une fois réunies les données nécessaires au calcul, on procède :

- à un premier choix de la couche de roulement,
- à un prédimensionnement de la structure par référence à des situations comparables.

Deuxième étape : Calcul de la structure

On calcule les contraintes et déformations de la structure de chaussée pré dimensionnée à l'étape1, sous l'essieu de référence de 130kN.

Troisième étape : Vérification en fatigue de la structure et de la déformation du support

La vérification est faite en comparant les contraintes et déformations calculées à la deuxième étape à des valeurs admissibles. Ces valeurs limites sont déterminées en fonction :

- du trafic cumulé sur la période de calcul considérée,
- du risque de ruine admis sur cette période, - des caractéristiques de résistance en fatigue des matériaux,
- des effets thermiques,
- des données d'observation du comportement de chaussées de même type.

Ce dernier point se traduit par l'introduction d'un coefficient, dit de calage, qui permet de tenir compte globalement d'une part d'effets que le modèle mathématique ne peut représenter de par les simplifications faites, et de l'autre, des biais attachés à la représentativité des essais de laboratoire pour la description des propriétés des matériaux.

Ce coefficient est choisi en se basant sur des expériences et pratiques, donc son mauvais choix pourrait conduire à un sous-dimensionnement ou un surdimensionnement. Pour y palier mieux vaut faire des études approfondies pour sortir des modèles mathématiques réels. Ce travail s'inscrit dans ce cadre.

Quatrième étape : Ajustement des épaisseurs calculées

Les épaisseurs de couches déterminées à l'issue de l'étape 3 sont ensuite ajustées pour :

- tenir compte des contraintes technologiques d'épaisseurs minimale et maximale pour atteindre les objectifs de compacité et d'uni,
- réduire les risques de défauts de liaison aux interfaces en limitant le nombre d'interfaces, - assurer une protection suffisante des assises traitées vis-à-vis de phénomènes non appréhendés par le calcul précédent (remontée de fissures en particulier).

Cinquième étape : Vérification de la tenue au gel-dégel

La vérification si nécessaire de la tenue au gel-dégel est une opération distincte menée en fin d'étape 4 suivant des principes bien définis.

Sixième étape : Définition de la coupe transversale de la chaussée

L'ensemble des vérifications précédentes étant positives, pour la structure dite nominale correspondant au bord droit de la voie la plus chargée, il reste à préciser le profil en travers de la chaussée. Pour cela les variations transversales d'épaisseur des couches sont fixées en fonction : du trafic par voie, des caractéristiques géométriques du tracé, du rattrapage des pentes transversales entre la plate-forme support de chaussée et la couche de surface.

1.1.6.2. Les méthodes de dimensionnement des chaussées

Le dimensionnement des chaussées présente des particularités liées au mode d'application des charges et au développement des différents modes de rupture.

Comme pour les autres ouvrages de génie civil, la structure de la route doit être définie à la suite d'un dimensionnement. Étant fonction des matériaux utilisés, des techniques de réalisation et des caractéristiques du trafic, le dimensionnement des chaussées a connu d'importantes évolutions.

Les principales méthodes employées sont :

- Les méthodes empiriques
- Les méthodes rationnelles
- Les catalogues de structures types

❖ **L'approche empirique** : elle s'appuie sur l'observation du comportement sous trafic de chaussées réelles ou expérimentales. L'objectif est d'établir, par régression multiple, des relations entre la durée de vie, les caractéristiques géométriques des structures (épaisseur des couches) et les propriétés mécaniques des matériaux. Cette corrélation nécessite, pour donner des résultats fiables, un nombre important de sections expérimentales et de mesures ; ce qui entraîne évidemment un coût très important de sections expérimentales et de mesures. D'autres inconvénients peuvent se greffer à ce problème : un temps de réponse trop long, des extrapolations hasardeuses ainsi qu'une difficulté certaine à généraliser les relations obtenues à d'autres tronçons de route car étant valables que pour les conditions climatiques et de trafic pour lesquelles elles ont été établies.

Comme exemple on distingue la méthode du CEBTP. A côté de cette méthode on a aussi la méthode des indices de groupe, la méthode du CBR et celle du TRRL (Transport and Road Research Laboratory).

❖ **L'approche théorique** : elle consiste à établir une méthode représentant le mieux possible le comportement mécanique du corps de chaussée. A l'aide de ce modèle, on détermine les sollicitations subies par les matériaux de chaussée et le sol – support sous l'effet du trafic. Ces sollicitations sont ensuite comparées aux sollicitations admissibles.

Dans la première étape qui consiste en la détermination des contraintes et des déformations dans les couches de chaussées, on a recours à un modèle mathématique fondé sur la mécanique des milieux continus. Le développement considérable de l'informatique par l'apparition de logiciels tels que ECOROUTE, ALIZE a favorisé une sophistication de ces méthodes aux cours des deux dernières décennies.

La deuxième étape de l'aspect théorique consiste en une vérification portant sur deux aspects à savoir :

- Si la rupture par fatigue ne survient pas avant la fin de la durée de vie souhaitée pour la chaussée
- Si les déformations permanentes dans les matériaux susceptibles d'en subir (matériaux non liés, à liant hydrocarboné, sol support) ne produisent pas des ornières ou des défauts d'uni rendant le trafic inconfortable, voire dangereux)

L'approche théorique est, en réalité, entachée d'empirisme puisque les propriétés des matériaux introduites comme données dans les modèles de calcul sont déterminées lors d'une phase expérimentale. De ce point de vue, elle recoupe l'approche empirique proprement dite.

On distingue dans cette approche le modèle de Boussinesq, le modèle de bicouche, le modèle de Hogg, le modèle de Wesfergard, le modèle multicouche de Burmiter.

❖ Les catalogues de structures types

Les catalogues donnent directement l'épaisseur de la couche en fonction des paramètres de base choisis. Ces épaisseurs sont choisies après insertion des données et les vérifications des structures par les méthodes rationnelles.

Pour dimensionner une chaussée on peut utiliser ces catalogues préalablement établis qui correspondent à un certain état de la technique à l'époque considérée donc il faudra donc réactualiser périodiquement ces catalogues.

Le nombre de catalogues se multiplie car chaque pays essaie d'élaborer un, qui lui soit propre. Comme exemple de catalogue nous pouvons citer "le guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux" ; ce qui est élaboré par le Centre Expérimental des recherches et d'Etude de bâtiment et des TP. Il fournit des fiches de dimensionnement basées sur la portance CBR des sols, le trafic. Dans ce guide, on considère cinq classes de trafic T1 à T5 et cinq classes de sol S1 à S5. La partie 3 de notre document présentera un catalogue élaboré en suivant cette même démarche.

Plusieurs pays ont adopté cette méthode car ils présentent plusieurs avantages.

- Rapidité du dimensionnement
- Simplicité de la méthode
- Structure standard permettant une bonne maîtrise de la technique et une bonne capitalisation des expériences.

L'utilisation des catalogues de dimensionnement fait appel aux mêmes paramètres fondamentaux utilisés dans les autres méthodes de dimensionnement des chaussées.

1.1.7. Modèle de charge

Pendant longtemps les changements des modèles de chaussées ne dépendent guère d'un changement de chargement puisque la charge est toujours considérée statique dans les guides de dimensionnement des chaussées. Cet état de chose est dû aux travaux de l'AASHTO. Ceci a montré que les variations de vitesse n'avaient aucun effet sur la réponse dynamique des chaussées. Cependant, depuis plus d'une décennie, avec les évolutions notables des chaussées et surtout de la charge à l'essieu des véhicules, à partir d'un seuil, l'effet de la vitesse devient non négligeable. Après avoir analysés sous différentes charges de groupes d'essieux mobiles, de façon analytique et dynamique les chaussées rigides renforcées et non, Darestani a abouti au fait que la vitesse de la charge a un effet significatif sur la réponse dynamique même pour les chaussées rigides à surface lisse [13].

Il est devenu donc important de pouvoir caractériser de façon dynamique la réponse des chaussées sous charges dynamiques. Pour ce faire, plusieurs modèles sont avancés en prenant en compte la charge comme dynamique.

1.1.7.1. Modèle de charge concentrée mobile uniforme

La charge du trafic est transmise à travers la plaque des chaussées par les pneumatiques recevant les charges des essieux. Pour matérialiser la charge dynamique transmise aux chaussées [14] l'a considéré comme étant :

$$P = P_0 \cdot \delta(x - vt) \cdot \delta(y)$$

En effet, l'utilisation de la fonction Delta de Dirac a permis de n'appliquer la charge qu'au point de coordonnées $X_0 = v \cdot t$; $Y_0 = 0$ et nulle part ailleurs à un instant quelconque t ($Y_0 = 0$ désignant l'axe central de la plaque). C'est donc la fonction de Dirac qui permet de fixer la nature et la trajectoire du mouvement. Enfin, cette charge est considérée circulant de façon uniforme, c'est-à-dire à vitesse constante, le long de l'axe longitudinal central de la plaque. Cette modélisation est l'une des plus répandues dans la littérature. Il est facile de constater que le seul effet dynamique pris en compte est simplement le déplacement de la force à travers les fonctions de Dirac. Mais les conséquences de ce déplacement ne sont pas prises en compte dans ce modèle.

1.1.7.2. Modèle de masse concentrée mobile

Le modèle de charges concentrées mobile ne tient pas compte du fait que les pneumatiques sont en rotation. En effet, les pneumatiques sont à la fois en mouvement de translation et de rotation ; ceci amène à tenir compte de l'effet de l'inertie de rotation sur la charge. Ainsi la charge n'est plus simplement une force en mouvement mais un ensemble de masses mobiles traversant la plaque mince modélisant la chaussée. Le chargement est le suivant :

$$P(x, y, t) = P_f(x, y, t) \left(1 - \frac{\Delta^*}{g} W(x, y, t) \right) \quad (\text{Équation 1})$$

Avec :

$P_f(x, y, t)$, la force continue mobile

Δ^* , l'opérateur d'accélération substantielle

g , l'accélération de la pesanteur.

$$P_f(x, y, t) = \sum_{i=1}^N M_i g \cdot \ddot{a}(x - v_i t) \cdot \ddot{a}(y - s) \quad (\text{Équation 2})$$

N , le nombre de masses concentrées

M_i évoluant à vitesse constante c_i

$$\Delta^* = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 + \frac{\partial^2}{\partial t^2} + 2 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \frac{dx}{dt} \frac{dy}{dt} + 2 \frac{\partial^2}{\partial x \partial t} \frac{dx}{dt} + 2 \frac{\partial^2}{\partial y \partial t} \frac{dy}{dt} + 2 \frac{\partial^2}{\partial y \partial t} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (\text{Équation 3})$$

Et avec les hypothèses ci-dessus mentionnées,

$$\Delta^* = \frac{\partial^2}{\partial t^2} + 2c_i \frac{\partial^2}{\partial x \partial t} + c_i^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \quad (\text{Équation 4})$$

Comme on le remarque avec la sommation, le modèle tel que défini considère donc un train de charges mobiles le long de la plaque. En supprimant ou en négligeant l'accélération autonome (substantielle), l'hypothèse de masse mobile reviendra à celle de la force mobile.

1.1.7.3. Modèles de charge concentrée harmonique mobile

L'uni de la chaussée est une qualité dans le confort de l'utilisateur. Mais ses défauts se traduisent, dans le véhicule, par des mouvements transversaux de **roulis**, et longitudinaux de **tangage**, engendrés l'un et l'autre par des défauts de grande amplitude. Ils se traduisent également par des émissions de **bruit** et par des **vibrations**. Deux éléments perturbateurs conduisent à ce que les charges réelles qui s'appliquent à la chaussée sont supérieures aux charges limites prescrites par la réglementation. Le premier est lié aux effets dynamiques qui apparaissent lorsque le **véhicule** est en **mouvement**. Certains de ces effets tels que la surcharge des roues extérieures dans les virages ou la surcharge des roues avant lors du freinage restent très modérés. Par contre, les **oscillations des véhicules**, que nous avons évoquées précédemment sous l'angle du confort, induisent des surcharges brèves, mais répétées, dont la valeur instantanée peut être du même ordre que la charge statique et conduire à doubler l'effort sur la chaussée.

- **Modèle de charges vibratoires simples**

Les effets dus au déplacement de la charge sont pris en compte déjà à partir des modèles de charge décrits précédemment. Pour Alisjahbana [15] par exemple, la charge P est modélisée par une valeur variant de façon harmonique et représentée par :

$$P = P_0 \cos(\omega \cdot t) \cdot \ddot{a}(x - vt) \cdot \ddot{a}(y) \quad (\text{Équation 5})$$

Où :

P_0 , est l'amplitude de la force

ω , la fréquence de la force mobile traversant la plaque.

Mais Sun a plutôt proposé le modèle qui suit surtout pour son utilisation dans le domaine fréquentiel :

$$P = P_0 \cdot e^{i\omega t} \cdot \ddot{a}(x - vt) \cdot \ddot{a}(y) \quad (\text{Équation 6})$$

En effet, avec ce modèle de charge, il, peut avoir des instants pendant lesquels la charge appliquée devient nulle ou même négative. Ce modèle suppose donc que le pneumatique n'a pas un contact franc avec la chaussée et que les forces transmises à la chaussée sont les seules forces vibratoires d'amplitude P_0 . Il reprend contact avec le sol suivant une fréquence circulaire bien définie. Mais il n'est pas évident que cette charge vibratoire remplace totalement la charge mobile ponctuelle appliquée. C'est ce qui a poussé à modéliser la charge autrement [16].

1.1.7.4. Modèles de charges mixtes : concentrées mobiles et vibratoires

Dans ses travaux qui ont suivi, Alisjahbana a modélisé la charge du trafic comme une combinaison de charge concentrée mobile et de charge vibratoire [16]. Dans ce modèle la charge vibratoire est supposée agir en parallèle avec la charge mobile ponctuelle. Elle est présentée comme suit :

$$P = P_0 \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cos \omega t\right) \cdot \ddot{a}\left[x - \left(\frac{1}{2}at^2 + V_0t\right)\right] \cdot \ddot{a}\left[y - \frac{1}{2}b\right] \quad (\text{Équation 7})$$

Du fait de la fonction cosinus bornée, la charge varie entre $P_0/2$ et $3P_0/2$ avec une fréquence circulaire. Donc ce modèle dispose d'un intervalle de temps durant lequel la charge est supérieure à l'amplitude de chargement P_0 . Ainsi, le modèle tient compte de la force concentrée mobile d'intensité P_0 et de la charge vibratoire :

$$P_v = \frac{1}{2} P_0 \cos \omega t \quad (\text{Équation 8})$$

Cela explique mieux les vibrations de la chaussée qu'on a en présence. De plus la charge mobile évolue suivant un mouvement uniformément varié. Par ailleurs la charge est supposée concentrée et évoluant le long de l'axe central longitudinal de la plaque, mais avec un mouvement uniformément varié.

1.1.7. Les enrobés bitumineux

L'enrobé bitumineux est un matériau composite constitué d'un mélange d'agrégats (gros agrégats, agrégats fins), du liant, de fines d'apport (d'origines diverses) et éventuellement des dopes d'adhésivité. Les caractéristiques et les propriétés mécaniques des matériaux bitumineux varient selon la composition volumétrique du mélange et sont surtout fonction de la taille du grain maximal, de la teneur en liant et de la teneur en vides du mélange. La teneur en masse de liant hydrocarboné est en général de 4 à 6%, le reste étant constitué par le squelette granulaire. L'obtention des enrobés par le mélange de granulats et de bitume fait appel aux propriétés de ses constituants que nous décrivons dans la suite du chapitre.

La composition des enrobés bitumineux repose principalement sur deux constituants :

1.1.7.1. Liants hydrocarbonés

Un liant hydrocarboné est un liant organique constitué d'hydrocarbures, c'est-à-dire essentiellement à base de carbone et d'hydrogène, auxquels s'ajoutent l'oxygène, et le soufre.

1.1.7.1.1. Propriétés générales des liants hydrocarbonés

Ces produits sont, en général, trop visqueux dans leur état naturel, pour pouvoir être employés directement. Il faut diminuer cette viscosité ou les liquéfier par différents procédés (chauffage, dissolution dans des solvants volatils, émulsions dans l'eau), pour pouvoir les utiliser à la place qui leur est destinée. Il est indispensable que ces traitements n'altèrent pas leurs caractéristiques essentielles indiquées ci-dessous :

- a- Cohésivité : c'est la propriété de se déformer sans arrachement ni fissuration interne en donnant des films étanches et plastiques.
- b- Adhésivité : c'est la propriété de coller aux granulats minéraux.
- c- Viscosité : elle est définie comme la résistance opposée au sein d'une masse liquide à une déformation telle que la vitesse de déplacement de différents points soit variable, la viscosité diminue considérablement avec la température.
- d- Susceptibilité : la susceptibilité est définie, en particulier, comme la variation de la viscosité avec la température.
- e- Vieillessement : c'est pour le liant, la perte de certaines qualités dans le temps et notamment la perte de cohésivité. D'une manière générale, le liant laisse échapper très lentement des huiles et devient de plus en plus dur.
- f- Ductilité : c'est la caractéristique du liant qui lui permet de s'allonger en un fil très mince, mais sans se rompre, l'allongement plastique qui précède la rupture diminue progressivement. Cette qualité est évidemment une conséquence de la cohésivité.

1.1.7.1.2. Différents types des liants hydrocarbonés

Les liants utilisés sont : les liants naturels, le goudron, le bitume. Le liant le plus couramment utilisé de nos jours est le bitume du fait de l'abandon des mines de houille.

a. Les liants naturels

Ce type se trouve dans la nature le plus souvent associés à des matières minérales, et qui sont utilisés depuis très longtemps. C'est la roche asphaltique qui se présente dans le gisement et qui après broyage donne asphalté ou bitume naturel.

b. Le goudron

Fraction lourde, brun foncé à noire, adhésive et visqueuse, résultant de la distillation destructive de matières organiques telles que la houille, la tourbe ou le bois.

c. Les bitumes

Les bitumes, qui sont obtenus par raffinage des pétroles bruts et des résidus pétroliers. Le bitume présente des propriétés complexes, soit sur le plan de sa composition chimique ou soit sur sa réponse aux sollicitations mécaniques. Il possède un grand pouvoir adhésif pour agglomérer. Les variations importantes de sa viscosité en fonction de la température permettent un mélange adéquat avec les granulats lors des différentes étapes de fabrication et de mise en œuvre de l'enrobé et par conséquent une bonne stabilité lors de l'exploitation de la chaussée, sous sollicitation mécaniques, thermiques et climatiques.

❖ Classification des bitumes

Les bitumes sont des produits solides, semi-solides ou liquides comprenant :

- Le bitume pur : Les plus communs des bitumes routiers sont obtenus en raffinerie par distillation directe, sauf les plus durs pour lesquels on peut faire appel à la rectification à l'air ou au désasphaltage. La plage de pénétrabilité, qui caractérise la dureté, varie de 50/70 à 160/220 pour les bitumes considérés comme mous, et de 10/20 à 35/50 pour les bitumes appelés durs sur les chantiers (cette terminologie ne correspond pas exactement au classement retenu par les normes).
- Le bitume fluidifié (cut-back) : Pour faciliter la mise en œuvre, on réduit la viscosité en ajoutant des fluidifiants (par exemple le kérosène) qui ramollissent le bitume. Certains bitumes fluidifiés peuvent être appliqués à température ambiante.
- Le bitume fluxé : L'ajout d'un fluxant, souvent une huile, ramollit le bitume et permet sa mise en œuvre à une température légèrement supérieure à 100 °C. La partie la plus légère du fluxant s'évapore tandis que la plus lourde a pour rôle de plastifier le liant en place.

- Le bitume fluxé mixte : Bitume pur dont on a diminué la consistance par incorporation de produits provenant de la distillation du pétrole pour au moins 50% des ajouts, et de la distillation du goudron de houille.
- Bitumes industriels : On distingue les bitumes oxydés (R – grades) et les bitumes industriels durs (H – grades), obtenus par soufflage à l'air de bases sélectionnées. Pour des pénétrabilités identiques, le bitume soufflé présente un point de ramollissement plus élevé que les bitumes conventionnels obtenus par distillation directe. Ses propriétés viscoélastiques sont également différentes.
- Le bitume composé : Comportant au moins 50% de bitume et se subdivisant en :
 - Bitume-goudron : mélange de bitume pur et de goudron de houille.
 - Bitume -brais : mélange de bitume pur et de brais de houille.
 - Emulsions de bitume : L'émulsion est une dispersion très fine du bitume dans l'eau. Il en existe deux catégories : L'émulsion est une dispersion très fine du bitume dans l'eau. Il en existe deux catégories : les émulsions anioniques et les émulsions cationiques. La stabilité de la dispersion est obtenue par l'ajout d'un tensioactif qui réduit la tension interfaciale eau/bitume et polarise les globules de bitume soit négativement (émulsion anionique), soit positivement (émulsion cationique). C'est la nature du tensioactif qui détermine la polarité de l'émulsion. Les émulsions de bitume peuvent être mises en œuvre à température modérée (<80 °C), voire à température ambiante. Les émulsions cationiques sont aujourd'hui les plus utilisées en France.
- Les bitumes modifiés par des polymères : Ce sont des bitumes dans lesquels on a incorporé un ou plusieurs polymères (élastomère ou plastomère), pour en améliorer les performances. Les élastomères sont les plus utilisés en France. Ces liants apportent à l'enrobé bitumineux de hautes performances : faible susceptibilité à la température et aux temps de charge, bonne résistance au fluage et à la fatigue, bonne souplesse au froid et comportement élastique. Certains polymères favorisent la résistance au kérosène (bitumes "anti-K").

1.1.7.2.Granulats

Les granulats représentent près de 95 % d'un enrobé bitumineux. Il est donc important de bien les caractériser afin de faire un choix optimal lors de la formulation et de la fabrication d'un enrobé performant. Granulat est un matériau granulaire utilisé en construction ou bien est un ensemble des grains de dimensions comprises entre 0 mm et 125 mm, qui participe intimement aux performances et à la durabilité des ouvrages. Les granulats utilisés dans les

enrobés peuvent être divisés en deux grandes catégories : les granulats naturels en provenance de carrières, sablières et gravières et les granulats d'autres origines tels que des granulats recyclés, des sous-produits d'origine industrielle ou des granulats fabriqués pour un usage spécifique.

1.1.7.2.1. Caractéristiques physiques et propriétés des granulats

Nous citons quelques essais de laboratoire permettant de déterminer certaines caractéristiques mécaniques des granulats :

- Résistance à la fragmentation (chocs) : Elle est mesurée par le coefficient "Los Angeles". Cette mesure est destinée à évaluer la résistance des granulats à la fragmentation sous l'action du trafic.
- Résistance à l'attrition et à l'usure : L'essai utilisé est le Micro Deval à sec ou en présence d'eau. Cette mesure ayant pour but de chiffrer l'usure qui se produit d'une part entre les gravillons dans une assise et d'autre part entre le pneumatique et le granulat à la surface des revêtements. Comme l'usure est très influencée par la présence d'eau, l'essai le plus représentatif est le Macro Deval en présence d'eau.
- Résistance au polissage : Cet essai permet de chiffrer la résistance au polissage des gravillons utilisés pour les couches de surface. On utilise une machine à tambour sur lequel sont disposées des plaques support de granulat.

1.1.7.2.2. Classification des granulats

Les granulats sont classifiés en différentes classes granulaires selon la taille des éléments. Une classe granulaire (d/D) est répertoriée par la taille du plus petit grain « d » et du plus gros grain « D » ; la taille est exprimée en millimètre. Il est admis qu'une fraction granulaire peut comporter jusqu'à 15% de matériaux excédentaires supérieurs. On peut distinguer les classes granulaires suivantes :

- | | | |
|----------------------|------|--|
| • Les fines 0/D | avec | $D \leq 0,080 \text{ mm}$ |
| • Les sables 0/D | avec | $D \leq 6,6 \text{ mm}$ |
| • Les gravillons d/D | avec | $d \geq 2 \text{ mm et } D \leq 31,5 \text{ mm}$ |
| • Les cailloux d/D | avec | $d \geq 20 \text{ mm et } D \leq 80 \text{ mm}$ |
| • Les graves 0/D | avec | $6,3 \text{ mm} < D \leq 80 \text{ mm}$ |

Tableau 1: Caractéristiques exigées pour les granulats routiers

PL/j V/J dans les 2 sens à titre indicatif	Caractéristiques	Couche de liaison	Couche de roulement
T ₄ <25 [<500 V/j]	A IC LA MDE CPA P ES	≤ 30 - ≤ 30 ≤ 25 - ≤ 2 % ≥ 50	≤ 30 ≥ 60 % ≤ 25 ≤ 20 ≥ 0,45 (1) ≤ 2 % ≥ 50
T ₃ 25 à 150 [500 à 3000 V/j]	A IC ou RC LA MDE CPA P ES	≤ 30 IC=100 % ≤ 25 ≤ 20 - ≤ 2 % ≥ 50	≤ 25 ≥ 2 ≤ 20 ≤ 15 ≥ 0,50 ≤ 2 % ≥ 50
T ₂ 25 à 150 [500 à 3000 V/j]	A RC LA MDE CPA P ES	≤ 25 ≥ 2 ≤ 25 ≤ 20 - ≤ 2 % ≥ 50	≤ 20 ≥ 2 ≤ 20 ≤ 15 ≥ 0,50 ≤ 2 % ≥ 50
T ₁ 300 à 750 [6000 à 15000 V/j]	A RC LA MDE CPA P ES	≤ 20 ≥ 2 ≤ 25 ≤ 20 - ≤ 2 % ≥ 50	≤ 20 ≥ 4 ≤ 20 ≤ 15 ≥ 0,50 ≤ 2 % ≥ 50
T ₀ >750 [>15000 V/j]	A RC LA MDE CPA P ES	≤ 20 ≥ 4 ≤ 25 ≤ 20 - ≤ 2 % ≥ 50	≤ 20 ≥ 4 ≤ 15 ≤ 15 ≥ 0,50 ≤ 2 % ≥ 50

On pourra admettre 0,40 comme minimum absolu lorsque la vitesse est limitée à 60 km/h.

PL/j: Poids lourds par jour

V/j: Véhicules légers par jour

A: Aplatissement

IC: Indice de concassage

RC: Rapport de concassage

LA: Los Angeles

MDE: Micro Deval en présence d'eau

CPA: Coefficient de Polissage Accéléré

P: Propreté superficielle des granulats

ES: Équivalent de Sable

1.1.7.2.3. Les fines d'apport

Lorsque la teneur en fines (éléments inférieurs à 0,08 mm) apportées par le sable de concassage ou de broyage entrant dans la composition des enrobés bitumineux s'avère insuffisante, il faut prévoir l'addition de fines d'apport. Pour caractériser la qualité de ces

finies ainsi que celles issue du sable, il convient d'utiliser les essais définis par les règlements en vigueur et de respecter les valeurs minimales imposées.

1.1.7.3. Classification des enrobés bitumineux

Les " enrobés bitumineux" sont des matériaux résultant d'un mélange des granulats et d'un liant hydrocarboné. Le mélange liant – granulats obtenu est constitué de trois phases :

- La phase solide : représentée par le squelette granulaire ;
- La phase visqueuse : représentée par l'apport du liant qui assure la cohésion ;
- La phase gazeuse : représentée par le pourcentage des vides contenu dans le mélange.

Dans le domaine routier, on rencontre plusieurs et différent type d'enrobés bitumineux, et le schéma suivant nous aide à connaître les principales différences entre ces types :

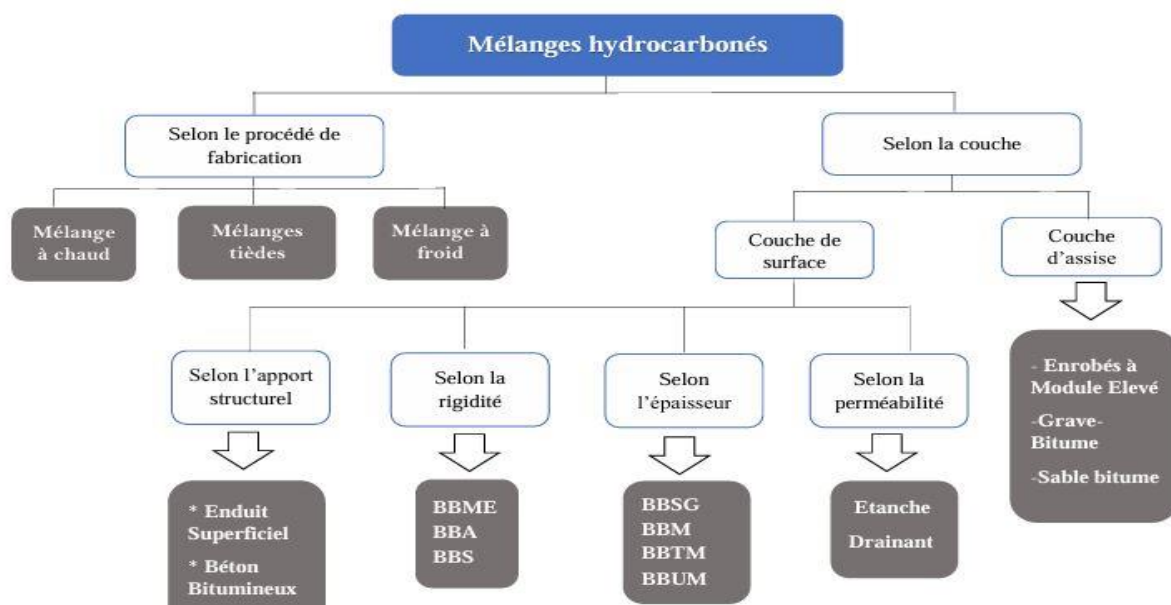


Figure 14: Classification des enrobés bitumineux [17]

Et d'après cette classification on sort avec plusieurs types d'enrobés, ci-dessous on présente quelques types et leurs utilisations :

1.1.7.3.1. Béton bitumineux (BB)

Le béton bitumineux (BB) est un mélange à granularité continue se composant de gravillons, de sable, de filler, de liant bitumineux et d'additifs éventuels. Les classes granulaires des bétons bitumineux retenues dans le présent cahier des charges sont les suivantes : BB 0/8, BB 0/12, BB 0/14. Ce type de matériau est bien adapté aux :

- Couche de surface des chaussées à forts trafics en raison des bonnes caractéristiques mécaniques. Il est aussi bien utilisé pour les chaussées neuves qu'en renforcement.

- Couche de roulement ou couche de liaison de routes, autoroutes et aérodromes selon leur type. Il est fabriqué, mis en œuvre et compacté à chaud.

1.1.7.3.2. Grave-Bitume (GB)

La grave-bitume (GB) est un mélange à granularité continue 0/20 se composant de granulats, de sable, de filler, de liant bitumineux et d'additifs éventuels. Elle est appropriée pour couche de base de routes, autoroutes et aérodromes. Elle est fabriquée, mise en œuvre et compactée à chaud et assure la portance de la chaussée et la répartition des charges du trafic transmis par les couches de surface. Elle sert aussi à établir le profil souhaité de la chaussée respectivement comme couche de reprofilage. La technique des graves bitumes est destinée :

- À la réalisation des assises de chaussée (couche de base et couche de fondation).
- Réseau RP1 : Classes de trafic TPL3 à TPL7

1.1.7.3.3. Sable bitume (SB)

Le sable bitume est un mélange d'un ou plusieurs sables avec du bitume pur. Généralement, le mélange nécessite l'ajout de fines provenant soit des matériaux de concassage – broyage (sable fileries, fines calcaires), soit des pulvérulents industriels (chaux, ciment). Le bitume utilisé doit être assez dur, de classe 40/50 ou 20/30 afin d'assurer une rigidité et une stabilité convenable. Leur domaine d'utilisation c'est d'emploi en couche de base pour les chaussées du réseau principal de niveau 2, il aussi utilise comme couche anti – ramant des fissures.

1.1.7.3.4. Bétons bitumineux à module élevé (BBME)

Le cas de notre étude, les BBME sont obtenus à partir d'un mélange de bitume pur ou modifié, de granulats fabriqués dans une centrale d'enrobage. Ils se caractérisent par un module de rigidité « E » plus élevé que les enrobés classiques et par une bonne tenue à l'orniérage. Ce enrobé est destiné aux couches de roulement des routes nationales et régionales empruntées par un trafic moyen et dense. Les BBME permettent une meilleure résistance à l'orniérage. Ils s'appliquent sur des épaisseurs de 5 à 7 cm pour les BBME 0/10 et 6 à 9 cm pour les BBME 0/14.

1.1.7.3.5. Enrobe à module élevé (EME)

Ce mélange est destiné aux couches de liaison soumises à un trafic lourd (principalement pour diminuer l'orniérage). Ce sont des Enrobes préparés à partir d'un mélange de liant hydrocarboné, de granulats et/ou d'additifs minéraux ou organiques, dosés, chauffés et malaxés dans une installation appelée centrale d'enrobage. Ils sont destinés à la réalisation des assises dans le cadre de travaux neufs ou de renforcement de chaussées. Ils se caractérisent

par un module de rigidité élevé atteignant 17000MPa et une plus grande résistance à la fatigue que les enrobés classiques.

On distingue deux classes de performance classe 1 et classe 2. Les granularités utilisées sont 0/10, 0/14 et 0/20. Chaque type d'EME comprend deux classes granulaires qui diffèrent entre elles notamment par leur teneur en liant et la dureté. On distingue :

- EME Classe 1 : correspond à des graves bitumes à module élevé obtenues par l'emploi d'un bitume dur, aux dosages voisins de ceux des graves bitumes (GB).
- EME Classe 2 : correspond à un enrobé à module élevé comportant, de plus, un très bon comportement en fatigue, du fait du dosage élevé en bitume dur, généralement parlant de l'EME. Les types des enrobes mentionnés au-dessus les plus connus et utilisés en Algérie, reste entre types des enrobes tels que drainant, aéronautique...etc.

1.1.7.4. Les propriétés mécaniques des enrobés dans les structures de chaussée

Le revêtement bitumineux doit supporter les charges dues au trafic, être confortable et sécuritaire et protéger les diverses couches de la fondation contre les charges et les agents atmosphériques [18]. Lors du passage des véhicules, la partie supérieure de la couche d'enrobé est soumise à des contraintes de compression alors que la partie inférieure est soumise à des contraintes de traction.

Les enrobés bitumineux ont un comportement complexe. Il existe quatre principaux types de comportements classés en fonction de l'amplitude de déformation $|\epsilon|$ et du nombre de chargements N comme présenté dans la *figure 15* [8] :

- Comportement fortement non linéaire : ce comportement apparaît avec un faible nombre de chargements et sous l'action de quelques % de déformations.
- Comportement viscoélastique linéaire : ce comportement est considéré pour des chargements comprennent des petites déformations (10^{-4} m/m) et quelques centaines de cycles
- La fatigue : c'est un phénomène d'endommagement des enrobés bitumineux développé sous l'action des faibles déformations et pour plusieurs dizaines de milliers de cycles de chargement.

- L'orniérage : c'est un endommagement qui résulte de l'accumulation des déformations permanentes à la surface de l'enrobé, développé sous l'action des cycles de chargement et des déformations d'amplitudes légèrement inférieures à ceux entraînant la rupture.

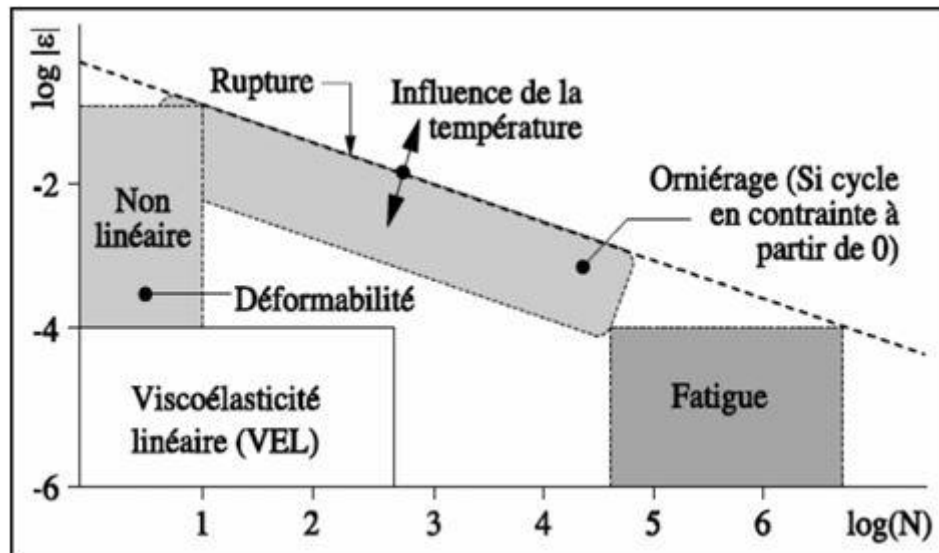


Figure 15: Comportement mécanique des enrobés bitumineux à température fixe [8]

1.1.7.5. Le module complexe

Comme on a mentionné précédemment, le comportement des enrobés est fortement lié à la température et la fréquence de chargement, du fait de la composante visqueuse du comportement visqueux du liant bitumineux. On utilise l'essai de module complexe (E^*) pour caractériser le comportement viscoélastique linéaire (VEL) des enrobés. L'essai consiste à soumettre, en conditions isothermes, une éprouvette d'enrobé à des sollicitations cycliques de forme sinusoïdale et de fréquences variées. L'essai peut être effectué en mode contrainte ou en mode déformation contrôlée et doit être réalisé à petites déformations où l'enrobé se comporte principalement comme un matériau viscoélastique linéaire [8]. Il existe plusieurs essais pour déterminer le module complexe voire les essais de traction ou compression, directe ou indirecte, ainsi que les essais de flexion. L'essai de traction compression est le plus simple à exploiter pour déterminer le module complexe d'un enrobé étant donné que son mode de chargement est homogène (la contrainte est uniforme dans toute l'éprouvette) permet de calculer l'état de contrainte et de déformation directement dans l'axe de sollicitation [12].

La norme du module complexe $|E^*|$ correspond au rapport entre l'amplitude de la contrainte sinusoïdale et l'amplitude de la déformation sinusoïdale. Cette valeur est une approximation du module élastique d'un matériau viscoélastique, qui peut être utilisée pour le

dimensionnement des chaussées lorsque les lois de l'élasticité sont employées. En outre, la réponse du matériau sous sollicitation est caractérisée par un angle de déphasage (φ) qui varie entre 0° pour un matériau purement élastique et 90° pour un matériau purement visqueux [12].

Plusieurs modèles de calcul rhéologique ont été développés permettant de calculer le module complexe sur une plage de température et de fréquence. Ces modèles utilisent la combinaison de ressorts (élément élastique) et d'amortissements linéaire et non linéaire (éléments visqueux newtoniens et autres) [19]. De nombreuses expressions analytiques sont ainsi proposées comme les séries de Prony ou de Dirichlet. Ces dernières représentations se basent sur la décomposition exponentielle [9].

1.1.7.6. Dégradations des chaussées bitumineuses

Les dégradations des chaussées se classent en deux grandes familles : les dégradations superficielles et les dégradations structurales. Les premières apparaissent dans le revêtement en lui affectant ses qualités superficielles alors que les dégradations structurales se manifestent au sein de la structure de la chaussée ou dans son sol support [6]. Les dégradations structurales les plus importantes et les plus préjudiciables pour la structure de la chaussée sont la fissuration et l'orniérage [20] [21]. En outre, l'analyse et le dimensionnement des chaussées se basent sur l'évaluation de ces dégradations [22].

1.1.7.6.1. Fissuration par fatigue

La fatigue est l'un des principaux modes de dégradation des chaussées bitumineuses. Ce mode d'endommagement conduit à l'apparition et la croissance des fissures engendrées par la répétition d'un grand nombre de sollicitations [23]. En effet, le passage des véhicules provoque des contraintes et des déformations à la base de la couche bitumineuse. La répétition de ces efforts engendre l'apparition et la propagation des microfissures qui conduit à l'infiltration de l'eau dans les couches non liées et provoque une détérioration structurale. La déformation horizontale en traction à la base de la couche bitumineuse est utilisée pour évaluer la fissuration par fatigue du bas vers le haut (*figure 16*) [24].

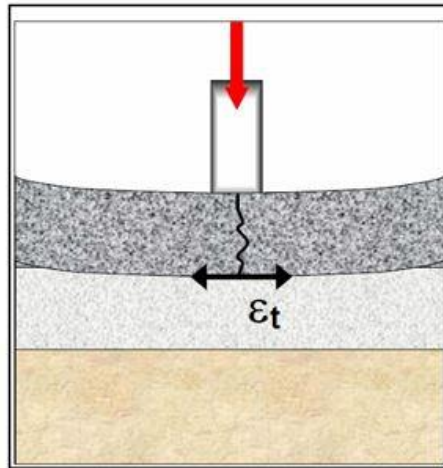


Figure 16: Mécanisme de fissuration par fatigue dans les chaussées bitumineuses [23]

1.1.7.6.2. Fissuration thermique

Comme on a souligné précédemment la sensibilité des enrobés bitumineux aux variations thermiques, la fissuration thermique est causée par la contraction de l'enrobé. En fait, les sollicitations dues aux changements de température affectent le comportement des matériaux et engendrent des contraintes et des déformations au sein du matériau en raison des dilatations contractions thermiques qui peuvent provoquer et faire se propager des fissures avec les cycles thermiques, surtout à basse température [25]. Ce type d'endommagement est souvent rencontré dans les pays où les conditions climatiques hivernales sont sévères [11].

1.1.7.6.3. Déformations permanentes (Orniérage)

L'orniérage est l'un des principaux modes de dégradations des chaussées bitumineuses qui entraîne des problèmes de sécurité et de confort au roulement. Lors du passage d'une charge, des efforts de compression et de cisaillement se manifestent dans les couches de la chaussée (figure 17). Ces efforts créent des déformations permanentes qui s'accumulent et entraînent l'orniérage à la surface de la chaussée. Ce phénomène s'observe, généralement sur les chaussées à fort trafic, sous forme d'une trace permanente sur les pistes des roues.

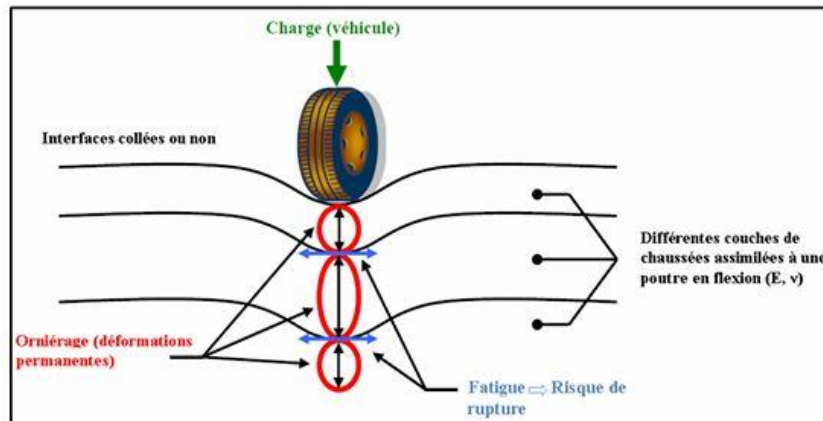


Figure 17: Les sollicitations induites par le trafic sur une chaussée bitumineuse adaptée de [8]

1.2. Types de plastiques utilisés et effets sur les propriétés mécaniques

1.2.1. Définitions

Le plastique est une matière synthétique fabriqué à partir d'un polymère, qui peut être moulé, façonné, en général à chaud et sous pression, afin de produire un objet souple ou rigide. On appelle polymère une macromolécule constituée de longues chaînes carbonées d'unités fondamentales appelées monomères reliées par des liaisons covalentes. La majorité du plastique utilisé dans le monde est fabriqué à partir de charbon, pétrole ou de gaz naturel.

1.2.2. Différentes familles de plastiques (polymères)

1.2.2.1. Thermoplastiques

Un thermoplastique est une matière plastique qui, sous l'effet de la chaleur, fond ou ramollit suffisamment pour pouvoir être remodelée un nombre infini de fois, et ce, sans que ses propriétés mécaniques soient modifiées. Les thermoplastiques ont la propriété de ramollir à la chaleur et de durcir au froid. Il est donc possible de leur donner une nouvelle forme, et ce, à répétition, sans affecter leurs propriétés mécaniques initiales. Cette particularité permet un recyclage plus facile de cette catégorie de plastique, en comparaison avec celui des deux autres types. Les thermoplastiques sont de loin les plastiques les plus utilisés, représentant plus des trois quarts de toutes les matières plastiques produites dans le monde.

1.2.2.2. Thermodurcissables

Un thermodurcissable est une matière plastique qui reste dure en permanence, même sous l'effet de la chaleur. Sa perte d'élasticité est irréversible. Contrairement aux thermoplastiques qui ramollissent sous l'effet de la chaleur, les thermodurcissables ont perdu cette propriété lors de leur fabrication. Ainsi, il conserve la même rigidité sous l'action de la chaleur jusqu'à l'atteinte de sa température de décomposition. Aussi, une fois produit, on ne peut plus

modifier la forme d'un thermodurcissable. Les thermodurcissables sont difficiles à recycler pour cela ils sont moins utilisés que les thermoplastiques.

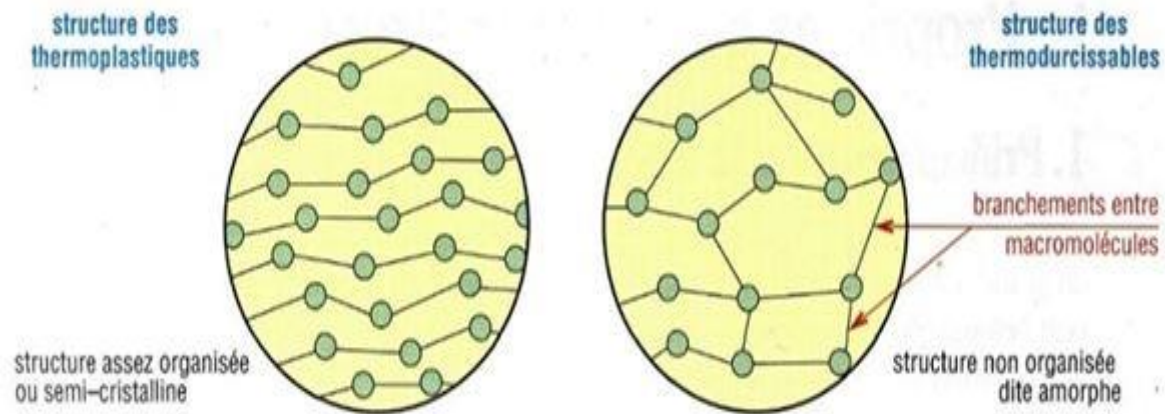


Figure 18: Structure des matières plastiques [26]

Le Tableau 4 récapitule les principales familles de plastiques utilisés :

Tableau 2: Principales matières plastiques [26]

Principales matières plastiques																			
			symbole	(1)	densité	températures limites (°C)	caractéristiques mécaniques				résistance chimique		soluants	(2)	(2)	(2)	(3)		
							R _r (daN/mm ²)	E (daN/mm ²)	A%	chocs 1200 encaillés	acides							bases alcalis	
											(2)	(2)						(2)	(2)
thermoplastiques	polyéthylène	basse densité	PE-LD	TRL-OQ	0,92	100	0,5-3	20-40	200-600	ne casse pas	F	B	B	B	B	B	1, 2		
		haute densité	PE-HD	TRL-OQ	0,96	120	2-4	80-180	20-80		F	B	B	B	B	B	3, 4		
	polypropylène		PP	TRP-OQ	0,91	130	3-5	140-200	250-600	7-25	F	B	B	B	B	B	1, 3, 6		
	polychlorure de vinyle	rigide	PVC	TRP-OQ	1,38	70	4-6	150-350	5-80	2-100							1, 3		
		souple		TRP-OQ	1,20	70	1-3	1-4	150-450			B	B	B	S	B	B	1	
	polystyrène		PS	TRL-OQ	1,05	80	3-5	200-320	5-75	3-20	F	B	B	B	S	B	1, 2, 5, 6		
	ABS*		ABS	TRL-OQ	1,10	110	1,7-6	200	10-50	10-50	F	B	B	B	S	B	1, 2, 3		
	poly (méthacrylate de méthyle)		PMMA	TRP-OQ	1,20	85	5-8	220-320	4-10	2-3	F	B	S	F	F	B	2, 3, 5, 6		
	acétate de cellulose		CA	TRP-OQ	1,30	90	3-6	80-250	20-50	6-45	S	F	F	F		B	1, 2, 5, 6		
	polyamide		PA	TRP-OQ	1,15	160	5-10	90-280	15-300	3-50	S	B	B	B	B	B	B	1, 3, 4	
	polycarbonate		PC	TRP-OQ	1,20	130	5-7	240	80-120	55-100	F	B	S	F	F	B	B	1, 2, 5, 6	
	polyoxyméthylène		POM	TRL-OQ	1,40	90	6-7	300	35-75	5-15	S	B	F	F	B	B	B	1, 3, 4	
	polytétrafluoroéthylène		PTFE	OQ	2,20	+260 -200	2-4	35-80	250-500	16	B	B	B	B	B	B	B	4, 6	
thermodurcissables	phénoplastes**		PF	TRP-OQ	1,3	190	3-6	270-480	750		S	F	S	S	S	B	B	1	
	polyesters		UP	TRP-OQ	1,2	190	5-15	280-400	250-1500	8-100	S	F	S	F	F	F	B	2, 3	
	polyépoxydes		EP	TRL-OQ	1,5	280	2-12		250	2-50	F	B	F	B	B	B	B	1, 3, 6	
	polyimides		PI		1,6	250	2-4		750		B	B	B	B	B	B	B	1, 7	
	silicones		SI	OQ	1-2	230	1				F	B	F	F	F	F	F	B	7

(1) TRL : translucide
TRP : transparent
OQ : opaque

(2) B : bon
F : faible à moyen
S : mauvais (soluble)

(3) ① : pièces mécaniques (engrenages, cames, rotors)
② : petits carter, boîtiers, jouets, petit outillage
③ : grands bâtis, cuves, containers, réservoirs, coques
④ : pièces de frottement (coussinets, paliers, glissières)
⑤ : pièces pour l'optique (vitres, luminaires, diffuseurs)
⑥ : applications chimiques, thermiques
⑦ : enrobage, étanchéité, isolant

* acrylonitrile styrène acrylate
** résine phénol formaldéhyde

1.2.2.3. Elastomères

Un élastomère est un polymère linéaire ou ramifiée transformé par vulcanisation en un réseau tridimensionnel faiblement réticulé infusible et insoluble. Les élastomères se différencient des thermodurcissables par leur propriété d'élasticité caoutchoutière, c'est-à-dire la capacité à subir thermodurcissables par leur propriété d'élasticité caoutchoutière, c'est-à-dire la capacité à subir de très grandes déformations réversibles sous l'action de contrainte mécaniques. Ils peuvent atteindre de très grandes allongements (jusqu'à 500 %) tout en étant capables de retrouver leur géométrie initiale en restituant au milieu l'énergie qui leur a été fournie lors de la déformation.

Tableau 3: Propriétés des différents types de plastiques [26]

Types de plastiques	Sources principales	Effets mécaniques
Polyéthylène (PE)	Films d'emballage, sacs plastiques, bouteilles de lait	Amélioration de la résistance à la déformation permanente (orniérage) Augmentation de la stabilité Marshall (15-25%) Meilleure résistance à l'eau et réduction du décollement Réduction de la résistance à la fatigue à hauts pourcentages
Polypropylène (PP)	Mobilier usagé, pots de yaourt, emballages rigides	Augmentation significative de la rigidité du mélange Amélioration de la résistance à la traction Stabilité thermique accrue Adhérence réduite avec les granulats nécessitant des agents compatibilisants
Polytéréphtalate d'éthylène (PET)	Bouteilles d'eau et de soda	Amélioration modérée des propriétés mécaniques Problèmes de fusion incomplète et dispersion hétérogène Utilisation limitée en pratique
Plastiques composites renforcés de fibres (PRF)	Tables, chaises, seaux, bassines	Combinaison des avantages du PP et du renfort fibreux Amélioration simultanée de la rigidité et de la ténacité Meilleure résistance à la fissuration

1.2.3. Recyclage du plastique

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets et de réintroduction des matériaux qui en sont issus dans le cycle de production d'autres produits équivalents ou différents, il permet de réduire les volumes de déchets, et donc leur pollution, et de préserver les ressources naturelles en réutilisant des matières premières déjà extraites (Futura planète).

1.2.3.1. Différentes méthodes de recyclage

1.2.3.1.1. Recyclage primaire

Mieux connu sous le nom de ré-extrusion, est la réintroduction des déchets de plastiques au cycle d'extrusion pour produire des produits similaires.

1.2.3.1.2. Recyclage mécanique (secondaire)

Le recyclage mécanique est le retraitement des plastiques utilisés pour former de nouveaux produits similaires. Il s'agit d'un type de recyclage secondaire du plastique où les déchets de matières plastiques homogènes sont transformés en produits avec un niveau de performance égal ou inférieur au produit original. Bien que, à première vue, le recyclage mécanique des déchets plastiques semble être une opération « verte », l'opération de retraitement n'est pas rentable car elle nécessite une énergie élevée pour le nettoyage, le tri, le transport et le traitement.

1.2.3.1.3. Recyclage thermique / incinération

C'est la récupération d'énergie par incinération comme moyen efficace de réduire le volume de matières organiques. L'incinération est un processus destructeur dans lequel les hydrocarbures sont convertis en leurs produits de combustion. Cependant, dans la plupart des pays développés, la méfiance du public à l'égard de l'incinération limite actuellement le potentiel des technologies de déchet-énergie, car elles produisent des gaz à effet de serre et des polluants hautement toxiques.

1.2.3.1.4. Recyclage chimique

Le recyclage des matières premières, également connu sous le nom de recyclage tertiaire, vise à convertir les déchets de polymères en monomères d'origine ou en d'autres produits chimiques de valeur. Ces produits sont utiles comme matières premières pour divers procédés industriels en aval ou comme carburants de transport.

Il existe trois approches principales : l'oxydation partielle, le craquage (thermique, catalytique et hydrocraquage) et la dépolymérisation. (Valorisation des déchets plastiques en produits à valeur énergétique).

1.2.3.2. Le cycle de recyclage du plastique

Après le tri effectué par les consommateurs, les plastiques sont collectés puis triés en trois catégories : PEHD, PET clair et PET foncé. Les plastiques sont ensuite mis en balle puis expédiés aux centres de régénération (Figure 19).

Ils sont alors à nouveau triés et prélevés pour éliminer les éléments indésirables et séparer les matériaux selon leur densité.

Le plastique est alors broyé en paillettes qui seront ensuite utilisées pour produire toute une gamme de produits : fibres, rembourrage de couettes et sacs de couchage, moquettes, polaires, etc... (pour ce qui concerne le PET). Les PEHD vont donner des produits différents des tuyaux, des sièges auto pour enfant, des arrosoirs ; etc.



Figure 19: Schéma de recyclage du plastique [26]

1.3. Avancées des recherches expérimentales existantes

1.3.1. Sur l'incorporation des déchets plastiques dans les enrobés bitumineux

De nombreux travaux ont montré l'intérêt de l'incorporation des déchets plastiques dans les enrobés bitumineux :

- **Bense et Aubert (1987)** ont mené l'une des premières études sur l'utilisation des déchets plastiques dans les enrobés bitumineux en intégrant du polyéthylène recyclé broyé par voie sèche en substitution partielle des granulats. Leur programme expérimental s'est appuyé principalement sur les essais Marshall afin d'évaluer la stabilité et le fluage des mélanges modifiés. Les résultats ont montré une augmentation

significative de la stabilité Marshall pour des taux de plastiques compris entre 4% et 6%, traduisant une meilleure cohésion interne et une rigidification du squelette granulaire. Toutefois, les auteurs ont observé qu'au-delà de ce seuil, le mélange devenait trop rigide, avec une augmentation du fluage et une perte de maniabilité, ce qui limitait son application pratique.

- **Zoorob et Suparma (2000)** ont étudié l'incorporation de plastiques recyclés issus de déchets municipaux dans les enrobés à chaud, en remplaçant partiellement les granulats fins. Leur étude a porté sur des dosages allant de 1% à 5% du poids total du mélange, et a inclus des essais Marshall, des essais de fatigue indirecte, des essais de wheel tracking et des tests de sensibilité à l'eau. Les résultats ont mis en évidence une réduction marquée de l'orniérage et une amélioration de la résistance à la fatigue, les auteurs concluant que les plastiques recyclés agissent comme un modificateur du comportement viscoélastique du mélange bitumineux.
- **Kamada et al. (2002)** ont analysé l'effet de deux types de plastiques recyclés, le polyéthylène (PE) et le polypropylène (PP), incorporés par voie sèche à des taux compris entre 5% et 10% du poids des granulats. Les essais Marshall et de traction indirecte ont montré que le PE permettait une augmentation de la stabilité tout en conservant une certaine ductilité, tandis que le PP induisait une rigidification plus importante, améliorant la résistance à l'orniérage mais augmentant le risque de comportement fragile sous sollicitations répétées.
- **Huang et al. (2004)** se sont intéressés à l'utilisation de plastiques recyclés issus de bouteilles en PET, broyés et incorporés par voie sèche dans des enrobés denses. Les essais réalisés comprenaient la stabilité et le fluage Marshall, la traction indirecte et la sensibilité à l'eau. Les résultats ont montré une augmentation de la stabilité Marshall pouvant atteindre 30 %, ainsi qu'une amélioration notable de l'adhésion bitume–granulats, attribuée à l'interaction mécanique entre les particules plastiques et la matrice bitumineuse.
- **Casey et al. (2008)** ont étudié l'incorporation de PVC recyclé dans les enrobés bitumineux par voie sèche. Les essais Marshall ont montré une augmentation de la stabilité, mais les essais à température élevée ont révélé une sensibilité thermique importante du mélange, entraînant une perte de performance sous climat chaud, ce qui limite l'utilisation du PVC recyclé dans les régions tropicales.

- **Al-Hadidy et Tan (2009)** ont utilisé une approche par voie humide consistant à fondre du polyéthylène recyclé directement dans le bitume avant le malaxage. Les essais rhéologiques ont montré une diminution de la pénétration et une augmentation du point de ramollissement, tandis que les essais Marshall ont mis en évidence une amélioration de la résistance au fluage, traduisant une meilleure tenue à haute température.
- **Ahmadinia et al. (2011)** ont incorporé des fibres de PET recyclé dans des enrobés drainants afin d'améliorer leurs performances mécaniques. Les essais Marshall, de fatigue et de résistance à l'eau ont montré que les fibres plastiques renforçaient la cohésion interne du mélange, augmentaient la stabilité Marshall et amélioraient la résistance à la fissuration sous chargement répété.
- **García et al. (2012)** ont étudié le comportement au fluage statique et dynamique d'enrobés modifiés par des plastiques recyclés. Les essais ont montré une réduction significative de la déformation permanente par rapport au mélange de référence, les auteurs attribuant cette amélioration à l'effet de renforcement mécanique des particules plastiques intégrées dans le squelette granulaire.
- **Étude fondatrice de Vasudevan et al. (2012)**- "Utilisation complète des déchets plastiques dans les constructions de chaussées flexibles" : cette recherche pionnière menée en Inde a démontré pour la première fois la faisabilité technique d'incorporer jusqu'à 10% de déchets plastiques dans les enrobés bitumineux. Les auteurs ont collecté et traité des déchets plastiques ménagers, principalement du polyéthylène et du polypropylène, par une méthode de broyage et d'incorporation à sec. Leurs résultats expérimentaux systématiques ont révélé des améliorations remarquables : une augmentation de 25% de la stabilité Marshall, une amélioration de 30% de la résistance à l'eau évaluée par l'essai de résistance à l'arrachement, et une réduction significative de l'orniérage sous chargements répétés. Le mécanisme identifié repose sur la formation d'un film polymère autour des granulats, créant une barrière imperméable et améliorant l'adhérence liant-granulats. Cette étude a établi les bases scientifiques de la valorisation des plastiques dans les chaussées et a inspiré de nombreuses recherches ultérieures.
- **Modarres et Hamed (2014)** ont analysé l'influence de faibles dosages de plastiques recyclés sur la durabilité des enrobés bitumineux. Les résultats expérimentaux ont montré qu'un faible taux de plastique permettait d'améliorer la résistance à l'orniérage

et la durabilité sans affecter négativement la mise en œuvre ni la compacité du mélange.

- **Moghaddam et al. (2014)** ont évalué la résistance à l'orniérage des enrobés modifiés par plastiques à l'aide de l'essai de wheel tracking. Les résultats ont mis en évidence une réduction de plus de 40% de la profondeur d'ornière pour les mélanges modifiés, confirmant l'intérêt des plastiques recyclés pour les chaussées soumises à des températures élevées.
- **Recherche innovante de Sharma & Choudhary (2014)** - "Évaluation des performances des mélanges bitumineux modifiés aux déchets plastiques" : Cette étude approfondie a exploré les mécanismes microscopiques d'interaction entre les plastiques et la matrice bitumineuse. Les chercheurs ont utilisé des techniques avancées de microscopie électronique à balayage pour observer la microstructure des enrobés modifiés. Leurs observations ont confirmé la formation d'un réseau tridimensionnel de polymères qui renforce la matrice bitumineuse et améliore sa résistance à la déformation permanente. Ils ont également identifié une limite critique à 12% d'incorporation, au-delà de laquelle on observe une rigidification excessive conduisant à une fragilisation du matériau. Leur contribution majeure réside dans l'explication des mécanismes de renfort à l'échelle microscopique et la détermination de plages d'incorporation optimales pour différents types de plastiques.
- **Houénou et al. (2014)** se sont intéressés à l'incorporation de sachets plastiques en poudre dans le bitume 50/70 afin d'évaluer leur influence sur les propriétés du liant et des enrobés. Les plastiques fondus ont été ajoutés au bitume en proportions allant jusqu'à 20%, et les échantillons ont été soumis à des essais de pénétrabilité, de point de ramollissement et de stabilité Marshall. Les résultats ont montré une diminution progressive de la pénétrabilité, une augmentation significative du point de ramollissement et une amélioration de la stabilité Marshall, en particulier pour des dosages intermédiaires compris entre 5% et 12%. Toutefois, au-delà de 12%, le mélange devenait trop rigide, perdant en flexibilité et risquant de fissurer prématurément. Cette étude démontre que l'ajout de plastiques peut renforcer les performances mécaniques des enrobés, mais elle reste limitée à des essais en laboratoire et ne considère pas la durabilité en conditions réelles.
- **Houénou (2015)** a approfondi cette approche dans un travail académique consacré à l'usage des sachets plastiques dans la construction routière. Des dosages allant de 0%

à 20% ont été testés avec une large batterie d'essais de caractérisation du liant et des enrobés. L'auteur observe un durcissement net du bitume et une hausse du point de ramollissement, accompagnés d'une amélioration des indices de stabilité Marshall pour des proportions situées entre 8% et 12%. Toutefois, les fortes teneurs compromettent la souplesse et la compacité, et l'étude n'intègre pas l'analyse du vieillissement, ni une évaluation en vraie grandeur. Ce travail met en évidence le potentiel d'une valorisation locale des plastiques, mais il n'apporte pas de réponse sur le seuil optimal ni sur l'impact à long terme.

- **Angelone et al. (2016)** ont comparé l'effet du polyéthylène et du polypropylène recyclés sur les propriétés mécaniques des enrobés bitumineux. Les essais Marshall et de déformation permanente ont montré que le PE offrait un meilleur compromis entre stabilité et ductilité, tandis que le PP augmentait fortement la rigidité, ce qui pouvait être défavorable à long terme.
- **Jafar (2016)** a étudié l'incorporation de plastiques recyclés traités chimiquement dans le bitume par voie humide. Les essais de pénétration, de point de ramollissement, de viscosité et Marshall ont montré une amélioration de l'adhésion bitume-granulats et une réduction de la sensibilité à l'eau, mettant en évidence l'intérêt du traitement chimique pour améliorer la compatibilité plastique-bitume.
- **Arabani et al. (2017)** ont développé des modèles viscoélastiques pour simuler le comportement thermomécanique des enrobés modifiés par plastiques. Les résultats numériques ont montré une bonne corrélation avec les essais expérimentaux de fluage, validant l'approche de modélisation pour l'analyse des performances à long terme.
- **You et al. (2018)** ont utilisé la méthode des éléments finis pour simuler le comportement des enrobés plastifiés sous chargement répété. Les simulations ont montré une diminution des déformations permanentes et une meilleure répartition des contraintes, confirmant les résultats observés expérimentalement.
- **Mashaan et al. (2020)** ont réalisé une revue systématique de la littérature portant sur plus de 50 études expérimentales. Leur analyse a montré que l'incorporation de plastiques recyclés entraîne généralement une augmentation du point de ramollissement, une diminution de la pénétration et une amélioration de la résistance à l'orniérage, sous réserve d'un dosage optimal.
- **Étude récente de Zhou et al. (2020)** - "Valorisation des déchets plastiques renforcés de fibres dans les enrobés bitumineux : une revue complète" : Cette recherche

synthétise les avancées les plus récentes sur l'utilisation des plastiques composites. Les auteurs ont démontré que les déchets plastiques renforcés de fibres (PRF) présentent des avantages significatifs par rapport aux plastiques conventionnels. La structure composite naturelle de ces matériaux, avec leur matrice polymère et leurs renforts fibreux, crée un effet synergique qui améliore simultanément la rigidité et la ténacité des enrobés. Leurs résultats montrent une amélioration de 40% de la durée de vie en fatigue et une réduction de 35% de la propagation des fissures. Cette étude ouvre des perspectives prometteuses

- pour la valorisation de flux spécifiques de déchets plastiques, particulièrement les mobiliers usagés qui constituent une source importante de PRF.
- **Ahmad et al. (2021)** ont étudié l'effet combiné de plastiques recyclés et de charges minérales sur les propriétés mécaniques des enrobés. Les essais ont montré une amélioration significative du module résilient et de la résistance à la fatigue.
- **Singh et al. (2021)** ont évalué la durabilité des enrobés plastifiés sous conditions climatiques sévères. Les résultats ont montré une meilleure résistance au vieillissement à court terme par rapport aux enrobés conventionnels.
- **Rahman et al. (2022)** ont analysé l'effet du plastique recyclé sur la sensibilité à l'eau des enrobés bitumineux. Les essais ITSr ont montré une amélioration de l'adhésion bitume-granulats.
- **Kareem et al. (2023)** ont étudié l'utilisation de faibles dosages de déchets plastiques issus de bouteilles. Les essais Marshall et de module résilient ont montré une augmentation de la stabilité pouvant atteindre 18,5% pour un dosage optimal de 0,5%.
- **Khedaywi et al. (2023)** ont incorporé du PET recyclé dans le liant bitumineux par voie humide. Les essais DSR et BBR ont montré une amélioration de la résistance à l'orniérage, avec une teneur optimale comprise entre 4% et 6%.
- **Zhang et al. (2024)** ont étudié l'effet de plastiques recyclés sur le comportement viscoélastique à haute température. Les résultats ont confirmé une réduction significative du fluage.
- **Ali et al. (2024)** ont analysé l'impact environnemental et mécanique des enrobés plastifiés, montrant un compromis favorable entre performances mécaniques et réduction des déchets.

- **Chamlagai et al. (2025)** ont mis en évidence la nécessité d'adapter les dosages de plastiques aux conditions climatiques locales, notamment en zone tropicale, pour éviter une rigidification excessive des mélanges.

Les travaux récents montrent que la simulation par éléments finis permet d'analyser finement les effets de **l'incorporation de polymères dans le bitume**, notamment la **répartition des contraintes von Mises** et la **formation de zones de concentration au niveau des inclusions plastiques**. Ces analyses fournissent des informations précieuses pour optimiser la proportion de plastiques et prédire la **durabilité du mélange** avant même la phase expérimentale.

En résumé, la modélisation numérique des enrobés bitumineux modifiés repose sur une approche **multi-échelle et multi-physique** :

- à l'échelle microscopique, elle permet d'étudier le **transfert de charge et l'adhérence** entre les constituants ;
- à l'échelle macroscopique, elle permet de prédire les **performances globales** (stabilité, fluage, fatigue, orniérage).

L'utilisation d'Abaqus dans ce cadre constitue une **approche prédictive** capable de réduire le nombre d'essais physiques nécessaires, tout en offrant une compréhension approfondie du comportement du matériau composite bitume-plastique.

1.3.2. Sur les apports et la fiabilité de la simulation numérique

La littérature scientifique témoigne de l'utilisation croissante du logiciel Abaqus pour la modélisation des structures routières, avec des applications couvrant plusieurs domaines spécifiques. Les travaux fondateurs de **Collop et al. (2003)** ont établi les bases de la modélisation fiable des enrobés bitumineux sous Abaqus. Leurs recherches ont démontré la capacité du logiciel à reproduire le comportement viscoélastique non linéaire des matériaux routiers avec une précision remarquable, validée par des essais expérimentaux montrant des écarts inférieurs à 8% pour les propriétés mécaniques principales.

Les études d'**Arambula-Mercado et al. (2018)** ont étendu ces capacités à la modélisation multi-physique des chaussées, intégrant les effets couplés de la température, de l'humidité et du vieillissement. Leurs simulations sous Abaqus ont permis de prédire avec succès le comportement à long terme des structures routières sous conditions environnementales réalistes, avec une corrélation exceptionnelle entre les résultats numériques et les mesures in situ sur des sections expérimentales instrumentées.

Plus récemment, **Kim et Lee (2019)** ont développé des modèles multi-échelles sous Abaqus pour simuler le comportement des composites bitume-polymère. Leur approche hiérarchique a

permis de relier les propriétés microscopiques des constituants au comportement macroscopique du composite, offrant ainsi un outil prédictif puissant pour l'optimisation des formulations d'enrobés modifiés.

Dans ces travaux, Abaqus a démontré sa capacité à reproduire des résultats proches des essais expérimentaux de laboratoire, notamment les essais Marshall, de fluage statique, ou de traction indirecte. L'ajout de sous-modèles dédiés (comme *Viscoelastic Material*, *Cohesive Behavior* ou *User Subroutines UMAT*) permet une modélisation fine des interfaces bitume–granulat–plastique et une simulation réaliste des conditions de chargement routier (trafic, cycles thermiques, contraintes de cisaillement).

1.4. Justification du recours à une modélisation numérique prédictive

Face aux limites des approches purement expérimentales coûteuses, longues et parfois difficilement reproductibles, la **modélisation numérique par éléments finis** apparaît comme une alternative efficace et rationnelle. Elle permet d'**anticiper le comportement du matériau composite bitume–plastique** à partir de ses propriétés constitutives, tout en **réduisant la dépendance aux essais physiques**.

Le recours à **Abaqus** s'impose ici comme un choix pertinent pour plusieurs raisons :

- il permet de représenter le **comportement viscoélastique et non linéaire** du bitume ;
- il offre la possibilité de **modéliser explicitement les interfaces** entre bitume, granulats et plastiques ;
- il autorise l'introduction de **chargements mécaniques et thermiques réalistes**, reproduisant les conditions de trafic et de climat du Bénin ;
- et enfin, il constitue un **outil de prédiction et d'optimisation** permettant d'identifier la composition offrant le meilleur compromis entre stabilité, flexibilité et durabilité.

Ainsi, cette étude vise à **contribuer à la transition vers une ingénierie routière numérique et durable**, en intégrant les déchets plastiques dans les enrobés bitumineux et en évaluant leurs performances à travers une approche **par simulation éléments finis sous Abaqus**.

Ce positionnement confère à la recherche un **caractère innovant**, en reliant la problématique environnementale de la gestion des plastiques à la modernisation technologique de la conception routière.

Conclusion

L'analyse bibliographique a montré que l'ajout de plastiques dans les enrobés améliore globalement la stabilité, la résistance et la durabilité des chaussées, mais les études restent souvent limitées aux essais expérimentaux.

La modélisation numérique, notamment par la méthode des éléments finis sous Abaqus, apparaît comme une alternative fiable pour prédire le comportement des enrobés modifiés et analyser les interactions bitume–plastique. Ainsi, ce chapitre établit le cadre scientifique justifiant le recours à une approche numérique prédictive. Le chapitre suivant présentera la méthodologie de modélisation adoptée et les paramètres utilisés pour la simulation.

Chapitre II : Matériels et méthodologie de simulation numérique

Dans le cadre de cette étude, la méthodologie adoptée repose sur une approche progressive et multi-échelle visant à analyser l'influence de l'incorporation de granulés plastiques recyclés dans les enrobés bitumineux. Dans un premier temps, une modélisation numérique de l'éprouvette Marshall est réalisée pour chacun des taux de plastique considérés, afin de déterminer la stabilité Marshall et d'évaluer l'évolution des performances mécaniques du matériau. Les résultats issus de ces simulations permettent ensuite d'identifier une plage optimale de teneur en plastiques, correspondant à un compromis satisfaisant entre résistance mécanique et déformabilité. Dans un second temps, le taux de plastique optimal retenu est intégré dans la modélisation de la structure complète de chaussée, soumise à des chargements statiques et dynamiques représentatifs des conditions de trafic. Cette démarche méthodologique permet d'assurer la cohérence entre le comportement du matériau à l'échelle de l'éprouvette et la réponse mécanique globale de la chaussée, tout en évaluant l'impact réel de l'utilisation des plastiques recyclés sur les performances structurelles de la couche de roulement.

2.0.Présentation du matériel de modélisation : le code ABAQUS

Il faut noter que les logiciels de conception et de calculs assistés par ordinateur sont très nombreux sur le marché. Tous ces logiciels effectuent les mêmes tâches, c'est à dire qu'ils génèrent des structures, ses caractéristiques et celles du problème étudié ensuite ils calculent le devenir de cette structure (déformations, ruptures, plastification...) et enfin ils permettent de traiter ces résultats afin d'en sortir des données utilisables et exploitables.

ABAQUS est avant tout un logiciel de simulation par **méthode des éléments finis (MEF)** largement reconnu dans le domaine de l'ingénierie civile, mécanique et industrielle pour l'analyse du comportement des structures et des matériaux soumis à différents types de sollicitations. Il permet de modéliser des problèmes linéaires et non linéaires, statiques et dynamiques, en prenant en compte des lois de comportement complexes.

Développé à l'origine par la société **Hibbitt, Karlsson & Sorensen (HKS)** dans les années 1970 et actuellement distribué par **Dassault Systèmes** au sein de la plateforme **SIMULIA**, ABAQUS offre un environnement intégré pour la **modélisation, le maillage, le calcul et la post-analyse des résultats**.

Le cœur du logiciel ABAQUS est donc ce qu'on pourrait appeler son "moteur de calcul". À partir d'un fichier de données (caractérisé par le suffixe .inp), qui décrit l'ensemble du problème mécanique, le logiciel analyse les données, effectue les simulations demandées

et fournit les résultats dans un fichier.odb. Deux tâches restent à accomplir : générer le fichier de données (cela s'appelle aussi effectuer le prétraitement), et exploiter les résultats contenus dans le fichier .odb (ou post traitement). La structure du fichier de données peut se révéler rapidement complexe : elle doit contenir toutes les définitions géométriques, les descriptions des maillages, des matériaux, des chargements, etc..., suivant une syntaxe précise. Il faut savoir que le pré traitement et le post traitement peuvent être effectués par d'autres logiciels. ABAQUS qui propose le module ABAQUS CAE, interface graphique qui permet de gérer l'ensemble des opérations liées à la modélisation :

- la génération du fichier de données,
- le lancement du calcul proprement dit,
- l'exploitation des résultats.

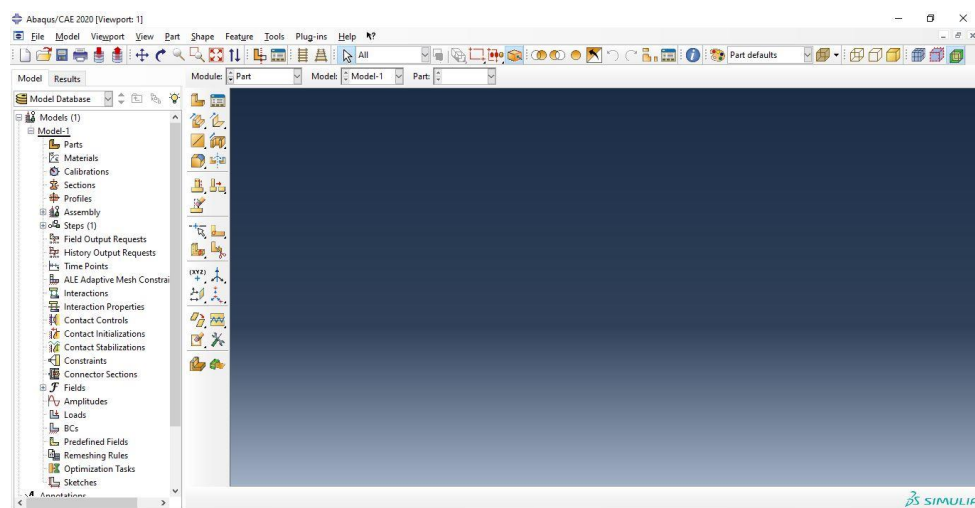


Figure 20: Interface d'utilisateur du logiciel ABAQUS/CAE

L'Abaqus/CAE (complete abaqus environment) présente deux grands codes :

- ✓ **ABAQUS/Standard**: résolution par un algorithme statique implicite ;
- ✓ **ABAQUS/Explicit**: résolution par un algorithme dynamique explicite.

La réalisation complète d'un jeu de données s'effectue après un passage successif dans les différents modules :

- **Module "Part"** : création de la géométrie

C'est dans ce module qu'est définie la géométrie des entités du modèle. Elles comprennent à la fois les parties déformables et les parties rigides.

- **Module "Property"** : matériau et section

On y définit les propriétés du ou des matériaux (des parties déformables du modèle) et la masse des corps rigides si nécessaire.

- **Module “Assembly”** : instance et assemblage

Dans ce module, il s'agit de créer une (voire plusieurs) instance(s) à partir des entités que vous avez définies dans le module Part. Ces instances seront celles que vous manipulerez par la suite dans le modèle.

- **“Module Step”** : incrémentation

C'est ici qu'on choisit le type d'impact et l'incrémentation. C'est également dans le module Step qu'on précise les sorties désirées. Il y a 2 types de sorties : des sorties de type champ qui fournissent des valeurs à un instant donné et des sorties de type historique qui vont donner l'évolution d'une grandeur au cours du temps.

- **Module “Interaction”** :

C'est dans ce module qu'on définit les interactions entre différentes entités du modèle, ce qui peut prendre la forme d'un contact ou d'équations de liaison entre degrés de liberté.

- **Module “Load”** : Chargement et conditions aux limites

On définit ici le chargement, les conditions aux limites et les vitesses initiales.

- **Module “Mesh”** : maillage

C'est ici qu'il faut mailler la structure.

- **Module “Job”** : lancer et suivre le calcul

La suite de notre travail sera consacrée à une modélisation et une simulation numérique d'une éprouvette Marshall et d'une plaque de chaussée sur un logiciel d'éléments finis. Nous avons donc eu recours au **Code Abaqus/CAE 2020**. La conduite de la simulation numérique a été possible grâce à l'utilisation d'un ordinateur.

2.1.Méthode de calcul des plaques multicouches

2.1.1. Approche monocouche équivalente

L'approche monocouche équivalente est dérivée de la théorie d'élasticité 3D suite à des hypothèses simplificatrices concernant la cinématique des déplacements ou de contraintes planes dans l'épaisseur du stratifié. Ces hypothèses permettent de réduire un problème 3D à un problème 2D. Dans l'approche monocouche équivalente, le nombre d'équations ne dépend pas du nombre de couche, la plaque multicouche est homogénéisée et est donc considérée comme une seule couche. Nous passons en revue, dans ce qui suit, les principaux modèles.

➤ Les modèles classiques Love-Kirchhoff

Les modèles sont basés sur une distribution linéaire des déplacements dans l'épaisseur. L'hypothèse adoptée est celle de Love-Kirchhoff de contraintes planes, les déformations dues aux cisaillements transverses sont négligées. La normale reste droite et est perpendiculaire à la surface moyenne après avoir déformée.

➤ ***Les modèles Reissner-Mindlin***

Pour introduire l'effet du cisaillement transverse, l'hypothèse cinématique est adoptée : la normale reste droite mais non perpendiculaire à la surface moyenne (à cause de l'effet du cisaillement transverse) dans la configuration déformée.

➤ ***Les modèles d'ordre supérieur***

Pour franchir les limites des théories du premier ordre, plusieurs auteurs proposent des théories à un ordre supérieur. Les modèles sont basés sur une distribution non linéaire des champs dans l'épaisseur. Ces modèles permettent de représenter le gauchissement de la section dans la configuration déformée. La plupart des modèles d'ordre supérieur utilisent un développement en série de Taylor des champs de déplacements.

2.1.2. Approches par couche

Dans les approches par couche, chaque couche est modélisée en 3D. Ces approches sont destinées justement à mieux décrire les effets d'interface. Ainsi différents modèles issus de l'approche par couche ont été proposés. Le multicouche est subdivisé en sous structures (correspondant en fait à chaque couche ou chaque ensemble de couche). On applique à chaque sous-structure une théorie du premier ordre ou un modèle d'ordre supérieur. Les modèles de ce type sont relativement coûteux (le nombre de variables dépend du nombre de couche), mais permettent l'obtention de résultats plus précis, notamment en ce qui concerne le calcul des contraintes hors plan. D'une manière générale, les modèles issus de l'approche par couche peuvent être classés en deux groupes : les modèles couches discrètes où chaque couche est considérée comme une plaque en imposant les conditions de continuité en déplacement ou en contrainte aux interfaces et les modèles zig-zag où la cinématique satisfait à priori les conditions de contact et est indépendante du nombre de couche

➤ ***Les modèles zig-zag***

Dans ce modèle, les déplacements membranaires sont les résultats de la superposition du champ de déplacement global d'une théorie du premier ordre et d'une fonction zig zag. L'avantage principal du champ de déplacement des modèles zig-zag réside dans la bonne modélisation de la distorsion de la normale de la surface déformée, ainsi que dans la

vérification des conditions de continuité, et ce sans augmenter pour autant le nombre et l'ordre des équations fondamentales de la théorie du premier ordre.

➤ **Les modèles couches discrètes (layerwise)**

Les modèles couches discrètes adoptent une approximation plus fine des champs suivant l'épaisseur du multicouche que les modèles de plaque d'ordre supérieur ou zig zag puisqu'ils proposent une cinématique par couche plutôt qu'une cinématique globale. En fait, avec les modèles couches discrètes, le multicouche est représenté par un ensemble de plaques (objets 2D) couplés par des efforts d'interface. Les conditions de continuité aux interfaces sont assurées. Le nombre de paramètres inconnus dépend du nombre de couche de la plaque composite.

2.1.3. Synthèse sur les approches

La plus répandue des approches monocouches équivalentes est l'approche classique qui est une extension de la théorie (classique) des plaques de Kirchhoff aux stratifiés. Cette approche est basée sur le champ de déplacement.

$$u(x, y, z, t) = u_0(x, y, t) - z \frac{\partial w_0}{\partial x} \quad (\text{Équation 9})$$

$$v(x, y, z, t) = v_0(x, y, t) - z \frac{\partial w_0}{\partial y} \quad (\text{Équation 10})$$

$$w(x, y, z, t) = w_0(x, y, t) \quad (\text{Équation 11})$$

où ($u_0, v_0 ; w_0$) sont des composants de déplacements suivants x, y, z respectivement. Quant aux modèles d'ordre supérieur, le champ de déplacement du premier ordre se présente sous la forme :

$$\begin{cases} u(x, y, z, t) = u_0(x, y, t) - z\Phi_x(x, y, t) \\ v(x, y, z, t) = v_0(x, y, t) - z\Phi_y(x, y, t) \\ w(x, y, z, t) = w_0(x, y, t) \end{cases} \quad (\text{Équation 12})$$

Où Φ_x et Φ_y sont des rotations par rapport à y et x respectivement.

Cette dernière est une extension cinématique du modèle classique en incluant une déformation transversale brute de cisaillement dans des hypothèses cinématiques. Elle exige des facteurs de correction qui sont difficiles à déterminer pour des structures arbitraires. Ces facteurs dépendent non seulement du stratifié, de ses paramètres géométriques mais aussi de la charge et des conditions aux limites.

La théorie classique des stratifiés, basée sur l'hypothèse de Kirchhoff, permet de décrire avec une bonne précision les champs des contraintes et déformations dans les matériaux composites stratifiés peu épais, excepté dans les régions peu étendues près des bords des stratifiés. La validité de la théorie des stratifiés a pu être établie en comparant les résultats obtenus à partir de cette théorie aux solutions exactes des équations d'élasticité, solutions qui ont été explicitées dans le cas de certaines configurations particulières.

Les équations de mouvement en fonction des déplacements

Dans le cas de la théorie classique, les déplacements peuvent être exprimés en fonction de rigidités à travers les équations suivantes connues sous le nom des équations de mouvement

$$\begin{aligned} & A_{11} \left(\frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \right) + A_{12} \left(\frac{\partial^2 v_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \right) \\ & + A_{16} \left(\frac{\partial^2 u_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \frac{\partial w_0}{\partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \right) - B_{11} \frac{\partial^3 w_0}{\partial x^3} - B_{12} \frac{\partial^3 w_0}{\partial x \partial y^2} \\ & + 2B_{16} \frac{\partial^3 w_0}{\partial x^2 \partial y} + A_{16} \left(\frac{\partial^2 u_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \right) + A_{26} \left(\frac{\partial^2 v_0}{\partial y^2} + \frac{\partial w_0}{\partial y} \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \right) \\ & + A_{66} \left(\frac{\partial^2 u_0}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \right) - B_{16} \frac{\partial^3 w_0}{\partial x^2 \partial y} - B_{26} \frac{\partial^3 w_0}{\partial y^3} - 2B_{66} \frac{\partial^3 w_0}{\partial x \partial y^2} \\ & = I_0 \frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2} - I_1 \frac{\partial^3 w_0}{\partial x \partial t^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & A_{16} \left(\frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \right) + A_{26} \left(\frac{\partial^2 v_0}{\partial y \partial x} + \frac{\partial w_0}{\partial y} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \right) \\ & + A_{66} \left(\frac{\partial^2 u_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \frac{\partial w_0}{\partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \right) - B_{16} \frac{\partial^3 w_0}{\partial x^3} - B_{26} \frac{\partial^3 w_0}{\partial x \partial y^2} \\ & + 2B_{66} \frac{\partial^3 w_0}{\partial x^2 \partial y} + A_{12} \left(\frac{\partial^2 u_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \right) + A_{22} \left(\frac{\partial^2 v_0}{\partial y^2} + \frac{\partial w_0}{\partial y} \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \right) \\ & + A_{26} \left(\frac{\partial^2 u_0}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \frac{\partial w_0}{\partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \right) - B_{12} \frac{\partial^3 w_0}{\partial x^2 \partial y} - B_{22} \frac{\partial^3 w_0}{\partial y^3} \\ & - 2B_{26} \frac{\partial^3 w_0}{\partial x \partial y^2} = I_0 \frac{\partial^2 v_0}{\partial t^2} - I_1 \frac{\partial^3 w_0}{\partial y \partial t^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& B_{11} \left(\frac{\partial^3 u_0}{\partial x^3} + \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial^3 w_0}{\partial x^3} \right) + B_{12} \left(\frac{\partial^3 u_0}{\partial x^2 \partial y} + \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial y} \frac{\partial^3 w_0}{\partial x^2 \partial y} \right) \\
& + B_{16} \left(\frac{\partial^3 u_0}{\partial x^2 \partial y} + \frac{\partial^3 v_0}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 w_0}{\partial x^3} \frac{\partial w_0}{\partial y} + 2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial^3 w_0}{\partial x^2 \partial y} \right) \\
& - D_{11} \frac{\partial^4 w_0}{\partial x^4} - D_{12} \frac{\partial^4 w_0}{\partial x^2 \partial y^2} - 2D_{16} \frac{\partial^4 w_0}{\partial x^3 \partial y} \\
& + 2B_{16} \left(\frac{\partial^3 u_0}{\partial x^2 \partial y} + \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial^3 w_0}{\partial x^2 \partial y} \right) \\
& + 2B_{26} \left(\frac{\partial^3 v_0}{\partial x \partial y^2} + \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} + \frac{\partial w_0}{\partial y} \frac{\partial^3 w_0}{\partial x \partial y^2} \right) \\
& + 2B_{66} \left(\frac{\partial^3 u_0}{\partial x \partial y^2} + \frac{\partial^3 v_0}{\partial x^2 \partial y} + \frac{\partial^3 w_0}{\partial x^2 \partial y} \frac{\partial w_0}{\partial y} + \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \right. \\
& \left. + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial^3 w_0}{\partial x \partial y^2} \right) - 2D_{16} \frac{\partial^4 w_0}{\partial x^3 \partial y} - 2D_{26} \frac{\partial^4 w_0}{\partial x \partial y^3} - 4D_{66} \frac{\partial^4 w_0}{\partial x^2 \partial y^2} \\
& + B_{12} \left(\frac{\partial^3 u_0}{\partial x \partial y^2} + \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial^3 w_0}{\partial x \partial y^2} \right) \\
& + B_{22} \left(\frac{\partial^3 v_0}{\partial y^3} + \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} + \frac{\partial w_0}{\partial y} \frac{\partial^3 w_0}{\partial x \partial y^2} \right) \\
& + B_{26} \left(\frac{\partial^3 u_0}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 v_0}{\partial x \partial y^2} + \frac{\partial^3 w_0}{\partial x \partial y^2} \frac{\partial w_0}{\partial y} + 2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial^3 w_0}{\partial y^3} \right) \\
& - D_{12} \frac{\partial^4 w_0}{\partial x^2 \partial y^2} - D_{22} \frac{\partial^4 w_0}{\partial y^4} - 2D_{26} \frac{\partial^4 w_0}{\partial x \partial y^3} + N(w_0) + q \\
& = I_0 \frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2} - I_2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^3} + \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \right) + I_1 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial w_0}{\partial x} + \frac{\partial w_0}{\partial y} \right)
\end{aligned}$$

Où $(A_{ij}; B_{ij}; D_{ij})$ sont les rigidités de la plaque et $(u_0; v_0; w_0)$ sont les déplacements au niveau du plan moyen correspondant à $z=0$. Une fois que les déplacements sont déterminés analytiquement ou numériquement pour un problème donné, les déformations et les contraintes peuvent être déterminées.

2.1.4. Aperçu sur la méthode des éléments finis (MEF)

2.1.4.1. Modélisation

La modélisation est une opération par laquelle on établit le modèle d'un système complexe. Un modèle est une représentation mathématique d'un phénomène complexe auquel on affecte des informations dans le but d'utiliser les lois de la mécanique générale pour faire des vérifications de résistance et de rigidité.

2.1.4.2.Simulation

La simulation est l'un des outils d'aide, de prise de décision les plus efficaces, à la disposition des concepteurs et des gestionnaires des systèmes complexes. Elle consiste à construire un modèle d'un système réel et à conduire des expériences sur ce modèle afin de comprendre le comportement de ce système et d'en améliorer les performances.

2.1.4.3.Classification des systèmes physiques

Un système physique est caractérisé par un ensemble de variables qui peuvent dépendre des coordonnées d'espace (**x, y, z**) et du temps **t**. Le système est dit stationnaire si ses variables ne dépendent pas du temps. Certaines variables **d** du système sont connues à priori : propriétés physiques, dimensions du système, sollicitations, conditions aux limites, etc.

D'autres variables **u** sont inconnus : déplacements, vitesses, températures, contraintes, etc.

Un modèle mathématique du système permet d'écrire des relations entre **u** et **d** en utilisant des lois physiques. Ces relations constituent un système d'équations en **u** qu'on est souvent amené à résoudre, le **nombre de degrés de liberté** du système est le nombre de paramètres nécessaires pour définir **u** à un instant **t** donné. Un système est **discret** s'il possède un nombre de degrés de liberté **fini**, un système est **continu** s'il possède un nombre de degrés de liberté **infini**.

Le comportement d'un système discret est représenté par un **système d'équations algébriques**, celui d'un système continu est le plus souvent représenté par un **système d'équations aux dérivées partielles** ou **intégral-différentielles** associé à des **conditions aux limites** en espace et en temps.

Les équations algébriques des systèmes discrets peuvent être résolues par les méthodes numériques. Par contre, les équations des systèmes continus ne peuvent en général pas être résolues directement. Il est nécessaire de discrétiser ces équations, c'est-à-dire de les remplacer par des équations algébriques. La méthode des éléments finis est l'une des méthodes qui peuvent être utilisées pour faire cette discrétisation.

2.1.4.4.Processus d'analyse d'un problème physique

De façon générale, les différentes étapes d'analyse d'un problème physique s'organisent suivant le processus schématisé par la figure 1. Nous partons d'un problème physique ; le cadre précis de l'étude est défini par les hypothèses simplificatrices qui permettent de définir un modèle mathématique. La difficulté pour l'ingénieur est de savoir choisir parmi les lois de la physique celles dont les équations traduiront avec la précision voulue la réalité du problème

physique. Un bon choix doit donner une réponse acceptable pour des efforts de mise en œuvre non prohibitifs. Le choix du modèle mathématique est un compromis entre le problème posé à l'ingénieur « quelles grandeurs veut-on calculer et avec quelle précision ? » et les moyens disponibles pour y répondre. Les équations du modèle retenu sont soumises à un certain nombre d'hypothèses basées sur les sciences de l'ingénieur. Il faut connaître le domaine de validité de ces hypothèses pour pouvoir vérifier que la solution obtenue est satisfaisante.

Si le modèle mathématique n'admet pas de solution analytique, il faut chercher une solution approchée de ce modèle. La discrétisation du problème correspond au choix d'un modèle numérique permettant de traiter les équations mathématiques.

Partant des hypothèses de petits déplacements et petites déformations, la mécanique des solides déformable a permis d'établir deux types d'équations régissant l'équilibre d'un corps : les équations d'équilibre des forces et la compatibilité des déplacements.

L'intégration de ces équations n'étant pas aisée, l'une des méthodes les plus utilisées pour les résoudre est celle dite des **éléments finis** qui revient à remplacer le **système continu** par un **système discret**.

Le solide est alors divisé en un certain nombre de **sous-domaines** dont l'**assemblage** permet la **reconstitution** de la géométrie initiale. Le processus de division du solide en un ensemble de sous-domaine s'appelle le **maillage**, on parle également de **discrétisation géométrique du solide**. Chacun de ces sous-domaines porte le nom d'**éléments** et ces **éléments** sont dits **finis** parce qu'ils sont de **forme** et de dimension **connue**. Ils sont reliés entre eux par des nœuds dont les **degrés de liberté (DDL)** constituent les inconnues du problème.

2.1.4.5.Discrétisation géométrique (maillage)

Un maillage est la discrétisation spatiale d'un milieu continu, ou aussi, une **modélisation géométrique** d'un domaine par des éléments proportionnés finis et bien définis. L'objet d'un maillage est de procéder à une **simplification** d'un système par un modèle représentant ce système et, éventuellement, son environnement (le milieu), dans l'optique de simulations de calculs ou de représentations graphiques. On parle également dans le langage commun de **pavage** du domaine. Un maillage est défini par :

- ✓ son repère ;
- ✓ les points (nœuds) le constituant, caractérisés par leurs coordonnées ;
- ✓ les cellules (éléments finis) reliant n de ces points ;

Caractérisation d'un maillage

Un maillage se caractérise par :

- sa dimension : typiquement 1D, 2D ou 3D ;

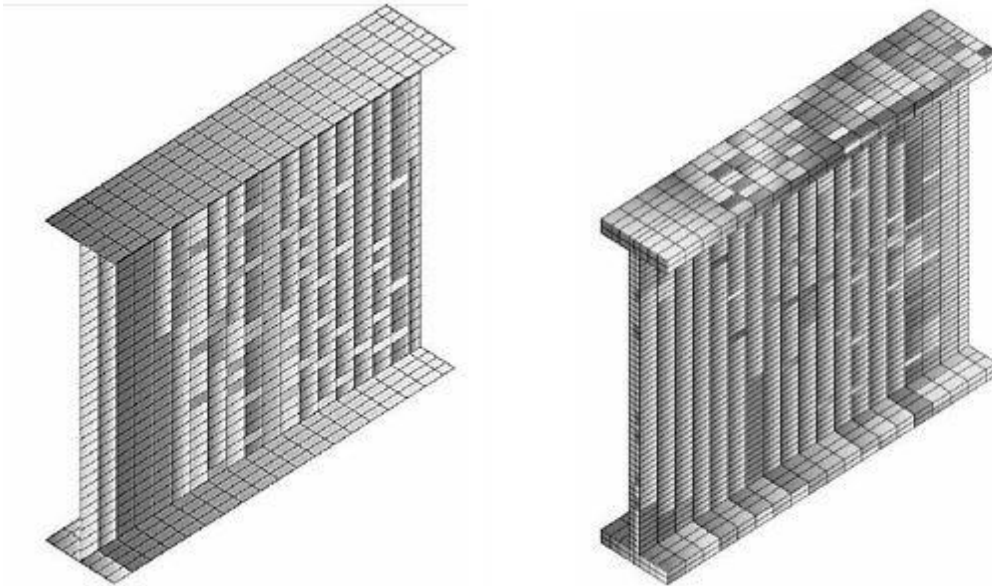


Figure 21: (a) maillage en 2D (poutre I) ; (b) maillage en 3D (poutre I)

- son volume (dimension totale couverte) ;
- sa finesse : surface ou volume moyen des cellules composant le maillage ;

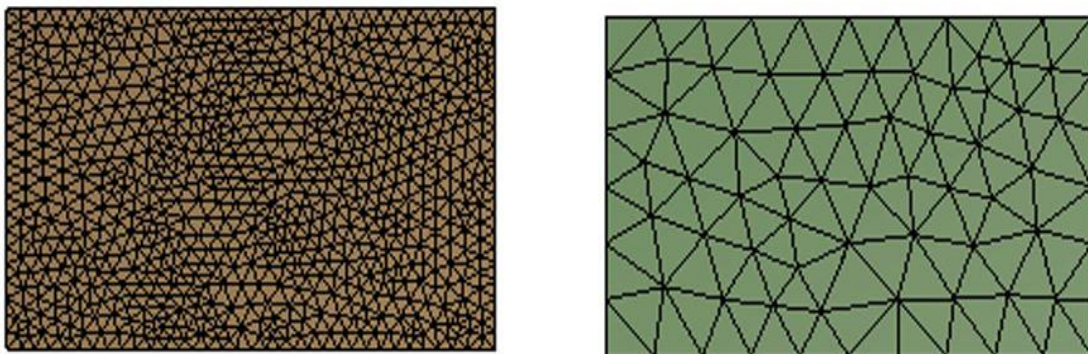


Figure 22 : (a) maillage raffiné (plaque) ; (b) maillage grossier (plaque)

- la géométrie des cellules : en 1D segments ; en 2D triangles, polygones, carrés ; en 3D polyèdres, parallélépipèdes, cubes.

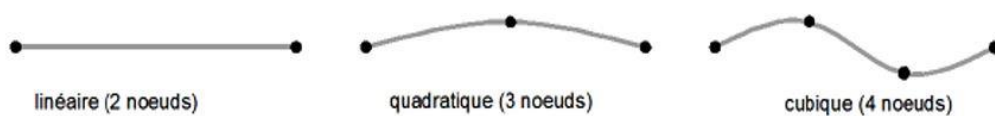


Figure 23 : Formes géométriques 1D

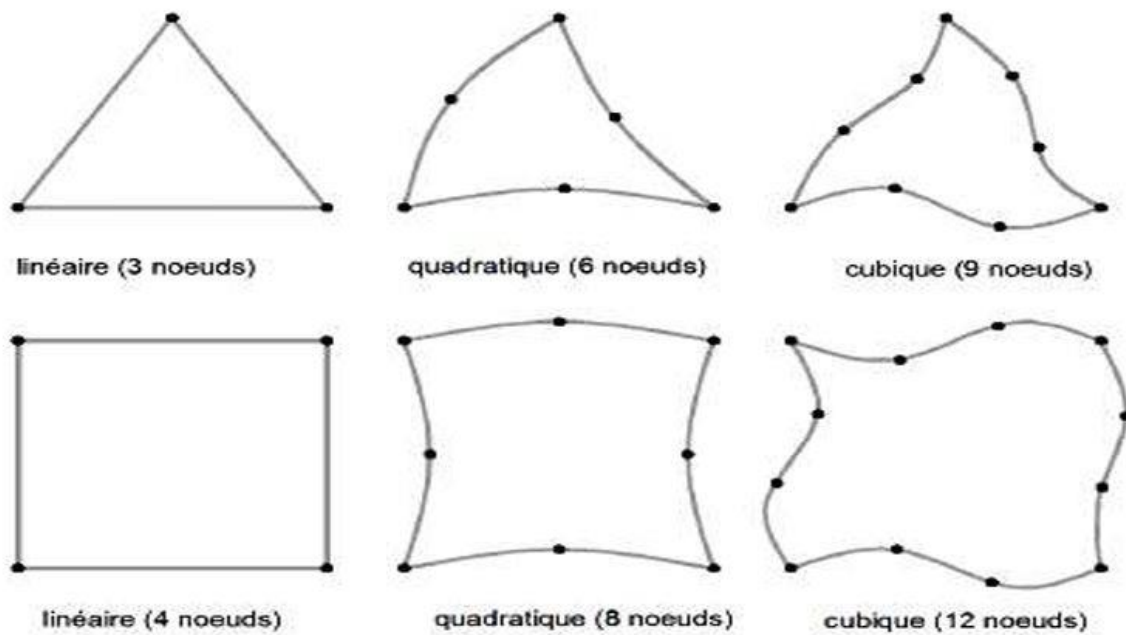


Figure 24 : Formes géométriques 2D

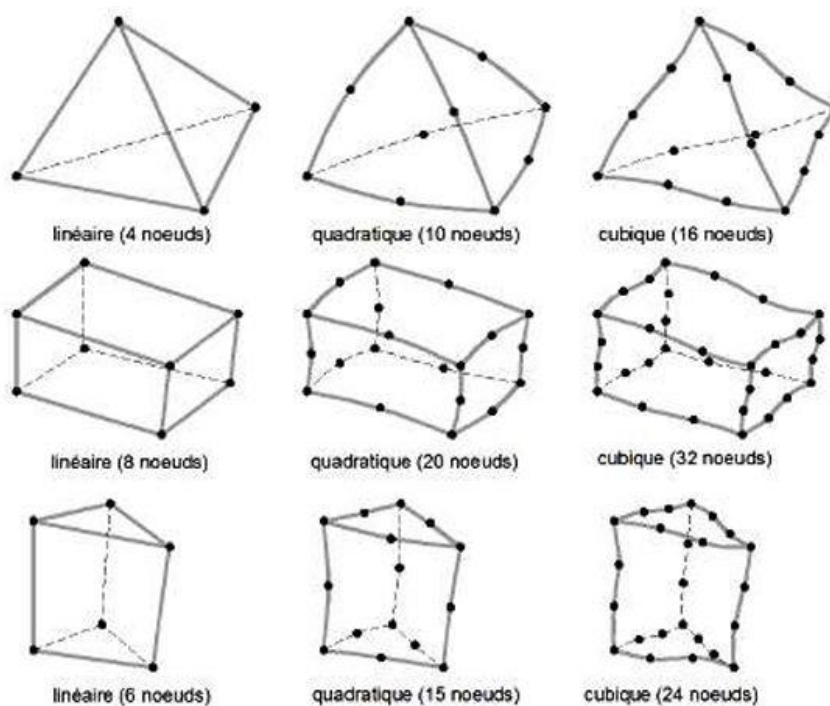


Figure 25 : Formes géométriques 3D

But et rôle du maillage

Le but principal d'un maillage d'éléments finis est de rapprocher adéquatement la géométrie issue de la modélisation, de la géométrie de l'objet réel. L'étape du maillage est d'une importance capitale et la qualité de la solution du problème étudié y est étroitement liée.

Premièrement, la qualité d'une solution dépend de la forme des éléments finis utilisés pour mailler le domaine. Les meilleurs résultats de la modélisation par éléments finis sont atteints si les éléments (par exemple : tétraèdres et triangles) formant le modèle maillé sont proches de ceux qui sont équilatéraux. **Deuxièmement**, outre les formes des éléments finis, la qualité de la solution est directement affectée par le degré de discrétisation du modèle géométrique original, la « densité » du maillage d'éléments finis.

Dans les logiciels éléments finis, l'utilisateur peut contrôler ce paramètre du générateur de maillage en spécifiant une taille moyenne relative ou absolue des éléments finis se rapprochant de la géométrie du corps, ou par les paramètres qui influencent la génération du maillage. Habituellement, une division plus fine donne de meilleurs résultats en termes de précision. Néanmoins, on doit garder à l'esprit qu'en faisant usage d'un grand nombre d'éléments de très petite taille, on augmente la taille du système d'équation à résoudre, ce qui ralentit la vitesse de calcul.

2.1.4.6. Les éléments

ABAQUS fournit une large gamme d'éléments pour différentes géométries et types d'analyse. Un élément se caractérise par ce qui suit :

- ❖ Famille : Continuum, Shell, Membrane, Rigide, poutre, Truss, etc.
- ❖ Nombre de nœuds: dépend de la forme de l'élément et de son ordre d'interpolation.
- ❖ Degrés de liberté par nœud: dépend du champ de solutions de l'analyse (déplacement, rotation, température, etc.) et l'ordre de l'espace de modélisation (1D, 2D et 3D).
- ❖ Formulation: Applicable à certaines familles d'éléments
- ❖ Intégration: intégration réduite et complète

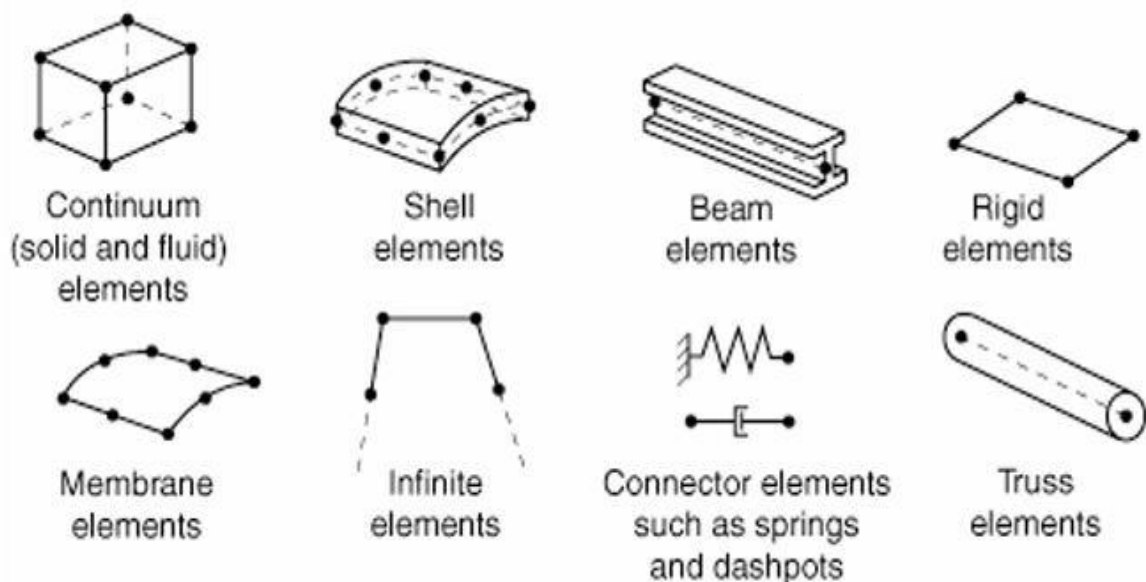


Figure 26 : Familles d'éléments

➤ **Nom**

Chaque élément comporte un nom unique dans Abaqus qui identifie les caractéristiques principales de l'élément tel que S4R qui représente Shell (coque), 4 nœuds, éléments d'intégration réduits et C3D4 qui correspond aux éléments continuum, 3D, 4 nœuds.

➤ **Sélection de l'élément**

La sélection d'éléments nécessite généralement des connaissances sur la théorie et l'application de l'analyse des éléments finis (FEA). Pour différents problèmes et types d'analyse, il existe des directives générales (règle de base) sur la sélection de l'élément.

- Tous les éléments comprennent une variété de charges élémentaires, par exemple les forces du corps (La pesanteur) et les charges de pression de surface sur les éléments solides et les éléments de coque, et les forces réparties sur une ligne pour les éléments de faisceau et de coque.
- Tous les éléments sont adaptés à une analyse géométriquement non linéaire (à l'exception du shell à petite déformation).
- Il n'y a généralement aucune restriction sur le type de matériau utilisé pour un élément.
- La plupart des éléments peuvent être utilisés pour les deux méthodes de résolutions Standard et explicite.

➤ **Éléments solides**

Les éléments solides (ou continuum) d'Abaqus peuvent être utilisés pour une analyse linéaire et pour des analyses complexes non linéaires impliquant contact, plasticité et grandes déformations. Ils sont disponibles pour le stress, le transfert de chaleur, les contraintes thermiques acoustiques, couplées, les analyses couplées de fluide pore fluide, piézoélectrique, magnétostatique, électromagnétique et couplée thermique électrique. Un utilisateur Abaqus devrait savoir que :

- Les éléments triangulaires et quadrilatéraux sont couramment utilisés pour la modélisation 2D des solides.
- Pour la modélisation 3D, les éléments tétraédriques et hexaédriques peuvent être utilisés.

- Généralement, l'utilisation d'éléments quadrilatéraux et hexaédriques est recommandée pour la modélisation des solides continus.
- L'élément solide dans Abaqus peut fournir une interpolation de premier ordre (linéaire) et de second ordre (quadratique).

Éléments quadrilatéraux et hexaédriques

Les éléments quadrilatéraux bidimensionnels comprennent CPE4R (contrainte plane), CPS4R (effort plan) et CAX4R (axisymétrique) et l'élément hexaédrique tridimensionnel comprennent C3D8R (brique tri linéaire à 8 nœuds) et C3D20R (brique quadratique à 20 nœuds). L'application de quadri décimaux et d'éléments hexadécimaux est généralement recommandée chaque fois que possible, mais ces éléments sont géométriquement moins polyvalents et difficiles à utiliser pour des géométries compliquées. Il convient de noter que par une utilisation efficace de différentes techniques de décomposition de domaine, il est possible d'utiliser ces éléments même dans des géométries complexes.

Éléments triangulaires et tétraédriques

Les éléments tétraédriques fournissent une polyvalence géométrique et la plupart des algorithmes de maillage automatique utilisent ces types d'éléments. L'utilisateur d'Abaqus devrait généralement savoir que :

- Les éléments tétraédriques de premier ordre (linéaire) (CPE3R, CPS3R, CAX3R et C3D4) sont rigides et ne doivent pas être utilisés pour l'analyse structurale (sauf si un maillage extrêmement fin est utilisé).
- Le tétraédrique et les triangles de second ordre modifiés (CPE6M, CPS6M, CAX6M et C3D10M) sont des alternatives efficaces aux types linéaires lorsque l'application nécessite l'utilisation de ces éléments (comme dans des géométries complexes). Ces éléments peuvent être utilisés avec la génération automatique de maille et sont robustes pour les grandes déformations et les problèmes de contact.
- Un bon maillage d'éléments hexaédriques (C3D8R) fournit généralement une solution de précision équivalente à moindre coût.

Éléments coque et membrane

Les éléments de coque sont développés en fonction de la théorie de la coque qui se rapproche d'un continuum 3D mince (petite épaisseur par rapport aux dimensions latérales) en utilisant une formulation 2D. Selon la relation entre les dimensions de l'épaisseur et des directions latérales, différentes théories ont été développées. L'utilisation d'éléments de coque et de membrane nécessite un bon niveau de compréhension des théories des coques et des

membranes et une sélection appropriée de ces éléments devrait être consultée avec des utilisateurs expérimentés. Abaqus offre des éléments de coque conventionnels (la géométrie 2D et l'épaisseur sont définies par la propriété de section) et les éléments de coque de continuum (géométrie 3D).

Éléments conventionnels de coque

Abaqus fournit à la fois des éléments de coque triangulaires et quadrilatéraux avec une interpolation linéaire et un choix par l'utilisateur de formulations de grandes et petites souches. Pour la plupart des applications, les éléments de coque à grande déformation (S4R, S3R et SAX1) sont appropriés avec ces considérations :

- S4R : Un élément quadrilatéral robuste pour les applications générales ;
- S3R : Un élément triangulaire qui peut subir un blocage du cisaillement. L'application de ces éléments n'est pas recommandée pour les surfaces courbes.

Les éléments de coque à faible déformation (S4RS, S4RSW, S3RS) sont plus efficaces pour les problèmes qui impliquent des souches de petites membranes avec de grandes rotations arbitraires, sous réserve des considérations suivantes :

- S4RS: Un élément de coque quadrilatéral efficace qui fonctionne mal lorsqu'il est déformé (équations dans les problèmes de torsion) ;
- S4RSW: élément de carré quadrilatéral moins efficace qui peut expliquer les configurations déformées ;
- S3RS: Un élément de coque triangulaire avec des propriétés similaires à S4RS.

Éléments de coque solide

Ces éléments permettent de capturer des déformations par épaisseur. Pour les problèmes impliquant la modélisation des contacts, ces éléments sont plus précis car ils peuvent représenter les changements de contact et d'épaisseur à deux faces. L'utilisation de ces éléments est également recommandée pour les structures en stratifiées composites car elles captent la réponse par épaisseur. Ces éléments ont des géométries en forme de coin (SC6R) et hexaédrique (SC8R). Le choix de la direction de l'épaisseur pour les éléments de coque hexaédriques peut être ambigu, car l'une des six faces peut être la face inférieure. Par défaut, Abaqus utilise la convention de connectivité nodale standard pour définir le sens de l'épaisseur, mais la direction par défaut peut être spécifiée à l'aide du paramètre "direction de la pile" sur la définition de la section de la coque. Dans notre étude, le type d'élément utilisé

est l'élément SC8R, pour sa simplicité et sa conformité en terme, de forme avec les éléments utilisés pour la modélisation du sol.

Éléments membranaires

Les éléments membranaires sont généralement utilisés pour représenter des surfaces minces dans un espace qui ont une résistance en plan et aucune rigidité de flexion hors plan. Abaqus offre différents éléments de membrane (M3D4R, M3D4, M3D3) avec les propriétés suivantes :

- M3D4R : éléments quadrilatéraux à intégration réduite avec contrôle du sablier ;
- M3D4 : éléments quadrilatéraux d'intégration complète sans sablage ;
- M3D3: éléments triangulaires d'intégration réduits.

Des éléments de membrane plus avancés de 6, 8 et 9 nœuds sont également disponibles dans Abaqus. Les éléments de membrane peuvent modéliser les couches de cisaillement pour le sol de Pasternak. Mais ces éléments n'ont pas été utilisés, par fautes de temps.

Organismes / éléments rigides

Un corps rigide est une collection de points que leur mouvement est régi par le mouvement d'un seul point de référence. Cela signifie qu'une partie du corps qui ne peut se déformer peut-être considérée comme un corps rigide. Les corps rigides sont très couramment utilisés dans l'analyse des éléments finis car ils sont très efficaces en calcul (ne nécessitent que 6 degrés de liberté). Abaqus permet la définition de corps rigides analytiques et d'éléments rigides. Les corps rigides analytiques sont plus couramment utilisés en raison de leurs nombreux avantages, y compris le potentiel de réduction de bruit dans la solution, l'efficacité informatique et la facilité de définition.

Les corps rigides analytiques ont des inconvénients, par exemple, ils ne peuvent pas être utilisés pour définir une géométrie rigide en 3D générale. Trois types de surfaces analytiques rigides sont disponibles dans Abaqus (Segments, Cylindres et Révolution).

Éléments à usages spéciaux

Abaqus a également un certain nombre d'éléments à usages spéciaux. Une liste non exhaustive de ces éléments est :

- Les éléments d'inertie et de rotation de masse : utilisés pour définir les propriétés d'inertie à différents points.
- Masse non structurelle : utilisée pour les caractéristiques du modèle qui ne contribuent qu'aux matrices de masse et sans rigidité.
- Eléments de surface : éléments polyvalents qui modélisent les surfaces dans l'espace.

- Eléments du connecteur : utilisé pour modéliser les connexions entre les régions du modèle.

2.2. Hypothèses générales de modélisation

La modélisation numérique réalisée dans cette étude repose sur un ensemble d'hypothèses visant à simplifier le problème tout en conservant une représentation réaliste du comportement mécanique de la chaussée. Ces hypothèses sont nécessaires afin de rendre le calcul numériquement stable et compatible avec les objectifs de l'analyse paramétrique.

2.2.1. Hypothèse de continuité et d'homogénéité

La couche de roulement en béton bitumineux à module élevé, modifiée ou non par des plastiques recyclés, est considérée comme un milieu continu et homogène à l'échelle de la modélisation. Les plastiques recyclés sous forme de granulés renforcés de fibres sont supposés être uniformément dispersés dans le mélange bitumineux. Leur effet sur le comportement mécanique global est pris en compte à travers des propriétés mécaniques équivalentes obtenues par un modèle d'homogénéisation.

Cette hypothèse permet de ne pas modéliser explicitement les hétérogénéités microscopiques du matériau, ce qui serait coûteux en temps de calcul, tout en conservant une représentation macroscopique cohérente du matériau.

2.2.2. Hypothèse de comportement élastique linéaire isotrope

Dans cette étude, la couche de roulement est assimilée à un milieu continu homogène présentant un comportement élastique linéaire isotrope. Cette hypothèse, couramment adoptée en génie routier, permet de décrire le comportement mécanique global du béton bitumineux à l'échelle macroscopique.

Le comportement élastique linéaire suppose une relation proportionnelle entre contraintes et déformations dans le domaine des petites déformations, conformément à la loi de Hooke. Le matériau est alors entièrement caractérisé par deux paramètres mécaniques indépendants : le module d'Young équivalent et le coefficient de Poisson.

L'hypothèse d'isotropie implique que les propriétés mécaniques sont identiques dans toutes les directions. Bien que le béton bitumineux modifié par plastiques recyclés soit hétérogène à l'échelle microscopique, cette approximation est jugée acceptable à l'échelle de la chaussée en raison de la répartition quasi aléatoire des constituants.

Cette hypothèse permet de simplifier la modélisation numérique tout en conservant une représentation pertinente de l'influence du taux de plastiques recyclés sur la rigidité globale

de la couche de roulement. Les effets viscoélastiques et dépendants du temps ne sont pas pris en compte à ce stade et feront l'objet d'analyses complémentaires.

2.2.3. Absence d'endommagement et de fissuration

La modélisation ne prend pas en compte les phénomènes d'endommagement progressif, de fissuration ou de rupture du matériau. La couche de roulement est supposée conserver ses propriétés mécaniques tout au long du chargement appliqué.

Cette hypothèse est acceptable dans le cadre d'une étude comparative visant à analyser l'influence relative des proportions de plastiques recyclés sur le comportement mécanique global de la chaussée, et non à prédire la durée de vie ou la rupture du matériau.

2.2.4. Conditions quasi statiques du chargement

Le chargement routier est considéré comme quasi statique. Les effets dynamiques liés au passage rapide des véhicules, tels que l'inertie ou les vibrations, sont négligés. Cette hypothèse est couramment adoptée dans les études numériques de chaussées lorsque l'objectif principal est l'analyse des contraintes et déformations induites par les charges de trafic.

Elle permet de simplifier le calcul tout en fournissant des résultats pertinents pour l'évaluation du comportement mécanique de la structure.

2.3. Modélisation des matériaux

2.3.1. Paramètres mécaniques retenus

Pour la simulation numérique de l'enrobé modifié, il est nécessaire de définir les valeurs représentatives des propriétés mécaniques et physiques de chaque constituant. Les valeurs ci-dessous ont été supposées sur la base de la littérature et de pratiques expérimentales courantes pour les granulats, le bitume 50/70 et le plastique ; et serviront de référence pour le calcul des propriétés équivalentes du mélange.

Le tableau ci-après présente les proportions des constituants des mélanges conduisant aux bétons bitumineux de référence.

Tableau 4: Proportions des constituants des mélanges

Constituant	Masse (g)	Fraction massique (%)
Granulats	1140	95
Bitume 50/70	60	5
Plastique	0	0
Total	1200	100

Le tableau ci-après présente les valeurs supposées des propriétés des constituants des mélanges conduisant aux bétons bitumineux de référence.

Tableau 5: Propriétés des constituants des mélanges

Constituant	Masse volumique $10^{-9}(\text{t/mm}^3)$	Module de Young E (MPa)	Coefficient de poisson du mélange
Granulats	2650	10 000	0.20
Bitume	1030	50	0.49
Plastique	950	2000	0.35

Ces paramètres constituent la base de comparaison pour l'analyse de l'influence des plastiques recyclés.

2.3.2. Présentation des modèles d'homogénéisation existants

L'homogénéisation vise à déterminer les propriétés mécaniques équivalentes d'un matériau composite à partir des propriétés de ses constituants et de leurs proportions. Plusieurs modèles sont disponibles dans la littérature, variant par leur niveau de complexité et leurs hypothèses physiques. Les principaux modèles utilisés en génie civil et *en mécanique des matériaux* sont *présentés ci-après*.

2.3.2.1. Modèle de Voigt (hypothèse d'iso-déformation)

Le modèle de Voigt repose sur l'hypothèse que toutes les phases du matériau composite subissent la même déformation lorsqu'un chargement est appliqué. Autrement dit, la déformation est uniforme dans l'ensemble du matériau.

Cette hypothèse correspond à un arrangement des phases en parallèle par rapport à la direction du chargement.

Le module d'Young équivalent selon Voigt est donné par une moyenne arithmétique pondérée :

$$E_{Voigt} = \sum_{i=1}^n V_i E_i \quad (\text{Équation 13})$$

où :

- E_i est le module d'Young de la phase (i),
- V_i est la fraction volumique correspondante.

Dans le cas d'un matériau biphasé (BB + plastiques) :

$$E_{Voigt} = V_{BB} E_{BB} + V_{Pl} E_{Pl} \quad (\text{Équation 14})$$

2.3.2.2. Modèle de Reuss (hypothèse d'iso-contrainte)

Le modèle de Reuss repose sur l'hypothèse que toutes les phases du matériau sont soumises à la même contrainte, tandis que les déformations peuvent varier d'une phase à l'autre.

Cette hypothèse correspond à un arrangement des phases en série par rapport à la direction du chargement.

Le module d'Young équivalent selon Reuss est défini par une moyenne harmonique pondérée :

$$\frac{1}{E_{Reuss}} = \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{E_i} \quad (\text{Équation 15})$$

Dans le cas d'un matériau biphasé :

$$\frac{1}{E_{Reuss}} = \frac{V_{BB}}{E_{BB}} + \frac{V_{PI}}{E_{PI}} \quad (\text{Équation 16})$$

2.3.2.3. Modèle de Mori–Tanaka (approche micromécanique)

Le modèle de Mori–Tanaka est un modèle micromécanique basé sur la théorie des inclusions. Il considère une matrice continue dans laquelle sont dispersées des inclusions (plastiques recyclés), supposées ellipsoïdales et faiblement interactives.

Le champ de déformation dans les inclusions est estimé à partir du champ moyen dans la matrice, en tenant compte de l'effet des inclusions sur le champ global.

Dans le cas d'un composite isotrope à inclusions sphériques, le module d'Young équivalent peut s'exprimer sous la forme générale :

$$E_{MT} = E_m + \frac{V_i(E_i - E_m)}{1 + (1 - V_i)\alpha} \quad (\text{Équation 17})$$

où :

- E_m est le module de la matrice (BB),
- E_i est le module des inclusions (plastiques),
- V_i est la fraction volumique des inclusions,
- α est un coefficient dépendant des propriétés élastiques de la matrice et de la forme des inclusions.

Remarque : l'expression exacte dépend du module de cisaillement, du coefficient de Poisson et du tenseur d'Eshelby.

2.3.2.4. Modèle de Hirsch

Le modèle de Hirsch est un modèle semi-empirique largement utilisé dans le domaine des enrobés bitumineux. Il combine les hypothèses de Voigt et de Reuss à travers un paramètre de pondération, permettant d'obtenir une estimation réaliste du module d'Young équivalent.

Ce modèle est reconnu pour sa simplicité, sa robustesse et sa bonne adéquation avec les résultats expérimentaux sur les mélanges bitumineux.

Le module d'Young équivalent E_{eq} est exprimé comme :

$$E_{eq} = P \times E_{Voigt} + (1 - P)E_{Reuss} \quad (\text{Équation 18})$$

où :

- P est un paramètre empirique compris entre 0 et 1 ;
- E_{Voigt} représente la borne supérieure ;
- E_{Reuss} représente la borne inférieure.

Dans la littérature sur les enrobés bitumineux, la valeur de (P) est généralement comprise entre 0,6 et 0,8.

Les enrobés bitumineux constituent des matériaux composites hétérogènes, dont le comportement mécanique global résulte de l'interaction entre les granulats, le liant bitumineux et, dans le cadre de cette étude, les granulés plastiques recyclés. La modélisation numérique de tels matériaux nécessite une simplification permettant leur représentation sous la forme d'un milieu homogène équivalent, compatible avec les outils de calcul par éléments finis.

Parmi les différents modèles d'homogénéisation disponibles dans la littérature (Voigt, Reuss, Mori-Tanaka, Hirsch), certains requièrent une description fine de la microstructure ou une calibration expérimentale avancée, difficilement accessible dans le cadre de ce travail. Dans un objectif d'analyse paramétrique et comparative de l'influence du taux de plastiques recyclés sur les performances mécaniques de l'enrobé, une approche fondée sur la **loi des mélanges volumiques** a donc été retenue.

Cette méthode permet de déterminer les propriétés mécaniques équivalentes représentatives du comportement global du mélange, tout en garantissant la robustesse, la traçabilité et la compatibilité des paramètres d'entrée avec un modèle élastique isotrope implémenté sous Abaqus.

2.3.2.5. Loi des mélanges volumiques

La loi des mélanges volumiques ou règle des mélanges pondérés par volume est une méthode d'homogénéisation simple et robuste utilisée pour estimer les propriétés mécaniques d'un matériau composite à partir des propriétés de ses constituants et de leur fraction volumique.

Elle permet de déterminer des grandeurs équivalentes telles que :

- **La densité apparente équivalente**

$$\rho_{eq} = \sum(V_i \times \rho_i) \quad (\text{Équation 19})$$
$$V_i = \frac{v_i}{v_{total}} \quad \text{et} \quad v_i = \frac{m_i}{\rho_i}$$

Avec :

V_i : fraction volumique

v_i : volume réel du constituant i ,

v_{total} : volume total du mélange.

m_i : masse du constituant (g),

ρ_i : la densité du constituant i

- **Le module de Young équivalent**

$$E_{eq} = \sum(V_i \times E_i) \quad (\text{Équation 20})$$

Avec :

E_i : le module de Young du constituant i

2.3.3. Calcul des propriétés mécaniques équivalentes

Dans cette étude, l'influence des plastiques recyclés est prise en compte à travers une variation de la densité apparente et du module d'Young équivalent de l'enrobé, calculé par homogénéisation. Afin de rester dans un cadre physiquement réaliste et compatible avec les hypothèses de comportement élastique linéaire, la variation des propriétés est volontairement limitée à 20 % par rapport à l'enrobé de référence.

Cette limite est justifiée par plusieurs considérations :

- les études expérimentales sur les enrobés modifiés par polymères ou plastiques recyclés montrent généralement une augmentation modérée de la rigidité, rarement supérieure à 20% pour des taux raisonnables d'incorporation ;

Mémoire de fin de formation pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de conception grade master

- une variation excessive du module pourrait traduire un changement de comportement mécanique non linéaire, non pris en compte dans le modèle retenu ;
- l'objectif de l'étude est une analyse comparative et paramétrique, et non la prédiction exacte d'un comportement expérimental spécifique ;
- une variation limitée garantit la stabilité numérique des calculs sous Abaqus.

Ainsi, le module d'Young équivalent est évalué pour différents taux de plastiques recyclés, en veillant à ce que l'augmentation globale reste inférieure ou égale à 20% par rapport au matériau de référence.

Les propriétés équivalentes associées aux différents taux de plastiques recyclés sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 6: Propriétés équivalentes associées aux différents taux de plastiques

Taux de plastique (%)	Taux bitume (%)	Taux granulat (%)	ρ_{eq} $10^{-9}(t/mm^3)$	E_{eq} (MPa)	ν_{eq}
0	5	95	2456,79568	8813,34383	0,35
2	5	93	2377,896687	8450,96495	
4	5	91	2303,907631	8111,13715	
6	5	89	2234,384021	7791,8189	
8	5	87	2168,933444	7491,20787	
10	5	85	2107,208159	7207,70692	
12	5	83	2048,898915	6939,89566	
14	5	81	1993,729769	6686,5067	
16	5	79	1941,453718	6446,40557	
18	5	77	1891,849004	6218,57376	
20	5	75	1844,715968	6002,09423	

2.4.Cas de modélisation de l'éprouvette Marshall

2.4.1. Géométrie de l'éprouvette et des mâchoires Marshall

L'éprouvette Marshall est modélisée sous la forme d'un cylindre plein, conformément aux prescriptions normatives de l'essai Marshall. Les dimensions géométriques retenues sont un diamètre de 101,6 mm et une hauteur de 63,5 mm, correspondant aux éprouvettes compactées en laboratoire. La géométrie est créée dans ABAQUS/CAE comme une pièce tridimensionnelle déformable obtenue par extrusion.

Les mâchoires de l'essai Marshall sont modélisées par des surfaces rigides analytiques, hypothèse justifiée par la rigidité très élevée de ces éléments par rapport à celle de l'enrobé bitumineux. Cette simplification permet de réduire le coût numérique tout en reproduisant fidèlement les conditions de chargement de l'essai réel.

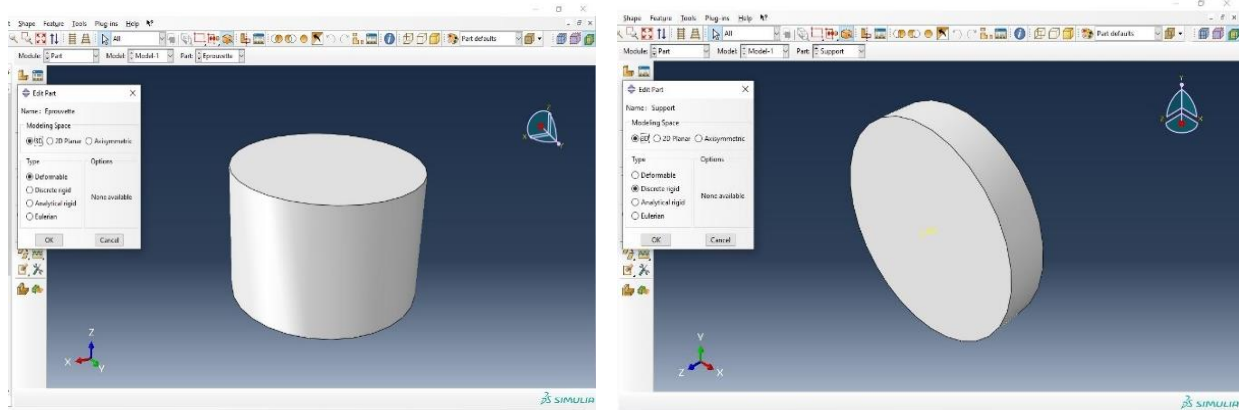


Figure 27: Géométrie tridimensionnelle de l'échantillon Marshall modélisé sous Abaqus

2.4.2. Propriétés des matériaux

Tous les matériaux sont supposés homogènes et isotropes. Les caractéristiques des matériaux sont définies selon le **Tableau** dans le module « **Property** » dans ABAQUS.

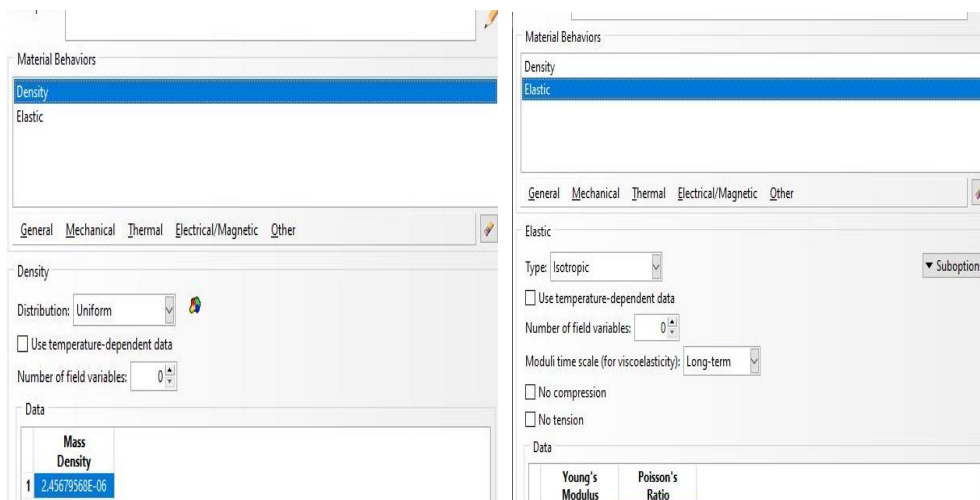


Figure 28: Paramétrage des propriétés élastiques du matériau dans Abaqus

2.4.3. Création et affectation de la section

Une section homogène solide est définie et associée au matériau représentant l'enrobé homogénéisé. Cette section est ensuite affectée à l'ensemble du volume de l'éprouvette afin de garantir une répartition uniforme des propriétés mécaniques dans le modèle numérique.

2.4.4. Assemblage du modèle

L'éprouvette est introduite dans le module « **Assembly** » sous la forme d'une instance dépendante, ce choix permettant une gestion cohérente du maillage et des interactions dans le cadre d'une analyse statique.

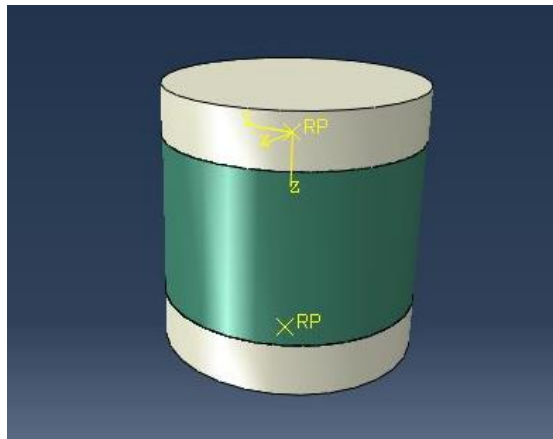


Figure 29: Assemblage numérique de l'essai Marshall dans Abaqus

2.4.5. Définition des interactions de contact

Une interaction de contact surface-à-surface est définie entre l'éprouvette et les mâchoires. Le comportement normal est modélisé par un contact dur (hard contact), tandis que le comportement tangentiel est supposé sans frottement. Cette hypothèse permet de se concentrer sur la réponse mécanique intrinsèque de l'enrobé sans introduire d'effets parasites liés au frottement.

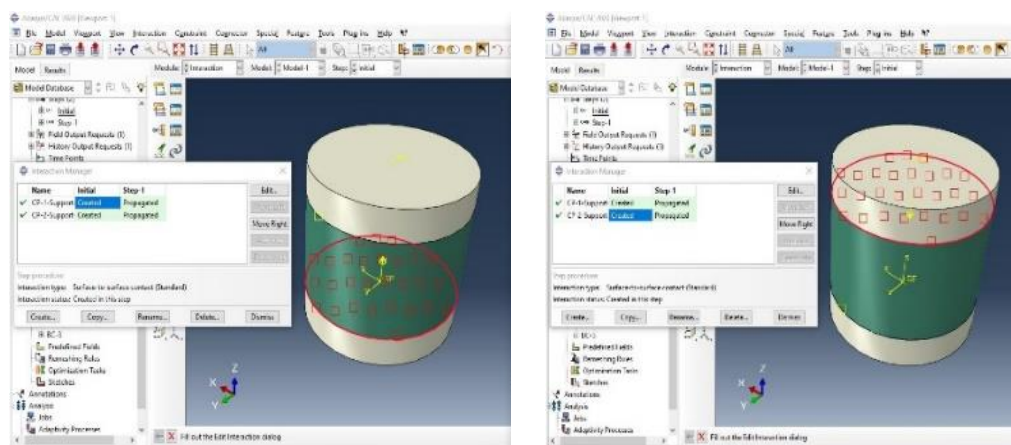


Figure 30: Définition des interactions de contact

2.4.6. Conditions aux limites

- ❖ Appui inférieur : La mâchoire inférieure est considérée comme un appui fixe, avec un blocage complet des déplacements suivant les trois directions de l'espace ($U_x = U_y = U_z = 0$). Cette condition reproduit fidèlement l'appui rigide de l'essai Marshall expérimental.
- ❖ Chargement supérieur : Le chargement est appliqué à travers la mâchoire supérieure sous la forme d'un déplacement vertical imposé. Un déplacement maximal de 5 mm est appliqué suivant l'axe vertical négatif, permettant d'assurer une bonne convergence numérique et une exploitation directe de la courbe force-déplacement.

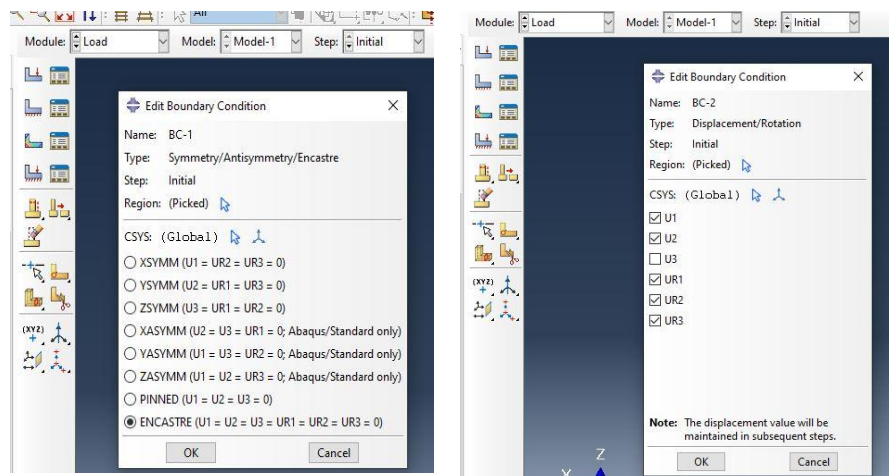


Figure 31: Conditions aux limites appliquées à l'éprouvette Marshall

2.4.7. Maillage du modèle

L'éprouvette est discrétisée à l'aide d'éléments solides tridimensionnels de type C3D8R (éléments hexaédriques à intégration réduite). Une taille moyenne d'élément comprise entre 3 et 5 mm est retenue, avec un raffinement local au voisinage des zones de contact, afin d'assurer un compromis satisfaisant entre précision des résultats et temps de calcul.

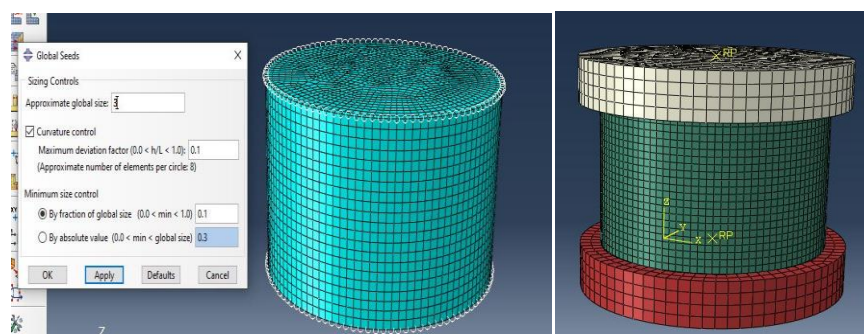


Figure 32: Maillage par éléments finis de l'éprouvette Marshall

2.4.8. Paramètres de sortie et exploitation des résultats

Les sorties de calcul demandées comprennent les forces de réaction, les déplacements, les champs de contraintes équivalentes de von Mises et les déformations. La stabilité Marshall numérique est déterminée à partir de la force maximale enregistrée lors du chargement, tandis que la déformation Marshall correspond au déplacement associé à cette force maximale.

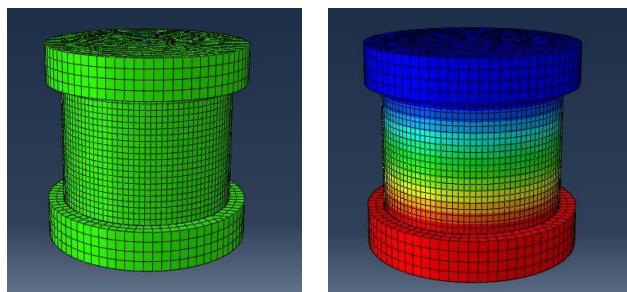


Figure 33: Champ de déplacements verticaux (U3) de l'éprouvette Marshall

Après les simulations des différentes proportions, les résultats de réaction et de déplacement se présentent comme suit :

Tableau 7: Récapitulatif des résultats de simulation

Taux	Niveau de champ	Déplacement (mm)	Force de réaction (kN)
0,00%	1	0	20,92
	2	-1,573	17,43
	3	-3,147	13,94
	4	-4,72	10,46
	5	-6,293	6,972
	6	-7,867	3,486
2,00%	1	0	21,25
	2	-1,667	17,71
	3	-3,333	14,16
	4	-5	10,62
	5	-6,667	7,082
	6	-8,333	3,541
4,00%	1	0	21,41
	2	-1,75	17,84
	3	-3,5	14,27
	4	-5,25	10,71
	5	-7	7,137
	6	-8,75	3,569

**Mémoire de fin de formation pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de conception
grade master**

6,00%	1	0	21,53
	2	-1,832	17,94
	3	-3,663	14,35
	4	-5,495	10,76
	5	-7,327	7,176
	6	-9,158	3,588
8,00%	1	0	21,66
	2	-1,917	18,05
	3	3,833	14,44
	4	-5,75	10,83
	5	-7,667	7,22
	6	-9,583	3,61
10,00%	1	0	21,93
	2	-2,017	18,27
	3	-4,033	14,62
	4	-6,05	10,96
	5	-8,067	7,309
	6	-10,08	3,654
12,00%	1	0	22,07
	2	-2,108	18,39
	3	-4,217	14,72
	4	-6,325	11,04
	5	-8,4323	7,357
	6	-10,54	3,678
14,00%	1	0	22,36
	2	-2,217	18,63
	3	-4,433	14,91
	4	-0,0665	11,18
	5	-8,867	7,454
	6	-11,08	3,727
16,00%	1	0	22,6
	2	-2,324	18,84
	3	-4,648	15,07
	4	-6,972	11,3
	5	-9,297	7,535
	6	-11,62	3,767

18,00%	1	0	22,83
	2	-2,433	19,02
	3	-4,867	15,22
	4	-7,3	11,41
	5	-9,733	7,61
	6	-12,17	3,805
20,00%	1	0	23,17
	2	-2,558	19,31
	3	-5,117	15,45
	4	-7,675	11,58
	5	-10,23	7,722
	6	-12,79	3,861

2.5.Choix de la plage optimale

La détermination de la plage optimale d'incorporation des granulés plastiques dans le béton bitumineux repose sur une analyse multicritère des performances du matériau, considérant la stabilité Marshall et la densité apparente. La stabilité Marshall reflète la résistance mécanique du mélange sous chargement, tandis que la densité apparente traduit la compacité et la durabilité potentielle du matériau. Les simulations numériques réalisées sous Abaqus montrent qu'une augmentation progressive de la teneur en granulés plastiques améliore la stabilité Marshall, traduisant un renforcement mécanique du mélange. Cette amélioration devient toutefois moins marquée au-delà d'une teneur d'environ 10 %, indiquant une zone de rendement mécanique décroissant.

Simultanément, la densité apparente décroît quasi linéairement avec l'augmentation du taux de granulés plastiques. Cette diminution, liée à la faible densité du plastique et à la modification du squelette granulaire, reste modérée jusqu'à environ 12 %, au-delà de laquelle la perte de compacité pourrait compromettre la durabilité du matériau.

L'analyse croisée de ces deux paramètres identifie une plage optimale d'incorporation comprise entre 10 % et 12 %, assurant une amélioration notable de la stabilité Marshall tout en maintenant une densité apparente compatible avec une bonne compacité. Cette plage correspond à un compromis optimal entre performance mécanique et stabilité volumique, conforme aux principes de conception des enrobés bitumineux visant la durabilité des chaussées plutôt que la maximisation isolée d'un paramètre.

2.6.Présentation générale de l'ouvrage à modéliser

2.6.1. Modélisation de la structure de chaussée multicouche sous Abaqus

Il s'agit d'une chaussée semi-rigide en grave de ciment, tirée du guide de dimensionnement LCPC (exemple de calcul des chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques P. 174).

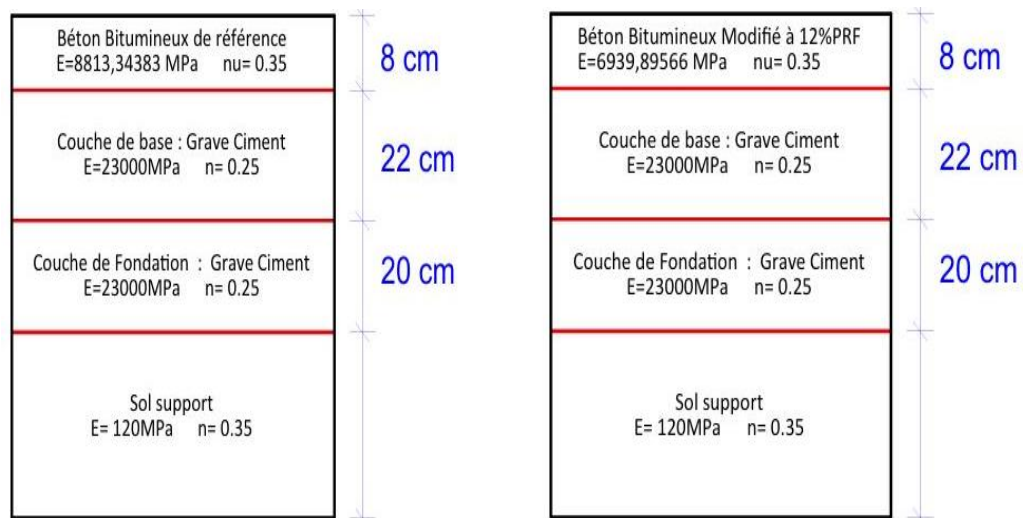


Figure 34 : Chaussée type à modéliser

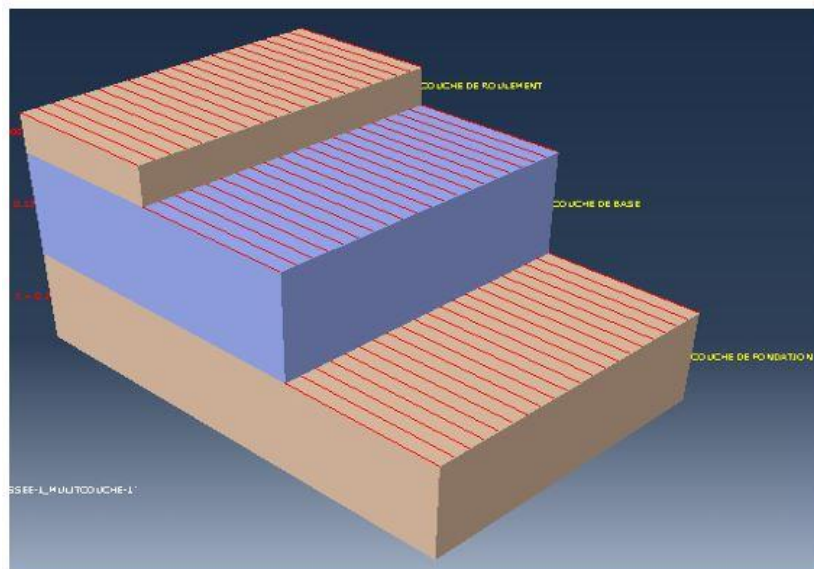


Figure 35 : Différentes couches de chaussée [27]

Les dimensions considérées pour la modélisation de la chaussée sont 5m sur 3,5m. Une pression uniforme de 66200Pa est appliquée sur une surface 0,0489 m² au centre de la plaque. Ce chargement est celui d'une roue d'un essieu standard français. Dans un premier temps, le chargement est statique pour chaque cas et dans un second temps le chargement sera dynamique (harmonique) pour chaque cas.

2.6.2. Modélisation statique

Nous avons conduit les modélisations statiques pour deux cas de chaussée : d'abord une chaussée dont la couche de roulement est en BB non modifié sur sol solide élastique puis une

chaussée dont la couche de roulement est en BB modifié à 12% sur sol solide élastique. Ceci dans le but d'analyser dans un premier temps la redistribution des contraintes, les déplacements verticaux et la déformation globale de la chaussée et dans un second temps de pouvoir faire des comparaisons.

Après chaque modélisation, les résultats sont divers. Nous pouvons donc aisément obtenir les déplacements ($U1$; $U2$; $U3$) correspondant respectivement (u_0 ; v_0 ; w_0) ; les déformations et autres variables. Une fois ces valeurs obtenues le problème est entièrement résolu. Dans la suite nous intéresserons plus au déplacement $U3$.

2.6.3. Modélisation de Plaques multicouches sur le sol élastique

La modélisation faite dans cette partie a consisté à superposer trois plaques représentant chacune des couches de chaussée et à supposer les interfaces entre les plaques collées. Et cet empilement de plaques est posé sur un sol solide élastique maillé avec les éléments C3D8R à travers le module interaction dans ABAQUS.

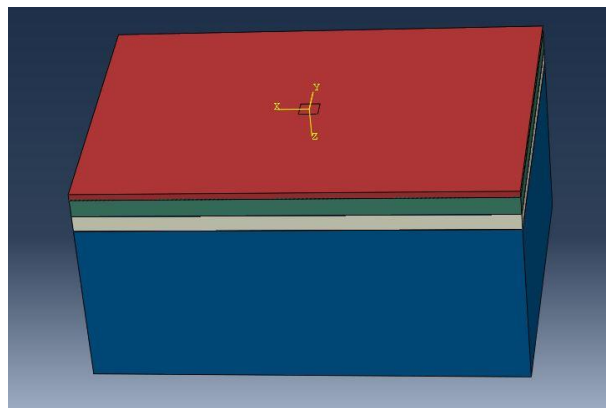


Figure 36 : Présentation de la plaque multicouche sur sol élastique

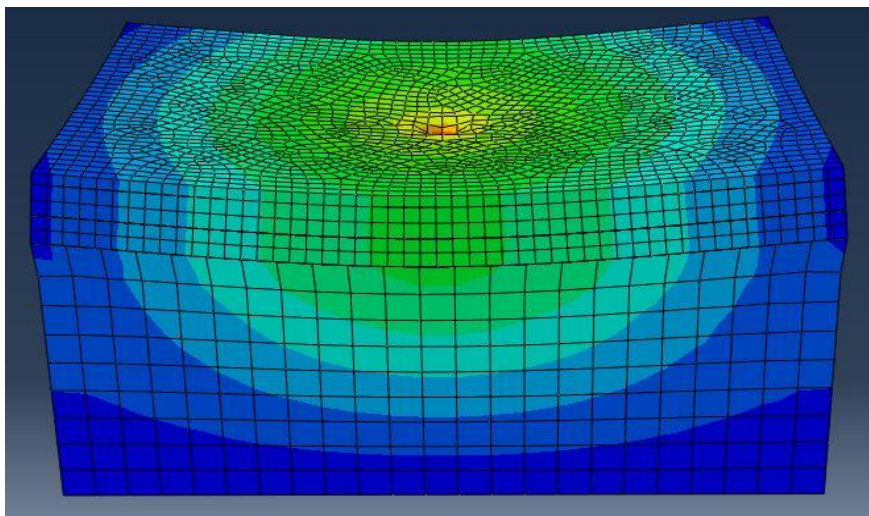


Figure 37 : Présentation de la plaque maillée et déformée sur le sol solide : charge statique centrée

Ce chapitre a permis de définir la méthodologie adoptée pour évaluer l'influence des granulés plastiques composites sur les performances mécaniques des enrobés bitumineux et sur le comportement structurel d'une chaussée multicouche. L'approche repose sur la simulation numérique de l'essai Marshall et sur la modélisation par éléments finis sous Abaqus, en considérant un comportement élastique linéaire isotrope des matériaux et un chargement statique représentatif du trafic routier.

Cette démarche a permis d'établir un cadre rigoureux reliant les propriétés mécaniques des enrobés modifiés aux réponses structurelles de la chaussée, notamment en termes de déplacements et de rigidité.

Les résultats issus de cette méthodologie sont présentés et analysés dans le chapitre suivant, afin d'évaluer l'apport réel des plastiques composites dans l'amélioration du comportement mécanique et des performances structurelles des chaussées.

CHAPITE III : Résultats et discussions

3.1. Résultats de la simulation Marshall

3.1.1. Effets de la teneur en granulés plastiques sur la densité apparente

Les résultats relatifs à l'évolution de la densité apparente du béton bitumineux en fonction de la teneur en granulés plastiques sont présentés sur la *figure 38*.

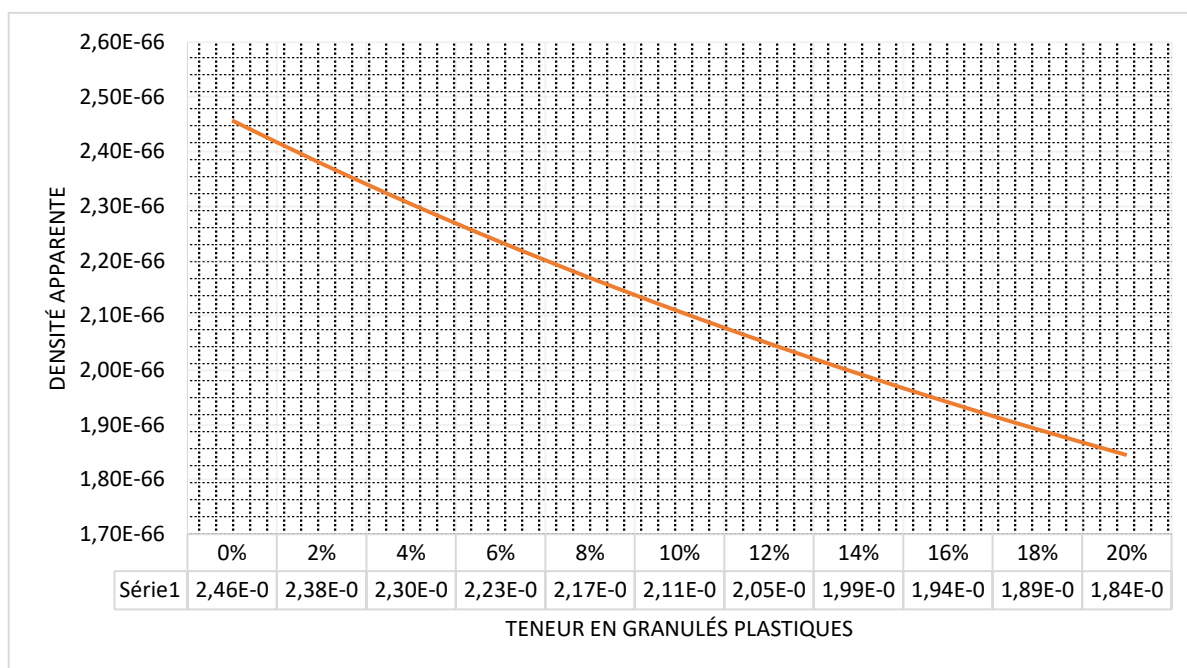


Figure 38: Evolution de la densité apparente du béton bitumineux en fonction de la teneur en granulés plastiques

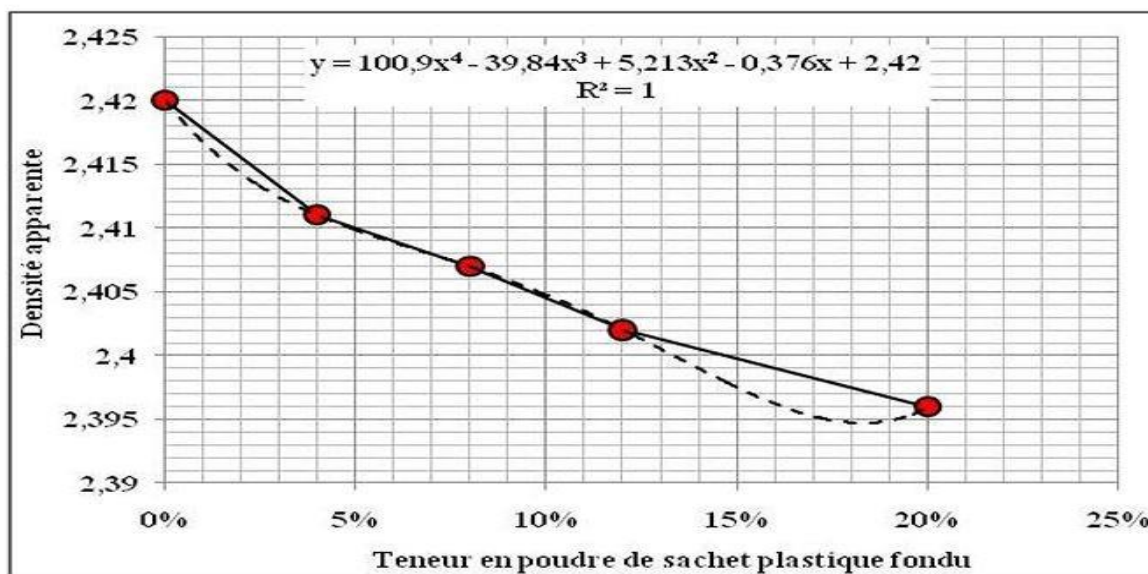


Figure 39 : Evolution de la densité apparente du béton bitumineux en fonction de la teneur en sachets plastiques

Les résultats présentés aux *figures 38 et 39* mettent en évidence l'évolution de la densité apparente des enrobés bitumineux en fonction du taux d'incorporation des granulés plastiques.

La *figure 38*, issue de la présente étude, montre une diminution progressive de la densité apparente avec l'augmentation de la teneur en plastiques, passant d'environ 2,45 g/cm³ pour l'enrobé non modifié à près de 1,80 g/cm³ pour un taux d'incorporation de 20 %. Cette réduction s'explique principalement par la faible densité intrinsèque des matériaux plastiques, notamment le polypropylène et le polyéthylène, comparativement aux granulats minéraux traditionnels. L'incorporation des plastiques entraîne ainsi une substitution partielle des granulats à forte densité, ce qui réduit la masse volumique globale du mélange.

La *figure 39*, issue d'une étude de référence portant sur l'incorporation de sachets plastiques fondus dans le béton bitumineux, présente une tendance similaire caractérisée par une diminution progressive de la densité avec l'augmentation du taux de plastique. Toutefois, cette diminution reste plus modérée, la densité passant de 2,42 g/cm³ à environ 2,39 g/cm³ pour un taux de 20 %. Cette différence peut être attribuée au mode d'incorporation des plastiques. Dans le cas des sachets fondus, le plastique agit davantage comme un liant modificateur du bitume, ce qui limite l'impact sur la structure granulaire globale et maintient une compacité plus élevée.

La concordance entre les tendances observées dans les deux études confirme que la diminution de la densité constitue un comportement intrinsèque des enrobés modifiés par des plastiques, indépendamment du procédé d'incorporation. Cette réduction de la densité présente un avantage structurel potentiel, notamment en réduisant les charges transmises aux couches inférieures et au sol support, contribuant ainsi à améliorer la durabilité globale de la structure routière.

3.1.2. Effets de la teneur en granulés plastiques sur la stabilité du béton bitumineux

La *figure 40* présente l'évolution de la stabilité Marshall du béton bitumineux en fonction de la teneur en granulés plastiques incorporés dans le mélange.

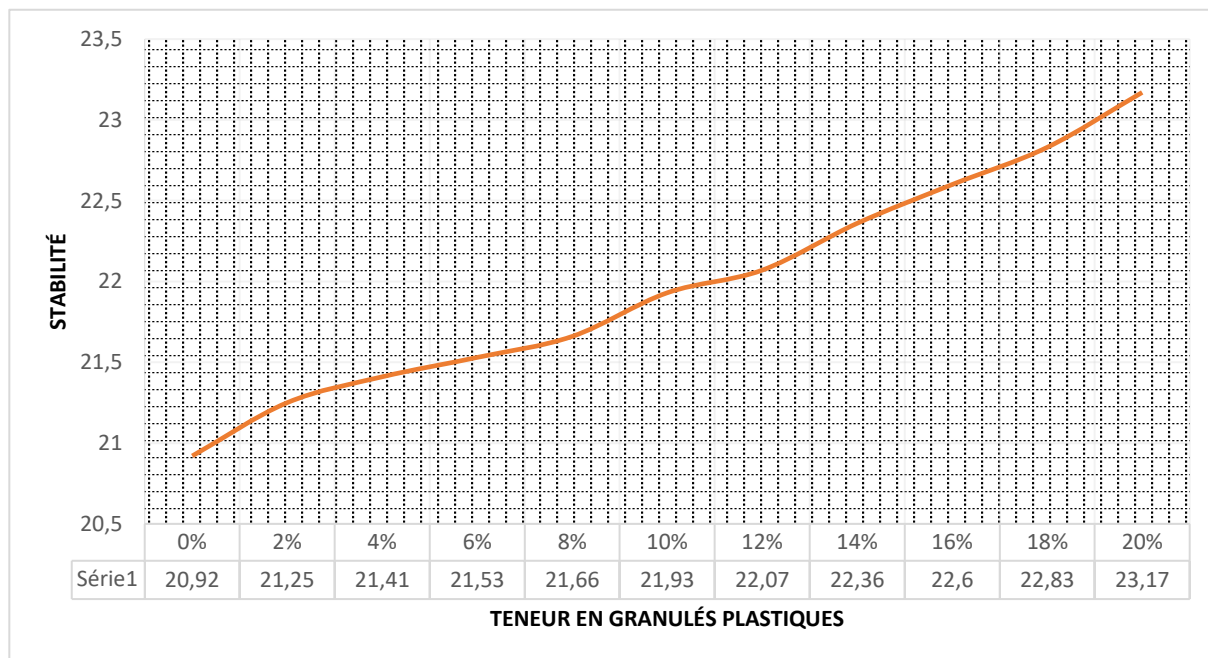


Figure 40: Evolution de la stabilité Marshall du béton bitumineux en fonction de la teneur en granulés plastiques

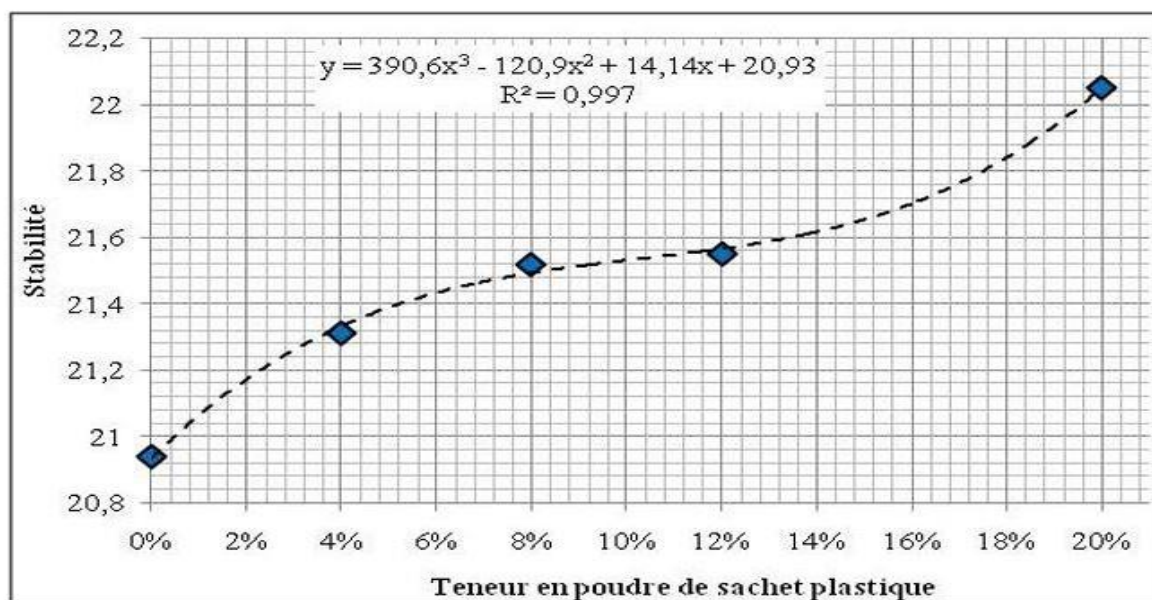


Figure 41 : Evolution de la stabilité Marshall du béton bitumineux en fonction de la teneur en sachets plastiques

L'analyse comparative des *figures 40 et 41* met en évidence une amélioration significative de la stabilité Marshall avec l'augmentation du taux d'incorporation des plastiques dans les

enrobés bitumineux. Toutefois, l'intensité du renforcement mécanique diffère selon la nature des plastiques utilisés.

Dans le cas des granulés plastiques composites issus de mobiliers plastiques (*figure 40*), la stabilité Marshall augmente de manière plus marquée, passant de 21,0 kN pour l'enrobé non modifié à environ 23,9 kN pour un taux d'incorporation de 20 %, soit une augmentation relative d'environ 13,8 %. Cette évolution suit une tendance polynomiale avec un coefficient de corrélation élevé, traduisant une amélioration progressive et structurée de la résistance mécanique du matériau.

En comparaison, l'étude utilisant des sachets plastiques fondus (*figure 41*) montre également une augmentation de la stabilité, mais avec une amplitude plus faible, atteignant environ 22,1 kN à 20 %, soit une augmentation relative inférieure à 6 %. Cette différence significative confirme que les granulés plastiques composites apportent un renforcement mécanique nettement supérieur.

Ces résultats démontrent clairement que les plastiques composites issus de mobiliers constituent un renforcement structurel plus efficace que les sachets plastiques fondus, en raison de leur structure renforcée par fibres. Cette caractéristique confère aux enrobés modifiés une meilleure capacité portante et une plus grande durabilité mécanique, ce qui en fait une solution particulièrement adaptée pour l'amélioration des performances des couches de roulement des chaussées.

3.2. Résultats de la simulation de la chaussée complète

3.2.1. Déplacement vertical à la surface de la couche de roulement

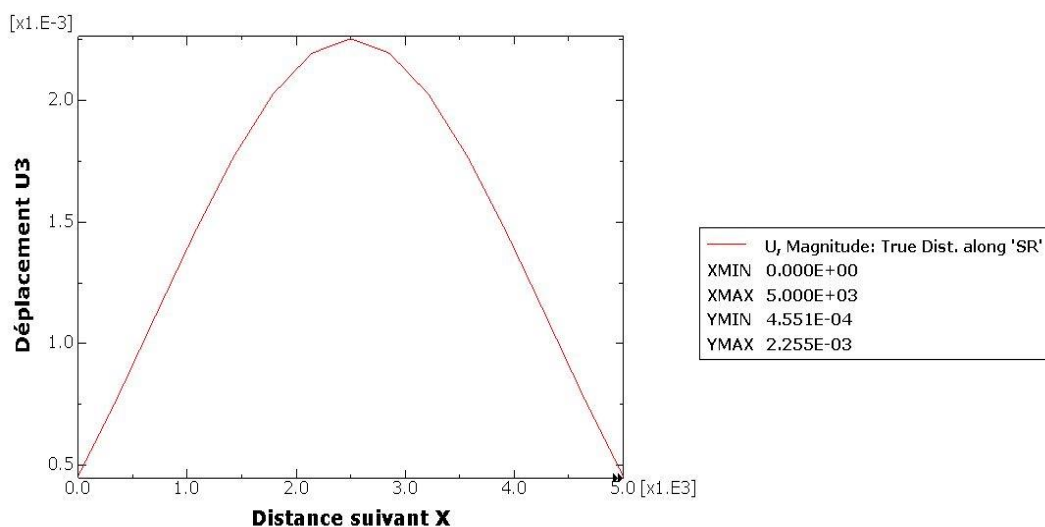


Figure 42 : Déplacement U3 de la plaque le long de l'axe X en surface de la couche de roulement conventionnelle sur un sol élastique dans le cas d'une charge statique

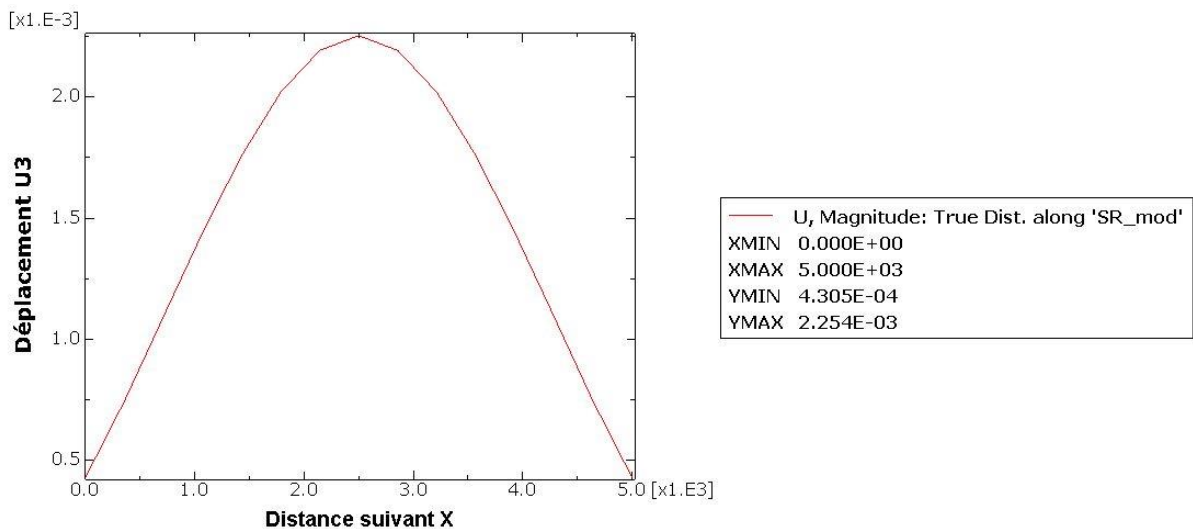


Figure 43 : Déplacement U_3 de la plaque le long de l'axe X en surface de la couche de roulement conventionnelle sur un sol élastique dans le cas d'une charge statique

Les figures 42 et 43 présentent la variation du déplacement vertical U_3 en fonction de l'abscisse X à la surface de la couche de roulement, respectivement pour la chaussée non modifiée et la chaussée modifiée par incorporation de 12 % de granulés plastiques.

Dans les deux cas, la courbe présente une forme parabolique symétrique, caractéristique du comportement d'une plaque multicouche reposant sur un sol élastique soumise à une charge uniforme centrée. Le déplacement est maximal au centre de la chaussée ($X = 2,5$ m), correspondant à la zone d'application du chargement, et diminue progressivement vers les extrémités, où les conditions aux limites limitent la déformation.

Les valeurs extraites montrent que :

- pour la chaussée non modifiée, le déplacement maximal atteint $2,25 \times 10^{-3}$ mm ;
- pour la chaussée modifiée à 12 % de plastiques, le déplacement maximal est de $2,254 \times 10^{-3}$ mm.

La différence entre ces deux valeurs est extrêmement faible, de l'ordre de 0,18 %, ce qui indique que l'incorporation de 12 % de plastiques n'entraîne pas de dégradation significative de la rigidité globale de la structure. Le comportement mécanique global reste donc conservé.

Toutefois, une légère redistribution des déplacements est observée, traduisant une modification locale des propriétés mécaniques de la couche de roulement.

3.2.2. Analyse comparative des déplacements aux différentes interfaces de la chaussée

Le tableau 8 présente les valeurs du déplacement vertical U_3 maximal et minimal aux différentes interfaces de la structure pour les deux configurations étudiées.

Tableau 8 : Déplacement U3 aux différentes interfaces de la chaussée

Type de chaussée	Surfaces	Déplacement U3 (mm)	
		Maximal (10^{-3})	Minimal (10^{-4})
Chaussée non modifiée	Surface de roulement	2.25	4.551
	Interface CR/CB	2.260	4.016
	Interface CB/CF	2.260	3.424
	Interface CF/SOL	2.257	4.230
Chaussée modifiée à 12% de plastiques	Surface de roulement	2.254	4.305
	Interface CR/CB	2.255	2.952
	Interface CB/CF	2.259	2.957
	Interface CF/SOL	2.250	2.988

Pour la chaussée conventionnelle, les déplacements maximaux sont relativement homogènes dans toute la structure. Cette homogénéité indique une transmission progressive et continue des efforts à travers les couches, caractéristique d'une structure mécaniquement cohérente. Les déplacements minimaux varient légèrement selon les interfaces, traduisant l'influence des propriétés mécaniques propres à chaque couche.

Pour la chaussée modifiée, les déplacements maximaux restent du même ordre de grandeur. Ces résultats montrent que l'incorporation des plastiques ne modifie pas significativement la déformation maximale globale de la structure.

En revanche, une réduction notable des déplacements minimaux est observée aux interfaces profondes :

- Interface CR/CB : diminution de $4,016 \times 10^{-4}$ mm à $2,952 \times 10^{-4}$ mm
- Interface CB/CF : diminution de $3,424 \times 10^{-4}$ mm à $2,957 \times 10^{-4}$ mm
- Interface CF/Sol : diminution de $4,230 \times 10^{-4}$ mm à $2,988 \times 10^{-4}$ mm

Cette réduction traduit une meilleure redistribution des contraintes dans la structure modifiée.

L'analyse comparative met en évidence plusieurs points fondamentaux :

✓ **Maintien de la rigidité globale**

L'incorporation de 12 % de plastiques ne provoque pas d'augmentation significative du déplacement maximal, ce qui signifie que la rigidité globale de la chaussée est conservée.

Cela confirme que la modification n'affaiblit pas la structure.

✓ **Amélioration de la transmission des efforts**

Les déplacements minimaux plus faibles observés dans la structure modifiée indiquent une meilleure répartition des contraintes.

Cela signifie que :

- la structure devient plus homogène mécaniquement,
- les concentrations locales de contraintes sont réduites,
- le risque d'endommagement local est diminué.

✓ **Amélioration potentielle de la durabilité**

La réduction des déplacements internes est un indicateur direct d'une meilleure résistance aux déformations permanentes, notamment :

- l'orniérage,
- la fatigue,
- les dégradations structurelles.

Ainsi, la modification à 12 % de plastiques contribue à améliorer le comportement mécanique global de la chaussée.

Conclusion de la discussion

L'ensemble des résultats met en évidence que l'incorporation de 12 % de plastiques dans la couche de roulement permet d'améliorer la réponse mécanique globale de la chaussée sans compromettre sa rigidité structurelle. La réduction des déplacements internes constitue un indicateur clair d'une meilleure distribution des contraintes et d'une amélioration du comportement structurel.

Ces résultats confirment le potentiel élevé des plastiques recyclés pour l'amélioration des performances des chaussées et ouvrent des perspectives prometteuses pour leur utilisation dans la conception des infrastructures routières durables.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude a démontré, par le biais de la simulation numérique, la pertinence technique de l'incorporation des déchets plastiques dans les enrobés bitumineux destinés aux couches de roulement en climat tropical. La modélisation de l'essai Marshall en élasticité linéaire isotrope, complétée par l'analyse structurelle de la chaussée multicouche, a permis d'évaluer de manière cohérente le comportement mécanique des enrobés modifiés en l'absence d'essais expérimentaux approfondis. Les résultats démontrent que les plastiques composites renforcés de fibres agissent comme un agent de renforcement structurel efficace, augmentant le module équivalent, améliorant la capacité portante et réduisant la susceptibilité aux déformations permanentes. Contrairement aux plastiques conventionnels, les plastiques composites présentent une architecture interne renforcée qui favorise une meilleure interaction avec la matrice bitumineuse et améliore la stabilité mécanique globale.

Les résultats obtenus ouvrent plusieurs perspectives de recherche et d'application.

À court terme, une validation expérimentale des résultats numériques à travers des essais de laboratoire, notamment des essais Marshall et des essais de module complexe, permettrait de confirmer la pertinence des conclusions obtenues par simulation.

À moyen terme, l'étude du comportement sous chargement dynamique et cyclique permettrait d'évaluer la résistance à la fatigue et la durabilité à long terme des enrobés modifiés, conditions essentielles pour une application réelle en chaussée.

À long terme, l'intégration de modèles viscoélastiques avancés dépendants de la température et du temps permettrait d'améliorer la précision des simulations et d'évaluer le comportement thermomécanique des chaussées modifiées dans des conditions climatiques réelles.

Enfin, l'extension de cette approche à l'échelle du réseau routier, combinée à une analyse technico-économique et environnementale, permettrait de quantifier les bénéfices économiques et écologiques de l'utilisation des plastiques composites dans la construction routière.

En définitive, cette étude démontre que les déchets plastiques composites renforcés de fibres constituent une solution innovante, durable et mécaniquement performante pour le renforcement des infrastructures routières, ouvrant la voie à leur intégration dans les pratiques modernes de conception des chaussées en milieu tropical.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] R. d. Bénin, «Loi sur interdiction des sachets plastiques non biodégradables,» Cotonou, 2017.
- [2] H. KOWANOU, . D. A. TCHEHOUALI, E. A. SANYA et A. K. VIANOU , «Effets de l'incorporation du fondu de déchets de sachets plastiques sur la consistance du bitume et la stabilité du béton bitumineux,» *Afrique SCIENCE*, vol. 10, n° 12, pp. 39 - 52 , 2014.
- [3] Mongabay, «Déchets solides ménagers à Cotonou,» 2024.
- [4] CEBTP, Guide technique des chaussées, Cotonou,, 2019.
- [5] D. ST-LAURENT, ««Synthèse des outils de modélisation de chaussées actuellement disponibles au LCPC,» 2008.
- [6] L. C. d. P. e. Chaussées, Catalogue des dégradations de surface des chaussées, complément à la méthode d'essai N° 38-2 Relevé des dégradations de surface des chaussées, Paris, 1998, p. 91.
- [7] A. Légaré, «L'entretien du réseau routier du Québec, l'exigence de solutions durables. Étude réalisée pour le compte de la Coalition pour l'entretien et la réfection du réseau routier du Québec,» 2005.
- [8] Di Benedetto, H., & Corté, J.-F, «Matériaux Routiers Bitumineux 2: Constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges. hermes: Coll.«Mécanique et Ingénierie des Matériaux»,» *Hermes Science*, 2005.
- [9] M. L. Nguyen, «Etude de la fissuration et de la fatigue des enrobés bitumineux,» Lyon, 2009.
- [10] J. Perret, «Déformations des couches bitumineuses au passage d'une charge de trafic,» 2003.
- [11] H. Baaj, «Dégradation et usure des revêtements routiers souples,» 2012.
- [12] Doucet, F. et Auger, B. , «Détermination du module complexe des enrobés au Ministère des transports du Québec. Service des matériaux d'infrastructures, Direction des laboratoires des,» 2010.
- [13] M. a. T. D. a. N.-a. A. a. B. D. Y. Darestani, «Dynamic Response of Concrete Pavements under Vehicular Loads.,» chez Response to Tomorrow's Challenges in

- Structural Engineering, Budapest,» 2006.
- [14] S. O. Rahman et I. Anam,, «Dynamic Analysis of Concrete Pavement under Moving Loads,» vol. 1, n° 111, pp. 1-6, 2005.
- [15] Q. D. TRAN, «MODELE SIMPLIFIE POUR LES CHAUSSEES FISSUREES MULTICOUCHES,» septembre 2004.
- [16] S. W. Alisjahbana, «Dynamic of rigid roadway pavement under dynamic loads,» Singapour, 2009.
- [17] G. F. GODONOU, COURS DE MATERIAUX ET GEOTECHNIQUE ROUTIERE, p. 117.
- [18] P. Langlois, «Enrobés: Formulation selon la méthode LC,» 2005.
- [19] Olard, F. et Di Benedetto, H., «General “2S2P1D” model and relation between the linear viscoelastic behaviours of bituminous binders and mixes,» *Road Materials and Pavement Design*, vol. 4, n° 12, pp. 185-224, 2003.
- [20] L. SETRA, Conception et dimensionnement des structures de chaussée. Guide technique, 1994.
- [21] D. St-Laurent, «Évaluation structurale de chaussées souples dans un contexte climatique nordique,» 1995.
- [22] N. C. H. R. Program, «Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures,» *Chapter 3: Design of New and Reconstructed Flexible Pavements.*, 2004.
- [23] Priest, A. L. et Timm, D. H., «Methodology and calibration of fatigue transfer functions for mechanistic-empirical flexible pavement design,» *National Center for Asphalt Technology NCAT*, 2006.
- [24] Y. H. Huang, «Pavement analysis and design,» Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall. , 1993.
- [25] Y. Lefeuvre, «Contribution a l'étude de comportement en fatigue des enrobés bitumineux, étude de l'allongement des éprouvettes comme manifestation de l'endommagement diffus, expérimentation-modélisation,» Paris.
- [26] TADJER Amina Imen et SIDJILANI Chahinaze , «VALORISATION DES DECHETS PLASTIQUES DANS LA FABRICATION DES BITUMES ROUTIERS,» TIARET, 2020.

- [27] S. H. G. Raoul, «Modélisation statique et dynamique par ABAQUS d'une plaque de chaussée multicouche reposant sur un sol élastique,» 2016.
- [28] R. Vasudevan, «Utilization of Waste Plastics in Flexible Pavements,» Indian Highways, 2012..
- [29] D. Sharma et R. Choudhary, «Use of Waste Plastic in Road Construction,» *International Journal*, 2014.
- [30] Modarres, A. et Hamed, H., «Effect of Plastic Waste on Asphalt Mix,» *Materials and Design*, 2014.
- [31] A. FERJANI, «Modélisation de la performance à la fissuration des chaussées réhabilitées par les techniques de retraitement type I et type II,» ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, 2020.
- [32] O. YAZOGHLI-MARZOUK, R.M. DHEILLY et M. QUENEUDEC, «Valorisation des déchets d'emballages plastiques dans les matériaux de construction,» *Récent Progrès en Génie des Procédés*, n° 192, 2005.

TABLE DES MATIERES

LISTE DES ENSEIGNANTS AYANT INTERVENU DANS NOTRE FORMATION DE 2022-2025.....	i
DEDICACES	iii
REMERCIEMENTS.....	iv
HOMMAGES	vi
LISTE DES ABREVIATIONS ACRONYMES ET SIGLES	vii
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES FIGURES	ix
RESUME.....	xi
ABSTRACT	xii
SOMMAIRE	xiii
INTRODUCTION GENERALE	1
Contexte global et justification.....	1
État de l'art et positionnement scientifique	2
Problématique.....	2
Objectif principal	3
Objectifs spécifiques.....	3
Démarche méthodologique	3
Chapitre I : Généralités et revue de littérature	4
1.1. Les chaussées et les enrobés bitumineux	4
1.1.1. Constitution d'une chaussée revêtue.....	4
1.1.1.1. La plate-forme.....	5
1.1.1.2. La couche de forme	5
1.1.1.3. La sous-couche de fondation	5
1.1.1.4. Les couches d'assise	6
1.1.1.5. La couche de surface.....	6
1.1.2. Types de chaussées.....	8
1.1.2.1. Les chaussées souples.....	8
1.1.2.2. Les chaussées bitumineuses épaisses	8
1.1.2.3. Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques	8
1.1.2.4. Les chaussées à structure mixte	9

1.1.2.5.	Les chaussées à structure inverse	9
1.1.2.6.	Les chaussées en béton de ciment	9
1.1.3.	Propriétés mécaniques recherchées	11
1.1.4.	Les sollicitations dans les chaussées bitumineuses	11
1.1.4.1.	L'effet du trafic.....	12
1.1.4.2.	Sollicitations thermiques	12
1.1.5.	Fonctionnement mécanique des chaussées.....	13
1.1.5.1.	La transmission verticale des charges sur le sol support	13
1.1.5.2.	La diffusion horizontale des charges.....	13
1.1.5.3.	Etapes d'évolution des chaussées.....	13
1.1.6.	Dimensionnement des chaussées	15
1.1.6.1.	Les démarches de dimensionnement	15
1.1.6.2.	Les méthodes de dimensionnement des chaussées	16
1.1.7.	Modèle de charge	18
1.1.7.	Les enrobés bitumineux	22
1.1.7.1.	Liants hydrocarbonés	22
1.1.7.2.	Granulats	24
1.1.7.3.	Classification des enrobes bitumineux	27
1.1.7.4.	Les propriétés mécaniques des enrobés dans les structures de chaussée	29
1.1.7.5.	Le module complexe	30
1.1.7.6.	Dégradations des chaussées bitumineuses	31
1.2.	Types de plastiques utilisés et effets sur les propriétés mécaniques.....	33
1.2.1.	Définitions	33
1.2.2.	Différentes familles de plastiques (polymères).....	33
1.2.2.1.	Thermoplastiques.....	33
1.2.2.2.	Thermodurcissables	33
1.2.2.3.	Elastomères.....	35
1.2.3.	Recyclage du plastique.....	36
1.2.3.1.	Différentes méthodes de recyclage.....	36
1.2.3.2.	Le cycle de recyclage du plastique.....	37
1.3.	Avancées des recherches expérimentales existantes	37
1.3.1.	Sur l'incorporation des déchets plastiques dans les enrobés bitumineux ...	37

1.3.2.	Sur les apports et la fiabilité de la simulation numérique	43
1.4.	Justification du recours à une modélisation numérique prédictive	44
Chapitre II : Matériels et méthodologie de simulation numérique		45
2.0.	Présentation du matériel de modélisation : le code ABAQUS.....	45
2.1.	Méthode de calcul des plaques multicouches	47
2.1.1.	Approche monocouche équivalente	47
2.1.2.	Approches par couche	48
2.1.3.	Synthèse sur les approches	49
2.1.4.	Aperçu sur la méthode des éléments finis (MEF).....	51
2.1.4.1.	Modélisation	51
2.1.4.2.	Simulation	52
2.1.4.3.	Classification des systèmes physiques	52
2.1.4.4.	Processus d'analyse d'un problème physique	52
2.1.4.5.	Discretisation géométrique (maillage).....	53
2.1.4.6.	Les éléments.....	56
2.2.	Hypothèses générales de modélisation	61
2.3.	Modélisation des matériaux	62
2.3.1.	Paramètres mécaniques retenus.....	62
2.3.2.	Présentation des modèles d'homogénéisation existants.....	63
2.3.2.1.	<i>Modèle de Voigt (hypothèse d'iso-déformation)</i>	63
2.3.2.2.	<i>Modèle de Reuss (hypothèse d'iso-contrainte)</i>	64
2.3.2.3.	<i>Modèle de Mori–Tanaka (approche micromécanique)</i>	64
2.3.2.4.	<i>Modèle de Hirsch</i>	64
2.3.2.5.	<i>Loi des mélanges volumiques</i>	65
2.3.3.	Calcul des propriétés mécaniques équivalentes.....	66
2.4.	Cas de modélisation de l'éprouvette Marshall	67
2.4.1.	Géométrie de l'éprouvette et des mâchoires Marshall.....	68
2.4.2.	Propriétés des matériaux	68
2.4.3.	Création et affectation de la section.....	68
2.4.4.	Assemblage du modèle	69
2.4.5.	Définition des interactions de contact.....	69
2.4.6.	Conditions aux limites.....	70
2.4.7.	Maillage du modèle	70

2.4.8. Paramètres de sortie et exploitation des résultats	70
2.5. Choix de la plage optimale	73
2.6. Présentation générale de l'ouvrage à modéliser	73
2.6.1. Modélisation de la structure de chaussée multicouche sous Abaqus.....	73
2.6.2. Modélisation statique	74
2.6.3. Modélisation de Plaques multicouches sur le sol élastique.....	75
CHAPITE III : Résultats et discussions.....	77
3.1. Résultats de la simulation Marshall.....	77
3.1.1. Effets de la teneur en granulés plastiques sur la densité apparente	77
3.1.2. Effets de la teneur en granulés plastiques sur la stabilité du béton bitumineux	79
3.2. Résultats de la simulation de la chaussée complète	80
3.2.1. Déplacement vertical à la surface de la couche de roulement.....	80
3.2.2. Analyse comparative des déplacements aux différentes interfaces de la chaussée	81
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	77
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	78
TABLE DES MATIERES.....	81