



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research
جامعة عبد الحميد بن باديس – مستغانم
University Abdelhamid Ibn Badis – Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculty of Sciences and Technology
قسم الهندسة المدنية
Civil engineering department



N° d'ordre : M/GP/2025

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Industrie de pétrochimie

Option : Génie pétrochimie

Thème :

**ETUDE ANALYTIQUE COMPARATIVE DES CYCLES
THERMIQUES SUR DES BÉTONS BITUMINEUX MODIFIÉS
PAR LE PET**

Présenté par :

- BENDREF Abdelmalik

Soutenu le 30/06/2025 devant le jury composé de :

Présidente : Dr MEKIBES Zohra

Examineur : Dr ZELMAT Yassine

Encadrante : Dr GUERZOU Tourkia

Co-encadrant : Dr MEKHATRIA Djilali

Invité : Dr MOSTEFA Fouzia

Année Universitaire : 2024/2025

REMERCIEMENT

Nous tenons tout d'abord à remercier le bon dieu de nous avoir guidés et donnée la force et la volonté pour atteindre notre objectif.

Nous tenons à remercier tous ceux et celle qui de loin ou de près a contribué à finaliser ce modeste travail qu'on espère qu'il sera à la hauteur de leur engagement.

Un grand merci à **Mme MEKIBES Zohra** qui a accepté de lire notre travail, et pour ses précieux conseils. On la remercie énormément pour tout le temps qu'elle nous a consacré, et qui nous a fait l'honneur de présider le jury.

Un grand merci à **Mr ZELMAT Yassine** qui nous fait l'honneur d'être présent parmi les membres de jury et avoir accepter d'examiner ce travail.

Un énorme et chaleureux merci à **Mme GUERZOU Tourkia** et **Mr MEKHATRIA Djilali** qui ont su nous faire partager ses savoir-faire et ses rigueurs scientifiques, pour ses aides précieuses, ses disponibilités, son encouragement et ces conseils durant toute la durée de notre travail.

Nous sommes reconnaissants à l'ensemble des enseignants qui ont contribués à notre formation avec beaucoup de dévouement et de compétence.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à ma Mère, mon Père, ma Grande Mère Zaza, mes Sœurs Amina et Hadjer, à Mon Frère Abdelrahmane à ma femme Kawthar qui m'ont toujours encouragé pour que et aussi je réussisse mes études.

Au enseignants Mme Mekibes, Mme Fares, Mme Mohamed Sghir, Mr Zelmat, Mme Guerzou, Mme Mostefa et Mme Akkermi.

A que j'aime et que je respecte infiniment, Mon ami Lina, à tous la famille et tous mes amis promos, à tous mes amis proches ou loin.

Et sans oublier mes enseignants qui m'ont soutenu durant tous mes années d'études.

BENDREF Abdelmalik

SOMMAIRE

Remerciement

Dédicace

TABLE DES MATIERES	I
LISTE DES FIGURES	V
LISTE DES TABLEAUX	VI
RESUME	A
ABSTRACT.....	B
ملخص	C
INTRODUCTION GENERALE	1

CHAPITRE I: LES CHAUSSEES, LES LIANTS ET LES ENROBES BITUMINEUX

I.1. INTRODUCTION	4
I.2. LA CHAUSSEE.....	4
I.2.1. Structure d'une chaussée	4
I.2.2. Différents types de structures de chaussée	5
I.2.3. Dégradations induites dans la chaussée	6
I.3. L'ENROBE BITUMINEUX	7
I.4. L'ENROBE A CHAUD :	8
I.5. DIFFERENTS TYPES D'ENROBES BITUMINEUX POUR LA COUCHE DE SURFACE.....	8
I.5.1. Le Sable bitume	9
I.5.2. Le Béton bitumineux:	10
I.5.3. Le Béton bitumineux à module élevé :	10
I.5.4. L'enrobé à module élevé:	10
I.5.5. Le-Bitume :	11
I.6. PROPRIETES RHEOLOGIQUES DES ENROBES BITUMINEUX	11
I.6.1. Généralités	11
I.6.2. Comportements mécaniques et thermomécaniques des enrobés bitumineux	12
I.6.3. Sensibilité à la température:.....	14

I.6.4. Influence de la teneur en liant.....	14
I.7. LES LIANTS HYDROCARBONES	15
I.7.1. Origine et applications du bitume.....	15
I.8. COMPORTEMENT DES BITUMES	16
I.9. CONCLUSION :	18

CHAPITRE II: MODIFICATION DES MELANGES BITUMINEUX PAR LES DECHETS PLASTIQUES

II.1 INTRODUCTION	21
II.2 GENERALITES SUR LES MATIERES PLASTIQUES.....	21
II.2.1. Définition de la matière plastique.....	21
II.2.2. Différents types de plastique (Polymère) :	23
II.2.3. Types de destinations possibles pour les déchets plastiques :	24
II.3 POLYETHYLENE TEREPHTALATE	26
II.3.1. Propriétés physiques et thermiques du PET	27
II.3.2. Propriétés chimiques du PET	28
II.3.3. Propriétés mécaniques du polyéthylène téréphtalate.....	28
II.4 LA MODIFICATION DES MELANGES BITUMINEUX	28
II.4.1. Les objectifs de la modification	30
II.4.2. Modification des bitumes	31
II.4.3. Modification des enrobés bitumineux	32
II.5 LA MODIFICATION PAR LE POLYETHYLENE TEREPHTALATE (ETAT DE L'ART) :	33
II.6 ETAT DE L'ART SUR L'EFFET DES CYCLES THERMIQUES	38
II.7 CONCLUSION.....	42

CHAPITRE III: PLAN D'EXPERIENCE ET PLAN FACTORIEL

III.1 INTRODUCTION	44
III.2 UN PLAN D'EXPERIENCE	44
III.3 TERMINOLOGIES	44

I.3.1. Facteurs ou variables naturelles (réelles).....	44
I.3.2. Réponse.....	45
III.4 DOMAINES D'UTILISATIONS ET OBJECTIFS D'UN PLAN D'EXPERIENCE :	45
I.4.1. Domaines d'utilisation.....	45
I.4.2. Domaine d'étude.....	45
I.4.3. Objectif d'utilisation d'un plan d'expérience	46
III.5 PLAN D'EXPERIENCE FACTORIEL	46
I.5.1. Plan factoriel 2k complet	46
I.5.2. Plan factoriel 2k fractionnaires	48
I.5.3. Plan d'expérience factoriel complet général	48
I.5.4. Mélange de plans d'expérience	48
III.6 OPTIMISATION DES REPONSES MULTIPLES.....	49
III.7 PLAN D'EXPERIENCES DE SURFACE DE REPONSE.....	49
I.7.1. Plans composites centrés	49
I.7.2. Plans de Box-Behnken.....	50
III.8 ANOVA	50
III.9 TESTS DE SIGNIFICATION ET VALIDATION DU MODELE : ANALYSE STATISTIQUE	50
BOOKMARK NOT DEFINED.	

CHAPITRE IV: PLAN D'EXPERIENCE: RESULTATS ET ANALYSE

IV.1 MODELISATION ET ANALYSE DE DONNEES	52
(a) Introduction des données dans le logiciel Minitab	52
IV.2 RESULTATS DES ANALYSES	53
✓ LA REGRESSION G-D VS %PET ; T	53
✓ LA REGRESSION E-R P1 VS %PET ; T.....	53
✓ LA REGRESSION E-R P2 VS %PET ; T.....	54
✓ MODELE LINEAIRE GENERAL G-D VS %PET; T	54
✓ MODELE LINEAIRE GENERAL E-R P1 VS %PET; T	55

✓ MODELE LINEAIRE GENERAL E-R P2 VS %PET; T	56
✓ ANOVA UNILATERALE	57
IV.3 CONCLUSION :	58
CONCLUSION GENERALE	60
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES	64
ANNEXE	

TABLE DES FIGURES

CHAPITRE I: LES CHAUSSEES, LES LIANTS ET LES ENROBES BITUMINEUX

Figure I.1: Structure multicouche d'une chaussée.....	4
Figure I.2: Schématisation des sollicitations induites par la température.....	7
Figure I.3: Différentes classes des enrobés bitumineux.....	9
Figure I.4: Schéma représentatif du comportement des enrobés bitumineux ; (ϵ : déformation, N : nombre de cycles de chargement).....	13
Figure I.5: Fragments de bitume provenant de gisements naturels au bord de la Mer Morte	16
Figure I.6: Présentation schématique des différentes classes de comportement des bitumes en fonction de $ \epsilon $ et de T	17

CHAPITRE II : MODIFICATION DES MELANGES BITUMINEUX PAR LES DECHETS PLASTIQUES

Figure II. 1 : Procès de fabrication de matière plastique	22
Figure II. 2: La gestion des déchets plastiques.	25
Figure II. 3: Les étapes du recyclage	26
Figure II. 4: Formule développée du polyéthylène téréphtalate.	27
Figure II. 5: Représentation schématique des différents modes de déformations du PET amorphe en traction uni-axiale.....	28
Figure II. 6: Effets de l'addition de déchets plastiques dans les enrobés.	33

CHAPITRE III: PLAN D'EXPERIENCE ET PLAN FACTORIEL

Figure III. 1: Schéma représentatif du domaine d'étude pour le cas de deux facteurs (plan 2^2)..	45
Figure III. 2 : Disposition des points expérimentaux d'un plan 2^3	47

TABLE DES TABLEAUX

CHAPITRE 1: LES CHAUSSEES, LES LIANTS ET LES ENROBES BITUMINEUX

Tableau I. 1 : Différentes structures de chaussée.	6
Tableau I. 2 : Plages de température des sollicitations mécaniques et essais correspondants	18

CHAPITRE 02 : MODIFICATION DES MELANGES BITUMINEUX PAR LES DECHETS PLASTIQUES

Tableau II. 1 : Propriétés physiques et thermiques du PET.	26
---	----

CHAPITRE 3: PLAN D'EXPERIENCE ET PLAN FACTORIEL

Tableau III. 1 : Matrice des expériences (N, k).....	47
--	----

CHAPITRE 3: PLAN D'EXPERIENCE ET PLAN FACTORIEL

Tableau III. 1 : Matrice des expériences (N, k).....	47
--	----

CHAPITRE IV: PLAN D'EXPERIENCE: RESULTATS ET ANALYSE

Tableau IV. 1 : La comparaison entre les cycles thermiques des bétons bitumineux.....	52
Tableau IV. 2 : Analyse de variance du modèle linéaire.....	54
Tableau IV. 3 : Récapitulatif du modèle linéaire.	54
Tableau IV. 4 : Récapitulatif détaillé du modèle linéaire.....	55
Tableau IV. 5 : Analyse de variance du modèle linéaire.....	55
Tableau IV. 6 : Récapitulatif du modèle linéaire.	56
Tableau IV. 7 : Récapitulatif détaillé du modèle linéaire.....	56
Tableau IV. 8 : Analyse de variance du modèle linéaire.....	56
Tableau IV. 9 : Récapitulatif du modèle linéaire.	57
Tableau IV. 10 : Récapitulatif détaillé du modèle linéaire.....	57
Tableau IV. 11 : Valeur de probabilité et coefficient de détermination.....	57
Tableau IV. 12 : Moyenne de confiance d'un plan unilatérale	58

RESUME

Ce mémoire porte sur l'étude analytique comparative des effets des cycles thermiques sur des bétons bitumineux modifiés par l'ajout de polyéthylène téréphtalate (PET), un déchet plastique très répandu. Dans un contexte où les revêtements routiers sont soumis à des contraintes croissantes dues au trafic intense et aux variations climatiques, l'intégration de déchets plastiques dans les matériaux routiers représente une solution à la fois écologique et innovante.

L'objectif principal est d'évaluer l'influence combinée de la température (0°C, 25°C et 50°C) et du taux de PET (0%, 3%, 5% et 7%) sur les déformations des enrobés bitumineux soumises à trois types de cycles thermiques : Gel-Dégel (G-D), Échauffement-Refroidissement 1 (25°C-45°C) et Échauffement-Refroidissement 2 (45°C-65°C). L'étude s'appuie sur une base de données expérimentale issue des travaux du Dr. Bekkhada Amine, analysée statistiquement à l'aide de modèles de régression linéaire générale et d'ANOVA.

Les résultats révèlent que la température a un impact significatif sur toutes les formes de déformation. En revanche, le pourcentage de PET n'a pas montré d'effet significatif sur ces déformations. Les modèles statistiques présentent des coefficients de détermination élevés (jusqu'à 98,39 %), indiquant une très bonne qualité d'ajustement.

En conclusion, bien que l'ajout de PET ne modifie pas de manière significative les performances thermiques du matériau, la température reste un facteur critique dans la durabilité des enrobés. L'étude recommande de futures recherches intégrant d'autres paramètres comme la taille des granulats de PET, leur type, ou encore l'effet de la température sur d'autres propriétés mécaniques comme le fluage ou la durabilité à l'eau.

Mots clés : Béton bitumineux, PET, déchets plastiques, cycles thermiques, Gel-Dégel, Échauffement-Refroidissement, analyse statistique.

ABSTRACT

This thesis focuses on a comparative analytical study of the effects of thermal cycles on bituminous concrete modified with polyethylene terephthalate (PET), a widely used plastic waste. In a context where road pavements are increasingly subjected to traffic loads and climatic variations, incorporating plastic waste into road materials appears as both an ecological and innovative solution.

The main objective is to evaluate the combined influence of temperature (0°C, 25°C, and 50°C) and PET content (0%, 3%, 5%, and 7%) on the deformations of bituminous mixtures under three types of thermal cycles: Freeze-Thaw (G-D), Heating-Cooling 1 (25°C-45°C), and Heating-Cooling 2 (45°C-65°C). The study relies on experimental data from Dr. Bekkhada Amine's work, analyzed statistically using general linear models and ANOVA.

The results show that the temperature has a significant effect on all types of deformation. Otherwise, the PET content has no significant effect on these deformations. The statistical models show high determination coefficients (up to 98.39%), indicating excellent model fit.

In conclusion, although PET addition does not significantly affect thermal performance, temperature remains a critical factor in bituminous mix durability. The study recommends further research considering other parameters such as PET aggregate size, type, and the effect of temperature on other mechanical properties such as creep, water retention, and durability.

Keywords: Bituminous concrete, PET, plastic waste, thermal cycles, Freeze-Thaw, Heating-Cooling, statistical analysis.

الملخص

تركز هذه المذكرة على دراسة تحليلية مقارنة لتأثير الدورات الحرارية على الخرسانة البيتومينية المعدلة بالبولي إيثيلين تيرفتالات (PET) ، وهو من أكثر النفايات البلاستيكية شيوعًا. في ظل الظروف التي تتعرض فيها طبقات الطرق لضغط متزايد نتيجة حركة المرور والتغيرات المناخية، فإن دمج النفايات البلاستيكية في مواد الطرق يمثل حلاً بيئيًا ومبتكرًا.

يتمثل الهدف الرئيسي في تقييم التأثير المشترك لدرجة الحرارة (0° ، 25° و 50°) ونسبة الـ PET (0%، 3%، 5%، و 7%) على تشوهات الخلطات البيتومينية تحت ثلاثة أنواع من الدورات الحرارية: التجميد-الذوبان، التسخين-التبريد 1 (25° - 45°) والتسخين-التبريد 2 (45° - 65°). تعتمد الدراسة على بيانات تجريبية من أعمال الدكتور بكحادة أمين، تم تحليلها إحصائيًا باستخدام نماذج الانحدار الخطي العام وتحليل التباين (ANOVA).

أظهرت النتائج أن درجة الحرارة لها تأثير كبير على جميع أنواع التشوهات. أما نسبة الـ PET فلم تُظهر تأثيرًا معنويًا على هذه التشوهات. أظهرت النماذج الإحصائية معاملات تحديد عالية (تصل إلى 98.39%)، مما يشير إلى جودة عالية في تطابق النموذج.

ختامًا، رغم أن إضافة PET لا تؤثر بشكل كبير على الأداء الحراري، تظل درجة الحرارة عاملاً حاسماً في متانة الخلطات البيتومينية. توصي الدراسة بإجراء أبحاث مستقبلية تأخذ في الاعتبار معايير أخرى مثل حجم حبيبات PET ، نوعها، وتأثير الحرارة على خصائص ميكانيكية أخرى مثل الزحف، واحتباس الماء، والمتانة.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة البيتومينية، PET، النفايات البلاستيكية، الدورات الحرارية، التجميد-الذوبان، التسخين-التبريد، التحليل الإحصائي.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les structures de chaussées routières sont soumises, en service, à des sollicitations très complexes. L'accroissement important des sollicitations de revêtements routiers du fait de la densité toujours plus forte du trafic et les changements environnementaux deviennent de grands soucis sur la performance et la durabilité des revêtements des chaussées en enrobés bitumineux. Ces sollicitations sont principalement basées sur des matériaux dont les propriétés ne sont constantes, mais évoluent dans le temps

D'autre part, l'un des problèmes environnementaux dans le monde est les grandes quantités de déchets plastiques, en polyéthylène téréphtalate (PET), polypropylène (PP), Polystyrène (PS), etc., déposés dans les déchets domestiques et les décharges. L'Algérie produit aussi des milliers de tonnes de déchets plastiques, selon l'Agence Nationale des Déchets (AND). Le plastique est une substance toxique et persistant. Par conséquent, l'élimination des déchets plastiques est un défi et un problème sérieux en raison de lente biodégradabilité et de leur aspect inesthétique. Aujourd'hui, la valorisation des déchets industriels et ménagers dans les chaussées bitumineuses est devenue une technique écologique qui participe dans la préservation des ressources naturelles. L'enrobé bitumineux est soumis, en service, aux contraintes dues au rigueur du climat et au trafic routier. Les changements importants de températures produisent l'orniérage (pour les hautes températures) et la fissuration thermique (pour les basses températures). Dans certaines chaussées de faible trafic, qui se situent dans des régions de fortes amplitudes journalières ou saisonnières, il est constaté que ces chaussées rencontrent de graves dégradations.

Cette mémoire a été réalisée dans le cadre d'obtention de diplôme de fin d'étude de Master, et a comme objective de trouver la meilleure relation entre la température et le pourcentage de PET sur les phénomènes Gel-Dégel et Echauffement-Refroidissement à temps intervalle de température (25°-45° et 45°-65°).

Outre cette introduction générale et une conclusion générale, cette mémoire comporte deux grandes parties :

- La première partie de revue bibliographique comporte trois chapitres : le premier chapitre

permet de présenter une recherche bibliographique sur les chaussées les liants, les granulats et les bétons bitumineux. Le deuxième chapitre est consacré à une étude bibliographique sur les déchets plastiques, enrobés modifiés par les déchets et le polyéthylène téréphtalate (PET), qui représente l'élément principal de cette recherche. En outre, un état de l'art sur la fatigue thermique a été appliquées aux matériaux bitumineux. Le troisième chapitre dédié au descriptive des plans d'expérience et plan factoriel.

- La deuxième partie est consacrée au analyse statistique des données.

Enfin, une conclusion générale reprend les principaux résultats ainsi que les perspectives possibles pour développer l'étude élaborée.

**CHAPITRE I: LES CHAUSSEES,
LES LIANTS ET LES ENROBES
BITUMINEUX**

I.1. Introduction

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique sur la chaussée routière, les liants et les enrobés bitumineux en soulignant ses contraintes aux conditions climatiques, qui affectent les matériaux bitumineux. Il expose également les connaissances actuelles sur les matériaux bitumineux, leur composition, leurs propriétés thermomécaniques et leur comportement viscoélastique. Enfin, il aborde la structure, la composition, la rhéologie et les essais de caractérisation des bitumes et enrobés, ainsi que leurs propriétés thermomécaniques.

I.2. La chaussée

La chaussée définie comme une partie de la route qui est désignée pour la circulation des engins de poids lourd et léger. Son rôle est d'assurer le passage des véhicules dans des conditions sûres et confortables tout en étant résistante et durable dans le temps.

I.2.1. Structure d'une chaussée

La chaussée se présente comme des structures multicouches (Figure 1), qui est réalisée dans le but de répartir les charges induites par le trafic vers le sol-support pour soutenir dans le cas des chaussées traitées aux liants hydrocarbonés structure comprend : [LCPC – SETRA 1994].

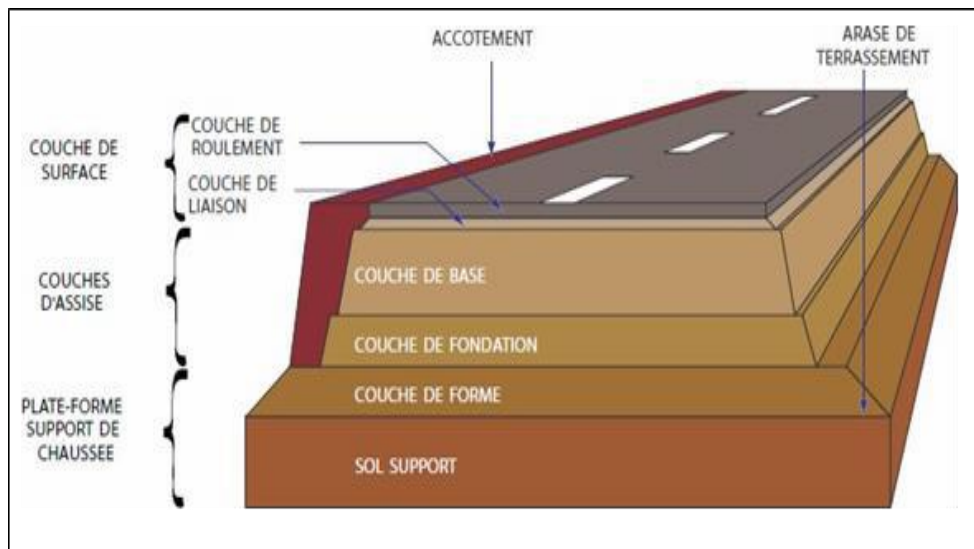


Figure I. 1: Structure multicouche d'une chaussée.

- Le sol support est la plate-forme ou bien le support de corps de la chaussée.
- La couche de forme qui protège le sol-support pendant les travaux. Elle permet d'homogénéiser les propriétés mécaniques du matériau constitutif du remblai, tout en améliorant la capacité portante du support de la chaussée.
- La couche d'assise (couche fondation + couche de base) répartie les contraintes de chargement dues au trafic dans les limites admissibles au niveau de la plate-forme support.
- Les couches de surface (couche de liaison + couche de roulement) ont pour but de protéger l'assise des conditions atmosphériques, et de garantir une circulation sûre et commode des véhicules sur la chaussée.

I.2.2. Différents types de structures de chaussée

Les chaussées se présentent pratiquement sous deux grandes classes : chaussées bitumineuses traitées aux liants hydrocarbonés (chaussées souples) et chaussées en béton traitées aux liants hydrauliques (chaussées rigides). Cette classification distribue la structure des chaussées des autres types tels que semi-rigide, mixte, etc.

Le guide technique français sur la conception et le dimensionnement des structures de chaussée [LCPC – SETRA 1994] fournit un tableau des matériaux de construction qui peuvent être subdivisés en deux grandes familles suivant qu'ils soient liés ou non :

- Matériaux granulaires liés sont couramment utilisés pour la construction d'un corps de chaussée à un fort trafic routier. On met la couleur "noire" pour les matériaux traités aux liants hydrocarbonés (C'est les matériaux bitumineux) et la couleur "blanche" pour les matériaux traités aux liants hydrauliques (MTLH).
- Matériaux granulaires non liés, ou la Graves Non Traitée (La GNT), couramment utilisé pour la construction d'un corps de chaussée à un faible trafic routier.

Tableau I. 1: Différentes structures de chaussée.

Structures types	Couches		
	Surface	Base	Fondation
Souples	Bitumineuse	Graves Non Traitées (GNT)	
Bitumineuses épaisses	Matériaux bitumineux		
Semi-rigides	Bitumineuse	MTLH	
Rigides	Béton de ciment (150 à 400 mm d'épaisseur)		• Soit en MTLH • Soit en GNT • Soit bitumineuse
Mixtes	Matériaux bitumineux		MTLH
Inverses	Bitumineuse	GNT	MTLH

I.2.3. Dégradations induites dans la chaussée

La chaussée bitumineuse est soumise à des phénomènes thermiques, mécaniques, physiques et même chimiques sous l'influence des contraintes extérieures qui se produisent souvent simultanément.

Les matériaux bitumineux sont employés principalement dans la couche de surface et d'assise. Ils subissent l'action du trafic et du climat, l'effet de trafic qui représente les contraintes imposées par le passage des véhicules, et les changements climatiques et la variation de température appelés effet thermique [Di Benedetto 2005].

La température évolue à des rythmes très différents, dus à la différence entre les cycles journaliers d'une part et les cycles saisonniers d'autre part. D'après [Bensbaa 2003], la température à deux effets principaux :

- Le changement de la rigidité du matériau, à cause des caractéristiques de susceptibilité thermique du bitume de l'enrobé.

- La création des contraintes et des déformations au sein du matériau en raison des dilatations-contractions thermiques plus ou moins empêchées lors des changements de températures (Figure 2).

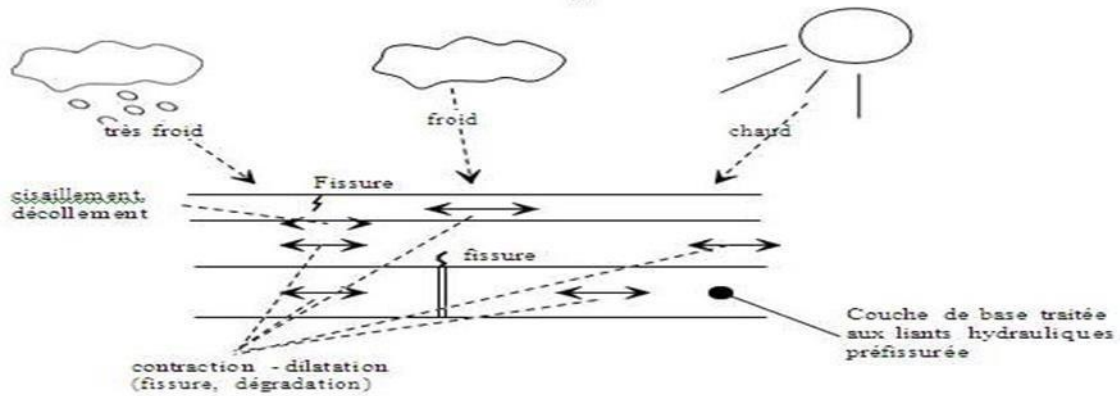


Figure I. 2 : Schématisation des sollicitations induites par la température [Di Benedetto 2005].

I.3. L'enrobé bitumineux

Tout enrobé constitué de granulats liés entre eux par un liant hydrocarboné est appelé enrobé bitumineux. Ce terme recouvre les mélanges où le liant n'est pas nécessairement un bitume pur par exemple le goudron, les bitumes fluidifiés et même les bitumes modifiés. En plus, on peut enrichir ce mélange par ajout de particules fines et différents additifs pour améliorer leur performance. Afin d'obtenir le bon enrobé bitumineux, nécessite des propriétés physiques, mécaniques et chimiques très spécifiques du liant et du granulat, en termes de température, charge de trafic, les granulats assurant la rigidité de l'enrobé et le bitume procurant la cohésion de l'ensemble, il est responsable du caractère visqueux. En commençant par les caractéristiques de chaque composant et se terminant par les caractéristiques du mélange final. En général, la composition des enrobés bitumineux est la suivante :

Les granulats atteignent jusqu'à 95 % du volume totale et se composent d'un certain nombre de fractions dans des proportions différentes :

- Les fines < 80 μm .
- Sables de la classe 0/3.
- Gravier de la classe 3/8, 8/15 et 15/25 pour le grave bitume.

- Bitumes d'une teneur de 4 à 6 % du poids total de mélange.
- Vides d'air de 2 à 20% selon les matériaux utilisés [Zemmiri 2008].

Selon leur utilisation, les enrobés bitumineux peuvent être classés en différentes catégories: pour la couche de roulement, le béton bitumineux abréviation (BB), pour la couche de base où la grave bitume (GB) est le matériau utilisé. Le dimensionnement et la formulation pour ces deux couches bitumineuses sont déterminées et réalisées suivant le nombre de cycles de contraintes (Trafic prévu) [Paranhos 2007].

I.4. L'enrobé à chaud :

Le mélange à chaud de gravier, de sable, de filler, de bitume et parfois d'autres additifs, dans un pourcentage choisi selon une formulation, donne un mélange bitumineux à chaud. [El beze 2008].

La fabrication des enrobés bitumineux sont effectués au niveau d'une centrale d'enrobage à une température d'environ 165°C.

Ensuite, ces matériaux bitumineux seront transportés sur le chantier, pour réaliser de la couche de surface du corps de chaussée. À l'aide d'un finisseur on fait la mise en œuvre de l'enrobé bitumineux à une température d'environ 150°C. À des températures inférieures à 130°C, les enrobés bitumineux chauds sont difficiles à appliquer, et même la qualité de la mise en œuvre devient médiocre.

I.5. Différents types d'enrobés bitumineux pour la couche de surface

Le malaxage de granulats et de liant bitumineux donne un enrobé bitumineux, ce mélange résultant (liant-granulats) est triphasique [Laldji 2015] :

- **La phase solide** qui est représentée par la structure granulaire.
- **La phase visqueuse** est représentée par l'ajout de bitume qui garantit la cohésion du mélange bitumineux.
- **La phase gazeuse** est le pourcentage des vides dans le mélange.

En général, on rencontre de nombreux type des mélanges bitumineux dans le domaine routier. La figure 3 présente un schéma qui permet de connaître les différents types de ces enrobés bitumineux et même la différence entre eux :

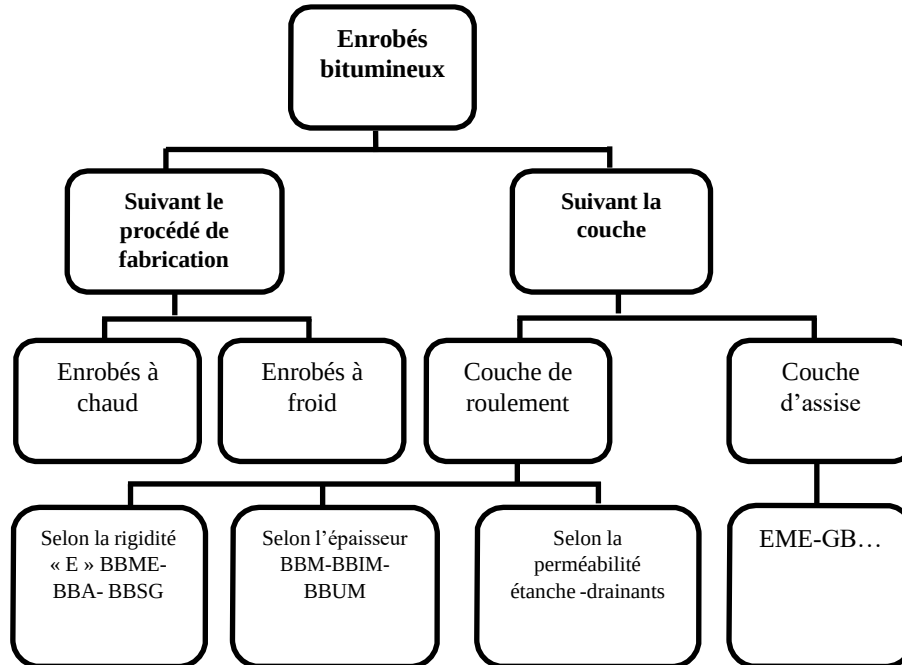


Figure I. 3: Différentes classes des enrobés bitumineux [Hachani 2013].

I.5.1. Le Sable bitume

Le mélange d'un ou plusieurs sable (s) et le bitume pur donne un sable bitume (SB). En effet, l'addition de fines calcaires ou fileries issus du concassage des matériaux ou des poudres industrielles comme le ciment et la chaux doit être nécessaire pour obtenir un bon sable bitumineux.

Un bitume dur de la classe 20/30 ou 40/50 doit être utilisé pour garantir une bonne rigidité et stabilité du mélange [CTTP 2004].

Ses domaines d'utilisation vont directement à utiliser comme une couche anti-rampant des fissures des chaussées ou réseau principal de niveau 02 : comme couche de base.

I.5.2. Le Béton bitumineux:

Le (BB) présente une granulométrie continue d'un mélange de gravier (de classe 3/8 et 8/15), de sable (0/3), de filler, de bitume et parfois certains additifs.

Différentes classes de bétons bitumineux existent dans la construction routière telles que le BB 0/8, BB 0/10, BB 0/12 et le plus célèbre est le BB 0/14 [CDC-ENR05 2005].

Ses domaines d'utilisation vont directement ont de bonnes propriétés mécaniques, ce qui les rend idéaux pour les couches de surface à trafic intense. Il peut être utilisé aussi bien pour les revêtements routiers neufs que pour le renforcement. Pour la couche de surface soit la couche de roulement ou la couche de liaison de voiries, autoroutes et même les aérodromes. La fabrication, la mise en œuvre et le compactage de ce matériau doivent être à chaud [Djabri 2016].

I.5.3. Le Béton bitumineux à module élevé :

Le béton bitumineux à module de rigidité élevé (BBME) est obtenu par le malaxage des agrégats et de liant bitumineux pur ou modifié, qui se produit dans la centrale d'enrobage. Suivant le module de rigidité plus élevé "E" et la bonne résistance contre l'orniérage, l'enrobé bitumineux performants distinguent des autres enrobés bitumineux classiques [CTTP 2004]. Son domaine d'utilisation est conçu généralement pour les couches de roulement des voiries locales ou nationales à faible ou fort trafic. Le BBME applique dans la couche de roulement sur des épaisseurs de 5 à 7 cm pour les BBME de la classe 0/10 et 6 à 9 cm pour les BBME de la classe 0/14.

I.5.4. L'enrobé à module élevé:

Les enrobés à module élevé (EME) sont préparés par le malaxage des agrégats, de liant bitumineux, et d'autres additifs minéraux ou organiques, dans une centrale d'enrobage ; Ils composent en deux classes de performance (Classe 1 et 2) avec des compositions comme suite : 0/10, 0/14 et 0/20 [Djabri 2016]. Le module de rigidité élevé "E" atteignant 17000 MPa, et la plus grande résistance contre la fatigue ce qui distingue des autres enrobés bitumineux classiques.

Ses domaines d'utilisation vont directement utiliser comme couche d'assise du corps de chaussée ou pour le renforcer. Il est utilisé aussi à la couche de liaison à fort trafic pour diminuer le problème de l'orniérage.

On distingue deux principales classes de particules qui diffèrent l'une de l'autre spécifiquement par leur dureté et la teneur en liant bitume [Djabri 2016] :

- La première classe de l'EME correspond au GB à module élevé obtenu à partir de bitume dur, à des teneurs proches de celle du grave bitume classique ;
- La deuxième classe de l'EME correspond à l'enrobé bitumineux à module élevé, possédant, en outre de très bonnes performances contre la fatigue du fait de la forte teneur en bitume dur.

I.5.5. Le-Bitume :

La grave bitume (GB) présente une granulométrie continue (0/20) d'un mélange de gravier (de la classe 3/8, 8/15 et 15/25), de sable (0/3), de filler, de bitume et parfois certains additifs.

Elle convient pour la couche de base des voiries, autoroutes et aéroports. Elle garantit une capacité portance et une répartition homogène des contraintes transmises par la couche de surface sous l'effet du trafic. Elle est également utilisée pour définir le profil de la chaussée souhaitée (couche de reprofilage). Comme le BB, la fabrication et la mise en œuvre du grave bitume sont réalisées à chaud [CDC-ENR05 2005].

Ses domaines d'utilisation vont directement pour la construction de la couche de base ou la couche de fondation du corps de chaussée. Ou comme un réseau principal de niveau 01 (Classes de trafic TPL3 à TPL7) [CTTP 2004].

I.6. Propriétés rhéologiques des enrobés bitumineux

I.6.1. Généralités

Sous l'influence conjuguée du trafic et de la température, des analyses de contraintes et de dégradation observées sur la chaussée bitumineuse, quatre principales propriétés thermomécaniques des enrobés bitumineux doivent être considérées et caractérisées :

- Module de rigidité, sa dépendance de température et au modèle de chargement.
- La fatigue.
- Développement permanent de la déformation.
- Diverses fissures et les excroissances aux basses températures.

Il convient de souligner que la température a toujours joué un rôle important crucial dans les études liées à ces matériaux :

- Les propriétés thermomécaniques permettent de déterminer les effets sur la structure de la chaussée et leur évolution avec dans temps ;
- La troisième propriété concerne de caractériser le phénomène d'orniérage.
- La quatrième propriété qui fait apparaître des couplages thermo-mécaniques, est souvent non conçus malgré leur importance pratique.

Ils peuvent calculer différentes plages de sollicitation en fonction du comportement des matériaux utilisés et de leurs propriétés thermomécaniques dans des milieux déformables.

I.6.2. Comportements mécaniques et thermomécaniques des enrobés bitumineux

Les propriétés viscoélastiques des enrobés bitumineux sont héritées du bitume qui enrobe les granulats ; de plus, à la présence de température les caractéristiques mécaniques de mélange bitumineux deviennent des caractéristiques thermomécaniques.

En fait, les propriétés mécaniques sont également influencées par la durée, la vitesse et la fréquence des sollicitations.

La figure 4 identifie les principaux types de comportements des enrobés bitumineux, en fonction de l'amplitude de la déformation « $|\epsilon|$ », et le nombre des cycles de chargement appliqué "N" [Di benedetto 1990] :

- Pour des chargements de quelques centaines de cycles et des déformations de faibles amplitudes ($<10^{-4}$ m/m) le comportement est considéré, en première approximation, viscoélastique linéaire.

- À de faibles nombres de chargements et de déformations (quelques pour cent), on observe un comportement hautement non linéaire.
- Lors de chargements de plusieurs milliers de cycles et sous faibles déformations, plusieurs phénomènes d'endommagement apparaissent comme la fatigue du matériau.
- Des déformations irréversibles non négligeables se produisent pour des amplitudes de déformation proches de la rupture, quand des sollicitations déviatrices en contraintes sont appliquées à partir d'une contrainte nulle, l'accumulation de ces sollicitations produise « Un orniérage ».

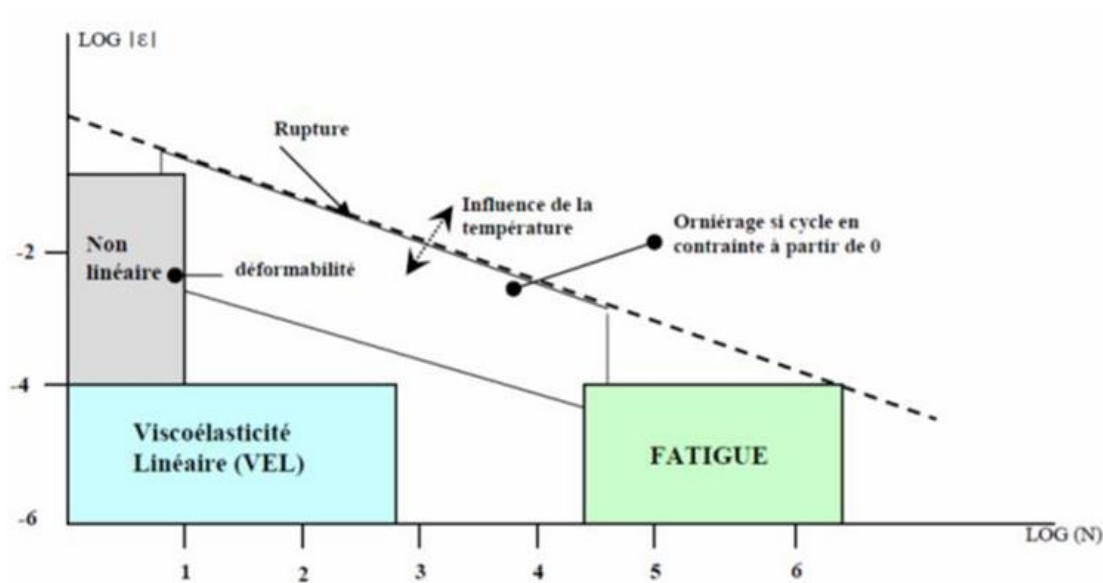


Figure I. 4: Schéma représentatif du comportement des enrobés bitumineux ; (ϵ : déformation, N : nombre de cycles de chargement) [Di benedetto 1990].

Le comportement des matériaux traités en liants hydrocarbonés, sont caractérisés par quatre propriétés mécaniques [Di benedetto 1990] qui sont :

- La rigidité ou le module complexe (comportement viscoélastique linéaire VEL).
- Le comportement à la fatigue.
- Le comportement à l'orniérage qui correspond à l'accumulation de déformations permanentes.

- Les fissures se forment et se propagent Les phénomènes de fissuration provoqués par l'apparition de contraintes liées aux variations de température, tels que la dilatation et/ou la contraction thermique, sont un élément crucial qui introduit un couplage thermomécanique.

I.6.3. Sensibilité à la température:

Du fait du comportement du liant, l'enrobé est aussi un matériau thermo-susceptible. En effet, le bitume a un comportement plastique de type fragile à basse température. De ce fait, sous l'effet conjugué des conditions climatiques et mécaniques de circulation des véhicules, la chaussée est susceptible de se fissurer.

Par conséquent, le liant bitumineux doit être le moins sensible aux phénomènes de fissuration thermique à basse température, et l'orniérage à haute température [Houel 2008].

De plus, l'enrobé bitumineux présente une rigidité élevée et il a un comportement visco-plastique de type fragile sous l'effet de trafic routier.

En revanche, l'enrobé bitumineux a un module de rigidité plus faible et donc une déformation plus élevée à haute température, son comportement est plastique du type ductile.

Enfin, des sollicitations répétées engendrent une perte de résistance sous forme de chaleur. Ainsi la température de l'enrobé bitumineux augmente au cours d'un essai de fatigue, ce qui a une incidence non négligeable sur la baisse du module de rigidité, sans pour autant être de l'endommagement.

I.6.4. Influence de la teneur en liant

La teneur en bitume affecte directement la compacité du mélange bitumineux, où on enregistre une augmentation du module de rigidité avec l'augmentation de cette teneur en liant jusqu'à une valeur maximale, et après cette limite le module de rigidité va diminuer [AIPCR 1999].

L'augmentation de la compacité (Et donc une diminution de la teneur en vides) conduit le mélange a présenté une rigidité plus élevée et la susceptibilité thermique devient plus faible [AIPCR 1999].

La température est généralement devenue, le paramètre principal affectant les matériaux bitumineux contre le phénomène d'orniérage, c'est-à-dire :

- À basse température, le bitume devient rigide, la cohésion des éléments devient aussi élevée, et par conséquent le mastic aide le mélange bitumineux à montrer une résistance élevée.
- À haute température, le bitume devient visqueux, la cohésion des éléments devient faible, une diminution significative de la résistance à la déformation de mélange granulaire et aussi le bitume, et donc le mélange bitumineux devient plus déformable.

I.7. Les liants hydrocarbonés

Les liants hydrocarbonés sont connus et utilisés par l'homme depuis environ 180 000 ans, lorsqu'ils sont en contact avec des particules, telles que des agrégats et du sable. Ils améliorent l'adhérence et la cohésion entre eux pour assurer une meilleure résistance aux déformations en compression, car ils sont constitués d'hydrocarbures, et donc essentiellement de carbone et d'hydrogène et présentent de faibles quantités d'oxygène, de soufre [Ait mokhtar 1994].

Ces liants se divisent en trois familles :

- Les liants naturels se trouvent en l'état dans la nature et plus souvent associés à des matières minérales. Ce sont des roches d'asphalte qui, après broyage, produiront de la poudre d'asphalte ainsi que du bitume naturel. Ils sont utilisés depuis des temps immémoriaux.
- Les goudrons qui proviennent de processus de génération de chaleur à l'abri de l'air (la pyrogénéation) de matériaux d'origine végétale comme lignite, bois et houille. Le goudron routier est principalement extrait de la houille.
- Les bitumes sont produits dans les raffineries à partir de la distillation partielle de certains pétroles bruts. Ils sont utilisés en technique routière pour leurs propriétés de liaison et d'étanchéité.

I.7.1. Origine et applications du bitume

Le bitume c'est une substance naturelle rencontrée dans certaines roches, aujourd'hui un produit industriel à forte valeur ajoutée, fabriqué à la demande à partir de certains pétroles bruts. Il n'y a pas un seul bitume, mais il y'en a plusieurs, d'où leurs constituants et leurs

caractéristiques reflètent celles des pétroles bruts dont ils sont issus, et des procédés techniques avec lesquels ils sont fabriqués [Corté 2004].

Grâce à leurs propriétés d'isolation thermique, acoustique et d'étanchéité, les bitumes sont utilisés dans l'industrie. De plus, les usages routiers sont les plus nombreux presque 90% de la production mondiale de bitume est utilisée comme des enrobés bitumineux [Corté 2004]. Comme illustré dans la figure 5 suivante :



Figure I. 5: Fragments de bitume provenant de gisements naturels au bord de la Mer Morte [Belkidar 2011].

I.8. Comportement des bitumes

Le bitume est un matériau thermoplastique, son comportement est celui [Murphy 2000]:

- D'un solide élastique pour un faible temps d'application de la charge et une basse température.
- D'un liquide visqueux pour un long temps d'application de charge et une haute température.
- D'un caractère viscoélastique pour les temps de charge et les températures intermédiaires.

Il est nécessaire de prendre en compte ces différents domaines pour préciser le comportement rhéologique global du matériau. Olard, proposa sous forme de graphique (Figure 6), de destituer

les principaux types de comportement des bitumes en fonction de l'amplitude de la déformation « ε » et de la température « T » pour une vitesse de déformation fixée [Olard 2003].

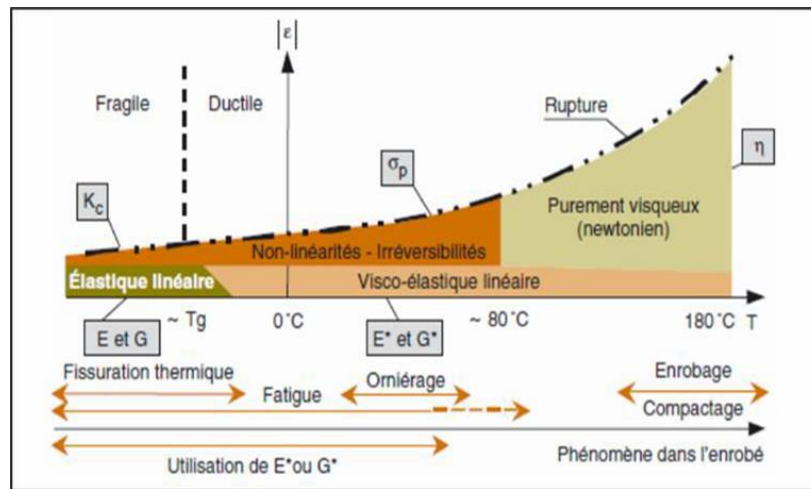


Figure I. 6: Présentation schématique des différentes classes de comportement des bitumes en fonction de $|\varepsilon|$ et de T [Olard 2003].

On note :

- Les domaines fragile et ductile, où la résistance à la traction σ_p peut être mesurée.
- La rupture fragile, qui peut être caractérisée par la ténacité K_c ou l'énergie de rupture G_c (Mécanique Linéaire de la Rupture).
- Le comportement élastique linéaire, caractérisé par les modules E et G .
- Le domaine viscoélastique linéaire, caractérisé par les modules complexes E^* et G^* .
- Le comportement purement visqueux (Newtonien), caractérisé par la viscosité η .
- Pour des déformations de l'ordre de quelques pour cent, le domaine où le comportement est fortement non linéaire.

La consistance du bitume peut varier en fonction de la saison ou de la journée, en fonction des conditions climatiques de chaque région. Les états intermédiaires, qui appartiennent au domaine viscoélastique, peuvent également varier. Une série de tests connexes pour évaluer les caractéristiques importantes correspondantes présenté dans le tableau 2 [Di benedetto 2004]:

Tableau I. 2 : Plages de température des sollicitations mécaniques et essais correspondants
[Merbouh 2010]

Phénomène	Fissuration Fragilité	Fatigue thermique et mécanique	Orniérage	Fabrication et Mise en œuvre
Marge de température (°C)	Basse -20	Moyenne +20	Elevée +60	Très élevée 130 à 180
Essais technologiques	Fraass	BBR – Pénétrabilité	TBA-IP-Pfeiffer	RTFOT
Essais mécaniques	Traction SHRP Mod. Complexe /angle de phase	Tract. Directe Mod. Complexe /angle de phase	Viscosité à 60°C Mod. Complexe /angle de phase	Viscosité à 60°C RTFOT Mod. Complexe /Angle de phase

De plus, les besoins en matériaux dépendent des phases considérées [Merbouh 2010] :

- Le bitume doit être dans un état contrôlé par des marges de viscosité pendant les phases de fabrication et d'exécution ;
- Lorsqu'il est malaxé, le mélange bitumineux à une température comprise entre 160 à 180°C doit avoir une consistance moyenne avec une viscosité de l'ordre de 2 Pa.s ;

Lorsqu'il est mis en place, il est suffisamment gérable pour assurer l'arrangement de mélange souhaité (densité) ;

Dans la chaussée bitumineuse :

- À des températures élevées, les propriétés souhaitables sont liées à la résistance aux déformations permanentes (l'orniérage).
- À température moyenne, l'objectif est la résistance à la fissuration par fatigue.
- À basse température, les performances requises sont liées à la fissuration fragile.

I.9. Conclusion :

Ce chapitre décrit une étude bibliographique sur les routes, notamment les différents types de corps de chaussées, les compositions des chaussées souples et les enrobés bitumineux, ainsi que leur dégradation. Il souligne l'impact de facteur température sur la durabilité de ces matériaux. La recherche vise à améliorer la résistance des enrobés par l'ajout d'additifs, afin d'obtenir des matériaux plus performants, notamment en termes de cohésion, d'adhérence et de résistance

thermique. L'importance de comprendre l'influence de la température sur le comportement thermomécanique des mélanges bitumineux est également mise en avant, avec une attention particulière aux cycles thermiques, pour mieux anticiper leur impact sur la durabilité des chaussées.

**CHAPITRE II: MODIFICATION
DES MELANGES BITUMINEUX
PAR LES DECHETS
PLASTIQUES**

II.1 Introduction

Ce chapitre aborde les problèmes environnementaux liés à la production massive de déchets, notamment plastiques, issus de la croissance démographique et industrielle. Ces déchets, non biodégradables, posent des risques écologiques et esthétiques, notamment lorsqu'ils sont mis en décharge ou incinérés. Face à cela, la valorisation des déchets plastiques dans la construction, notamment pour la fabrication de routes, apparaît comme une solution durable, permettant de réduire la pollution tout en améliorant la résistance des infrastructures routières. Des recherches ont été menées pour intégrer ces déchets dans les mélanges bitumineux, notamment dans des zones aux températures extrêmes, comme le sud de l'Algérie, afin de garantir la performance des routes à différentes températures. L'évolution des techniques de modification des mélanges bitumineux contribue à répondre aux défis liés à l'augmentation du trafic routier et aux conditions climatiques variées.

II.2 Généralités sur les matières plastiques

II.2.1. Définition de la matière plastique

Les matières plastiques sont des matériaux obtenus par polymérisation de composés (éthylène, propylène, styrène...) issus principalement du vapocraquage d'hydrocarbures eux-mêmes provenant de la distillation du pétrole. Il en existe de très nombreux types qui se présentent sous des formes variées. Leur production a connu un développement considérable à partir de la deuxième partie du XXème siècle. Il est souvent fabriqué à partir de molécules monomères (hydrocarbures) provenant de source pétrolière (4% du pétrole brut est investi dans la production de plastique) ou gazières. Lorsque ces molécules hydrocarbures polymérisent, ils produisent des polymères complexes ; les additifs ajoutés à la résine de base pour former le plastique contribuent à lui conférer des caractéristiques spécifiques (voir figure II.1).

Le plastique a plusieurs problèmes associés à son élimination. Car, très légèrement, le plastique s'est envolé au premier coup de vent, se dispersant au bord de la route et la verdure.

Un sac en plastique, une bouteille ou un plat en polystyrène peuvent durer des centaines d'années. Le plastique est un désastre s'il n'est pas recyclé. Si tel est le cas, dans la grande majorité

des cas, le plastique finit en décharge ou incinéré. La mise en décharge a été interdite et l'incinération est devenue plus difficile [Christophe 2003].

Plus de 90% de la production mondiale se compose des cinq familles de plastiques suivantes:

- Polyéthylène (PE) comprend le polyéthylène à basse densité (LDPE) et le polyéthylène à haute densité (HDPE) ;
- Polypropylène (PP) ;
- Chlorure de polyvinyle (PVC) ;
- Polystyrène solide (PS) et polystyrène expansé (PSE) ;
- Polyéthylène téréphtalate (PET) fabriqué.

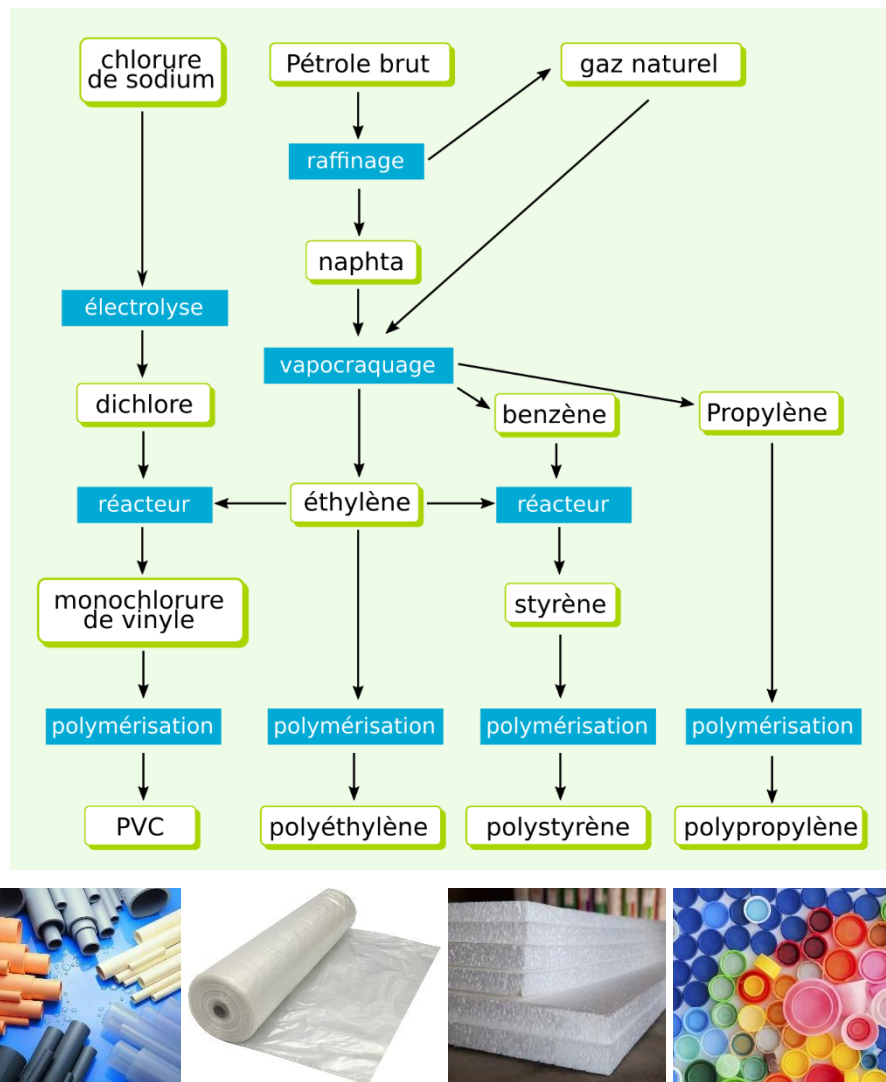


Figure II.1: Procès de fabrication de matière plastique

II.2.2. Différents types de plastique (Polymère) :

Dans la science de matières, les polymères peuvent être classés selon différents paramètres, la structure, l'origine soit naturel tels que les polymères végétaux, ou industriel comme étant mentionné précédemment.

Mais le paramètre le plus important pour l'utilisation de ces polymères que ce soit dans la fabrication des plastiques ou la modification des enrobés c'est le comportement thermique :

Trois grandes familles de polymères peuvent être distinguées : les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères.

A- Les thermoplastiques

Les polymères composés de chaînes macromoléculaires linéaires ou avec ramifications sont désignés sous le terme thermoplastiques.

Sous l'effet de la chaleur, les chaînes de ces polymères glissent les unes par rapport aux autres. Le polymère se ramollit, peut se déformer et être mis en forme. Après refroidissement, la forme donnée est figée. Cette opération peut être répétée : à nouveau chauffé, le polymère redevient malléable et peut être remis en forme. Exclusivement possédée par les polymères thermoplastiques, cette caractéristique permet la recyclabilité de ces matières.

Dans cette catégorie se trouvent les polymères suivants :

- Le polycarbonate : PC (verre organique)
- Les polyamides : PA (Nylon)
- Les styréniques : PS, PSE
- Les polyoléfines : PE, PP
- Les vinyliques : PVC

B- Les thermodurcissables

Les polymères réticulés (contenant des noeuds entre les chaînes macromoléculaires) ou en réseau constituent les thermodurcissables.

A l'inverse des thermoplastiques, la mobilité thermique est réduite. Plus la température est élevée, plus les chaînes tridimensionnelles se figent ; les liaisons ou nœuds se renforcent. L'opération est irréversible. Le polymère se rigidifie dès la première transformation jusqu'à se dégrader si la température continue d'augmenter.

Dans cette catégorie se trouvent les polymères suivants :

- Les phénoplastes
- Les polyépoxydes
- Les polyuréthanes : PU
- Les silicones

C- Les élastomères

Les élastomères sont caractérisés par leur grande déformabilité (6 à 8 fois leur longueur initiale).

Ils sont obtenus à partir de polymères linéaires caractérisés par des liaisons extrêmement faibles. Ces polymères sont donc des liquides très visqueux. Pour être utilisés comme caoutchouc, des liaisons pontales (nœuds de réticulation) doivent être introduites entre les chaînes, conférant ainsi aux matériaux une structure tridimensionnelle qui assure la réversibilité de la déformation mécanique. Les nœuds de réticulation sont introduits par une réaction chimique appelée vulcanisation après la mise en forme du matériau.

Dans cette catégorie se trouvent les polymères suivants :

- Le polyisoprène : NR (caoutchouc naturel)
- Le polyisoprène de synthèse : IR
- Le polychloroprène (Néoprène)
- Les polysiloxanes (silicones)

II.2.3. Types de destinations possibles pour les déchets plastiques :

Les déchets résultant de l'utilisation du plastique ont quatre destinations finales (Figure II.2):

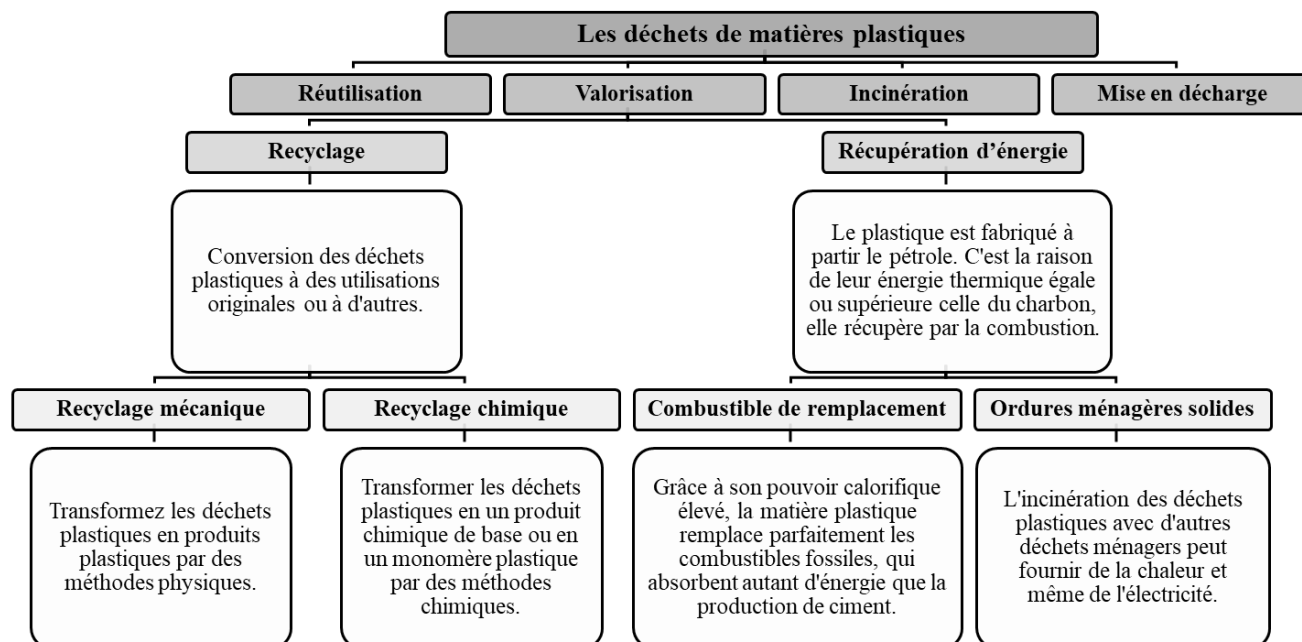


Figure II. 2: La gestion des déchets plastiques [Caubergs 2001].

A- Recyclage des déchets plastiques

Le recyclage du plastique doit être pris en compte dans tout plan de gestion des déchets plastiques. En plus de réduire la quantité de déchets plastiques dans les décharges, cela peut également apporter une contribution significative à la conservation des matières premières pétrochimiques et aux économies d'énergie, les étapes de recyclage sont représentées sur la figure II. 3 [EPA 1991].

Selon les rapports de Rebeiz, il existe actuellement plusieurs contraintes techniques et économiques qui limitent le recyclage complet et efficace des déchets plastiques en produits utiles:

- La contamination des déchets plastiques par des déchets organiques et d'autres matériaux tels que les métaux peuvent endommager les équipements utilisés pour le recyclage ;
- Le plastique n'est pas un matériau homogène comme l'aluminium ou le papier, mais se compose d'un grand nombre de qualités avec différentes propriétés et structures moléculaires, chaque composant plastique (dans les déchets mélangés) a un comportement de fusion, une rhéologie et une stabilité différents ;
- Les déchets plastiques sont souvent de densité faible. Par conséquent, ils sont souvent compressés ou broyés avant l'expédition afin de réduire les coûts de transport.
- L'approvisionnement en déchets plastiques est souvent inégal [Rebeiz 1995].



Figure II. 3: Les étapes du recyclage [site web 2].

B- Les avantages des recyclages des déchets plastiques

Les avantages de de recyclage des déchets plastiques sont :

- Les déchets de recyclage contiennent par exemple des scories vitrifiées qui peuvent être utilisées pour l'enfouissement ou pour la construction de routes ;
- Dans les cendres vitrifiées, les minéraux sont liés de manière à ne pas diffuser dans l'environnement ;
- La réduction de l'espace de décharge ;
- Diminution des émissions des gaz des décharges et des incinérateurs.

C- Les inconvénients des recyclages des déchets plastiques

- Obligation de tri ;
- Absence de filières de recyclage ;
- Coût de la main-d'œuvre élevés à échelle mondiale ;
- L'augmentation de la cadence de production ;
- Nécessite l'ajout d'un liant (10%) ;
- Pollution de l'air et Nocivité (dégagement de gaz dangereux).

II.3 Polyéthylène téréphtalate

Par définition, le polyéthylène téréphtalate (PET) est un polycondensat de la famille des polyesters aromatiques, sa structure chimique est représentée sur la figure II. 4

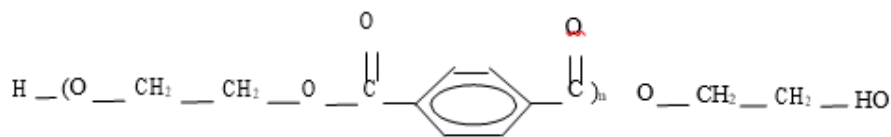


Figure II. 4 : Formule développée du polyéthylène téréphtalate.

Le polyéthylène téréphtalate peut être obtenu sous deux structures différentes [Chaffraix 2002].:

- Structure totalement amorphe lorsque le PET passe brutalement de l'état fondu à l'état solide;
- Structure semi-cristalline lorsque le PET est lentement refroidi, le taux de cristallisation maximum est alors de 50% à 60% ;

Le PET possède des caractéristiques spécifiques qui sont [Medjdoub 2011]:

- Transparence ;
- Brillance ;
- Une bonne résistance aux chocs ;
- Cristalline, légèreté, solidité et longue durée de vie ;
- Une bonne résistance à la traction ;
- Meilleure résistance aux pressions et aux gaz.

II.3.1. Propriétés physiques et thermiques du PET

La cristallinité affectera directement les propriétés physiques et thermiques du PET. Par conséquent, le PET amorphe se comporte différemment du PET semi-cristallin. Le tableau ci-dessous (Tableau II. 1) répertorie certaines des propriétés du PET, qui varient selon la structure cristalline considérée [Chaffraix 2002].

Tableau II. 1: Propriétés physiques et thermiques du PET [Rule 1987].

Caractéristiques	PET amorphe	PET semi-cristallin
Masse volumique (g/cm ³)	1.335	1.455 – 1.515
Transition vitreuse (°C)	67	81 – 125 (orienté)
Indice de réfraction (°C)	1.576 (25°C)	1.64 (23°C)
Température de fusion (°C)	/	260°C

II.3.2. Propriétés chimiques du PET

Le PET possède une excellente résistance chimique aux acides concentrés et dilués, aux cétones, aux graisses et aux huiles, mais s'hydrolyse en présence des produits alcalins [Gouissem 2007] [Medjdoub 2011].

II.3.3. Propriétés mécaniques du polyéthylène téréphtalate

La structure du matériau (amorphe ou semi-cristallin) ainsi que ces caractéristiques mécaniques dépendront du traitement thermique appliqué au PET.

Pour les contraintes de traction uni-axiales, cinq modes de déformation peuvent être définis [Stearne 1969], dont chacun est utilisé pour augmenter la température d'essai :

- Comportement fragile (Figure II. 5. a) ;
- Comportement ductile homogène (Figure II. 5. b) ;
- Comportement ductile avec striction instable (Figure II. 5. c) ;
- Comportement ductile avec striction stable (étirage à froid) (Figure II. 5. d) ;
- Comportement caoutchoutier (Figure II. 5. e).

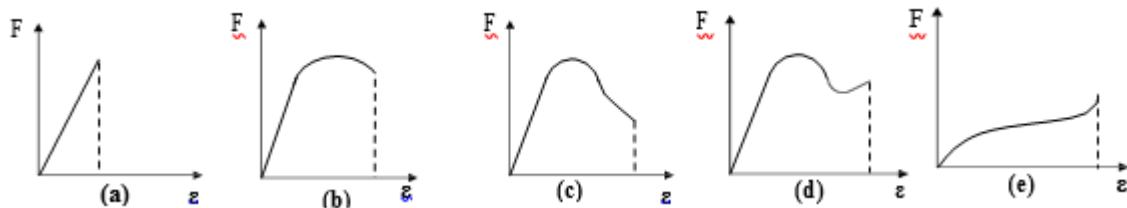


Figure II. 5: Représentation schématique des différents modes de déformations du PET amorphe en traction uni-axiale [Stearne 1969].

II.4 La modification des mélanges bitumineux

L'amélioration des caractéristiques des chaussées souples routières s'avère indispensable devant la croissance des trafics et les performances des véhicules de plus en plus exigeantes.

Cette amélioration s'est développée par l'introduction de nouvelles techniques et procédés de modification des produits bitumineux [Saoula 2010]. La modification est définie comme étant

une modification dans les propriétés rhéologiques pendant la fabrication par l'emploi d'un ou plusieurs agents chimiques.

Dans ce contexte, le terme agent chimique comprend le caoutchouc naturel, les polymères synthétiques, le soufre et certains composants organométalliques, mais pas l'oxygène, ou ces divers produits tels que les chlorures ferriques ... etc. qui ne sont pas considérées comme modificateurs du bitume.

Les polymères sont l'un des modificateurs les plus importants pour améliorer les performances de bitume et les mélanges bitumineux en général. Ils augmentent la plage de température dans laquelle, l'enrobé bitumineux peut résister à l'orniérage des roues et à la fissuration thermique, ainsi que sa durabilité vis-à-vis la fatigue [Zoorob 2000] [Tayfur 2007].

La première apparition d'un bitume-caoutchouc revient à l'année 1939 et fut fondamentale dans la journée d'étude des bitumes-caoutchouc organisée par LCPC en mai 1964. Mais ce développement de la modification significatif avec des processus industrialisés pendant les années 70 en Europe, particulièrement en Allemagne.

En Italie et dans la même période, apparut une chaussée autoroutière avec un revêtement constitué de mélanges bitumineux à base de polyéthylène introduit lors du malaxage.

L'augmentation progressive du trafic routier d'une part, ainsi que les crises pétrolières de 1973 puis de 1979 d'autre part a constitué des facteurs essentiels du développement des liants modifiés. En effet, la recherche d'économie des projets de construction et également dans le domaine routier, a conduit à rechercher des solutions innovantes en particulier dans le domaine des couches de roulement avec des revêtements réduits en épaisseur (< 5 cm).

À l'époque moderne, la première utilisation de ces polymères dans le renforcement des fibres du polymère a commencé au début des années 1990 [Tapkin 2009].

Des certains nombres d'études [Flynn 1993] sont menées récemment pour la recherche de matériaux bitumineux améliorés utilisant des déchets plastiques.

L'Inde, l'Irlande et le Royaume-Uni sont les pays les plus expérimentés dans la recherche de nouvelles applications pour les déchets plastiques, y compris leur utilisation dans les enrobés. En Inde, l'utilisation de déchets plastiques dans la construction de chaussées flexibles a commencé en 2000 [Casado 2014].

Pour préparer un enrobé modifié, il existe deux principaux procédés. Le polymère peut donc être ajouté directement au liant, ce qui donne un Bitume Modifié par Polymère "BMP" qui peut ensuite être pratiquement utilisé comme bitume "pur". Ce processus est appelé « La voie humide ». En parallèle, certains modifiants, sont ajoutés dans la centrale d'enrobage en même temps que les agrégats. Ce type de processus est appelé « la voie sèche », cas de cette étude. Dans cette méthode, le bitume et les polymères n'acquièrent pas la morphologie du liant modifié. Le comportement des modifiants dépend soit de la modification de la structure granulaire, soit du bitume.

II.4.1. Les objectifs de la modification

Il existe plusieurs objectifs pour modifier le bitume et l'enrobé bitumineux. De plus, il s'agit de modifier le comportement thermique, celui de maintenir une consistance suffisamment élevée à haute température pour éviter le ressuage et l'orniérage, et de réduire la fragilité à basse température pour éviter la fissuration et le désenrobage.

Ces objectifs dépendent également des domaines d'application et des technologies envisagées [Brulé 1986].

- Enduits superficiels comme les enrobés ultra-minces (1-2 cm) ou très minces (2-3 cm)
 - Amélioration de la résistance sous les sollicitations de traction et de cisaillement ;
 - Assurer la durabilité ;
 - Eviter le ressuage ;
 - Améliorer l'adhésivité/tenue à l'eau.
- Enrobés ouverts
 - Améliorer les propriétés anti-dérapantes ;
 - Augmenter la viscosité aux températures d'application.
- Enrobés à chaud épais (> 5cm), enrobés minces (3 à 4cm)

- Assurer la résistance à l'orniérage ;
- Améliorer le comportement à basse température ;
- Améliorer le comportement à la fatigue.
- Couche d'assise de chaussée
 - Augmenter la résistance à la fatigue sous les chargements répétés du trafic ;
 - Apport d'une certaine flexibilité.
- Renforcement des chaussées
 - Minimiser l'épaisseur du rechargement.
- Membranes anti-fissures, imperméable
 - Augmenter la capacité d'allongement.

II.4.2. Modification des bitumes

Afin d'améliorer les caractéristiques des bitumes traditionnels qui ne répondent plus aux exigences actuelles, les polymères ou les déchets polymériques recyclés s'avèrent être des agents modifiants efficaces. Mais des conditions sont nécessaires pour optimiser cette modification.

Un liant modifié est un liant bitumineux qui a été modifié par l'utilisation d'un agent chimique qui, dans le bitume de base, modifie sa structure et/ou ses propriétés physiques et mécaniques.

Après la compatibilité entre le bitume et le polymère ou le déchet de plastique en général, on obtient un mélange homogène, car ces additifs donnent de bonnes propriétés mécaniques au mélange.

Cette compatibilité est liée à la stabilité de la structure colloïdale et la composition chimique de liant bitumineux. [Brulé 1986]. Pour cette raison, un polymère n'est compatible avec le bitume que s'il peut au moins gonfler ou mieux soluble dans la partie huileuse du maltène.

La température de mélange bitume/polymère ou déchet plastique est comprise entre 150°C et 200°C, et peut être supérieure selon l'agent modificateur utilisé. Le temps de malaxage varie de quelques minutes à quelques heures. Le temps de malaxage optimal est atteint lorsque les propriétés souhaitées du bitume et du modificateur sont atteintes.

Cette modification introduite dans les bitumes peut entraîner de diminution de déformations permanentes à haute température, meilleure résistance à la fissuration à basse température et meilleure tenue de l'enrobé lorsqu'il est utilisé sous de fortes charges répétées, ces améliorations doivent être permanentes.

L'utilisation des déchets du plastique pour modifier le bitume aide aussi à l'amélioration des caractéristiques du BMP, la susceptibilité thermique, les propriétés visqueuses, et les propriétés de recouvrance élastique. Avec une bonne compatibilité et une bonne cohésion au niveau microscopique [Karmakar 2016].

La modification du bitume par déchets de plastique améliore également les caractéristiques de la construction routière, il réduit : l'orniérage car il augmente le point de ramollissement, la fissuration et le nid-de-poule [Bishnoi 2017].

II.4.3. Modification des enrobés bitumineux

Elle consiste à introduire le polymère ou le déchet plastique directement au malaxeur de la poste d'enrobage avec le bitume et les granulats pour la fabrication de l'enrobé à chaud.

Ce processus possède également quatre autres qualités [SETRA 1987] :

- La simplicité de dosages des déchets solides dispersés en doses prêtes à l'emploi, sans changement de bitume ;
- Facile à utiliser ;
- Efficacité et effet puissant à faibles doses ;
- Prix pas cher, inférieur à celui de bitume conventionnel.

Dispersé au contact des granulats chauds, il fond et adhère au minéral. Le bitume, injecté ensuite, enveloppe l'ensemble et attaque légèrement la surface des particules du polymère. La réaction est d'autant plus rapide et plus poussée que la masse moléculaire ou la densité du polymère est plus basse. Lors de la phase de refroidissement, les polymères cristallisent pour se disperser, ce qui peut être plus ou moins homogène. Des enrobés avec un liant "composite" sont utilisés pour les former [Serfass 2000].

La modification des enrobés peut également être effectuée à l'aide de déchets plastiques. Cela peut entraîner trois effets en fonction de leurs propriétés chimiques, de leurs propriétés physiques et de leur taille (Figure II. 6) [Bense 1983] :

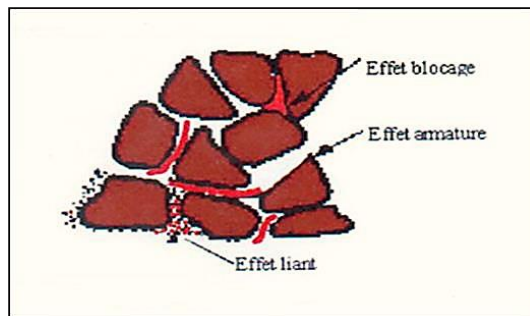


Figure II. 6: Effets de l'addition de déchets plastiques dans les enrobés [Bense 1983].

- Effet sur l'adhésif dû à une augmentation de la viscosité du bitume due à la dissolution proprement dite de certains matériaux ou à la dispersion à l'état fondu ;
- L'effet de renforcement provoqué par les fibres ou les morceaux plastique reste rigide et long pour construire des ponts l'intérieur de la structure granulaire ;
- Effet de blocage dû au fait que la résine est temporairement ramollie pendant l'exécution, de taille courte et thermoformée lors de la compression pour combler les vides de la structure granulaire.

Ces trois effets, individuellement ou en combinaison, conduisent à un mélange d'hydrocarbure moins sensible à la température et donc moins sensible à la déformation de fluage.

II.5 La modification par le polyéthylène téréphtalate (état de l'art) :

La consommation mondiale de bouteilles en PET s'élève à près de 20 millions de tonnes en 2013 et augmente à un taux stupéfiant de 15 % par an [Yao 2014]. Dans le même temps, le taux de recyclage de la bouteille en PET est faible, à peine 29,3 % [Frigione 2010] [Miller 2012].

L'utilisation du PET crée des problèmes environnementaux à cause de sa courte durée de vie et de sa faible biodégradabilité. Pour surmonter la menace de pollution des plastiques en général, et des déchets de bouteilles en PET en particulier, des canaux de réutilisation des déchets de PET sont explorés là où pourraient être utilisés en grandes quantités. L'une de ces voies de

réutilisation des déchets de PET a été l'industrie routière où il peut être utilisé comme additif aux enrobés bitumineux ou comme substitut aux granulats fins [Ahmadinia 2012] [Moghaddam 2012]. Par conséquent, l'utilisation de ce type de déchets dans la construction de chaussées souples et la réhabilitation de routes permettrait d'éliminer plusieurs millions de tonnes de déchets de PET du flux de déchets, ce qui aurait des effets positifs sur l'environnement, tels que la diminution de la pollution et des charges environnementales dues aux émissions de gaz à effet de serre et aux déchets plastiques, la réduction des problèmes de drainage dus aux réseaux de drainage obstrués par les déchets de PET, l'augmentation de la durée de vie des décharges et la conservation des ressources naturelles utilisées dans l'enrobé bitumineux, comme le bitume, et l'amélioration des performances des routes.

Selon Kakar et al, dans les pays développés, des réglementations et des mesures de surveillance sont mise en place pour faire respecter l'utilisation des déchets PET par les entreprises de construction routière, des règlements similaires mis en place au Royaume-Uni [Kakar 2015]. Selon Lo Presti, La Californie exige 35 % de la composition des pneus caoutchoutés dans le poids total de bitume pour les routes bitumineuses [Presti 2013]. L'utilisation des déchets de polyéthylène téréphtalate dans la construction industrielle et les projets de production a également été soutenue par Ahmadinia et al [Bensbaa 2003]. Depuis 2019, en Australie, des tronçons d'essai de routes sont construits avec des déchets, y compris des déchets de plastique PET [Mashaan 2021].

La proportion (0,2 à 1% en poids du granulat) de la teneur en PET a été utilisée par Al-shalout et al [Al-shalout 2007], tandis que la teneur en bitume était de 5 à 7%, un test de fluage dynamique (FD) a été effectué, les auteurs ont rapporté les effets de différents pourcentages de ces déchets plastiques pour 250 kPa, 350 kPa et 450 kPa, respectivement. Par conséquent, le FD a augmenté directement avec l'augmentation de la teneur en PET. Les résultats peuvent montrer que les mélanges modifiés par les déchets de PET ont moins de frottement interne que les échantillons ordinaire (sans modification de déchet plastique).

L'ajout de PET au bitume a amélioré le point de ramollissement ainsi a démunie la pénétration. La résistance du liant à la chaleur a augmenté lorsque le point de ramollissement a été augmenté [Abdelaziz 2010]. Il a été établi que le PET peut être utilisé comme liant bitumineux

modifié et offrir une meilleure résistance aux déformations permanentes en raison de son $G^*/\sin\alpha$ plus élevé et de son point de ramollissement plus élevé par rapport aux liants purs.

Ahmadinia, a déterminé l'effet de l'incorporation de PET (2 à 10%) sur le mélange bitumineux et ses propriétés. L'auteur a conclu que les valeurs de stabilité ont augmenté après l'ajout de PET jusqu'à atteindre un niveau maximal, qui était d'environ 6% du PET utilisé, puis ont commencé à diminuer [Ahmadinia 2011]. Le seul mélange qui présentait une valeur de stabilité inférieure était le 10% de PET. L'ajout de la quantité optimale de PET, soit 6%, au mélange a augmenté le SM du mélange de PET de 4,5%.

Moghaddam, a aussi utilisé des déchets de bouteilles en PET dans différents pourcentages de 0,2 à 1% en poids de particules d'agrégats. Les auteurs ont conclu que l'incorporation de bouteilles PET usagées jusqu'à 0,6% de plastique dans l'enrobé bitumineux augmente le SM ; cependant, une teneur en plastique plus élevée réduit le MS. Ce résultat précise que l'incorporation de déchets de bouteilles en PET a amélioré l'adhérence entre les particules de granulats et le bitume. L'auteur a déterminé qu'avec la teneur croissante en PET, la rigidité de l'échantillon diminue [Moghaddam 2013].

D'après [Rahman 2013], les enrobés bitumineux modifiés ont été produits à partir d'un concentré de contenu de palette PET recyclée compris entre 5 et 25% du poids du mélange bitumineux avec une taille de tamis de 2,36 mm à 1,18 mm et 5 % du poids du contenu de bitume. L'ajout de PET recyclé aux mélanges bitumineux n'a aucun effet sur la rigidité des propriétés de bitume. L'ajout de 20% de PET recyclé à un mélange bitumineux a permis de réduire la déformation de 40% (par rapport au poids total du bitume).

Ziari et al, visent à évaluer les effets de l'utilisation de déchets de polyéthylène téréphtalate sur les caractéristiques des enrobés bitumineux [Ziari 2016]. La performance d'orniérage des mélanges bitumineux qui comprennent divers pourcentages de PET (0, 0,25, 0,5, 0,75 et 1%) et diverses tailles de PET (10 × 2,5, 20 × 2,5 et 30 × 2,5 mm). Les résultats ont indiqué que la résistance vis-à-vis l'orniérage des mélanges augmente avec l'addition de contenu de PET. Avec l'augmentation des dimensions de PET, les déformations permanentes des enrobés bitumineux va diminuer. Avec l'augmentation de la charge dynamique, les contraintes produites ont été absorbées par les particules de PET, ce qui a entraîné un retard dans le phénomène d'orniérage.

D'après Ameri, a utilisé différents pourcentages de déchets plastiques de 4 à 10% du pourcentages total en poids d'agrégat dans les enrobés bitumineux à des températures de 25 et 40°C [Ameri 2017]. Le mélange d'enrobé modifié contenant 8 % de plastique présente le MR le plus élevé, ce qui est presque le double du mélange d'asphalte normal. L'essai est répétitif sur le béton bitumineux, et l'orniérage se produit à des teneurs en plastique comprises entre 4 et 10%. Les résultats ont montré que le module de fluage augmente avec une proportion croissante de plastique jusqu'à 8%. Par conséquent, les plastiques peuvent augmenter la rigidité du mélange jusqu'à le pourcentage optimal et diminuer avec l'augmentation supplémentaire de ce déchet. Le fluage maximum est de 72.95 MPa après une utilisation de 8% de plastique. Le facteur de fluage le plus bas est de 24,87 MPa pour 4% de plastique, ce qui est inférieur de 5% aux mélanges bitumineux normaux. Les mélanges d'enrobé ordinaire ont la plus faible rigidité, soit 8,53 kN/mm. La rigidité des mélanges PET a été augmentée de 539,5% lorsqu'une quantité optimale de PET, soit 6%, a été ajoutée au mélange.

Jan et al, ont signalé que la température influe sur ITSR des échantillons. A cet effet, Les auteurs ont testé les spécimens à 5 et 20°C [Jan 2017]. L'ajout de 2% de PET a augmenté la ITSR aux deux températures d'essai. De plus, la ITSR diminuait constamment avec l'ajout de la teneur en PET. En raison de la teneur plus élevée en PET, le bitume s'accumule sur la surface externe des particules de plastique. La ITSR du mélange PET a augmenté de 13,1%.

D'après Badejo, le PET a été utilisé comme modificateur dans des proportions variables (2 à 10%) en fonction du poids de bitume [Badejo 2017]. Les valeurs de MR des mélanges comprenant du plastique étaient généralement plus élevées que les mélanges ordinaire (0% PET), et les résultats obtenus ont montré que le MR était maximisé par l'ajout de 6% de PET et atteint une valeur maximale de 16% du MR. En outre, la valeur de la profondeur des ornières augmente fortement au cours des 15 premières minutes, après cela, l'augmentation ralentit et diminue. Après 45 min, les profondeurs d'orniérage pour les mélanges contenant 2 à 10% de PET respectivement étaient de 1,78, 1,50, 1,25, 1,35, 1,62 et 1,56 mm, par rapport aux mélanges contenant 4% de plastiques. La profondeur d'orniérage minimale a été obtenue avec une réduction de 28% de la profondeur des ornières par rapport aux formulations normales.

Dans cette recherche [Silva 2018], La dimension de PET fine a été utilisé comme additif pour les enrobés bitumineux. Le déchet plastique a été mélangé dans des quantités de 4, 5 et 6% en poids total du granulat, et des essais mécaniques ont été réalisés. Deux méthodes de conception d'enrobés SUPER-PAVE ont été réalisées. La première a été réalisé avec du bitume pur et la teneur optimale en liant a été déterminée et les éprouvettes ont été analysées selon les paramètres suivants : le (MR), et la ITSr. Une deuxième procédure de conception de mélange a été réalisée avec la teneur optimale en PET selon les meilleurs résultats obtenus dans la première et analysée selon les essais MR, la ITSr, Fatigue et fluage. Les résultats montrent des améliorations significatives sur les propriétés mécaniques des enrobés avec PET fin par rapport aux enrobés sans additif. Les enrobés bitumineux utilisant le liant modifié PET fin ont connu une amélioration de 25% de la durée de vie en fatigue par rapport aux enrobés ordinaires, ce qui contribue à augmenter la durée de vie en réduisant la fissuration par fatigue. Selon les résultats, il est possible de conclure que les déchets de PET fine améliorent le comportement mécanique des enrobés bitumineux. L'ajout de PET fin au liant bitumineux a augmenté le paramètre de ITSr, de résistance aux dommages causés par l'eau, de durée de vie à la fatigue et de MR.

La présente étude de Choudhary, a porté l'effet de l'incorporation de déchets de bouteilles PET broyées sur les propriétés des enrobés bitumineux en termes de : (i) processus d'ajout de PET, (ii) teneur en PET et (iii) Taille du PET. La conception expérimentale comprenait trois variables : deux procédés (procédé à voie sèche et procédé à voie sèche modifié), trois teneurs en PET (2,5, 5 et 7,5% en poids de liant) et deux tailles de PET (2,36 – 1,18 mm et 0,30 – 0,15mm). Le procédé à la voie sèche modifié a produit une stabilité Marshall plus élevée que le procédé à voie sèche pour tous les contenus et toutes les tailles de PET [Choudhary 2018]. Jusqu'à une teneur en PET de 5 %, la stabilité des mélanges modifiés au PET fabriqués par les deux procédés était nettement plus élevée que celle du mélange témoin. En général, les mélanges modifiés au PET ont montré une plus grande résistance à la déformation avec une plus grande SM, un fluage plus faible et un QM plus élevé que le mélange témoin. Dans l'ensemble, les mélanges modifiés au PET produits par le procédé à voie sèche modifié avec une dimension de PET plus grossière (2,36-1,18 mm) ont montré des performances comparativement supérieures en termes de volumétrie, de paramètres Marshall et de ITSr que les enrobés modifiés par la dimension fine fine. Lorsque 12% de PET broyé par un poids total de bitume a été préchauffé à 300°C et utilisé comme agrégat, un mélange à 5,1% montre

que le quotient de Marshall a considérablement augmenté par rapport à un mélange standard de calcaire à 5,9% de bitume [El-Naga 2019].

II.6 Etat de l'art sur l'effet des cycles thermiques

Les chaussées bitumineuses sont influencées par deux principaux types de sollicitations : les sollicitations mécaniques dues aux poids lourds et les effets climatiques [Badeli 2018]. Les changements climatiques actuels, tels que les changements soudains de température, produite sur les couches de surface des cycles gel/dégel sévère en hiver ou dans les régions froides [Karen 2005]. En été ou dans les régions chaudes, le phénomène d'échauffement/refroidissement provoque un durcissement du liant et donc de la chaussée [Merbouh 2012] [Glaoui 2011]. Le facteur thermique régional et son instabilité, dans une même journée, jouent un rôle important dans l'évolution des propriétés viscoélastiques du bitume. Aussi, le changement rapide et répété de température dû au jour et à la nuit crée un cycle thermique d'usure marquant une dégradation accélérée dans la chaussée, qui se manifeste au fil du temps par une rigidité accrue, une fragilité ou un orniérage.

Les températures extrêmes dont les variations de température quotidiennes et saisonnières sont très importantes comme dans notre région où la température régnant dans la route peut atteindre 65°C, avec un écart durant la nuit de 30°C. En hiver, la température nocturne peut atteindre des valeurs négatives, voire inférieures à -10°C dans les zones froides et les hauts plateaux. Le béton bitumineux est un matériau sensible aux sollicitations thermiques et perd ainsi sa viscoélasticité linéaire dans des conditions extrêmes. Pendant l'exploitation de la chaussée, les changements de température peuvent provoquer des contraintes thermiques très élevées dues à un retrait ou une dilatation limitée

À basse température, le matériau devient plus élastique, plus fragile et tend à se fissurer, la contrainte résultante ne peut pas être dissipée et le mélange ne peut pas résister à la contrainte qui provoque le retrait et la fissuration [Huang 2004]. À haute température, il devient susceptible de subir des déformations permanentes (fluage), les contraintes thermiques génèrent de grandes déformations irréversibles (orniérage) et parfois l'enrobé ne peut plus résister aux contraintes de traction créées par les effets de la dilatation empêchés (fissuration) et entraîne ainsi la défaillance de la chaussée souple [Lytton 1983] [Si 2013].

Le liant bitumineux présente des propriétés visqueuses à des températures extrêmes et des propriétés élastiques à basses températures. La déformation permanente du béton bitumineux se produit en raison de l'écoulement visqueux après qu'il a soumis à des charges répétitives [Nicholls 1998]. La qualité et la structure des agrégats ainsi que la conception appropriée du mélange influent grandement sur le comportement de la chaussée et sont responsables de l'orniérage dans une plus grande mesure, soit de 80 à 85% [Architects 1994].

Selon Amy [Amy 1995], les fluctuations de température quotidiennes, combinées à des températures extrêmement basses en hiver et élevées en été, peuvent entraîner un durcissement (vieillesse chimique). Elles peuvent provoquer des problèmes de fissurations transversales dues à la fatigue thermique dans les chaussées en béton bitumineux. La fatigue thermique engendre des contraintes de traction répétées. Le vieillissement de béton bitumineux contribue au niveau de contrainte produite. Lorsque l'effet du cycle thermique (contraintes induites) dépasse la résistance de l'enrobé bitumineux, les fissures transversales sont provoquées par des contraintes de déformations maximales, qui apparaissent dans la direction longitudinale de la chaussée.

D'après, [Ai-ling 2005] [Chang-Xuan 2011], ont été conclus que la fissuration et le décollement augmentent avec chaque cycle de gel-dégel. Sous l'effet de la contrainte de charge et ces cycles, la structure du mélange devient lâche, ce qui entraîne une diminution de la résistance à la compression. Cette diminution rapide au cours des premiers cycles gel-dégel est due à l'expansion des pores internes et les vides d'air [Yan 2008] [Yi-qiu 2011]. Si l'eau entre en contact avec la chaussée, il a été observé que les vides d'air dans l'enrobé exposés aux cycles gel- dégel augmentent de 40% en 24 jours [Özgan 2013].

Feng et al ont conditionnés les échantillons dans un bain d'eau par saturation de vide avec de l'eau distillée pendant 15 minutes [Feng 2009]. Les échantillons ont été soumis à la congélation pendant 8 heures à -20°C suivi du trempage pendant 4 heures à 60°C, pour un total de 2 cycles par jour. Des essais de résistance à la traction indirecte ont été réalisés à 0, 2, 4, 6, 8 cycles de traitement de gel-dégel. Il a prouvé que les dommages gel-dégel se produisent à trois étapes différentes. Feng a conclu cela avec l'augmentation des cycles gel-dégel, la force de fendage diminue de l'enrobé, taux de perte de poids diminue tandis que le volume du mélange augmente d'une façon régulière. Feng a également noté que la performance stabilisée jusqu'à la détérioration qui suit rapide

provoquée par la perte d'adhérence. Ils ont conclu aussi que la résistance de l'enrobé bitumineux à la fissuration thermique diminue avec l'augmentation du cycle gel-dégel.

Dans une autre étude effectuée par Feng et al, qui rapporte l'impact du sel par rapport à l'eau distillée par la méthode de conditionnement de gel-dégel, il a été constaté que les dommages de gel-dégel des mélanges d'enrobés comprennent deux phases [Feng 2010]. En première phase, les dommages sont causés par l'expansion de l'eau qui diminue la résistance de béton bitumineux à la traction indirecte. Le dommage de la deuxième phase se produit sur l'interface du mélange entre le bitume et le granulat. Ils ont également constaté que le sel joue un rôle majeur dans la performance du bitume à basse température. En particulier, lorsque le pourcentage de sel est supérieur à 3, la déformabilité de l'enrobé diminue rapidement.

Merbouh tente de recréer le climat réel vécu par les enrobés bitumineux sur place dans différentes régions (régions aux étés chauds à très chauds, régions aux hivers froids, parfois sahariens ou subsahariens) [Merbouh 2012]. Trois lots d'échantillons ont été préparés et subit à trois plages de températures différentes. La première plage simule le climat des régions froides, les échantillons de bitume ont été conditionnés par des cycles de -15 au gel et +20°C au dégel, pour 90, 180 et 270 cycles thermiques, la deuxième plage représente les températures des régions plus ou moins chaudes (+25 et +45°C), pour 90, 180 et 270 cycles et la troisième plage, simule le climat des régions très chaudes, pour 90 et 180 cycles thermiques (+45 et +65°C). Il a conclu que les cycles d'échauffement/refroidissement diminuent la susceptibilité de déformation de l'enrobé et provoque un vieillissement chimique du matériau.

Une étude de Barlas a effectué un test de flexion en quatre points sur des échantillons d'enrobé conditionnés avec 20 cycles de gel-dégel [Barlas 2013]. Chaque cycle comprenait 16 h de gel à - 5°C et 8 h de dégel à 30°C. Il a montré que la rigidité initiale et la durée en fatigue de béton bitumineux diminuent avec le conditionnement par les cycles de gel/dégel.

Cette étude examine la rigidité et le comportement de résistance de béton bitumineux à la traction due au conditionnement par des cycles de gel/dégel au niveau de laboratoire. La valeur de diminution de la rigidité est très fort jusqu'à 20 premiers cycles, (réduite à 83% de la rigidité d'origine), ensuite, il diminue très lentement. Cette réduction est de 25% pendant 120 jours de conditionnement. Les dommages induits par le gel-dégel sur la rigidité en flexion sont négligeables

après 120 cycles de conditionnement [Rashadul 2016]. Glaoui a exposé un groupe des échantillons de bitume modifié et non modifié à un traitement thermique de 100 cycles de gel-dégel (-10 et 25°C), et l'autre groupe à 100 cycles d'échauffement-refroidissement entre 25 et 65°C. Ces cycles thermiques entraînent un vieillissement et donc un durcissement du liant. Bendjima a exposé les mêmes cycles thermiques que Glaoui mais sur des échantillons d'enrobé bitumineux ordinaire (sans modification) [Bendjima 2017]. Cette étude décrit l'effet des cycles thermiques sur le fluage-recouvrance d'un enrobé à chaud. Les résultats obtenus montrent qu'il existe une différence significative entre les valeurs mesurées à différentes températures, de 0 à 50°C il y a une augmentation de la déformation de fluage de 45 fois. Donc, les cycles thermiques conduisent au durcissement de l'enrobé à chaud.

Wei et al, et d'après des résultats d'essais en laboratoire, montrent également l'effet de cycles gel-dégel sur la résistance et le module résilient du béton bitumineux à la compression. Après 14 cycles thermiques, la résistance et le module d'élasticité ont diminué de 14 et 20% respectivement.

L'effet du conditionnement par des cycles de gel/dégel sur la rigidité à 60 secondes et d'autres caractéristiques de six types de matrices de granulats fins a été étudié par Gong et al [Gong 2016] les résultats obtenus ont montré que le conditionnement diminue dans tous les cas la rigidité des mélanges qui peut être jusqu'à 27% et que la diminution de la rigidité devient plus forte avec l'augmentation du nombre de cycles gel-dégel.

Tarefder et al ont évalué l'effet du conditionnement par des cycles de gel/dégel sur la durée de vie en fatigue de l'enrobé à chaud et de la rigidité du bitume [Tarefder 2018]. Les échantillons de béton bitumineux et de bitume ont été soumis à 5, 10, 15 et 20 cycles thermiques. Il s'avère que les caractéristiques étudiées de ces matériaux diminuent avec l'augmentation du nombre des cycles. Après 20 cycles de gel-dégel, la résistance à la fatigue du béton bitumineux et la rigidité du bitume ont diminué de 37% et 41% respectivement.

Teltayev et al, ont étudié l'effet du cycle gel-dégel sur les caractéristiques du bitume pur et des bitumes modifiés avec différents polymères dans la plage de température de $-18 \pm 2^\circ\text{C}$ à $+20^\circ\text{C}$, les caractéristiques des bitumes ont été déterminées dans l'état initial et après 25 et 50 cycles gel-dégel.

En fin, on peut dire qu'il y a beaucoup de méthodes de traitement thermique qui ont été explorées par différents chercheurs. La recherche sur l'effet des cycles thermiques reste un domaine très vaste. Ça réfère à l'absence d'un essai standard, normalisé et conçu uniquement pour les enrobés ou les liants bitumineux.

II.7 Conclusion

Les polymères sont devenus des principaux produits, notamment les thermoplastiques tels que le PET, PP, PS, etc. en raison de leur économie, de leurs performances diversifiées et de leur facilité de mise en œuvre par rapport aux matériaux traditionnels.

Afin d'améliorer les caractéristiques des bitumes et l'enrobé bitumineux traditionnels qui ne répondent plus aux exigences actuelles, ces polymères s'avèrent être des agents modifiants efficaces. A cause de son avantage de disponibilité, légèreté et de souplesse, le PET est le plus utilisé. Ainsi, cette modification conduira, d'une part, à une diminution de la résistance à l'orniérage (déformation permanente) à des températures élevées, améliorer la résistance des enrobés bitumineux à la fissuration à des basses températures et une meilleure performance des matériaux bitumineux en service sous l'effet des charges lourdes et fréquentes d'autre part. Ces améliorations doivent être aussi durables.

L'importance de cette technologie dans le but de valoriser les déchets plastiques est confirmée par la connaissance de différents processus de modification des bitumes ou des enrobés bitumineux par des matières plastiques. En plus d'améliorer les performances des routes, surtout dans les zones où les températures varient considérablement (plus chaude pendant l'été et très froide pendant l'hiver), les dégradations se produisent plus rapidement.

Dans ce chapitre on a également abordé l'état de l'art des matériaux bitumineux soumis à différents cycles thermiques. En plus, on a expliqué les causes, les mécanismes et les conséquences de ce problème. Aussi, on a cité quelques essais consacrés pour simuler les cycles thermiques au niveau du laboratoire. De plus, d'autres recherches ont montré que les sollicitations et les réponses réelles ont été quantifiées afin de mieux comprendre ce type de problème.

**CHAPITRE III: PLAN
D'EXPERIENCE ET PLAN
FACTORIEL**

III.1 Introduction

Dans cette partie de notre projet on va donner quelques notions relatives au plan d'expériences et leurs domaines d'utilisations. On va aussi définir la méthode du plan factoriel complet et ses avantages par rapport aux autres méthodes utilisées dans l'industrie.

III.2 Un plan d'expérience

Un plan d'expériences est une série d'essais ou de tests, dans laquelle vous apportez à dessein des modifications à différentes variables d'entrée à la fois et observez les réponses.

Dans l'industrie, les plans d'expériences peuvent être utilisés pour étudier systématiquement les variables concernant le procédé ou le produit qui ont une incidence sur la qualité de celui-ci. Après avoir identifié les conditions des procédés et les composants des produits qui influent sur la qualité, vous pourrez vous employer à améliorer la faisabilité, la fiabilité, la qualité et les performances du produit sur le terrain.

III.3 Terminologies

Les utilisateurs des plans d'expériences pratiquent un vocabulaire propre à ce domaine. Dans ce qui suit, nous illustrons les terminologies les plus importantes [GOUPY, 2006] [Buragohain, 2006] [Damodar et al, 2004] [Lagrade, 1983] [GOUPY, 2001] [PILLET, 2001] [GOUPY, 1999]

I.3.1. Facteurs ou variables naturelles (réelles)

Grandeurs modifiables par l'expérimentateur, censées influencer sur les variations de la réponse. Lorsque la variable prend deux niveaux dans une expérimentation, nous désignons par :

- (min) : niveau (borne) inférieur ;
- (max) : niveau (borne) supérieur.

I.3.2. Réponse

Grandeur de sortie ou grandeur étudiée. Elle représente la manifestation mesurable, observée lorsqu'on fait varier les facteurs étudiés. Elle doit être représentative, quantifiable et moins dispersée possible pour des variables d'entrées maîtrisées et constantes. [GOUPY, 1999]

III.4 Domaines d'utilisations et objectifs d'un plan d'expérience :

I.4.1. Domaines d'utilisation

Les plans d'expériences sont utilisés dans les études industrielles en recherche développement. Ils interviennent dans de nombreux domaines industriels. On peut notamment citer:

- L'industrie mécanique et automobile.
- L'industrie métallurgique.
- L'industrie chimique, pétrochimique et pharmaceutique.

I.4.2. Domaine d'étude

C'est la partie de l'espace expérimental retenu par l'expérimentateur pour faire ses essais. Il est délimité par les niveaux inférieur et supérieur des facteurs étudiés. La réunion des domaines des différents facteurs définit le domaine d'étude (Figure III. 1). [GOUPY, 2001]

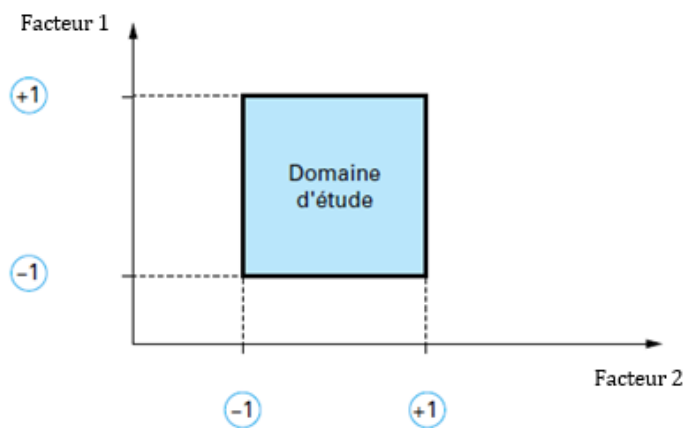


Figure III. 1 : Schéma représentatif du domaine d'étude pour le cas de deux facteurs (plan 2^2) [GOUPY, 1999].

I.4.3. Objectif d'utilisation d'un plan d'expérience

Leurs utilisations visent les buts suivants :

- Détermination des facteurs clés sans la conception d'un nouveau produit ou un nouveau procédé.
- Optimisation des réglages d'un procédé industriel ou un appareil de mesure ou d'une machine.
- Prédiction par modélisation du comportement d'un procédé.

Les plans d'expériences s'inscrivent donc dans une démarche générale d'amélioration de la qualité.

III.5 Plan d'expérience factoriel

Les plans factoriels complets à deux niveaux sont les plus simples, ils sont aussi les plus utiles car ils forment la base de tous les débuts d'étude. Les premiers résultats obtenus grâce à ces plans peuvent toujours être complétés par de nouvelles expériences permettant d'atteindre le degré de précision et d'information recherché. [Site web 4]

Un plan d'expérience factoriel 2^k a les types suivants.

I.5.1. Plan factoriel 2^k complet

L'expérience utilise toutes les combinaisons possibles de paramètres de facteurs avec 8 essais pour 3 facteurs, 16 essais pour 4 facteurs, 32 essais pour 5 facteurs, et ainsi de suite. [Site web 4]

Les plans factoriels complets 2^k (PFC) sont les plans les plus utilisés car ils sont les plus simples et les plus rapides à mettre en œuvre. Ils permettent d'étudier k facteurs à raison de deux niveaux par facteur (niveau supérieur (+1) et niveau inférieur (-1)). Ils sont formés de $N = 2^k$ expériences déterminées par les différentes combinaisons possibles des niveaux minimal et maximal des k facteurs. Pour ces plans, il faut donc calculer M inconnues du modèle (coefficients) correspondants aux [TRIBOULET, 2008] [GOUPY, 2006] [Buragohain, 2006] [GOUPY, 2001] [PILLET, 2001] [GOUPY, 1999]:

- k effets principaux (linéaires) ;
- $(2^k) - k - 1$ interactions ;
- Une constante représentant la moyenne de la réponse.

Pour un plan factoriel complet à 3 facteurs, dont il faut réaliser un nombre d'expériences : $N = 2^3 = 8$, les points expérimentaux seront aux sommets d'un cube (Figure III. 2) et la matrice représentative des expériences sera un tableau traduisant l'emplacement de ces points en indiquant leurs trois coordonnées en variables centrées réduites (Tableau III.1).

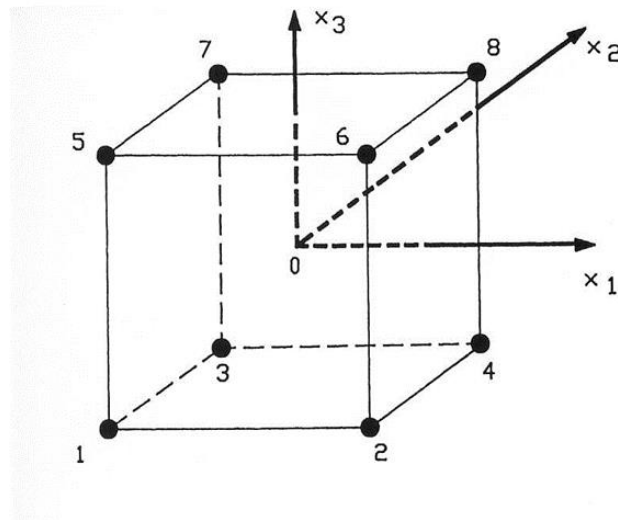


Figure III. 2: Disposition des points expérimentaux d'un plan 2^3 [TRIBOULET, 2008]
[GOUPY, 2006]

Tableau III.1 : Matrice des expériences (N, k).

Nombre d'essai N	Valeurs des variables réelles			Valeurs des variables codées			Réponse
	Z_1	Z_2	Z_3	x_1	x_2	x_3	
1	Z_{1min}	Z_{2min}	Z_{3min}	-1	-1	-1	y_1
2	Z_{1max}	Z_{2min}	Z_{3min}	+1	-1	-1	y_2
3	Z_{1min}	Z_{2max}	Z_{3min}	-1	+1	-1	y_3
4	Z_{1max}	Z_{2max}	Z_{3min}	+1	+1	-1	y_4
5	Z_{1min}	Z_{2min}	Z_{3max}	-1	-1	+1	y_5
6	Z_{1max}	Z_{2min}	Z_{3max}	+1	-1	+1	y_6
7	Z_{1min}	Z_{2max}	Z_{3max}	-1	+1	+1	y_7
8	Z_{1max}	Z_{2max}	Z_{3max}	+1	+1	+1	y_8

I.5.2. Plan factoriel 2k fractionnaires

L'expérience utilise une fraction (la moitié, un quart, etc.) de toutes les combinaisons possibles de paramètres factoriels, avec un nombre de séries inférieur à celui de la conception factorielle complète de 2k. [Site web 4]

Pour décider si on souhaite exécuter un plan d'expérience factoriel complet ou fractionnel, on compare :

- Si le nombre de facteurs est inférieur à 5, exécutez le plan factoriel complet 2k pour permettre de modéliser toutes les interactions à 2 facteurs avec seulement 8 (3 facteurs) ou 16 (4 facteurs).
- Si le nombre de facteurs est de 5 ou plus, exécutez le plan factoriel fractionnaire de résolution V ou supérieure de 2k pour réduire le nombre d'essais tout en modélisant toutes les interactions à 2 facteurs.

I.5.3. Plan d'expérience factoriel complet général

Utilisez un plan factoriel complet général pour créer un plan d'expériences et étudier des facteurs pouvant avoir n'importe quel nombre de niveaux. On peut utiliser un plan factoriel complet général pour créer des plans à 2 niveaux à résolution complète pour au moins 8 facteurs. [Site web 4]

I.5.4. Mélange de plans d'expérience

Les expériences de mélanges représentent une classe particulière d'expériences de surface de réponse dans lesquelles le produit analysé est constitué de plusieurs composantes ou éléments.

Les plans utilisant ces expériences s'avèrent utiles, car de nombreuses activités de conception et de développement industrielles impliquent des formulations ou des mélanges. Dans de tels cas, la réponse est fonction des proportions des différents ingrédients constitutifs du mélange.

Avant de créer un plan de mélange, on doit déterminer le plan convenant le mieux à une expérience. Minitab fournit des plans de mélange centrés, des plans en réseaux et des plans sous contraintes. Prenons les étapes suivantes. [Site web 4]

- Identifier les composantes, les variables de procédé et les quantités de mélange à étudier.
- Déterminer le modèle que vous souhaitez ajuster.
- Assurer une couverture adaptée de la région expérimentale qui vous intéresse.
- Déterminer l'impact des autres considérations sur votre choix de plan.

Parmi les autres considérations, citons le coût, le temps, la disponibilité des ressources, ainsi que les contraintes de bornes inférieure et supérieure. [Site web 4]

III.6 Optimisation des réponses multiples

Utilisez l'optimisation des réponses multiples pour déterminer les paramètres optimaux dans une expérience avec une seule sortie ou avec plusieurs sorties concurrentes.

Un plan optimal utilise le groupe des "meilleurs" points du plan sélectionnés en réduisant ou en augmentant le nombre d'essais expérimentaux dans le plan initial. Les fonctionnalités de plan optimal peuvent être utilisées avec les plans factoriels complets généraux, les plans de surface de réponse et les plans de mélange.

III.7 Plan d'expériences de surface de réponse

Un plan de surface de réponse est un ensemble de techniques de plan d'expériences qui nous permettent de mieux comprendre et d'optimiser votre réponse.

La méthodologie du plan de surface de réponse est souvent utilisée pour mettre au point des modèles suite à la détermination de facteurs importants à l'aide de plans de criblage ou de plans factoriels, notamment si vous soupçonnez une courbure dans la surface de réponse. [Site web 4]

Il existe deux principaux types de plans de surface de réponse.

I.7.1. Plans composites centrés

Les plans composites centrés peuvent ajuster un modèle quadratique complet. Ils sont souvent utilisés lorsque le plan demande une expérimentation séquentielle, car ces plans peuvent intégrer des informations provenant d'une expérience factorielle correctement planifiée.

I.7.2. Plans de Box-Behnken

Comme les plans de Box-Behnken comportent moins de points, leur coût est moindre que celui des plans composites centrés pour le même nombre de facteurs. Ils peuvent estimer efficacement les coefficients de premier et second ordre ; toutefois, ils ne peuvent pas inclure d'essais provenant d'un plan factoriel. Les conceptions Box-Behnken ont toujours 3 niveaux par facteur, contrairement aux conceptions composites centrales, qui peuvent en avoir jusqu'à 5. En outre, contrairement aux conceptions composites centrales, les conceptions Box-Behnken n'incluent jamais de pistes où tous les facteurs sont à leur réglage extrême, tels que tous les réglages bas. [Site web 4]

III.8 ANOVA

Une analyse de variance à un facteur contrôlé (ANOVA) est utilisée lorsqu'on dispose d'un acteur de catégorie et d'une réponse continue, et qu'on souhaite déterminer si les moyennes de population de deux groupes ou plus diffèrent. Pour utiliser une analyse ANOVA, vous devez collecter un échantillon de données pour chaque niveau de la variable X. [Site web 4]

III.9 Tests de signification et validation du modèle : Analyse statistique

L'emploi des principes d'analyse de régression et de corrélation permet de trouver lors du traitement des données expérimentales, la dépendance entre les variables et les conditions optimales. Une fois l'équation de régression obtenue, on procède à l'analyse statistique des résultats. Pour conduire cette analyse, il faut remplir les conditions suivantes :

- Le paramètre est mesuré avec une erreur négligeable. L'apparition d'une erreur dans la détermination de (réponse) s'explique par la présence, dans le processus, de variables non exploitées qui ne figurent pas dans l'équation de régression ; [Site web 4]
- Les résultats des observations sur les variables de sortie sont des grandeurs indépendantes à distribution normale.

**CHAPITRE IV: PLAN
D'EXPERIENCE: RESULTATS
ET ANALYSE**

IV.1 MODELISATION ET ANALYSE DE DONNEES

Le plan d'expérience utilisé dans notre étude est le plan factoriel complet général. Le choix de ce plan nous permet d'étudier les effets que plusieurs facteurs peuvent avoir sur une ou des réponse (s). Lorsqu'on réalise une expérience, on varie les niveaux de tous les facteurs simultanément plutôt qu'un à la fois nous permet d'étudier les interactions entre les facteurs.

Notre étude est basée sur l'interaction entre le pourcentage de PET utilisé pour la modification des bitumes (0%, 3%, 5% et 7%) et la température de cycle thermique (0, 25 et 50) en tant que facteurs et déformation Gel-Dégel (G-D), déformation Echauffement – Refroidissement à deux températures 25°C-45°C et 45°C-65°C (E-RP1 et E-R P2 successivement) d'une étude expérimentale faite par le docteur Bekkhada. [Bekkhada Amine, 2024]

Le tableau suivant montre les données analysées par le logiciel Minitab.

Tableau IV. 1 : la comparaison entre les cycles thermiques des bétons bitumineux

%PET	T	G-D	E-R P1	E-R P2
0	0	-1,73	-33,91	-26,95
	25	31,03	16,66	52,66
	50	19,52	-27,94	-13,97
3	0	10,58	-14,47	-18,42
	25	29,54	26,19	45,61
	50	7,84	-38,33	-10
5	0	9,55	-11,26	-16,2
	25	43,9	32,35	58,18
	50	17,04	-36,6	-16,07
7	0	6,52	-15,69	-18,6
	25	23,91	30	41,67
	50	23,35	-40,62	-13,82

(a) Introduction des données dans le logiciel Minitab

L'introduction de ces données se fait premièrement par le choix du plan idéal pour l'analyse.

Minitab propose des plans à deux niveaux, soit factoriels fractionnaires, soit factoriels complets, des plans en parcelles divisées (split plot) à deux niveaux, des plans de Plackett-Burman et des plans factoriels complets généraux à plus de deux niveaux. Lors du choix d'un plan, on doit:

- Identifier le nombre de facteurs concernés (2 facteurs : %PET et T)
- Déterminer le nombre d'essais que vous pouvez effectuer (3 essais : G-D, E-R P1 et E-R P2)

Lorsqu'on a des différents niveaux pour chaque facteur, nous avons choisi un plans factoriel complet général. Les figures en annexe A montrent les étapes de l'introduction de nos données.

IV.2 RESULTATS DES ANALYSES

Numéro des conceptions basique définie par le plan de chaque modèle et régression est de 12 avec une réplique et un seul bloque.

✓ La régression G-D vs %PET ; T

R-sq (R^2), la régression carrée ou coefficient de détermination de notre modèle est de 100% ou 1 et une degré de liberté d'erreur de 0. Cela indique un ajustement parfait du modèle aux données.

L'équation de régression est :

$$\begin{aligned} G-D = & 18,42 - 2,147 \%PET_0 - 2,434 \%PET_3 + 5,076 \%PET_5 - 0,4942 \%PET_7 - 12,19 T_0 \\ & + 13,67 T_25 - 1,483 T_50 - 5,812 \%PET*T_0\ 0 + 1,082 \%PET*T_0\ 25 + 4,730 \%PET*T_0\ 50 \\ & + 6,784 \%PET*T_3\ 0 - 0,1208 \%PET*T_3\ 25 - 6,663 \%PET*T_3\ 50 - 1,756 \%PET*T_5\ 0 + \\ & 6,729 \%PET*T_5\ 25 - 4,973 \%PET*T_5\ 50 + 0,7842 \%PET*T_7\ 0 - 7,691 \%PET*T_7\ 25 + \\ & 6,907 \%PET*T_7\ 50 \end{aligned}$$

✓ La régression E-R P1 vs %PET ; T

R-sq(R^2) de notre modèle est de 100% ou 1 et une degré de liberté d'erreur de 0. Cela indique aussi un ajustement parfait du modèle aux données.

L'équation de régression est :

$$\begin{aligned} E-R\ P1 = & -9,468 - 5,595 \%PET_0 + 0,5983 \%PET_3 + 4,298 \%PET_5 + 0,6983 \%PET_7 - \\ & 9,364 T_0 + 35,77 T_25 - 26,40 T_50 - 9,482 \%PET*T_0\ 0 - 4,045 \%PET*T_0\ 25 + 13,53 \\ & \%PET*T_0\ 50 + 3,764 \%PET*T_3\ 0 - 0,7083 \%PET*T_3\ 25 - 3,056 \%PET*T_3\ 50 + 3,274 \\ & \%PET*T_5\ 0 + 1,752 \%PET*T_5\ 25 - 5,026 \%PET*T_5\ 50 + 2,444 \%PET*T_7\ 0 + 3,002 \\ & \%PET*T_7\ 25 - 5,446 \%PET*T_7\ 50 \end{aligned}$$

✓ **La régression E-R P2 vs %PET ; T**

R-sq de ce modèle est de 100% ou 1 et une degré de liberté d'erreur de 0. Cela indique aussi un ajustement parfait du modèle aux données.

L'équation de régression est :

$$\begin{aligned} E-R P2 = & 5,341 - 1,428 \%PET_0 + 0,3892 \%PET_3 + 3,296 \%PET_5 - 2,258 \%PET_7 - 25,38 \\ & T_0 + 44,19 T_25 - 18,81 T_50 - 5,480 \%PET*T_0 0 + 4,558 \%PET*T_0 25 + 0,9225 \\ & \%PET*T_0 50 + 1,233 \%PET*T_3 0 - 4,309 \%PET*T_3 25 + 3,076 \%PET*T_3 50 + 0,5467 \\ & \%PET*T_5 0 + 5,354 \%PET*T_5 25 - 5,901 \%PET*T_5 50 + 3,700 \%PET*T_7 0 - 5,602 \\ & \%PET*T_7 25 + 1,903 \%PET*T_7 50 \end{aligned}$$

✓ **Modèle linéaire général G-D vs %PET; T**

La régression teste si les termes du modèle ont un effet significatif sur la réponse. Le modèle de régression de pourcentage de PET n'est pas significatif ($P = 0,602 > 0,05$). Donc, il ne peut pas expliquer la variation dans la réponse (tableau 2). Cependant, le modèle de régression d'influence de température sur le Gel-Dégel est significatif ($P = 0,007 < 0,05$) qui correspond à une variation dans la réponse, autrement dit, la température influe sur la déformation Gel-Dégel.

Analyse des variances donne les résultats suivants :

Tableau IV. 2 : Analyse de variance du modèle linéaire.

Source	Degrés de liberté	Adj SS	Adj MS	Valeur Statistique F	Valeur de P
%PET	3	109,6	36,55	0,67	0,602
T	2	1351,2	675,60	12,35	0,007
Erreur	6	328,3	54,72		

Le tableau 3 montre le résumé de résultats pour le modèle linéaire général. Ce modèle a un coefficient de détermination de 81,65% ; ce qui suggère que le modèle a une bonne capacité explicative ; ajusté à 66,36% ce qui peut indiquer que certaines variables incluses dans le modèle n'apportent pas beaucoup d'information supplémentaire, ou qu'on a trop de variables pour le nombre d'observations disponibles.

Tableau IV. 3 : Récapitulatif du modèle linéaire.

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
7,39745	81,65%	66,36%	26,60%

Tableau IV. 4 : Récapitulatif du modèle linéaire.

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	18,42	2,14	8,63	0,000	
%PET					
0	-2,15	3,70	-0,58	0,583	1,50
3	-2,43	3,70	-0,66	0,535	1,50
5	5,08	3,70	1,37	0,219	1,50
T					
0	-12,19	3,02	-4,04	0,007	1,33
25	13,67	3,02	4,53	0,004	1,33

L'équation de régression :

$$G-D=18,42 - 2,15 \%PET_0 - 2,43 \%PET_3 + 5,08 \%PET_5 - 0,49 \%PET_7 - 12,19 T_0 + 13,67 T_25 - 1,48 T_50$$

✓ **Modèle linéaire général E-R P1 vs %PET; T**

La régression teste si les termes du modèle ont un effet significatif sur la réponse. Le modèle de régression n'est pas significatif ($P=0,554>0,05$) en ce qui concerne le pourcentage de PET. Donc, il ne peut pas expliquer la variation dans la réponse (tableau 5). Néanmoins, le modèle de régression d'influence de température sur la déformation Echauffement-Refroidissement (25° - 45°) est très significatif ($P=0,000<0,05$) qui correspond à une variation dans la réponse de la déformation E-R P1.

Analyse des variances donne les résultats suivants :

Tableau IV. 5 : Analyse de variance du modèle linéaire.

Source	Degrés de liberté	Adj SS	Adj MS	Valeur Statistique F	Valeur de P
%PET	3	151,9	50,63	0,77	0,554
T	2	8257,0	4128,48	62,40	0,000
Erreur	6	397,0	66,16		

Ce modèle a un coefficient de détermination de 95,49%; ce qui suggère que le modèle a une excellente capacité explicative ; ajusté à 91,74% ce qui peut indiquer que les variables incluses dans le modèle apportent beaucoup d'information supplémentaire.

Tableau IV. 6 : Récapitulatif du modèle linéaire.

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
8,13399	95,49%	91,74%	81,97%

Tableau IV. 7 : Récapitulatif du modèle linéaire.

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-9,47	2,35	-4,03	0,007	
%PET					
0	-5,60	4,07	-1,38	0,218	1,50
3	0,60	4,07	0,15	0,888	1,50
5	4,30	4,07	1,06	0,331	1,50
T					
0	-9,36	3,32	-2,82	0,030	1,33
25	35,77	3,32	10,77	0,000	1,33

L'équation Régression :

$$E-R P1 = -9,47 - 5,60 \%PET_0 + 0,60 \%PET_3 + 4,30 \%PET_5 + 0,70 \%PET_7 - 9,36 T_0 + 35,77 T_25 - 26,40 T_50$$

✓ **Modèle linéaire général E-R P2 vs %PET; T**

La régression teste si les termes du modèle ont un effet significatif sur la réponse. Le modèle de régression n'est pas significatif ($P = 0,659 > 0,05$). Donc, il ne peut pas expliquer la variation dans la réponse (tableau 8). Toutefois, le modèle de régression d'influence de température sur la déformation Echauffement-Refroidissement (45° - 65°) est très significatif ($P = 0,000 < 0,05$) qui correspond à une variation dans la réponse de la déformation E-R P2

Analyse des variances donne les résultats suivants :

Tableau IV. 8 : Analyse de variance du modèle linéaire.

Source	Degrés de liberté	Adj SS	Adj MS	Valeur Statistique F	Valeur de P
%PET	3	54,4	18,15	0,56	0,659
T	2	11802,6	5901,31	182,81	0,000
Erreur	6	193,7	32,28		

Ce modèle a un coefficient de détermination de 98,39%; ce qui suggère que le modèle

a une excellente capacité explicative ; ajusté à 97,05% ce qui peut indiquer que les variables incluses dans le modèle apportent beaucoup d'information supplémentaire.

Tableau IV. 9 : Récapitulatif du modèle linéaire.

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
5,68164	98,39%	97,05%	93,57%

Tableau IV. 10 : Récapitulatif du modèle linéaire.

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	5,34	1,64	3,26	0,017	
%PET					
0	-1,43	2,84	-0,50	0,633	1,50
3	0,39	2,84	0,14	0,896	1,50
5	3,30	2,84	1,16	0,290	1,50
T					
0	-25,38	2,32	-10,94	0,000	1,33
25	44,19	2,32	19,05	0,000	1,33

L'équation Régression :

$$E-R P2 = 5,34 - 1,43 \%PET_0 + 0,39 \%PET_3 + 3,30 \%PET_5 - 2,26 \%PET_7 - 25,38 T_0 + 44,19 T_25 - 18,81 T_50$$

✓ **ANOVA unilatérale**

Les valeurs de probabilité à sens unique ou unilatérale entre les données sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau IV. 11 : Valeur de probabilité et coefficient de détermination

	G-D		E-R P1		E-R P1	
	Valeur P	R-sq	Valeur P	R-sq	Valeur P	R-sq
%PET	0,911 NS	6,13	0,986 NS	1,72	0,998 NS	0,45
T	0,002 S	75,52	0,000 S	93,77	0,000 S	97,94

NS : Non Significant

S : Significant

Les résultats montrent que le % de PET n'influe pas sur la déformation au Gel-Dégel et déformations au Echauffement refroidissement, par contre la température a une influence très significative aux différents déformations étudiés.

Tableau IV. 12 : Moyenne de confiance d'un plan unilatérale

		G-D		E-R P1		E-R P2	
		Moyenne	Groupe	Moyenne	Groupe	Moyenne	Groupe
%PET	0	16,27	A	-15,1	A	3,9	A
	3	15,99	A	-8,9	A	5,7	A
	5	23,5	A	-5,2	A	8,6	A
	7	17,93	A	-8,8	A	3,1	A
T	0	6,23	B	-18,83	B	-20,04	A
	25	32,09	A	26,30	A	49,53	/
	50	16,94	B	-35,87	C	-13,46	A

A : Niveau de confiance relatif la plus élevé

B : Niveau de confiance relatif moyenne

C : Niveau de confiance relatif la plus faible

Niveau de confiance ne représentent pas directement la valeur numérique, mais la significativité statistique entre les groupes.

D'après le tableau, on remarque que le pourcentage de PET n'a pas une moyenne significative pour les déformations Gel-Dégel, Echauffement- Refroidissement 1 (25°C-45°C) et 2 (45°C-65°C). Par contre, effet de température a une moyenne significative pour tous les déformations étudiées.

IV.3 CONCLUSION :

L'analyse comparative des résultats de déformation Gel-Dégel, Echauffement- Refroidissement 1 et 2 montre que le pourcentage de PET n'a pas une influence sur ces déformations, par contre, la température a une influence significative. Cela est confirmé par les résultats d'analyse de la régression, de modèle linéaire général et d'ANOVA unilatérale.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'augmentation significative des charges exercées sur les revêtements routiers, due à une densité de trafic toujours plus élevée, ainsi que les changements environnementaux, posent de grands défis quant à la performance et à la durabilité des revêtements en enrobé bitumineux. Ces sollicitations dépendent principalement de matériaux dont les propriétés ne sont pas fixes, mais évoluent au fil du temps.

Par ailleurs, un enjeu environnemental majeur à l'échelle mondiale concerne la gestion des déchets plastiques, notamment le polyéthylène téréphtalate (PET), qui sont déposés dans les déchets domestiques et les décharges. Le plastique étant une substance toxique et persistante, son élimination constitue un défi important, en raison de sa biodégradabilité très lente et de son aspect peu esthétique. Aujourd'hui, la valorisation des déchets industriels et ménagers dans la fabrication des chaussées bitumineuses apparaît comme une solution écologique, contribuant à la préservation des ressources naturelles.

L'enrobé bitumineux, en service, doit également faire face à des contraintes liées au climat rigoureux et au trafic routier. Les variations importantes de température engendrent des déformations telles que l'orniérage par temps chaud et la fissuration thermique lors des basses températures. Dans certaines chaussées à faible trafic, situées dans des régions où les amplitudes journalières ou saisonnières de température sont importantes, ces dégradations deviennent particulièrement graves.

Cette mémoire est basée sur l'interaction entre le pourcentage de PET utilisé pour la modification des bétons bitumes (0%, 3%, 5% et 7%) et la température de cycle thermique (0, 25 et 50) en tant que facteurs et déformation Gel-Dégel (G-D), déformation Echauffement – Refroidissement à deux températures 25°C-45°C et 45°C-65°C (E-RP1 et E-R P2) d'une étude expérimentale faite par le docteur Bekkhada Amine.

La régression carrée ou coefficient de détermination de G-D, E-RP1 et E-RP2 vs %PET ; T de notre modèle est de 100% ou 1 et une degré de liberté d'erreur de 0 qui indique un ajustement parfait du modèle aux données.

Le modèle linéaire générale de G-D vs %PET et T a un coefficient de détermination de 81,65% ; ce qui suggère que le modèle a une bonne capacité explicative ; ajusté à 66,36% ce qui peut indiquer que certaines variables incluses dans le modèle n'apportent pas beaucoup d'information supplémentaire, ou qu'on a trop de variables pour le nombre d'observations disponibles. La régression de pourcentage de PET contre le G-D n'est pas significatif ($P=0,602>0,05$). Cependant, la régression d'influence de température sur le Gel-Dégel est significatif ($P=0,007<0,05$) qui correspond à une variation dans la réponse, autrement dit, la température influe sur la déformation Gel-Dégel.

Le modèle linéaire général E-R P1 vs %PET; T a un coefficient de détermination de 95,49%; ce qui suggère que le modèle a une excellente capacité explicative ; ajusté à 91,74% ce qui peut indiquer que les variables incluses dans le modèle apportent beaucoup d'information supplémentaire. La régression ce qui concerne le pourcentage de PET n'est pas significatif ($P=0,554>0,05$). Néanmoins, la régression d'influence de température sur la déformation Echauffement-Refroidissement (25° - 45°) est très significatif ($P=0,000<0,05$) qui correspond à une variation dans la réponse de la déformation E-R P1.

Le modèle linéaire général E-R P2 vs %PET; T a un coefficient de détermination de 98,39%; ce qui suggère que le modèle a une excellente capacité explicative ; ajusté à 97,05% ce qui peut indiquer que les variables incluses dans le modèle apportent beaucoup d'information supplémentaire. Le modèle de régression de pourcentage de PET n'est pas significatif ($P=0,659>0,05$). Toutefois, le modèle de régression d'influence de température sur la déformation Echauffement-Refroidissement (45° - 65°) est très significatif ($P=0,000<0,05$) qui correspond à une variation dans la réponse de la déformation E-R P2.

L'analyse comparative des résultats de déformation Gel-Dégel, Echauffement-Refroidissement 1 et 2 montre que le pourcentage de PET n'a pas une influence sur ces déformations, par contre, la température a une influence significative. Cela est confirmé par les résultats d'analyse de la régression, de modèle linéaire général et d'ANOVA unidirectionnelle.

En perspectives, nous recommandons de continuer le travail par:

- Etudier l'influence d'autres paramètres telle que la taille de granulats de PET, le type de PET

...etc sur les phénomènes Gel-Dégel, Echauffement-Refroidissement.

- Voir l'influence de température sur le fluage recouvrance, lexicivité, la tenue en eau, la durabilité ...etc

REFERENCE

BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [AASHTO 2002] AASHTO T182-84, “Standard Method of Test for Coating and Stripping of Bitumen-Aggregate Mixture’’, Static Immersion Test, 2002.
- [AASHTO 2007] AASHTO T283-07, “Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture-Induced Damage’’, 2007.
- [AASHTO 2010] AASHTO T324, “Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA)’’, 2010.
- [Abdelaziz 2010] Abdelaziz, M, Rehan, M. K, “Rheological evaluation of bituminous binder modified with waste plastic material’’, 2010.
- [Ahmadinia 2011] Ahmadinia, E, Zargar, M, Karim, M.R, Abdelaziz, M, Shafigh, P. “Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt’’, Material and Design, 2011, vol 32, pp 4844–4849.
- [Ahmadinia 2012] Ahmadinia, E, Zargar, M, Karim, M. R, Abdelaziz, M, Ahmadinia, E. “Performance evaluation of utilization of waste Polyethylene Terephthalate (PET) in stone mastic asphalt’’, Construction and Building Materials, 36, 2012, pp. 984–989.
- [Ai-ling 2005] Ai-ling, Y, Xi-ling, Z, Xuan-Cang, W, “Effect of Test Methods on Compression Module of Asphalt Mixture’’, Journal Changan University Natural Science Edition, 2005, pp 21–24.
- [AIPCR 1999] Association mondiale de la route AIPCR, “Les liants modifiés, les liants avec additifs et les bitumes spéciaux’’, N° 303, 1999.
- [Ait mokhtar 1994] Ait mokhtar, A. “Influence de l’affinité Liant Hydrocarboné granulat sur les caractéristiques mécaniques des mélanges hydrocarbonés’’, Thèse de Magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene institut de génie civil, 1994.
- [Ajour 1971] Ajour et al. “Constitution et propriétés physico-mécaniques des bitumes’’, Journées d’information Bitumes et enrobés bitumineux, 1971, pp 21-139, Paris.

- [Aksoy 2005] Aksoy, A, Şamlioglu, K, Tayfur, S, Özen, H. “Effects of various additives on the moisture damage sensitivity of asphalt mixtures”, *Construction and Building Materials*, Vol.19, 2005, pp. 11-18.
- [Ali 2008] Ali, B, Marwan, S, Shahrour, I. “Modélisation numérique de l’orniérage: Application aux voiries urbaines”, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 12, no 9-10, 2008, p. 1165-1180.
- [Ali b 2005] Ali, B, Shahrour, Woznica, K. “Etude du comportement mécanique des chaussées souples application à la prévision de l’orniérage”, communication au 17ème Congrès Français de Mécanique, Septembre, 2005.
- [Allison 1967] Allison, S.W, Ward, I.M. “The cold drawing of polyethylene terephthalate”, *British Journal Applied. Physics*, 1967, vol 18, 1151.
- [Aloueimine 2006] Aloueimine, S.O. “Méthodologie de caractérisation des déchets ménagers à Nouakchott (Mauritanie) : contribution à la gestion des déchets et outils d’aide à la décision”, thèse de doctorat, Laboratoire des Sciences de l’Eau et de l’Environnement, 2006.
- [Al-qadi 2005] Al-qadi, I. L, Hassan, M, Mostafa, A. E. “Field and theorical evaluation of thermal fatigue cracking in flexible pavements”, *Transportation research record*, 1919, 2005, pp 87,95.
- [Al-shalout 2007] Al-shalout, I, Miro, O, Stas, R. “Effects of moisture, compaction temperature and gradation types on durability of asphalt”, *Damascus Univ. Journal* 2007, vol 23, pp 7–35.
- [Ameri 2012] Ameri, M, Behnood, A. “Laboratory studies to investigate the properties of CIR mixes containing steel slag as a substitute for virgin aggregates”, *Construction and Building Materials*, 26(1), 2012, pp. 475–480.
- [Ameri 2017] Ameri, M, Nasr, D. “Performance properties of devulcanized waste PET modified asphalt mixtures”, *Petroleum Science and Technology*, vol 35, 2017, pp 99–104.
- [Ameri 2020] Ameri, M, Mohammadi, R, Mousavinezhad, M, Ameri, A. and Shaker, H. “Evaluating Properties of Asphalt Mixtures Containing polymers of Styrene Butadiene Rubber (SBR) and recycled Polyethylene Terephthalate (rPET) against Failures Caused by Rutting”, *Moisture and Fatigue, Frattura ed Integrità Strutturale*, 53, 2020, pp. 177-186.

- [Amir 2014] Amir, M, Hamidreza H. “Developing laboratory fatigue and resilient modulus models for modified asphalt mixes with waste plastic bottles (PET)”, Construction and Building Materials, Vol. 14, 2014, pp 259-267.
- [Amy 1995] Amy, L, Epps. “Thermal fatigue, proceeding of the association of asphalt paving technologists”, 1995.
- [Amy 1999] Amy, L. Epps. “An approach to Examine Thermal Fatigue in Asphalt Concrete, Asphalt Paving Technology”, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume V.68-99, 1999, p.319.
- [AND 2018] Agence Nationale des Déchets. “Campagne de caractérisation des Déchets Côtiers”, Algérie, 2018.
- [AND 2021] Agence nationale des déchets. “Rapport sur l'état de la gestion des déchets en Algérie”, Algérie, 2021.
- [Anderson 1994] Anderson, D.A. “Programme SHRP : Méthodes d'essais et spécifications des liants”, Revue Générale des Routes et des Aéroports, n°714, janvier, 1994.
- [Anonyme 2003] Anonyme 2. “Trier les plastiques”, Fiche conseil N°047. Réseau consommation (www.ecoconso.be/articl205.html), 2003.
- [Architects 1994] Architects. Kriech, A.J. “Understanding the SHRP Binder Specification”, Indianapolis, Indiana: Heritage Research Group, 1994.
- [ASTM 2005] ASTM D3625. “Standard Practice for Effect of Water on Bituminous Coated Aggregate Using Boiling Water”, 2005.
- [Attia 2010] Attia, M, Abdelrahman. “Sensitivity of untreated reclaimed asphalt pavement to moisture, density and freeze thaw”, Journal of Materials in Civil Engineering,
- [Baaj 2002] BAAJ, H. “Comportement a la fatigue des matériaux granulaires traites aux liants hydrocarbonés”, Institut National des Sciences Appliquées INSA, Lyon, France, 2002.
- [Badejo 2017] Badejo, A.A, Adekunle, A.A, Adekoya, O.O, Ndambuki, J.M, Kupolati, K.W, Bada, B.S, Omole, D.O. “Plastic waste as strength modifiers in asphalt for a sustainable environment”, African Journal of Science, Technology, Innovation and Development, vol 9, 2017, pp 173–177.

- [Badeli 2018] Badeli, S, Carter, A, Doré, G, “Effect of laboratory compaction on the viscoelastic characteristics of an asphalt mix before and after rapid freeze-thaw cycles”, *Cold Regions Science and Technology*, vol 146, 2018, pp 98–109.
- [Bahia 1992] Bahia, H. U, Anderson, D. A. Christensen, D. “The bending beam rheometer: a simple device for measuring low temperature rheology of asphalt binders”, *Proceeding AAPT*. Vol. 61, 1992. pp 117-153.
- [Bahia 2009] Bahia, H. U. “Modelling of asphalt binder rheology and its application to modified binders”, *modeling of asphalt concrete*, ASCE Press, New York, 2009.
- [Bahuguna 2000] Bahuguna, P, Panoskaltsis, Papoulia, M, “Characterization and Modelling of Permanent Deformations of Asphalt Pavements. Proceeding”, *ASCE 14th Engineering Mechanics Conference*, University of Texas, Austin, TX, May 21-24, 2000.
- [Bahuguna 2006] Bahuguna, S, Panoskaltsis, V. “Identification and Modelling of Permanent Deformations of Asphalt Concrete”, *J. Engrg. Mech*, Vol 132 (3), 2006, pp. 231-239.
- [Barlas 2013] Barlas, G. “Material characteristics of hot mix asphalt and binder using freeze- thaw conditioning”, *Master of Science thesis*, Department of Civil Engineering, University of New Mexico, Albuquerque, NM, 2013.
- [Belkidar 2011] Belkidar, K. “Contribution à la notion d’adhérence sur les chaussées du réseau algérie”, *Mémoire de Magister en Génie Civil Option : Géotechnique et Environnement*, 2011.
- [Bendjima 2017] Bendjima, M, Merbouh, M, Glaoui, B. “Effect of Thermal Cycles on Hot Mix Asphalt”, *International Review of Civil Engineering (IRECE)*, 8 (2), 2017, pp. 53-56.
- [Bendjima 2018] Bendjima, M. “Contribution à l’étude du comportement des enrobes bitumineux -effet des cycles thermiques”, *Thèse doctorat en Sciences*, université Thari mohamed, Béchar, 2018.
- [Bensbaa 2003] Bensbaa. “Etude rhéologique des liants modifiés, impact du vieillissement intégrant la démarche, haute qualité environnementale”, *Thèse de magister Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene*, Alger, 2003

- [Bense 1983] Bense, P. “Enrobés armés par déchets de matières plastiques”, Bulletin de liaison ponts et chaussées, N°128, 1983, pp. 99-106.
- [Berthe 2005] Berthe, J. D. “Caractérisation des déformations d’orniérage des chaussées bitumineuses”, thèse de doctorat de l’institut national des sciences appliquées, Lyon, 2005, p 264.
- [Bishnoi 2017] Bishnoi, J, DHILLON, V, MONGA, H. “Evaluation of Engineering Properties of Plastic Modified Bitumen”, Indian Journal of Science and Technology, Vol 10 (26), 2017.
- [Boughamsa 2008] BOUGHAMSA, W : « Les bitumes modifiés par polymères », Université de Skikda, 2008, Algérie.
- [Briand 2014] Briand, N, MobiScience. “Plastiques et pollution par les plastiques”, Rubrique 5, 2014.
- [Brulé 1986] Brulé, B. “Liants modifiés par les polymères pour les enduits et enrobés spéciaux”, Rapport des Laboratoires, PC 6, 8, 1986
- [Buragohain, 2006] M.Buragohain, C.Mahanta, "Full Factorial Design Based ANFIS Model for Complex Systems", 2006.
- [Cai 2018] Cai, L, Shi, X, Xue, J. “Laboratory evaluation of composed modified asphalt binder and mixture containing nano-silica/rock asphalt/SBS”, Constr. Build. Mater, 172, 2018, pp 204–211.
- [Casado 2014] Casado, R, Saez, C. B, Castro, F. E, Verdego, A, Nunez, F. “Polymix: polymeric wastes in asphalt mixes”, Taylor & Francis Group, London, 2014, 147 (3).
- [Castaneda 2007] Castaneda, E. “Contribution de méthodes non destructives à l’évaluation de l’effet de l’eau sur les enrobés bitumineux”, Collections du LCPC, Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées CR41, 2007.
- [Caubergs 2001] Caubergs, R. MESN. “Milieu, Education, Nature & Société” 1er trimestre 2001
- [CDC-ENR05 2005] CDC-ENR05. “ Cahier des charges d’enrobés à chaud”, Le Ministre des Travaux Publics, Algérie, 2005.

- [Chaffraix 2002] Chaffraix, V. “étude de l’extrusion du polyéthylène téréphtalate et de ses mélanges non-compatibilisés avec le polyéthylène haute densité -application au recyclage-”, thèse doctorat, l’Ecole des Mines de Paris
- [Chang-Xuan 2011] Chang-Xuan, H. “Analysis of Effects of Gradation and Compaction Number on Mixture Performance”, Journal of Wuhan University Technology, 2011, pp 49– 54.
- [Chen 2003] Chen, J.S, Liao, M.C, Lin, C.H. “Determination of polymer content in modified bitumen”, Materials and structures, Vol 36, 2003, pp. 594-598.
- [Chen 2004] Chen, J. S, lin, C. H. Stein, E, Hothan, J. “Development of a Mechanistic- Empirical Model to Characterize Rutting in Flexible Pavements». Journal of Computing in Civil Engineering”, Vol 130 (4),2004, pp. 519-525.
- [Cheng 2018] Cheng, Y, Yu, D, Gong, Y, Zhu, C, Tao, J, Wang, W. “Laboratory Evaluation on Performance of Eco-Friendly Basalt Fiber and Diatomite Compound Modified Asphalt Mixture”, 11, 2400, Materials 2018.
- [Chetref 1998] Chetref, B, Phelix, C. “Le recyclage des pneus usagés”, Revue Générale Routes et Aéroports, N°763, pp. 21-23, 1998.
- [Chettah 2008] Chettah, A. “Comportement vibroacoustique des structures élaborées à partir de poudrettes de pneus recyclés”, Thèse de doctorat de l’École Centrale de Lyon : Université de Reims, Novembre 2008, p 237.
- [Choquet 1993] Choquet, F. “Le vieillissement du bitume”, Centre de Recherche Routières, Octobre 1993.
- [Choudhary 2018] Choudhary, R, Kumar, A, Murkute, K. “Properties of Waste Polyethylene Terephthalate (PET) Modified Asphalt Mixes: Dependence on PET Size, PET Content, and Mixing Process”, Periodica Polytechnica Civil Engineering, 2018
- [Christophe 2003] Christophe, M. “La valorisation des matières plastiques en fin de vie: Etat des lieux et propositions d’amélioration”, Travail de Fin d’Etudes en vue de l’obtention du grade académique de Diplômé d’Etudes Spécialisées en Gestion de l’Environnement. Université Libre de Bruxelles: 2002-2003.

- [Contreras 2015] Contreras, L.R.Z, Cabanag, K.L.N, De Alday, H.A, Polillo, J.P.L, Saiyari, D.M, Manio, M.V.M. “Effects of Temperature in Mechanical Properties of Stone Mastic Asphalt (SMA) Mixture with Waste Polyethylene Terephthalate (PET)”, In Proceedings of the 2015 International Conference on Environmental Quality Concern, Control and Conservation, Kaohsiung, Taiwan, May 2015, pp 7–8.
- [Corté 2004] Corté, Jean-François et Di Benedetto, H. “Matériaux routiers bitumineux 1 : Description et propriétés des constituants”, Publication « Hermes-Science, Lavoisier », 2004. 234 p.
- [CST COLAS 2006] CST COLAS. “Commission Scientifique et Technique”, Paris, France, 2006.
- [CTTP 2004] CTTP. “Contrôle Technique des Travaux Publics”, Algérie, 2004.
- [CTTP 2004] CTTP. “Recommandation algériennes sur l’utilisation des bitumes et enrobés bitumineux à chaud”, MTP 2004.
- [Damodar et al, 2004] Damodar, N.Gujarati, "Econométrie", Traduction de la 4^{ème} édition Américaine par Bernard Bernier, 2004.
- [Dawson 2006] Dawson, A, Kolisoja, P. “Managing rutting in low volume roads”, Edition, ROADDEX III Lead Partner, July 2006, P 26.
- [De la Roche 1996] De la Roche, C. “Module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux”, Ecole Centrale de Paris, France, 1996.
- [Dekali 1996] Dekali, K. “Evolution des caractéristiques des bitumes à l’enrobage”, II^{ème} congrée algérien de la route- 1996.
- [Delorme 2007] Delorme, J. L, de la Roche, C, Wendling, L. “Manuel LPC d’aide à la formulation des enrobés”, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France, 2007.
- [Di benedetto 1990] Di benedetto, H. “Nouvelle approche du comportement des enrobés bitumineux : résultats expérimentaux et formulation rhéologique”, Mechanical Tests for Bituminous Mixes, Characterization, Design and Quality Control, Proceedings of the Fourth Rilem Symposium, Budapest, 1990.

- [Di benedetto 2004] Di Benedetto, H, Corté, J. F. “Matériaux routiers bitumineux, description et propriétés des constituants”, Lavoisier, tome 1, Paris 2004.
- [Di Benedetto 2005] Di Benedetto, H, Corté, J. F. “Matériaux bitumineux routiers 2, Constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges”, Éditions Lavoisier, Hermès Science, Paris, 2005, 283 pages.
- [Dickinson 2000] Dickinson, E. J. “Prediction of the Hardening of the Bitumen in Pavement Surfacing by Reaction with Atmospheric Oxygen”, ITRD, IJRMPD, Vol. 1(3), Issue Number 3, Pub. Hermès Sciences Publications. Lavoisier 2000, p.255-79.
- [Djabri 2016] Djabri, A, Hammana. A. “Caractérisation des enrobés bitumineux recyclés”, Université de Tébessa, Algérie, 2016.
- [Dongmo 2005] Dongmo. B.J. : « Caractérisation des déformations d’orniérage des chaussées bitumineuses », Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005, Lyon, France.
- [El beze 2008] El beze, L. “Recyclage à chaud des agrégats d’enrobés bitumineux : Identification de traceurs d’homogénéité du mélange entre bitume vieilli et bitume neuf d’apport”, Thèse de doctorat de l’université Paul Cézanne, décembre 2008.
- [El-Naga 2019] El-Naga, I. A, Ragab, M. “Benefits of utilization the recycle polyethylene terephthalate waste plastic materials as a modifier to asphalt mixtures”, Construction Building Materials, vol 219, 2019, pp:81–90.
- [EPA 1991] EPA. “Plastic wastes: management, control, recycling and disposal”, Pollution Technology Review No. 201, Noyes Data Corporation, Park Ridge, NJ, 1991.
- [Fang 2014] Fang, C, Wu, C, Hu, J, Yu, R, Zhang, Z, Nie, L, Zhou, S. and Mi, X. “Pavement Properties of Asphalt Modified with Packaging-Waste Polyethylene”, Journal of vinyl & additive technology, 20 (1), 2014, pp. 31-35.
- [Feng 2009] Feng, D, Yi, J, Wang, L, Wang, D. “Impact of Gradation Types on Freeze-Thaw Performance of Asphalt Mixtures in Seasonal Frozen Region”, 2009, pp 2336–2342.

- [Feng 2010] Feng, D, Yi, J, Wang, D, Chen, L. “Impact of salt and freeze-thaw cycles on performance of asphalt mixtures in coastal frozen region of China”, *Cold Regions Science Technology*, vol 62, pp 34–41.
- [Flynn 1993] Larry flynn, “Recycled plastic finds home in asphalt binders”, *Journal, Roads and Bridges*. March 1993.
- [Foolmaun 2012] Foolmaun, R. K, Ramjeeawon, T. “Disposal of post-consumer poly- ethylene terephthalate (PET) bottles: comparison of five disposal alternatives in the small island state of Mauritius using a life cycle assessment tool”, *Environmental Technology*, 33(5), 2012, pp. 563–572.
- [Frigione 2010] Frigione, M. “Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete”, *Waste Management*, 30(6), 2010 pp. 1101–1106.
- [Garforth 2002] Garforth, A.A, Ali, S, Hernández-Martínez, J, Akah, A. “Feedstock recycling of polymer wastes”, *CurrOpin. Solid State Mater. Sci*, 2004, 8, pp 419–425.
- [Gerritsen 1988] Gerritsen, A.H, Jongeneel, D.J. “Fatigue Properties of Asphalt Mixes Under Conditions of Very Low Loading Frequencies”, *Shell International Petroleum Company Limited*, Amsterdam, The Netherlands, 1988.
- [Glaoui 2011] Glaoui, B, Ven, M, Merbouh, M, Chailleux, E, Youcefi, A. “Thermal Fatigue with Freeze-thaw Cycles of Polymer Modified Bitumen”, *Journal Applied. Science*, Vol 11, 2011.
- [Glaoui 2012] Glaoui, B. “Contribution à la caractérisation des liants bitumineux par l’analyse vibratoire effet des cycles de fatigue thermiques sur les liants bitumineux”, *Thèse de doctorat*, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf d’Oran, 2012.
- [Glaoui 2014] Glaoui, B, Merbouh, M, Bendjima, M, Van de, V. “Impact of Freeze-Thaw Cycles on the Performance of Polymer Modified Bitumen”, *International Review of Civil Engineering (I.RE.C. E)*, 5(4), pp. 130- 134.
- [Goh 2012] Goh, S, You, Z. “Evaluation of hot-mix asphalt distress under rapid freeze- thaw cycles using image processing technique”, *Proc, 12th COTA International Conference of Transportation parent Professionals*, ASCE, Reston, VA, 2012, pp 3305–3315.

- [Gong 2016] Gong, X, Romero, P, Dong, Z, Sudbury, D.S. “The effect of freeze-thaw cycle on the low-temperature properties of asphalt fine aggregate matrix utilizing bending beam rheometer”, Cold Regions Science and Technology, vol 125, 2016, pp101–107.
- [Gordon 2003] Gordon, D, Airey, Y. K, Choi, A. C, Richard, C. E. “Durability Test Methods, Development of an accelerated durability assessment procedure for high modulus base (HMB) materials”, Paper 18, 6th RILEM Symposium PTEBM'03, Zurich, 2003, pp 160.
- [Gouisseem 2007] Gouisseem, L. “Contribution à l’amélioration des propriétés du polyéthylène téréphtalate (PET) recyclé”, Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas, Algérie, 2007.
- [GOUPY, 1999] GOUPY Jacques «Plans d’expériences pour surfaces de réponse ». Dunod. Paris. Page 409. (1999). ISBN 2 10 003993 8.
- [GOUPY, 2001] GOUPY Jacques «Introduction aux Plans d'expériences». Dunod. Paris. Page 303. (2001).
- [GOUPY, 2006] Jacques GOUPY, "Les plans d'expériences", 2006.
- [Guercio 2014] Guercio, M, McCarthy, L, Mehta, Y. “Mechanical Responses and Viscoelastic Properties of Asphalt Mixtures Under Heavy Static and Dynamic Aircraft Loads”, Transportation Research Record Journal Transportation Research, Board 2449, pp 88– 95.
- [Hachani 2013] Hachani I, Daas, D. “Etude d’un béton bitumineux modifié à la poudrette de caoutchouc - Influence du mode de modification”, UKM Ouargla, Algérie, 2013.
- [Haddadi 2008] Haddadi, S, Ghorbel, E, Laradi, N. “Fluage des bétons bitumineux- Influence de la classe du bitume et du dosage en poudrette de caoutchouc”, European Journal of Environmental and Civil Engineering, 12 (3), 2008, pp. 229-241.
- [Hassani 2005] Hassani, A, Ganjidoust, H, Maghanaki, A. A. “Use of plastic waste (polyethylene terephthalate) in asphalt concrete mixture as aggregate replacement”, Waste Management & Research, 23(4), 2005, pp. 322–327.
- [Hinislioglu 2005] Hinislioglu, S, Aras, H.N, Bayrak, O.Ü. “Effects of high-density polyethylene on the permanent deformation of asphalt concrete”, Indian Journal of Engineering Material Science 2005, vol 12, pp 456–460.

- [HOUEL 2008] Houel, A. “Endommagement à la fatigue et fissuration mécanique des enrobés bitumineux sur dalle orthotrope”, thèse de doctorat, L’institut notionnel des sciences appliquées de Lyon, 24 juin 2008.
- [Huang 2004] Huang, Y.H, “Pavement Analysis and Design”, n 775, 2004.
- [Iddir 1998] Iddir, R. “Etude du comportement rhéologique des bitumes et influence sur les enrobés bitumineux- IGC- USTHB”, Thèse de magister, 1998.
- [Jan 2017] Jan, H, Aman, M.Y, Karim, F. “Plastic Bottles Waste Utilization as Modifier for Asphalt Mixture Production”, MATEC Web Conferences, 103(6), 2017,09007.
- [Jassim 2014] Jassim, H.M, Mahmood, O.T, Ahmed, S.A. “Optimum use of plastic waste to enhance the Marshall properties and moisture resistance of hot mix asphalt”, International Journal of Engineering Trends and Technology, vol 7 ,2014, pp 18–25.
- [Jha 2010] Jha, V, Mehta, Y, Norton, A, Tomlinson, C, McCarthy, L. “Sensitivity analysis and calibration of the alligator cracking model using regional data”, Geo Florida: Advances in Analysis, Modeling & Design, 2010.
- [JORDP 2011] Journal Officiel de la République Algérienne N 18, 23 mars 2011.
- [Kakar 2015] Kakar, M. R, Hamzah, M. O, Valentin, J. “A review on moisture damages of hot and warm mix asphalt and related investigations”, Journal of Cleaner Production, vol 99 , 2015, pp39–58.
- [Karen 2005] Karen, S.H, Olson, J.P, Farrington, S.P, Lens, J, “Improved Performance of Unpaved Roads During Spring Thaw”, Engineer Research and Development Center. Cold Reg. Res. Eng. Lab. United State, 2005.
- [Karmakar 2016] Karmakar, S, Kumar, S. R. “Effect of Waste Plastic and Waste Tires Ash on Mechanical Behavior of Bitumen”, American Society of Civil Engineers, MT 2016, 1943-5533.0001484.
- [Kettil 2005] Kettil, P, Engström, G, Wiberg N. E. “Coupled Hydro-mechanical Wave Propagation in Road Structures”, Computers & structures, 83(21), 2005, pp 1719-1729.

- [Khengaoui 2013] Khengaoui, S “Valorisation du sable de dunes en couche de roulement : Sable – bitume ”, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algeria, 2013.
- [Krishnan 2005] Krishnan, J. M, Rajagopal, K. R. “On the mechanical behaviour of asphalt”, Science Direct Elsevier Ltd. Mechanics of materials 37, 2005, pp 1085- 1100.
- [Lagrade, 1983] J. D. Lagrade, "Initiation à l'analyse des données", Edition Dunod, Paris, 1983
- [Laldji 2015] Laldji, S. “Les Enrobés bitumineux”, ETS Cours, 2015.
- [Lamothe 2015] Lamothe, S, Perraton, D, Di Benedetto, H. “Contraction and expansion of partially saturated hot mix asphalt samples exposed to freeze-thaw cycles”, Road Materials and Pavement Design,16 (2), 2015, pp 277–299.
- [Laradi 1996] Laradi, N, Ait Mokhtar, K, Haddadi, S, Belakhdar. “Etude du phénomène de fatigue des enrobés bitumineux algériens”, 4, 219, Eurobitume, 1996.
- [LCPC – SETRA 1994] LCPC – SETRA. “Conception et dimensionnement des structures de chaussée, guide technique”, paris, décembre, 1994.
- [Lei 2020] Lei, B, Li, W, Luo, Z, Tam, V. W, Dong, W, Wang, K. “Performance Enhancement of Permeable Asphalt Mixtures with Recycled Aggregat for Concrete Pavement Application”, Front. Mater. 7, 2020, p253.
- [Liu 2019] Liu, H, Zhu, B, Wei, H, Chai, C, Chen, Y. “Laboratory evaluation on the performance of porous asphalt mixture with steel slag for seasonal frozen regions”, Sustainability Sustainability 2019, 11, 6924.
- [Lytton 1983] Lytton, R.L, Shanmugham, U, Garret, B.D. “Design of asphalt pavements for thermal fatigue cracking”,1983.
- [Lytton 1993] Lytton, R, Uzan, J, Emmanuel, Reynaldo, R, Dennis H. “Development and Validation of Performance Prediction Models and Specifications for Asphalt Binders and Paving Mixes”, SHRP-A-357 Strategic Highway Research Program, 1993.
- [Ma 2018] Ma, T, Zhang, D, Zhang, Y, Wang, S, Huang, X. “Simulation of wheel tracking test for asphalt mixture using discrete element modeling”, Road Mater Pavement, 19, 2018, pp367–384.

- [Mabui 2020] Mabui, D. S, Tjaronge, M. W, Adisasmita, S. A, Pasra. M. “Performance of porous asphalt containing modified Buton asphalt and plastic waste”, International Journal of GEOMATE 18 (65), (P). 2186-2990 (O). Geotechnique. Construction Materials and Environment, 2020, pp. 118-123.
- [Maillard 2005] Maillard S. “Fissuration et autoréparation des liants bitumineux - apport de l’essai de rupture locale répétée sur bitume”, Thèse de doctorat Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes, France, 2005.
- [Mashaan 2021] Mashaan, N.S, Chegenizadeh, A, Nikraz, H, Rezagholilou, A. “Investigating the engineering properties of asphalt binder modified with waste plastic polymer”, Ain shams Engineering Journal, vol 12 (2), 2021, pp 1569-1574.
- [Mashaan 2021] Mashaan, N.S, Chegenizadeh, A, Nikraz, H. “Laboratory Properties of Waste PET Plastic-Modified Asphalt Mixes. Recycling”, 6(3), 49, 2021.
- [Mauduit 2007] Mauduit V, Mauduit C, Vulcano-Greullet N. et Coulon N. “Dégradations précoces des couches de roulement bitumineuses à la sortie des hivers”, Revue générale des routes et des aéroports (RGRA) n° 859 juillet-août 2007, pp.99-104
- [Mauduit 2010] C. Mauduit, Hammoum, F, Piau, J.M, Mauduit, V, Ludwig, S, Hamon, D. “Quantifying expansion effects induced by freeze-thaw cycles in partially water saturated bituminous mix: Laboratory experiments”, Road Materials and Pavement Design, Vol 11 (sup1), 2010, pp 443–457.
- [Mazouz 2019] Mazouz, M, Merbouh, M. “The Effect of Low-Density Polyethylene Addition and Temperature on Creep recovery Behavior of Hot Mix Asphalt”, Civil Engineering Journal, 5 (3), 2019, pp. 597-607.
- [Medjdoub 2011] Medjdoub, N. “Effets du triphenylphosphite et du SEBS-g-MA sur les propriétés du système (PET/PEHD) à base de matériaux recyclé”, Mémoire de Master, Université Ferhat Abbas, Algérie, 2011.
- [MEER & ARIF 2001] Ministère de l’Environnement et des Energies Renouvelables loi « relative à la gestion, au contrôle et l’élimination des déchets, n° 01-19, 12 Décembre 2001.

- [Mei 2010] Mei, Y, Liang, N, Cao, A. Y, Li, Z. “Fatigue Life Prediction of Asphalt Pavement Based on Cumulative Damage”, Preceding’s of the Conference, International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, Wuhan, 2010, pp. 2876-2882.
- [Merbouh 2000] Merbouh, M. “caractérisation rhéologique de fluides complexes, application aux bitumes routiers’, mémoire de magistère, Université de Bechar, juin 2000.
- [Merbouh 2010] Merbouh, M. “Contribution à la modélisation du comportement rhéologique des enrobés bitumineux, Influence des conditions extrêmes de température et de trafic en fatigue’’, thèse de doctorat, spécialité mécanique et ingénierie, université bordeaux, 2010.
- [Merbouh 2012] Merbouh, M. “Effect of thermal cycling on the creep-recovery behaviour of road bitumen”, Energy Procedia vol 18, 2012, pp 1106–1114.
- [Meunier 2012] Meunier, M. “Prédiction de l’orniérage lié aux déformations permanentes des enrobés bitumineux’’, Thèse de doctorat électronique. École de technologie supérieure.
- [Meza 2009] Meza, H, Castillo-Alvarez, A, Gonzalez-Bonilla, C, Meza, I. “Cross-talk between Rac1 and Cdc42 GTPases regulates formation of filopodia required for dengue virus type-2 entry into HMEC-1 cells”, J Gen Virol 90: 2009, pp 2902–2911.
- [Miller 2012] Miller, C. “Profiles in garbage: Polyethylene Terephthalate” Cited 2016 Jun 7, Last accessed: Jun 7, 2016.
- [Modarres 2014] Modarres, A, Hamed, H. “Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes”, Materials & Design, 61, 2014, pp. 8-15.
- [Moghaddam 2012] Moghaddam, T. B, Karim, M. R, Syammaun, T. “Dynamic properties of stone mastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles”, Construction and Building Materials, 34, 2012.
- [Moghaddam 2012] Moghaddam, T.B, Karim, M.R. “Properties of SMA mixtures containing waste Polyethylene Terephthalate”, International Journal of Chemical and Biological Engineering, 2012, vol 6, pp 612–622.

- [Moghaddam 2013] Moghaddam, T.B, Karim, M.R, Soltani, M. “Utilization of waste plastic bottles in asphalt mixture”, *Journal of Engineering Science and Technology*, 2013, vol 8, pp 264–271.
- [Moghaddam 2014] Moghaddam, T.B, Soltani, M, Karim, M.R. “Evaluation of permanent deformation characteristics of unmodified and Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures using dynamic creep test”, *Materials and Design* vol 53, 2014, pp 317–324.
- [MoRTH 2013] MoRTH. “Specifications for Road and Bridge Works”, Ministry of Roads Transport and Highways, 5th Revision, Govt. of India, 2013.
- [Murphy 2000] Murphy, M, O’mahony, M, Lycett, C, Jamieson, I. “Bitumens modified with recycled polymers”, *Materials and Structures*, Vol.33, 2000, pp. 438-444.
- [NF EN 2008] NF EN 12697 – 12, Mélange bitumineux – Méthodes d’essai pour mélange hydrocarboné à chaud –Partie 12. “Détermination de la sensibilité à l’eau de matériaux bitumineux”, (Méthode A : ITSR et Méthode B : Essai Duriez), 2008.
- [Nguyen 2006] Nguyen, D. T. “Prédiction des déformation permanentes des couches de surface des chaussées bitumineuses”, *Ecole des Ponts Paris Tech*, 2006.
- [Nguyen 2009] Nguyen, M. L. “Etude de la fissuration et de la fatigue des enrobés bitumineux”, Thèse de doctorat de l’institut national des sciences appliquées des Lyon. 2009, p 264.
- [Nicholls 1998] Nicholls, J.C. “Asphalt Surfacing. In: Performance of Bituminous and Hydraulic Materials in Pavements: Proceedings of the Fourth European Symposium”, London, UK: E & FN Spon, 1998.
- [Nien 2008] Nien, Y. H, Yeh, P. H, Chen, W.C, Liu, W.T, “Investigation of Flow Properties of Asphalt Binders Containing Polymer Modifiers”, *Polymer Composites*, 29 (5), 2008.
- [Olard 2000] Olard, F. “Etude et modélisation de comportement thermo-mécanique des enrobés bitumineux”, Mémoire de recherche pour l’obtention du Diplôme d’Etudes Approfondies de Génie Civil de l’Ecole Doctorale MEGA de Lyon, juillet 2000.

[Olard 2003] Olard, F, Di benedetto, H, Dony, A. “Properties of bituminous mixtures at low temperatures and relations with binder characteristics”, 6th International RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, Zurich, 2003.

[Olard 2003] Olard, F. “Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basse températures, relation entre les propriétés du liant et de l’enrobé”, Thèse de doctorat, L’institut notionnel des sciences appliquées de Lyon, 30 Octobre, 2003.

[ONS 2020] Office National des Statistiques année 2020.

[Ould henia 2005] Ould henia, M. “Modélisation et prédiction du comportement rhéologique des mélanges bitume-caoutchouc”, Thèse de docteur ès sciences Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 2005.

[Özgan 2013] Özgan, E, Serin, S. “Investigation of certain engineering characteristics of asphalt concrete exposed to freeze- thaw cycles”, Cold Regions Science Technology, vol 85, 2013, pp 131–136.

[Padhan 2013] Padhan, R. K, Gupta, A. A, Badoni, R. P, Bhatnagar, A.K. “Polyethylene terephthalate waste derived chemicals as an antistripping additive for bitumen–An environment friendly approach for disposal of environmentally hazardous material”, Polymer Degradation and Stability, 98(12), 2013, pp. 2592–2601.

[Panoskaltsis 2005] Panoskaltsis, V, Panneerselvam, D. “An Anisotropic Hyperelastic-Viscoplastic Damage Model for Asphalt Concrete Materials and Its Numerical Implementation”. 5th GRACM International Congress on Computational Mechanics Limassol, 29 June – 1 July, 2005.

[Persoz 1960] Persoz, B. “Introduction à l’étude de la rhéologie”, Edition Dunod-Paris 1960, pp.10-11.

[Piarc 1999] Piarc. “Use of modified bituminous binders, special bitumens with additives in road pavements”, Laboratoire Central des ponts et chaussée, 1999.

[PILLET, 2001] M.PILLET, "Les plans d'expériences par la méthode de Taguchi", Les éditions d'organisation, 2001.

- [Presti 2013] Presti, D. L. “Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: A literature review”, *Construction and Building Materials*, vol 49, 2013.
- [Pucci 2000] Pucci, T. “Approche prévisionnelle de la fissuration par sollicitation thermique des revêtements bitumineux”, Thèse de Doctorat EPFL Lausanne, 2000.
- [Purcell 1976] Purcell, A.H, Smith, F.L. “Energy and environmental impacts of materials alternatives: An assessment of quantitative understanding”, *Resour, Recovery Conserv*, 1976, 2, pp 93–102.
- [Rahman 2013] Rahman W, M, Abdul N, W, Wahab, A. F. A, “Green pavement using recycled polyethylene terephthalate (PET) as partial fine aggregate replacement in modified asphalt”, *Proc Eng* 53, 2013, pp124–128.
- [Ramond 2000] Ramond, G, Epinat, M. “Contribution à l’élaboration d’un mode opératoire de mesure du module complexe”, *Bitume actualités*, N°101, 2000, pp. 37-42.
- [Ramond 2004] Ramond, G, Lesueur, D. “Adhésion Liant Granulats, Matériaux routiers bitumineux”, Tome 1, Editions Lavoisier, 2004.
- [Rapport] Rapport. “Marché mondial des emballages en PET – croissance, tendances, impact du covid-19 et prévisions (2022-2027)”, 2019.
- [Rashadul 2016] Rashadul, I. M. “Effects of large freeze-thaw cycles on stiffness and tensile strength of asphalt concrete”, *Journal of Cold Regions Engineering*, vol 30 ,2016, 6014006,
- [Rebeiz 1995] Rebeiz, K. S, Craft, A.P. “Plastic waste management in construction: technological and institutional issues Resources”, *Conservation and Recycling* 15, 1995, pp 245–257.
- [Saoula 2010] Saoula, S. “Approche Modéliste et Valorisation des Enrobés Modifiés par Ajout de Polymères - Impact sur l’Environnement”, Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, 2010.
- [Schram 2012] Schram S. “Ranking of HMA Moisture Sensitivity Tests in Iowa”, SP&R Project # RB10-012, Final Report, Iowa Department of Transportation, 2012.
- [Serfass 2000] Serfass, J. P, Bense, P, Tessonneau, H. “Enrobés bitumineux modifiés au polyéthylène”, *Revue Générale Routes et Aérodrômes*, N°787, 2000, pp. 47-57.

- [SETRA 1987] Ministère de l'équipement, du logement, de l'aménagement du territoire, et des transports "Enrobé bitumineux renforcés par addition de déchets plastiques." SETRA Mai 1987.
- [Shell bitumes 1990] Shell bitumes, "Bitumes –Techniques et utilisations", 1991.
- [Si 2013] Si, W, Ma, B, Wang, H, Li, N, Hu, J. "Analysis of Compressive Characteristics of Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles in Cold Plateau Regions", Journal of Highway and Transportation Research and Development, English Ed. 7, 2013, pp 17–22.
- [Sidibé 1995] Sidibé, M. "Etude de l'utilisation des granulats de type silexlte en géotechnique routière (notamment en couches de base et revêtement des couches de chaussées)", projet de fin d'étude de l'école polytechnique de tries, université cheikh anta diop de dakar, juillet 1995.
- [Silva 2015] Silva, J. A. A, Lucena, L. C. DE F. L, Rodrigues, J. K. G, Carvalho, M. W, Costa, D. B. "Use of micronized polyethylene terephthalate (PET) waste in asphalt binder", Petroleum Science and Technology, 33 (15-16), 2015, pp 1508–1515.
- [Silva 2018] Silva, J.D.A.A.E, Rodrigues, J.K.G, de Carvalho, M.W, Lucena, L.C.D.F.L, Cavalcante, E.H. "Mechanical Performance of Asphalt Mixtures Using Polymer-Micronized PET-Modified Binder", Road Materials and Pavement Design, vol 19, 2018, pp 1001–1009.
- [Simpson 2001] Simpson. "A Characterization of Transverse Profiles", FHWA-RD-01-024, Federal Highway administration. Highway Research Center, Georgetown Pike, 2001
- [Skok 2002] Skok, E, Johnson. "An Asphalt Pavement Analyses (APA) Evaluation", Technical report, Minnesota department of transportation, September, 2002.
- [Sohm 2011] Sohm, J. "Prédiction des déformations permanentes des matériaux bitumineux", Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2011.
- [Sousa 1991] Sousa, J, Craus, J, Monismith, C, "Summary report on permanent deformation in asphalt concrete", National research council. Washington, D.C, 1991.
- [Stearne 1969] Stearne, J.M, Ward, I.M. "The tensile behavior of polyethylene terephthalate", Journal of Materials Science, vol 4, 1088 ,1969.

- [Tapkin 2009] Tapkin, S, Cevik, A, Usar, U. “Accumulated strain prediction of polypropylene modified Marshall specimens in repeated creep test using artificial neural networks”. *Expert Syst Appl*; 36(11), 2009, pp 186–97.
- [Tarefder 2018] Tarefder, R, Faisal, H, Barlas, G. “Freeze-thaw effects on fatigue life of hot mix asphalt and stiffness of asphalt binder”, *Cold Regions Science and Technology*, vol 153, 2018, pp 197–204.
- [Tasdemir 2007] Tasdemir, Y, Agar, E. “Investigation of the low temperature performances of polymer and fiber modified asphalt mixtures”, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 14 (2), 2007, pp. 151-157.
- [Tayfur 2007] Tayfur S, Özen H, Aksoy A, “Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers”, *Construction and Building Materials*, Vol.21, 2007, pp. 328-337.
- [Teltayev 2019] Teltayev, B.B, Rossi. C. O, Izmailova. G.G, Erik, D. Amirbayev, E.D. “Effect of Freeze-Thaw Cycles on Mechanical Characteristics of Bitumens and Stone Mastic Asphalts”, *applied sciences*, 9(3), 2019, p 458.
- [Usirf 2001] Usirf, R. “Union des syndicats de l’industrie routière française.”, *Les enrobés bitumineux – Tome 1*, 2001.
- [Vaitkus 2017] Vaitkus, A, Vorobjovas, V, Kleiziene, R, Šernas, O. and Grazulyte, J. “Modified asphalt mixtures for heavy duty pavement wearing layers”, *Construction and Building Materials*, 131, 2017, pp. 503-511.
- [Verhasselt 2003] Verhasselt, A, Sainton, A, Verhelst, F. “Modification du bitume et des enrobés bitumineux. Centre de recherches routières”, *Rapport de Recherche*, Belgique, 2003.
- [Wei 2015] Wei, S, Ning, L, Biao, M, Junping, R, Hainian, W, Jian, H. “Impact of freeze- thaw cycles on compressive characteristics of asphalt mixture in cold regions”, *Journal of Wuhan University Technology Material and Science Edition*, vol 30, 2015, pp703–709.
- [White 2002] White, T, Haddock, J, Hand, A, Fang, H. “Contributions of pavement structural layers to rutting of hot mix asphalt pavements”, *NCHRP Rep. 468*, National Cooperative Highway

Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C, 2002.

[WHO 2006] WHO (World Health Organization). Guidelines for drinking water quality: Recommendations in book. Guidelines for drinking water quality: Recommendations. (2006) Geneva.

[Yan 2008] Yan, M, Zhi-yong, L, Ying-jun, M. “Temperature Modification Coefficient of compressive modulus of asphalt mixture”, Journal of Tongji University Natural Science Edition, 2008, pp 182–186.

[Yan 2015] Yan, K.Z, Ge, D.D, You, L.Y, Wang, X.L. “Laboratory investigation of the characteristics of SMA mixtures under freeze–thaw cycles”. Cold Reg. Sci. Technol. 2015, 119, 2015, pp68–74.

[Yang 2005] Yang, G. Li. S. L, Jiang J.M, WU, C.X. “Polymer”, 46, 11142-11148, 2005.

[Yao 2014] Yao, Z, Zhang, X, Ge, Z, Jin, Z, Han, J. “Mix Proportion Design and Mechanical Properties of Recycled PET Concrete.” Journal of Testing and Evaluation, 43(2), 10.

[Yi-qiu 2011] Yi-qiu, T, Li-dong, Z, Bi-Wll, L. “Research on Freeze-Thaw Damage Model and Life Prediction of Asphalt Mixture”, Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, pp1–7.

[Zaniewski 2003] Zaniewski, J, Nallamotheu, S. “Evaluation of Binder Graded on Rutting Performance.” Report of the West Virginia Highways Department, June, 2003.

[Zemmiri 2008] Zemmiri, A. A. “Comparaison des formulations d'enrobes à chaud pour couches de roulement des chaussées très circulées utilisées en France et en Algérie du point de vue sécurité (glissance) et orniérage”, Certificat d'études supérieures - ENTPE de Lyon 2008, p 112.

[Zhang 2021] Zhang, W, Chen, C; Shen, S, Louay. N. M, F, Cui C, Wu, S, Ali R, K. “Investigation of Field Rut Depth of Asphalt Pavements Using Hamburg Wheel Tracking Test” J. Transp. Eng, Part B: Pavements, 147(1), 2021, 04020091 .

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[Ziari 2016] Ziari, H, Kaliji, A.G, Babagoli, R. “Laboratory evaluation of the effect of waste plastic bottle (PET) on rutting performance of hot mix asphalt mixtures”, Petroleum Science and Technology, 2016, vol 34, pp 819–823.

[Zoorob 2000] Zoorob, S.E, Suparna, L.B. “Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded Asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt)”, Cement & Concrete Composites, Vol.22, 2000, pp. 233-242.

REFERENCES WEBOGRAPHIE

[Site web 1] <http://www.xn--guide-dchets-heb.com/>

[Site web 2] <http://www.planetepropre.fr/details-recyclage+des+gobelets+et+des+canettes-71.html>

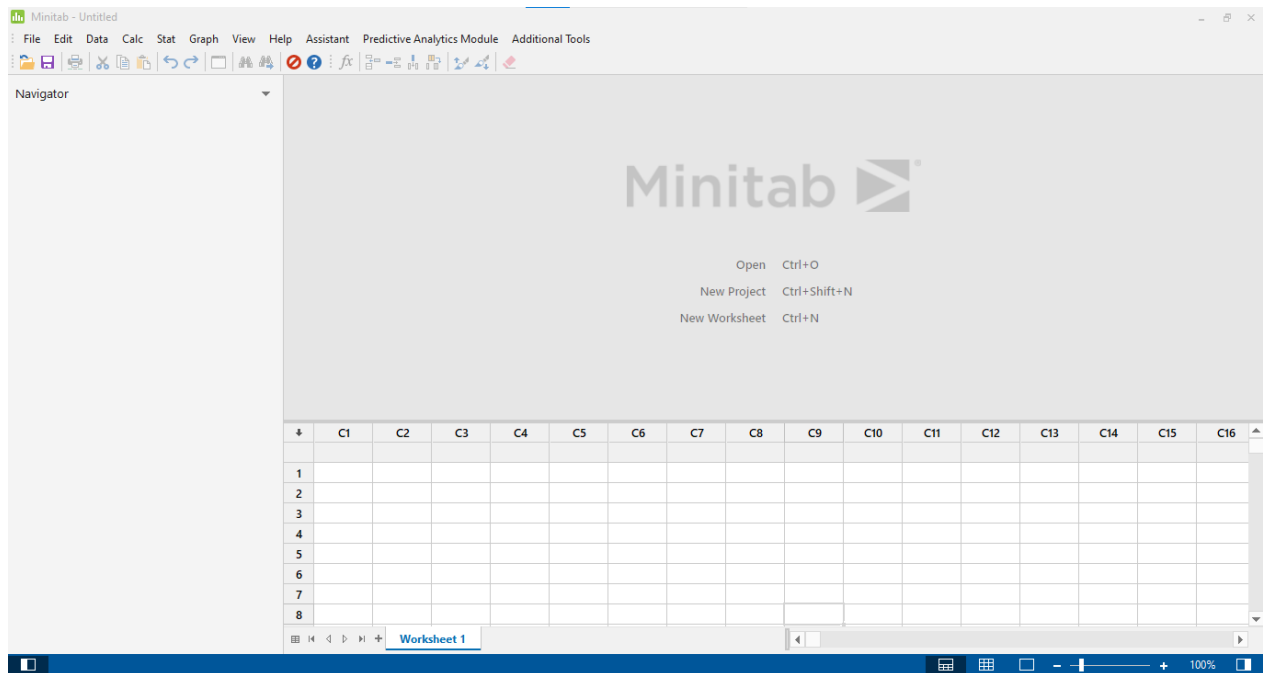
[Site web 3] PEMRG, (2007): <https://www.plasticseurope.org/en/resources/market-data>

[Site web 4] <https://support.minitab.com/en-us/minitab/>

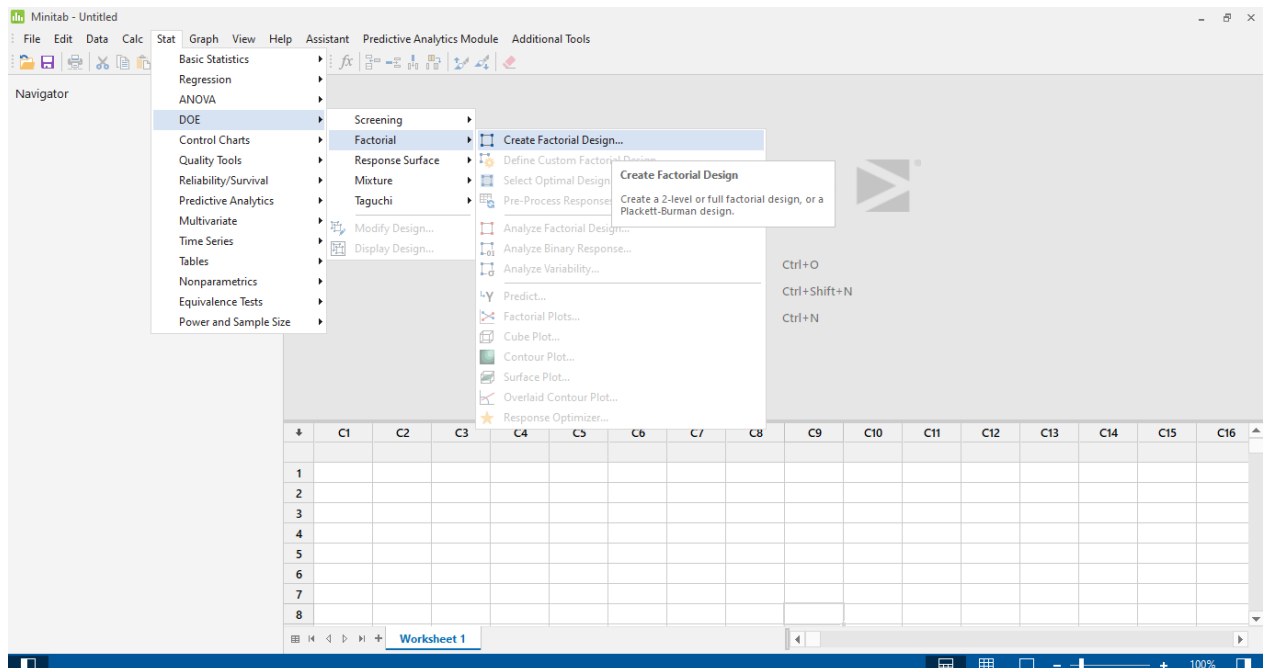
ANNEXE A

Les étapes d'Introduction des données dans le logiciel Minitab

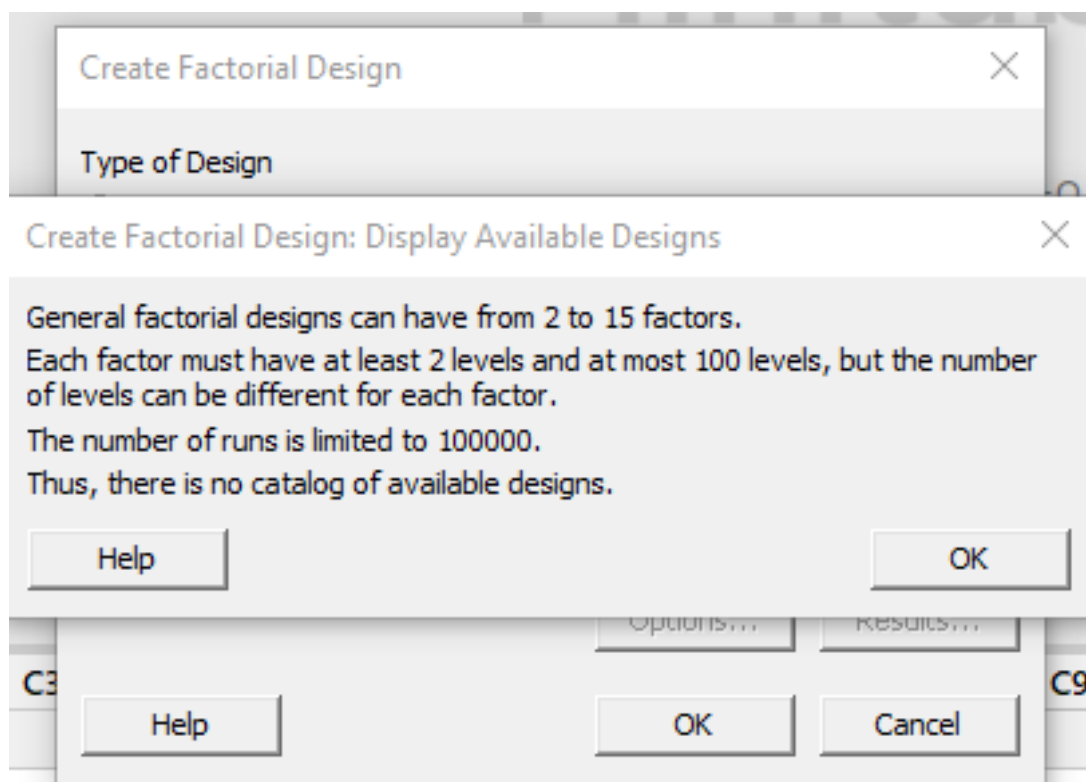
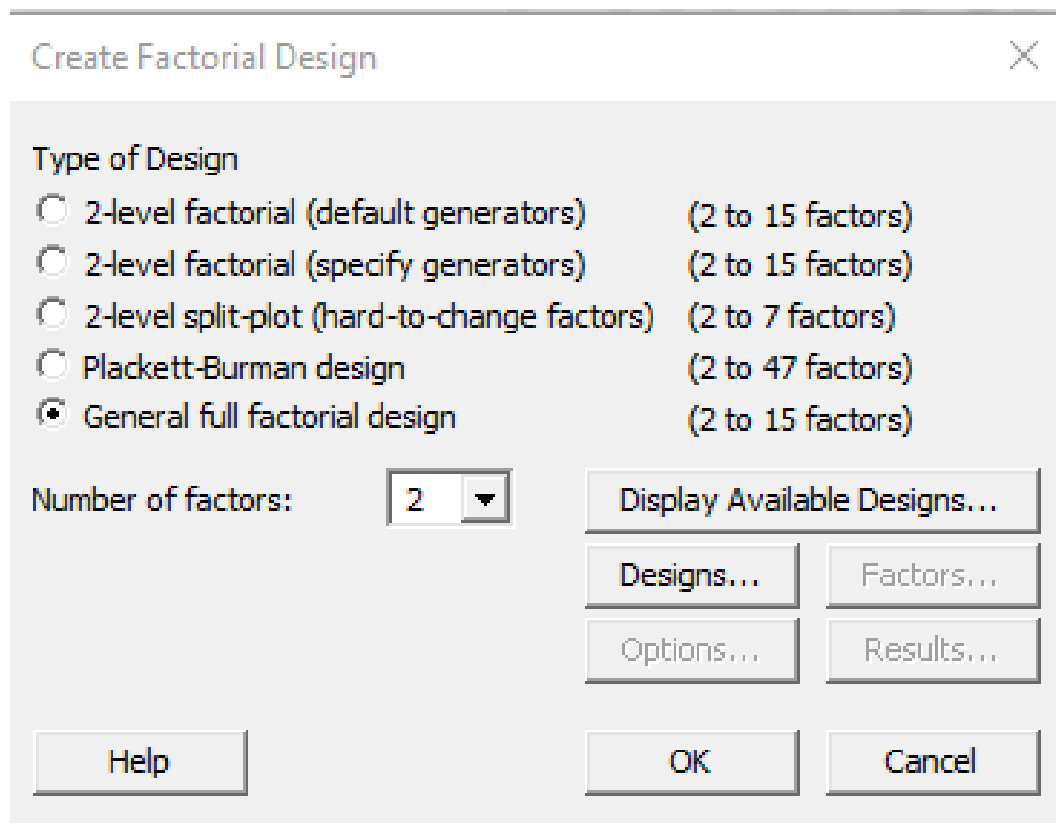
1. L'interface de Minitab



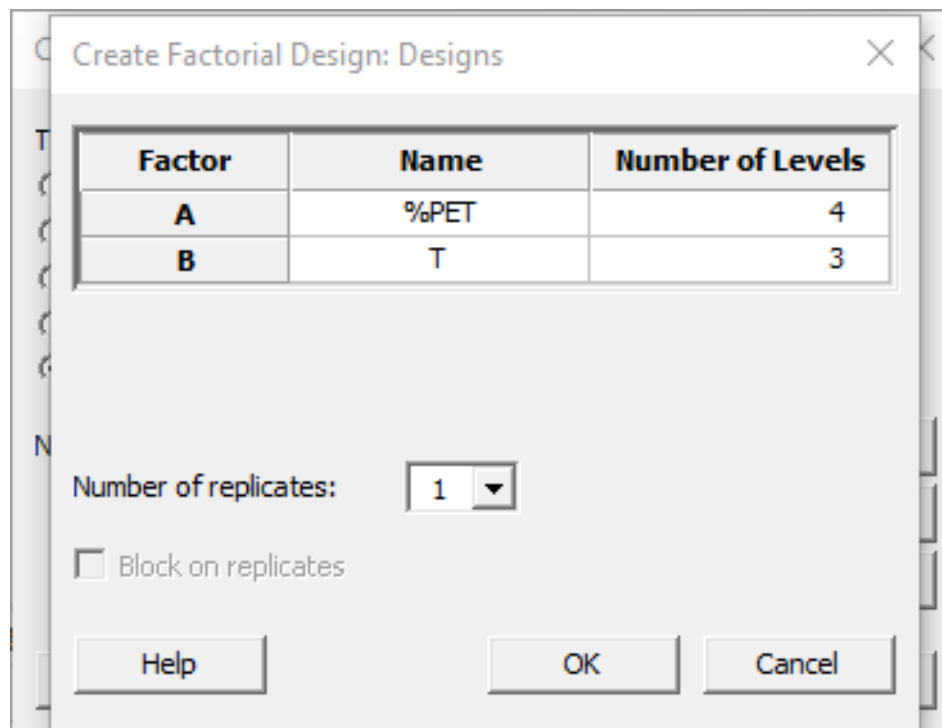
2. Creation du plan factoriel



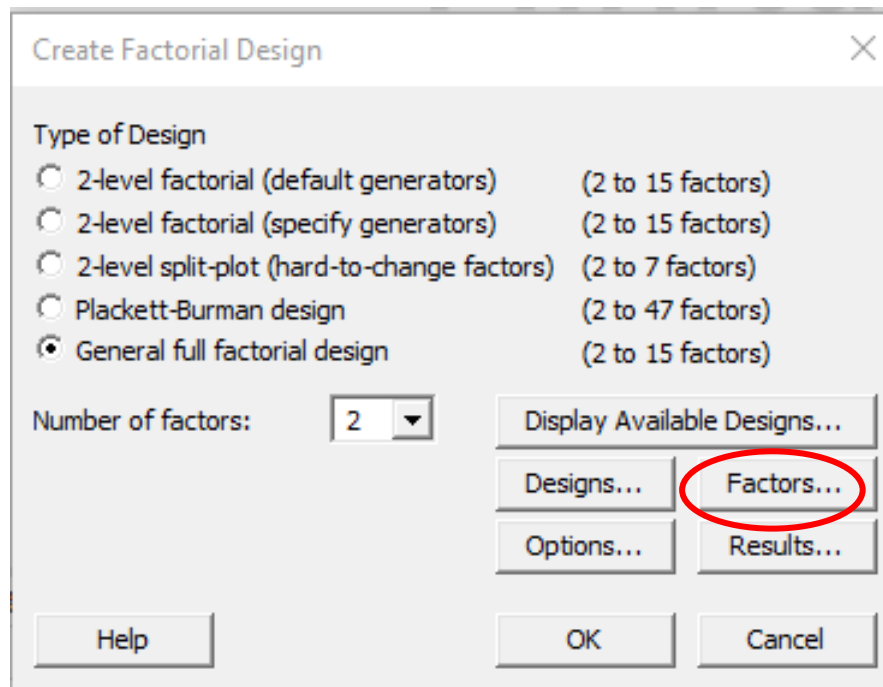
3. Choix de modèle



4. Introduction des facteurs et leurs niveaux



5. Introduction des valeurs de chaque niveau (remplissage des données)



Create Factorial Design

Create Factorial Design: Factors

Factor	Name	Type	Levels	Level Values			
A	%PET	Numeric	4	0	3	5	7
B	T	Numeric	3	0	25	50	

Help

OK

Cancel

Help

OK

Cancel

6. Choix des options

Create Factorial Design

Type of Design

Create Factorial Designs: Options

☐ Randomize runs
Base for random data generator:

☒ Store design in worksheet

Help

OK

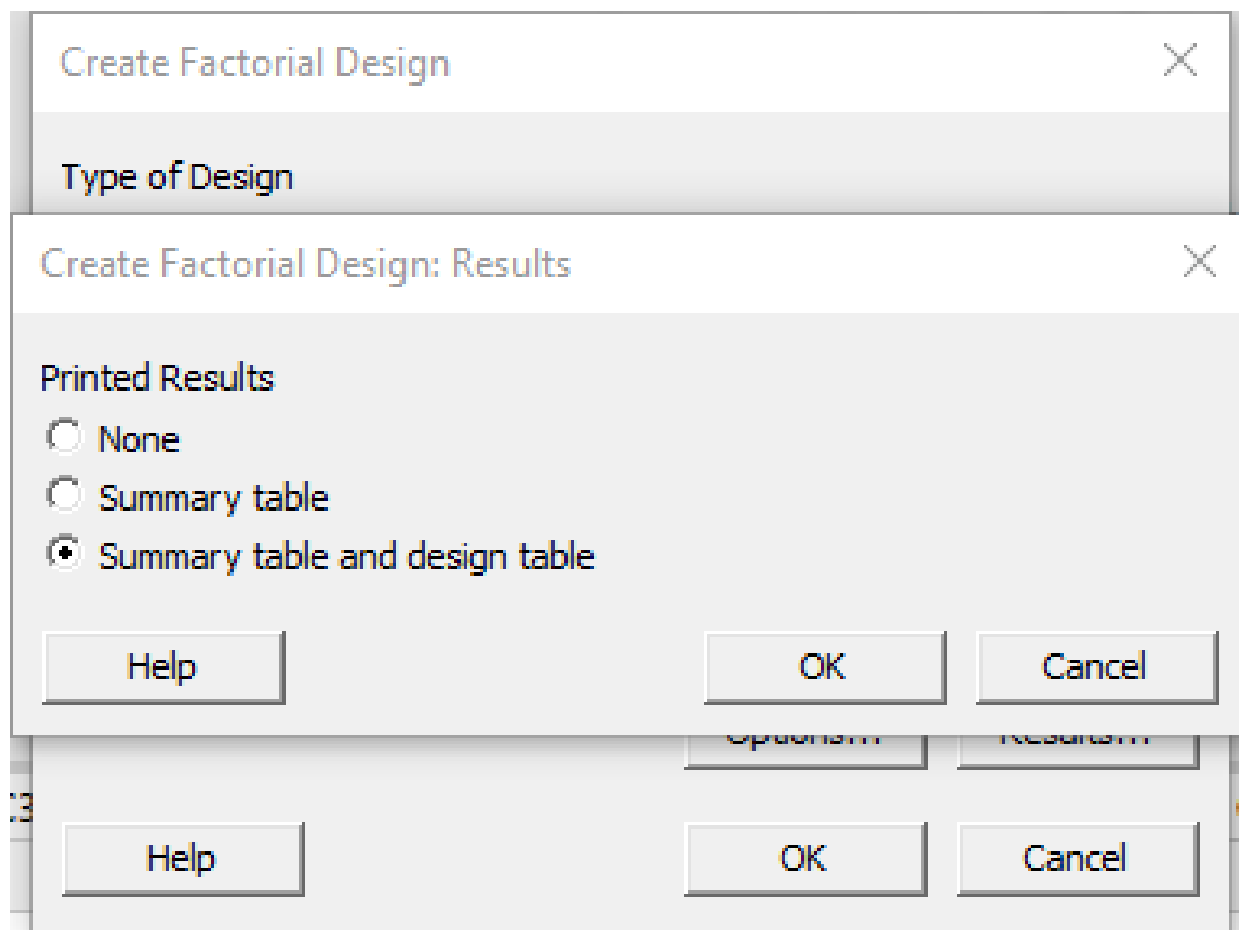
Cancel

Help

OK

Cancel

7. Choix le type de stockage de résultats



8. Le tableau des données généré par le Minitab

WORKSHEET 1

Multilevel Factorial Design

Design Summary

Factors: 2 Replicates: 1
Base runs: 12 Total runs: 12
Base blocks: 1 Total blocks: 1

Number of levels: 4; 3

Design Table

Run	Blk	A	B
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	1	3
4	1	2	1
5	1	2	2
6	1	2	3
7	1	3	1
8	1	3	2
9	1	3	3
10	1	4	1
11	1	4	2
12	1	4	3

9. Affichage des données dans la feuille de calculs

The screenshot shows the Minitab Multilevel Factorial Design worksheet. The title bar indicates the file is 'Untitled'. The menu bar includes File, Edit, Data, Calc, Stat, Graph, View, Help, Assistant, Predictive Analytics Module, and Additional Tools. The Navigator pane on the left shows 'Multilevel Factorial Design' and 'Worksheet 1'. The main window displays the 'Multilevel Factorial Design' title and a 'Design Summary' section.

Design Summary

Factors:	2	Replicates:	1
Base runs:	12	Total runs:	12
Base blocks:	1	Total blocks:	1

Below the summary is a data table with 16 columns (C1 to C16) and 14 rows (1 to 14). The first six columns (C1-C6) contain data for the design, while columns C7-C16 are empty.

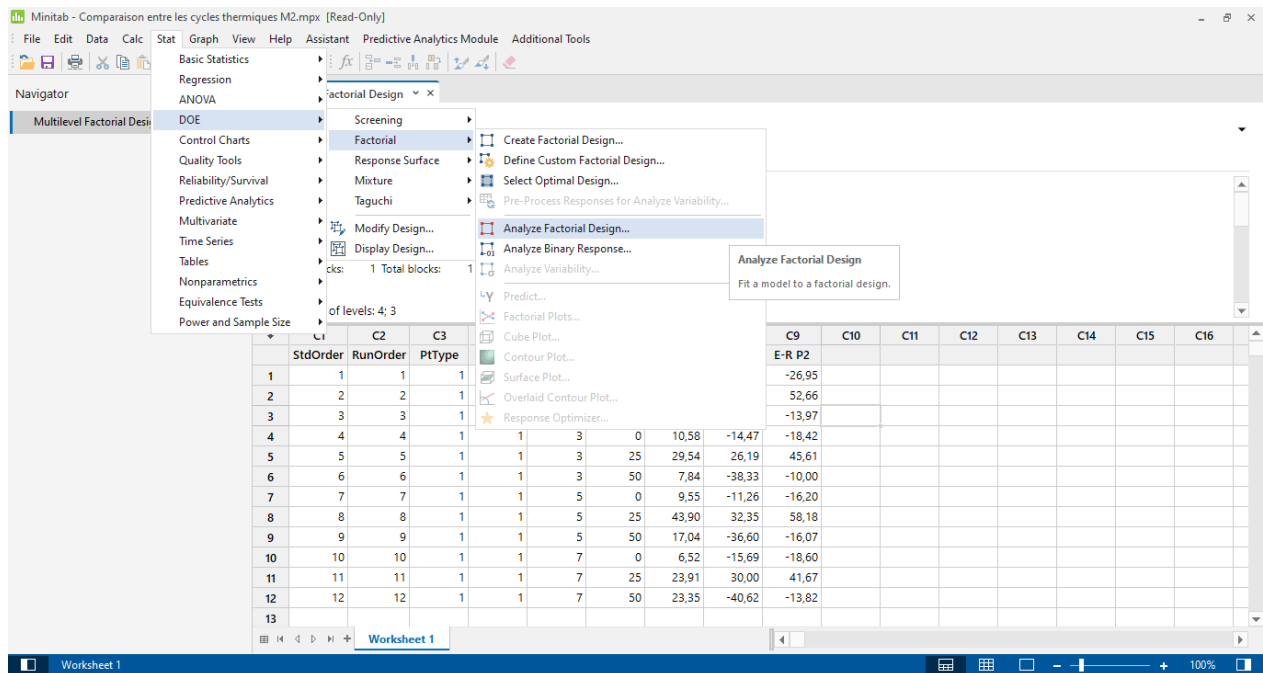
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
	StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	%PET	T										
1	1	1	1	1	0	0										
2	2	2	1	1	0	25										
3	3	3	1	1	0	50										
4	4	4	1	1	3	0										
5	5	5	1	1	3	25										
6	6	6	1	1	3	50										
7	7	7	1	1	5	0										
8	8	8	1	1	5	25										
9	9	9	1	1	5	50										
10	10	10	1	1	7	0										
11	11	11	1	1	7	25										
12	12	12	1	1	7	50										
13																
14																

The status bar at the bottom shows 'Worksheet 1' and a zoom level of 100%.

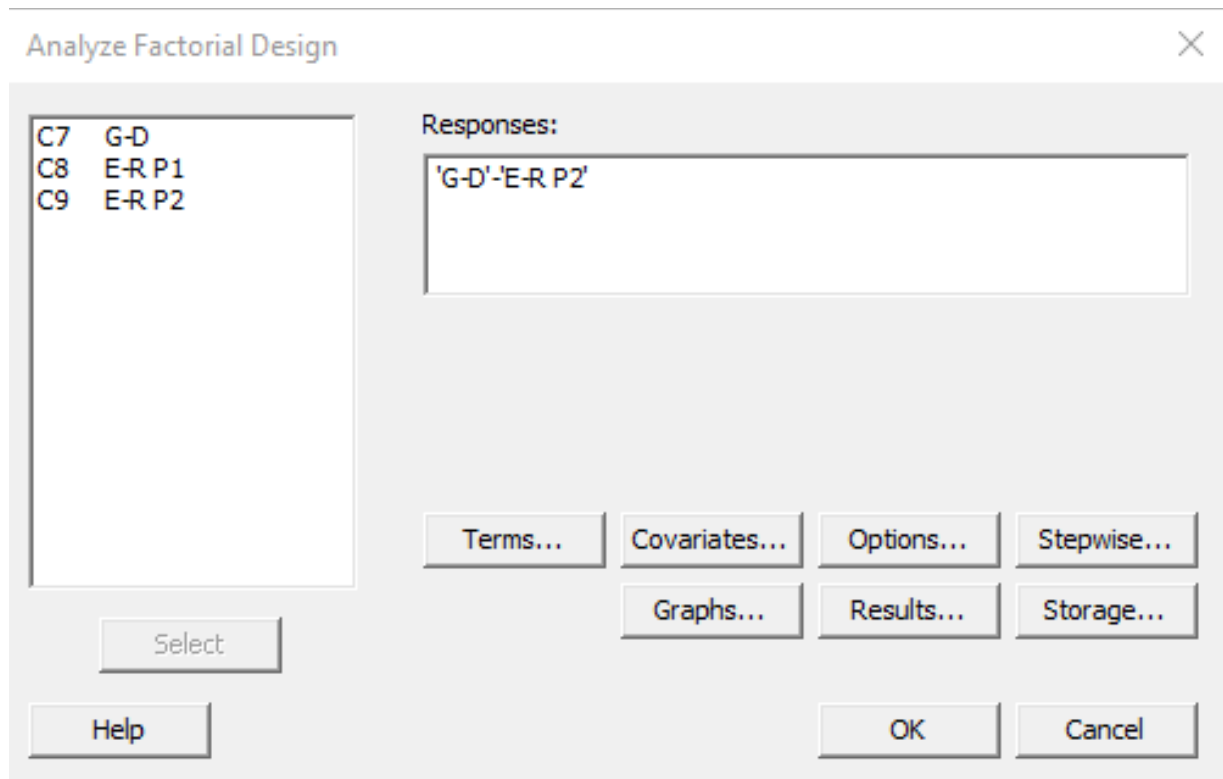
10. L'introduction des résultats

[illegible]

11. Analyse de modèle factoriel



12. Choix des réponses à étudier



13. Choix des termes

Analyze Factorial Design: Terms

Include terms in the model up through order:

Available Terms:

A: %PET
B: T

>
>>
<
<<
Cross
Default

Selected Terms:

A: %PET
B: T
AB

☐ Include blocks in the model

Help OK Cancel

14. Choix des options

Analyze Factorial Design: Options

Weights:

Confidence level for all intervals:

Type of confidence interval:

Box-Cox Transformation

☒ No Transformation

☐ Optimal λ

☐ $\lambda = 0$ (natural log)

☐ $\lambda = 0.5$ (square root)

☐ λ :

Means table:

Available Terms:

A:A
B:B
AB

>
>>
<
<<

Select

Help OK Cancel

Analyze Factorial Design: Stepwise

Method:

Potential terms:

A
B
AB

E = Include term in every model I = Include term in the initial model

Alpha to enter:

Alpha to remove:

Hierarchy...

☒ Display the table of model selection details

Details about the method

Help OK Cancel

15. Choix type des graphs, des résultats et de stockage des données

