

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR - ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Année : 2017

Faculté des sciences de l'ingénieur
Département de Génie Civil

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT SCIENCES

**VALORISATION ET RENFORCEMENT
DES BETONS BITUMINEUX**

Option : Matériaux

Par

BORDJIBA Abdelhak

Devant le Jury :

Président : Prof MERZOULD Mouloud Université d'Annaba
Rapporteur : Prof HACENE CHAUCHE Abdelmadjid Université d'Annaba
Examineur : Prof GUENFOUD Mohamed Université Guelma
Examineur : Prof NAFAA Zaher Eldinne Université Guelma
Examineur : Prof OUCIEF Hocine Université d'Annaba
Examineur : Prof BENMARCE Abdelaziz Université Guelma

Remerciements

Mes premiers remerciements, et sans doute les plus vifs, sont adressés à mon directeur de thèse professeur HACENE CHAUCHE Abdelmadjid et mon Co-encadreur le professeur GUENFOUD Mohamed qui ont été un réel exemple pour moi. Ils ont su me Communiquer la rigueur et la meilleure manière de travailler. Leurs critiques m'ont été très précieux pour structurer le travail et pour améliorer la qualité des différentes sections. Je remercie également le professeur MOUSSAOUI qui m'a aidé et soutenu beaucoup pendant ces années de thèse.

J'exprime tout mon remerciement au professeur MERZLOUD Mouloud Pour m'avoir fait L'honneur d'être président du jury. Je remercie également les professeurs, Prof NAFAA Zaher Eldinne, Prof OUCIEF Hocine et Prof BENMARCE Abdelaziz, Pour m'avoir fait l'honneur d'examiner mon travail.

Je suis très reconnaissant au docteur HAMLAT S. chef du pole route et à son équipe de laboratoire CETE d'Angers en France, qui a mis à ma disposition le matériel des essais.

Plus généralement, je voudrais remercier l'ensemble de mes collègues, pour leur soutien et leur encouragement durant ce travail.

Enfin, je voudrais dédier ce travail à toute ma famille.

Abstract

Under the traffic action, the pavement crumbling occurs rapidly, which leads to severe impairments that are reflected on the surface layers: rutting, cracking, substances rejection, polishing and pulling out the aggregates on surface. This situation often involves the renovation of the surface's layers. It is, therefore, urgent to appeal to a new vision of pavement design based on optimizing the use of local materials, nonrenewable, and respect for the environment. The recycling of bituminous substances is one of the relevant solutions. It has the advantage of reusing building materials by mixing them with a proportion of refined ones to achieve the required performance. This works researches for different rates of coated aggregates, the effects of manufacturing temperature and blending time in the mixing of the constituents during production as well as the additive (powder of rubber) on the improvement of the recycled asphalt rutting. Rutting is one of the most encountered degradation phenomena in the Algerian roads. The formulated hypothesis used here assumes that the additive has an influence on the mechanical performance (rutting) of the recycled asphalt and also on the rate of the used asphalt aggregates. To justify this hypothesis, it is mandatory to go through the manufacture of the asphalt with different rate of asphalt aggregates. To reduce the number of experimental tests necessary for this study, we used the experimental approaches method ANOVA. With an aim of putting work on a real scale of the environment of the area, a passage of checking of the extreme influence of the temperatures is obligatory.

Keywords Asphalt · Recycling · Additive · Retting · Binder · Penetrability

Résumé

Sous l'action de la circulation, La dégradation de la chaussée se produit rapidement, ce qui conduit à des altérations graves qui se reflètent sur les couches de roulements: (orniérage, craquage, rejet de substances, polissage et extraction des granulats sur la surface). Cette situation comporte souvent la rénovation des couches de roulement. Elle est, donc, urgent pour lancer un appel à une nouvelle vision de conception de l'enrobé basée sur optimisation et l'utilisation des matériaux locaux, non-renouvelable, et qui respect l'environnement. La réutilisation des substances bitumeuses est l'une des solutions appropriées. Elle a l'avantage de réutiliser des matériaux de construction en les mélangeant à une proportion de raffinage pour réaliser la représentation exigée. Ce travail cherche pour différents taux d'agrégats d'enrobé, degré de la température de fabrication et le temps de malaxage du mélange pendant la production aussi l'utilisation des additifs (poudre du caoutchouc) pour l'amélioration de l'enrobé recyclé. L'orniérage est l'un des phénomènes de dégradation les plus produits dans les routes algériennes. L'hypothèse formulée utilisée ici suppose que l'additif a une influence sur les performances mécaniques (orniérage) de l'enrobé recyclé et également sur le taux des agrégats d'enrobé. Pour justifier cette hypothèse, il est obligatoire de passer par la fabrication d'enrobé avec le taux différent d'agrégats d'enrobé. Pour réduire le nombre d'essais expérimentaux nécessaires pour cette étude, nous avons utilisé la méthode des plans d'expérience ANOVA. Dans le but de mettre le travail à l'échelle réelle de l'environnement du site, un passage de vérification de l'influence des températures extrême est obligatoire.

Mots clefs: Enrobé, Recyclage, additive, orniérage, pénétrabilité, liant.

ملخص

بسبب الحركة المرورية. الطرق تتهترئ بسرعة و هذا ما يؤدي إلى حالات خطيرة تنعكس على طريقة الحركة (الحفر الطولي) وما ينتج عنه من تطاير للحبيبات الموجودة على السطح.... الخ. هذه الوضعية دائما ما تؤدي إلى تحديد طريقة الحركة. وعليه من الضروري البحث المستعجل عن نظرية جديدة في تركيب الكسوة البيتومية تركز على الاستغلال العقلاني للمواد غير المتجددة و التي تحافظ على البيئة.

إن إعادة استعمال المادة البيتومية تعتبر من الحلول المثلى و لها محاسن كأعادة استعمال مواد البناء بحيث يتم خلطهم بنسب معينة من أجل تكوين خلطات مطابقة للمعايير. هذا العمل يبحث من أجل نسب مختلفة من الحصى البيتومي. درجة حرارة . وقت الصنع. كذلك إضافة غيرة البلاستيك لتحسين الخرسانة البيتومية معادة الصنع.

الحفر الطولي للخرسانة البيتومية واحد من المظاهر التي نراها بكثرة في الطرقات الجزائرية. الفرضية تقضي إلى استعمال غيرة البلاستيك التي تقوي و تحسن نوعية الخرسانة البيتومية معادة الصنع و خاصة نسبة الركام البيتومي.

من أجل إنقاص عدد التجارب اللازمة لهذه الدراسة قمنا باستعمال المخطط التجريبي ANOVA .

و لوضع هذا العمل في الواقع قمنا بتحديد تأثير العوامل المناخية و الحرارة الحدية على نوعية الخرسانة البيتومية معادة الصنع.

كلمات مفتاح : الكسوة البيتومية , اعادة الاستعمال , الاضافات , الحفر الطولي , الدخول . الماسكة

TABLE DE MATIÈRES

Remerciement	01
Abstract	02
Résumé	03
ملخص	04
Tableau de matières	05
Liste des figures	09
Liste des tableaux	12
Introduction générale	13
CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
1.1. Histoire de la Construction des Routes	18
1.1.1. Les Anciennes Civilisations et la Route	18
1.2. Développement des Chaussées Routières	20
1.2.1. Les Différentes Catégories de Structures des Chaussées	21
1.2.2. Les Bitumes	24
1.2.3. Les Granulats	27
1.2.4. Les Enrobés	29
1.3. Dégradations des Couches en Enrobes Bitumineux	38
1.3.1. Catégories des Phénomènes Défavorables à la Durabilité des Revêtements Routiers	38
1.3.2. Modes de dégradation et d'usures des revêtements routiers	40
1.3.3. Dégradation par déformation (Phénomène d'orniérage)	45
2. Définition	
3. Les types d'orniérages	
4. Le mécanisme d'orniérage	
1.4 Le recyclage	47
4.1.1. Le recyclage dans le monde	49
4.1.2. Les opérations de recyclage	49
4.1.3. Les procédés de recyclage	51
4.1.4. Fabrication	52
1.4.5. Domaines d'emploi et Performances	57
1.4.6. Recyclage à froid en centrale	58

1.4.7. Recyclage au liant hydraulique	58
1.5. Les polymères	59
1.5.1. Définition des polymères	59
1.5.2. Différents types de polymères utilisés pour la modification des enrobés	59
1.5.3. Propriétés macroscopiques des polymères	59
Conclusion	60
 CHAPITRE II : EXPOSÉ DE LA MÉTHODE DES PLANS D'EXPÉRIENCES	
2.1. Introduction	62
2.2. But des plans d'expérience	62
2.2.1. Méthode Traditionnelle des Essais	62
2.2.2. Méthodologie des Plans d'expériences	63
2.3. Différents modelé des plans d'expériences	64
2.3.1. Plans factoriels complets	64
2.3.2. Plan Taguchi	64
2.3.3. Les Plans des Surfaces de Réponse	64
2.3.4. Les plans de Box-Behnken	64
2.3.5. Les plans de mélanges	65
2.3.6. Les plans hybrides	65
2.4. Les éléments d'un plan d'expérience	65
2.5. Les étapes d'un plan d'expérience	66
2.5.1. Première étape	66
2.5.2. Deuxième étape	69
Conclusion	74
 <u>CHAPITRE III ETUDE EXPÉRIMENTALE</u>	
3.1. Introduction	76
3.2. Le béton bitumineux semi grenus (BBSG)	76
3.3. Matériaux utilisés	77
3.3.1. Choix des agrégats neuf	77
3.3.2. Identification des échantillons neuf	77
3.3.3. Nettoyage des granulats	79
3.3.4. Essais chimique	80

3.3.5. Le liant neuf	80
3.3.6. La Poudrette des Caoutchoucs	81
3.3.7. Agrégat d'enrobé	81
3.4. Formulation d'un enrobé sain	83
3.4.1. Etude Marshall	83
a. Préparation du Mélange et Confection des Éprouvettes d'essai	84
b. Analyse des résultats de l'essai Marshall	84
3.4.2. Essais D'immersion - Compression Lcpc - Duriez	84
a. Préparation du Mélange et Confection des Éprouvettes d'essai	85
b. Analyse des résultats de l'essai Duriez	85
3.5. Formulation d'un enrobé recyclé	86
3.5.1. À base d'agrégats d'enrobé	86
a. Méthode	86
b. Analyse des résultats	87
3.5.2. À base de la poudrette des caoutchoucs	90
a. Méthode	90
b. Analyse des résultats conclusion	91
Conclusion	93
CHAPITRE IV : OPTIMISATION D'UNE FORMULATION D'ENROBÉ RECYCLÉ	
4.1. Introduction	96
4.2. Formulation d'un enrobé recyclé	96
4.3. L'approche par plan d'expérience	97
4.3.1. Méthode du plan factoriel complet	97
4.4. Les paramètres d'étude	98
a. Pourcentage des agrégats d'enrobé	98
b. Pourcentage de poudrette	98
c. Température de fabrication	99
d. Durée de malaxage	99
4.5. Les matériaux utilisés	99
4.6. Préparation des corps d'épreuve	100
4.6.1. Malaxage des éprouvettes	100
4.6.2. Moulage des éprouvettes	101
4.6.3. Préparation des éprouvettes	102

4.6.4. Mode opératoire	102
4.7. L'approche par la méthode des plans d'expérience	103
4.7.1. Analyse des résultats	104
a. Analyse fiabiliste	104
b. Échantillonnage	105
4.7.2. Effet de la température sur la pénétrabilité de liant modifié	106
4.7.3. Effets des facteurs sur la réponse	106
4.8. Optimisation de la fabrication des enrobés recyclés	108
4.9. Effet de l'environnement sur les performances mécanique des enrobé recyclés	109
4.9.1. Protocole des essais	110
4.9.2. Résultats des essais et discussions	110
Conclusion	114
Conclusion et perspectives	115
Références bibliographique	118

Liste des figures

Fig.1.1 : Égyptienne Route	18
Fig.1.2: Mac Adam's Roads	19
Fig.1.3: Telfords Roads	19
Fig.1.4 : Travaux De Pavage De La Ville De Paris	20
Fig.1.5 : le corps d'une chaussée souple	22
Fig.1.6 : le corps d'une chaussée semi rigide	23
Fig.1.7 : le corps d'une chaussée rigide	23
Fig.1.8 : Representation de L'essai de Penetrabilite	25
Fig.1.9 : Essai TBA	26
Fig.1.10 : Essai RTFOT	27
Fig.1.11 : Essai Marshall	34
Fig.1.12 : Essai Presse à Cisaillement Giratoire	36
Fig.1-13 : Essai d'Orniérage	37
Fig.1.14 : Essai de Fatigue	37
Fig.1.15 : Effet de la température sur le corps de chaussé	39
Fig.1-16: Fissuration du revêtement routier par fatigue	41
Fig.1.17 : Fissuration par retrait thermique empêché et soulèvement à petites longueurs d'onde.	42
Fig.1.18 : Fissure longitudinale causée par la rupture de joint de construction longitudinal	42
Fig.1.19 : Fissuration de faïence du revêtement routier	43
Fig.1.20 : Ségrégation au centre de la table de répandage conduisant à la fissuration de l'enrobé	44
Fig.1.21 : Fissures longitudinale proche de l'accotement de la chaussée (fissure en rive)	44
Fig.1.22 : a - Cas d'orniérage structurel de sévérité majeure	46
Fig.1.22 : b- Cas d'orniérage d'usure « orniérage à petit rayon »	46
Fig.1.23 : Stockage des agrégats recyclés	47
Fig.1.24 : Graduateur à Rouleaux	50
Fig.1.25 : Vue d'ensemble d'un poste à chaud discontinu	52
Fig.1.26 : Les quatre méthodes de recyclage en poste discontinu	53
Fig.1.27 : Principe du recyclage dans le tambour d'un poste discontinu	54

Fig.1.28 : Poste discontinu à tambours parallèles	55
Fig.1.29 : Poste continu TSE avec anneau de recyclage Poste continu TSE avec anneau de recyclage	55
Fig.1.30 : a- Principe du poste continu TSE Figure avec recyclage à équicourant	56
Fig.1.30 : b- Principe du poste continu double tambour à contre-courant	56
Fig.1.30 : c - Principe du poste continu TSE avec recyclage à contre-courant	56
Fig.1.31: Centrale d'enrobage à froid ultramobile	58
Fig.1.32 : schéma de cycle de préparation de la poudrette des caoutchoucs	60
Fig. 2.1 : les étapes d'un plan d'expérience	62
Fig. 2.2 : les éléments d'un plan d'expérience	66
Fig. 2.3 : la méthode traditionnelle	67
Fig. 2.4 : La méthode des plans d'expériences	68
Fig. 2.5 : la méthode de codification d'un plan d'expérience	69
Fig. 2.6 : le codage des facteurs	71
Fig. 2.7.a : Représentation des résultats d'un plan d'expérience en surfaces de réponse	73
Fig. 2.7.b : Représentation des résultats d'un plan d'expérience en iso-réponse	73
Fig.3.1.a : Analyse granulométrique 8/14	78
Fig.3.1.b : Analyse granulométrique 3/8	78
Fig.3.1.c : Analyse granulométrique 0/3	79
Fig.3.2 : Moyen de nettoyage des agrégats 8/14 et 3/8	79
Fig.3.3: Courbe Granulométrique de la Poudrette de Caoutchouc.	81
Fig.3.4 : Stockage des agrégats d'enrobé avant l'essai	82
Fig.3.5 : Analyse de calibrage des agrégats d'enrobé sélectionné par le tamis 14 mm	82
Fig.3.6 : Représentation des dosages de la formule retenue	83
Fig.3.7: Récupération de liant vieil d'agrégat d'enrobé	86
Fig.3.8: la compacité en fonction du % AE pour des mélanges avec AESL	88
Fig.3.9 : la compacité en fonction du % AE pour des mélanges avec AEAL	89
Fig.3.10 : Le fluage en fonction du % AE pour des mélanges avec AEAL	89
Fig.3.11 : Le fluage en fonction du % AE pour des mélanges avec AESL	90
Fig.3.12: la compacité en fonction du % PC	92
Fig.3.13 : Le fluage en fonction du % PC	92
Fig.4.1 : Courbe des essais granulométrique des mélanges	100
Fig.4.2 :L'appareil de préparation d'enrobé	101

Fig.4.3 : Compacteur d'enrobé (préparation de la plaque)	101
Fig.4.5 : Confection des moules	102
Fig.4.6.a : Analyse de la variance R^2	105
Fig.4.6.b: Probability plot for rutting, estimates normal—95% CI	105
Fig.4.7. Effets des facteurs sur l'orniérage suivant le graphe de PARITO	107
Fig.4.8 : Effets des facteurs sur l'orniérage	107
Fig.4.9 : Diagramme de surface d'orniérage Agrégat d'enrobé et l'additif.	109
Fig.4.10 : Diagramme de surface d'orniérage Agrégat d'enrobé et l'additif.	109
Fig.4.11 : Comportement des enrobés recyclés à l'orniérage dans un climat chaud (50°)	112
Fig.4.12 : Comportement des enrobés recyclés à l'orniérage dans un climat froid (-2.5°)	113
Fig.4.13 : Limite de la courbe d'iso-réponses d'orniérage A.E-Additif	113

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Classification des Bitumes Selon la Pénétrabilité et TBA.	26
Tableau.1.2 : Fuseau Granulométrique BB 0/14	31
Tableau .2.1 : le codage des facteurs dans un plan d'expérience	31
Tableau 3.1 : les caractéristiques physique des agrégats sains	71
Tableau 3.2 : Résultats de l'analyse chimique des agrégats sain	77
Tableau.3.3 : Caractérisation du Liant Neuf	80
Tableau.3.4 : Caractéristiques Règlementaires de la Poudrette des Caoutchoucs	80
Tableau.3.5 : Résultats de l'essai Marshall pour différents taux de liant	81
Tableau.3.6 : Optimisation vis à vis CTPP	84
Tableau.3.7 : Résultats de l'essai Duriez pour un taux de liant 5.4	84
Tableau.3.8 : La pénétrabilité des mélanges avec AEAL	85
Tableau.3.9 : La pénétrabilité des mélanges avec poudrette des caoutchoucs	90
Tableau 4.1 : Codage des Facteurs	91
Tableau 4.2 : Protocole de Dosage	98
Tableau 4.3 : Résultats d'essais d'orniérage suivant le plant d'expérience (expérimentale et calculé)	100
Tableau .4.4 : Pénétrabilité des liants modifier d'enrobé recyclé en fonction des taux d'agrégats d'enrobés dans le mélanges et le taux d'additif par rapport au pourcentage du liant d'apport	103 106
Tableau 4.5: Les zones climatiques dans l'Algérie	110
Tableau .4.6 : Pénétrabilité des liants modifier d'enrobé recyclé	112

Introduction générale

Introduction générale

Comment intégrer le développement durable dans la protection de l'environnement, une question qui joue un rôle primordial pour les décideurs comme les chercheurs. La réponse sur cette question c'est de développer des méthodes et techniques qui protègent l'environnement par la récupération des déchets et les recyclaient. Dans le domaine de la construction routière des actions ont été mise en œuvre par la réduction de l'utilisation de la matière première naturelle non renouvelable, et aussi minimiser l'énergie nécessaire à la fabrication des matériaux de construction.

Cette thèse s'inscrit dans ce cadre de développer une technique pour la valorisation des performances mécaniques de la route algériennes par l'utilisation des déchets de la route, fraisât récupérer après scarification de la couche de roulement en béton bitumineux, et aussi la poudrette des caoutchoucs issu des pneus rejeter.

Cette thèse est initiée en mars 2013. Les essais réalisés dans ce travail ont été effectué dans les laboratoires de l'entreprise japonaise COOJAL (pole de Skikda) et avec le CETE d'Angers, France dans le cadre des stages de courte durée.

Le recyclage est la réponse d'actualité sur les solutions proposées pour la réduction de la consommation des granulats et de liant bitumineux, matières premières naturelles non renouvelables.

En Algérie, cette technique est en phase de discussion, par contre dans les pays développés celle-ci a connu une évolution remarquable traduit par l'utilisation des différents déchets dans le projet de la route.

Dans le but de réduire l'empreinte écologique des enrobés bitumineux, le domaine de la construction routière désire cumuler les avantages de la technique de maximiser d'une part le taux de recyclage des enrobés avec la poudrette des caoutchoucs et en abaissant d'autre part la température et le temps de leur fabrication.

Afin de préserver et garantir la durabilité des infrastructures routières, le travail présenté s'attache à comprendre les mécanismes régissant le mélange des constituants neufs et recyclés, afin de permettre une meilleure connaissance des enrobés recyclés et une optimisation des processus de recyclage. Le travail présenté considère pour différents taux de recyclage des enrobés et de la poudrette des caoutchoucs, les effets de la température de fabrication et de la durée de malaxage sur le mélange des constituants durant la manufacturassions.

Ce travail de thèse est axé sur la compréhension des facteurs régissant le phénomène de remobilisation du liant des agrégats d'enrobé et leurs influences sur les performances mécaniques (orniéage) des enrobés bitumineux.

Ce travail de thèse a pour but de développer une méthode numérique pour formuler des enrobés à base des agrégats d'enrobes et poudrette des caoutchoucs avec le contrôle du mécanisme de formation d'orniéage et d'analyser le rôle de différents facteurs dans l'apparition de ce phénomène. Ceci permet d'analyser les stratégies de dosage des formulations des enrobés recyclés dans la centrale d'enrobé.

Le travail de thèse comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique, ou une présentation historique a été faite sur le développement de la construction des routes depuis l'antiquité jusqu'à aujourd'hui puis une partie consacré aux différents cause de dégradation de la chaussée et les méthodes de recyclages utilisées dans la pratique (centrale d'enrobé).

Le second chapitre expose la méthode des plans d'expériences, la différence entre la méthode classique des essais et la méthode des plans d'expériences a été montré, les différents plans d'expériences et l'analyse des résultats ont été présenté dans ce chapitre avec une conclusion à la fin.

Le troisième chapitre regroupe les résultats des essais effectués sur les enrobés afin de formulé un enrobé de grande performance mécanique. Cette campagne comporte deux phase : la première est de formuler un enrobé sain pour l'utiliser comme une référence dans les prochains chemins, puis de fabriquer un enrobé avec l'ajout des agrégats d'enrobé (fraisât) (avec extraction du liant d'agrégat et sans extraction du liant d'agrégat) et à la fin de cette phase l'enrobé sain est modifié avec l'ajout de la poudrette du caoutchouc. La deuxième phase cherche sur l'effet de la température sur les enrobés recyclés à base de poudrette des caoutchoucs. Dans ces deux phases, deux caractéristiques ont été contrôlé : le fluage et la compacité. À la fin de ce chapitre la conclusion a signalé le handicap des essais classiques pour donner une réponse optimisé vis-à-vis les frontières des facteurs (dosage en agrégat d'enrobé, dosage en poudrette des caoutchoucs et le degré de la température). Et à la fin, la conclusion plaide pour la recherche d'une méthode qui a la capacité de répondre à cette question d'optimisation.

Le quatrième chapitre étudie la faisabilité de formuler un enrobé de caractéristiques mécaniques respectant les normes en vigueur, l'optimisation cherche pour un maxima

des ajouts (agrégats d'enrobés et poudrette du caoutchouc) et un minima de la température de fabrication ainsi que le temps du malaxage. Suite aux remarques présentés dans la conclusion du chapitre précédent, les essais effectués par la méthode classique n'ont pas la capacité de donner des résultats exactes sur les degrés des pourcentages dans le mélange en fonction de la qualité mécanique désirée, ce qui est à orienter l'étude vers la méthode des plans d'expérience. Le but de cette méthode comme montré dans le chapitre deux est de réduire le nombre d'essais expérimentaux nécessaires pour une étude et avoir le maxima des informations.

L'hypothèse de formulation utilisée ici cherche à augmenter le taux des agrégats d'enrobée et la poudrette du caoutchouc aux maximum et minimiser le temps du malaxage et la température de fabrication d'enrobé au maximum. Aussi l'hypothèse suppose une remobilisation totale du liant vieille dans les agrégats d'enrobé. Ce qui nous a conduit à suivre l'évolution de la pénétrabilité et la température de ramollissement pour chaque essai, Elle permet de plus, de contrôler l'influence de ces paramètres sur les performances mécaniques des enrobés recyclés.

Dans ce chapitre une étude complémentaire a été effectuée pour vérifier l'effet de l'environnement sur la résistance du béton d'où une série d'essais est réalisée sur des échantillons conservés dans des températures reflétant le climat de la région où l'étude a été opérée.

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Histoire de la Construction des Routes

1.1.1 Les Anciennes Civilisations et la Route

Les civilisations antiques ont construits des fabuleux bâtiments et monuments qui sont encore debout, nous permettons de connaître leur culture et niveau de vie. Ces civilisations ont construit les routes utilisés dans les gères ainsi que les voyages et le commerce. Cette section examine brièvement les modèles des routes construites à travers l'histoire par civilisations connues [01].

a. La Route Égyptienne

Il y a environ 5000 ans, avant l'invention de la roue, les personnes et les matériaux ont été transportés par voie terrestre à pied ou par les animaux. Les égyptiens lors de la construction des pyramides ont utilisé, pour le transport des pierres lourdes, des rouleaux en pierres couverts par une matière qui diminuait le frottement entre la pierre et le sol, ainsi que la réduction de l'intensité de la charge. Puis ils ont créé une surface dure sur laquelle marchent leurs rouleaux (1 km consommé 10 ans pour le construire) [02], comme illustre la figure (fig1.1).

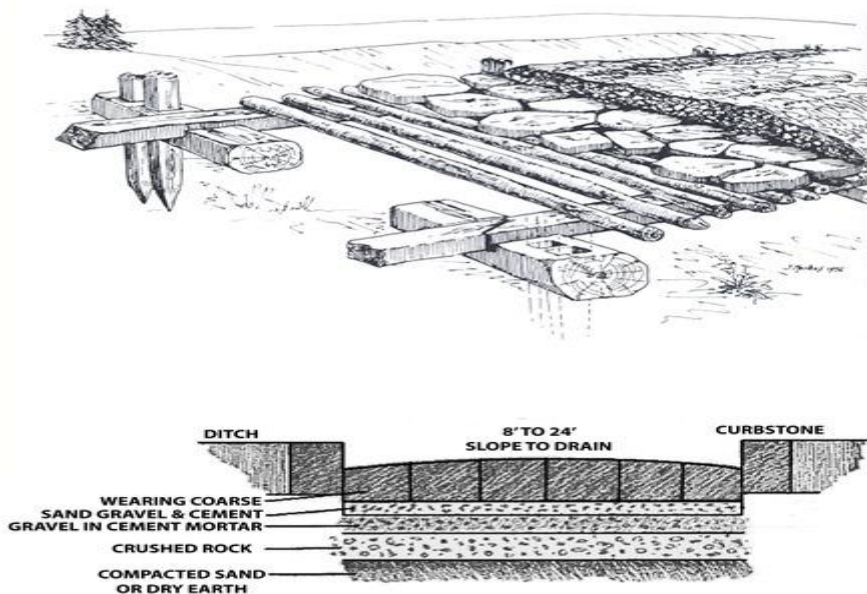


Fig.1.1 : Égyptienne Route [02]

b. La Route du Royale Babylon

La voie du Babel a été construite en 620 JC, c'est la première utilisation du bitume dans un revêtement de la chaussée, le bitume était le maintien des pierres entre eux. La chaussée était sur 1 km de long et de largeur varie entre 10 à 20 m [02].

c. La Route du Royale Perse

La première route construite à une distance importante est celle du roi DARIUS I de Perse. C’était construit en 500 avant JC sur une période de 60ans. Une de ses grandes caractéristiques est l’utilisation d’une ligne droite en tant que la plus courte distance entre deux points. Elle comprenait également la première voie de contournement de la ville. C’est que les romains ont l’exploité et modernise plus tard [03].

d. La Route du Turnpike Trusts

Instituer en Angleterre par une loi de 1707, les Turnpike Trusts étaient organismes indépendants publics chargés de leur côté de collecter des commissions sur le trafic routier pour améliorer les routes, au moment où se développe le concept de public trust. Les commissions faisaient payer bien les usagers venant d'autres régions mais aussi les collectivités locales, qui devaient conserver les sommes, sous l'autorité d'un contrôleur et d'un trésorier, veillant à ce qu'elles soient réinvesties dans l'entretien et l'amélioration du réseau routier. Plus de 20 000 miles de routes étaient sous le contrôle des Turnpike trusts avant les années 1830, pour des commissions annuelles de 1,5 million de Sterling [03].

e. La Construction de la Route Britannique

La science de la construction des routes a été presque complètement perdu de Roman jusqu’à ce que l’avènement de Telford et Macadams dans le milieu du XVIIIe siècle. Beaucoup a été écrit sur les types de construction utilisés par chacun de ces deux grands pionniers de l’ingénierie. Figures (fig.1.2) et (fig.1.3) illustrent leurs techniques. Les deux ingénieurs ont compris les principes de base nécessaires pour la durabilité et la capacité pour acheminer le trafic par tous les temps. Ils ont reconnu la nécessité d'un bon système de drainage, stabilité du sous-sol, construction en couches, un bon compactage pour assurer un verrouillage de particules de pierre concassée et de contrôle de la granulométrie et sa propreté.

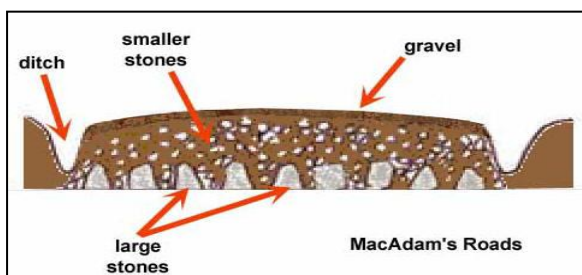


Fig.1.2: Mac Adam’s Roads [04]

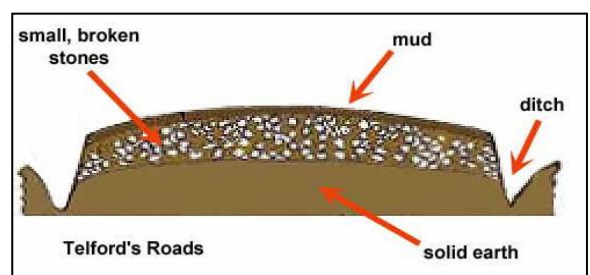


Fig.1.3: Telfords Roads [04]

La différence essentielle entre les deux méthodes réside dans leur approche de l'économie. Telford construit épaisse pour fournir une route à durer plus longtemps. MacAdam pense qu'à condition que la couche de surface ait été rendue imperméable par attrition et compactage la couche de fondations pourrait être supprimée [04].

f. Pavage des rues de Paris au XIIe

Les rues des villes étaient dans une situation dégager, lorsque Philippe-Auguste, en 1184, frappé de l'état boueux de celles de Paris, entreprit pour la première fois de les faire paver. Les voies qui ont été pavées formaient ce qu'on appelait la croisée de Paris voir la figure (fig.1.4). C'était l'intersection des deux grandes voies qui joignaient du nord au sud la porte Saint-Denis à la porte Saint-Jacques, et de l'est à l'ouest la porte Baudet au château du Louvre. Cette partie du pavé de Paris resta toujours à la charge du roi. Si l'administration municipale en eut l'entretien jusqu'en 1318, elle reçut une indemnité qui la couvrit de la dépense [05].

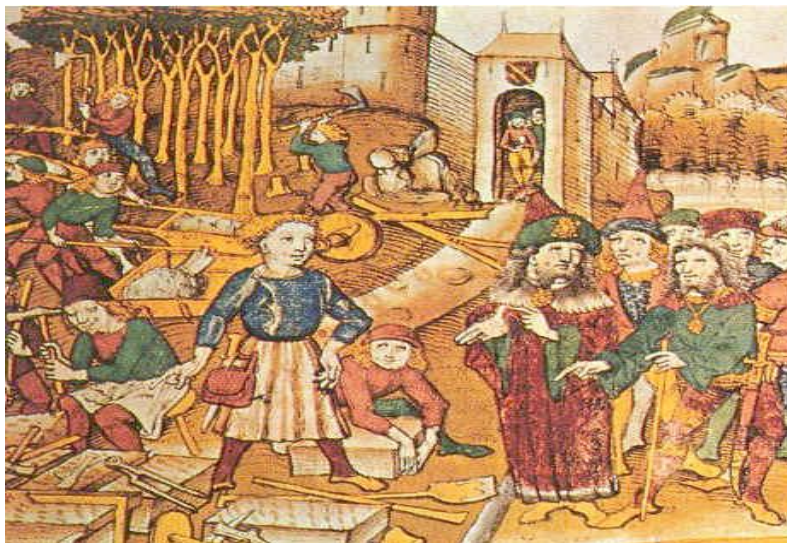


Fig.1.4 : Travaux De Pavage De La Ville De Paris [05]

1.2 Développement des Chaussées Routières

La structure d'une chaussée représente l'ensemble des couches de revêtement, en matériaux liés et non liés, utilisées dans la construction de la chaussée sur le sol support. Le rôle principal de cette structure est de répartir les efforts induits par le trafic en les amortissant progressivement de manière à ce que les efforts transmis au sol support soient suffisamment faibles pour assurer la stabilité et la durabilité de la chaussée pendant sa durée de vie escomptée.

L'épaisseur des couches composant la chaussée doit être donc suffisante pour assurer cette fonction. L'épaisseur totale de la structure de la chaussée et les épaisseurs des couches qui la composent sont généralement déterminées par l'étude de dimensionnement de chaussée ou par l'utilisation de structures types pour certaines chaussées à faible trafic. En France, la méthode en vigueur est celle décrite dans le guide technique de Conception et Dimensionnement de Structure de Chaussées publié pour la première fois en 1971 sous la forme de catalogues de structures-types et révisé en 1977, 1988 et finalement en 1994 [06]. Cette démarche est une démarche rationnelle basée sur une approche semi-mécanistique qui intègre à la fois les caractéristiques mécaniques des matériaux, la mécanique de la structure et une part d'empirisme. En revanche, la méthode AASHTO 93 (American Association of State Highway and Transportation Officials) [07], qui est largement utilisée en Amérique du Nord et dans d'autres pays du monde, est purement empirique.

La comparaison entre les deux méthodes a bien montré la supériorité de la méthode française sur la méthode AASHTO et sur d'autres méthodes de dimensionnement, du fait de sa prise en compte des caractéristiques mécaniques des enrobés lors de la conception de chaussées [06].

L'homme a inventé la route pour répondre à ses besoins de déplacement. Ces besoins ont évolué et par conséquent la structure de chaussée a aussi évolué avec le temps. De plus, les nouvelles technologies dans les domaines des matériaux de construction ont permis de donner à la route des nouvelles fonctionnalités pour répondre à des besoins de sécurité et de confort comme le drainage d'eau de surface, la réduction de bruit et l'amélioration de l'adhérence pneu-chaussée entre autres. L'émergence des concepts de développement durable et les préoccupations environnementales ont aussi joué un rôle important dans l'évolution des structures routières. Les nouvelles structures utilisent de plus en plus de matériaux recyclés, des enrobés bitumineux tièdes, des matériaux traités aux liants hydrauliques et même des liants d'origine végétale.

1.2.1 Les Différentes Catégories de Structures des Chaussées

Selon le type des matériaux de construction utilisés dans le revêtement, les chaussées peuvent être classées suivant les trois catégories décrites ci-après.

a. Chaussées Souples

Également appelées chaussées flexibles dans la littérature nord-américaine, cette catégorie de structure de chaussées est la plus couramment utilisée de nos jours en France et dans le monde.

Dans cette catégorie, des matériaux granulaires traités aux liants hydrocarbonés sont utilisés pour la construction des couches supérieures. Les couches sous-jacentes (couches d'assise et couche de forme) peuvent être constituées de matériaux granulaires traités ou non [06]. La structure type d'une chaussée souple est illustrée à la figure (fig.1.5).

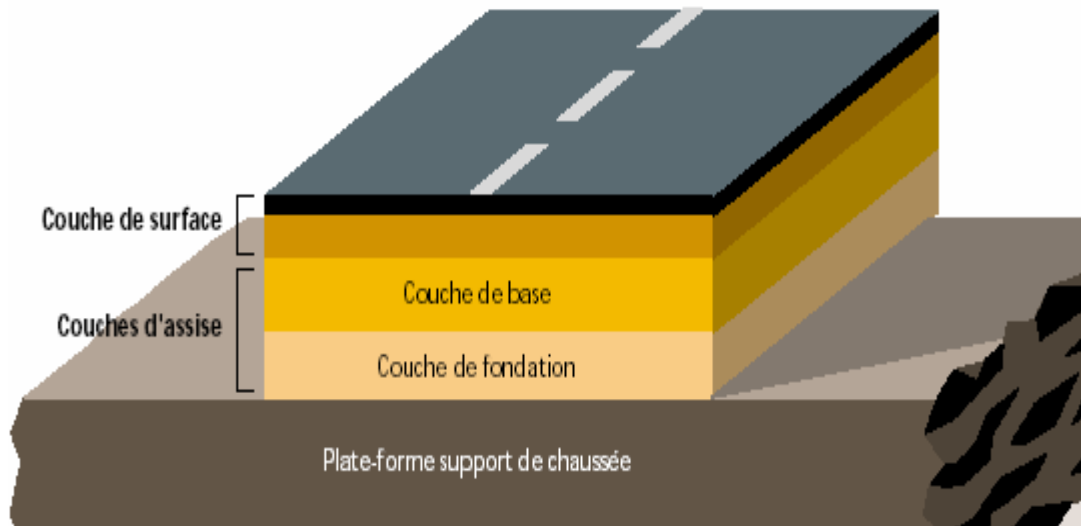


Fig.1.5 : le corps d'une chaussée souple [06]

b. Chaussées Semi-Rigides

Cette structure de chaussée hybride est constituée de matériaux liés avec des liants hydrocarbonés dans certaines couches et de matériaux liés avec des liants hydrauliques dans d'autres. En France, la structure type est généralement composée de couches de surface en enrobé bitumineux et de couche de base et/ou de fondation en graves-ciment. Ce type de structure est appelé « chaussée à structure mixte » et le ratio de l'épaisseur de matériaux bitumineux à l'épaisseur totale de chaussée est de l'ordre de 1/2 [06].

Un autre type de chaussée que l'on classe dans cette catégorie est celui des « chaussées à structure inverse » où la couche de surface bitumineuse, d'une quinzaine de centimètres, est suivie par une couche de grave non traitée (d'environ 12 cm) reposant elle-même sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques [06]. Ce type peut s'avérer très avantageux, économiquement et structurellement lorsque le sol support est très faible (sol argileux sensible à l'humidité par exemple) avec un trafic important. La rigidité élevée de la couche de grave-ciment ou la dalle de béton de ciment permet donc de réduire significativement l'épaisseur totale de la chaussée, la figure (fig.1.6) présente la composition d'une chaussée semi-rigide.

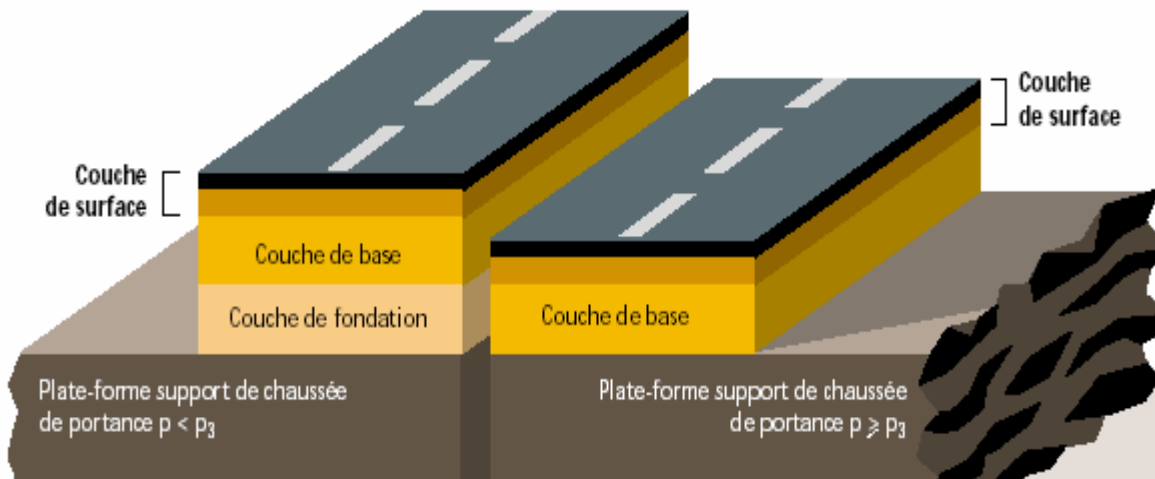


Fig.1.6 : Le corps d'une chaussée semi rigide [06]

c. Chaussées Rigides

Dans cette catégorie présentée sur la figure (fig.1.7), la structure de chaussée est typiquement composée d'une couche de fondation granulaire reposant sur la couche de forme et couverte par une dalle de béton de ciment.

Une couche de roulement très mince en enrobé bitumineux peut être déployée pour réduire le bruit et améliorer l'adhérence. Cette couche de roulement ne jouera pas de rôle structural.

Ce type de chaussées est peu utilisé en France mais plus largement utilisé en Allemagne, au Canada et dans certains états américains [06]. La route en béton devient avantageuse sur les revêtements fortement sollicités comme les autoroutes urbaines autour des grandes villes où le trafic peut être à la fois lent, lourd et dense. C'est aussi le cas des zones de chargement et de stockage et les pistes de décollage des aéroports. La route en béton est en plein développement dans plusieurs pays en raison de la forte augmentation des prix du pétrole et les prévisions de l'épuisement des réserves de carbone fossile pétrolières dans environ 45 ans. Des considérations économiques et environnementales pencheraient donc en faveur de la route en béton dans certains cas.

Les modes de dégradation de cette catégorie de chaussées ne seront pas abordés dans ce chapitre.

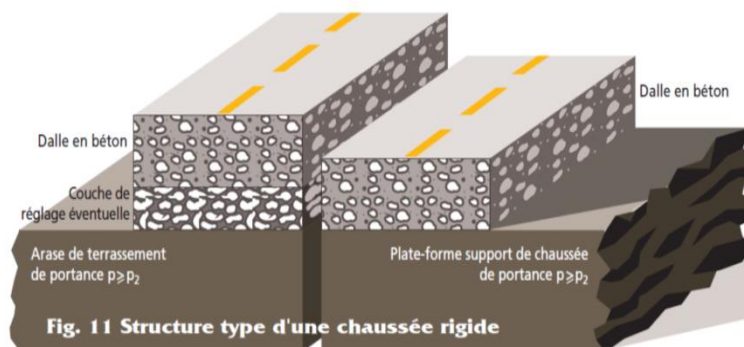


Fig.1.7 : Le corps d'une chaussée rigide [06]

1.2.2 Les Bitumes

Les bitumes sont des substances composées de mélange d'hydrocarbures, très visqueux à la température ambiante et de couleur noire. Connus depuis la plus haute Antiquité sous forme naturelle, ils proviennent, de nos jours, presque exclusivement de la distillation des pétroles bruts.

Plus généralement, le bitume désigne tout mélange d'hydrocarbures extraits du pétrole par fractionnement qui, sous forme pâteuse ou solide est liquéfiable à chaud et adhère sur les supports sur lesquels on l'applique [07].

En construction routière, il sert de liant pour la réalisation de matériaux enrobés à chaud, tels que les bétons bitumineux ou les graves bitumes. Il entre également dans la fabrication d'enduits superficiels sous forme d'émulsion ou bien fluidifié par un solvant.

Le bitume est utilisé dans l'industrie pour ses propriétés d'étanchéité et d'isolation (thermique et acoustique). Néanmoins, les applications routières sont les plus nombreuses puisque, en effet, 90% de la production de bitume est utilisée sous forme d'enrobés et d'enduits superficiels [08].

a. Principaux types de bitume

Les bitumes obtenus par distillation du pétrole brut et destinés aux revêtements routiers sont raffinés pour répondre à des spécifications particulières ; c'est le cas du bitume routier qui entre dans le béton bitumineux, et qu'on nomme alors plus simplement : bitume. À l'état pur, les bitumes sont trop visqueux pour être utilisés tels quels, on doit abaisser leur viscosité par chauffage (120 °C à 160 °C).

Mais on connaît deux autres façons de rendre le bitume temporairement, fluide pour certains usages.

- On peut procéder par solubilisation, habituellement dans un hydrocarbure, on parle alors de bitumes fluidifiés ou liquides.
- On peut aussi avoir recours à l'émulsification dans l'eau. On obtient alors les émulsions de bitume.

Lorsqu'on ajoute un polymère à l'un ou l'autre de ces liants pour améliorer une de ses propriétés, on parle de bitumes composés [05].

b. Principales caractéristiques des bitumes routiers

✓ La mesure de pénétrabilité (NF EN 1426)

La pénétrabilité représente la mesure de l'enfoncement d'une aiguille normalisée dans un bitume maintenu à une température donnée, au bout de 5 secondes sous une charge définie. Elle s'exprime en 1/10 mm. La pénétrabilité la plus utilisée est celle mesurée à 25 °C et avec un chargement de 100g, comme le montre la figure (fig.1.8) et le tableau 1.1.

Ainsi, à une température donnée, plus un bitume est dur, plus sa valeur de pénétrabilité est faible [09].

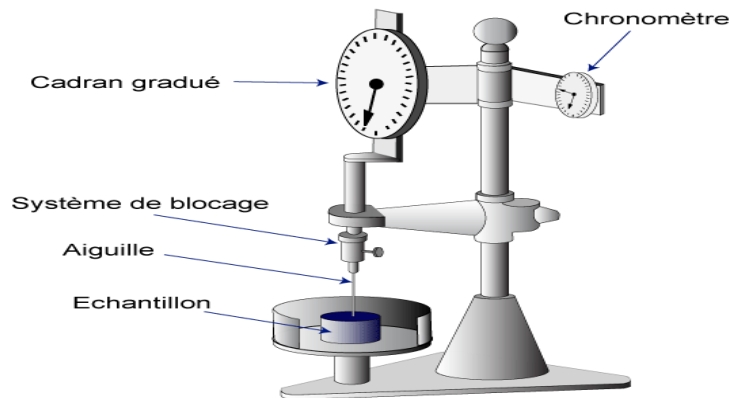


Fig.1.8 : Representation de L'essai de Penetrabilite [09].

Il existe, en Algérie, trois classes de bitumes routiers qui sont dans le sens des duretés croissantes, il s'agit 70/100, 65/50 et 20/30.

Pour mieux définir un bitume, on peut être amené à effectuer des essais à plusieurs températures, ce qui permet de tracer une courbe de pénétrabilité en fonction de la température, très utile pour apprécier la susceptibilité thermique du bitume [10].

✓ **La Température de ramollissement Bille et Anneau (TBA) (NF EN 1427)**

C'est la température pour laquelle une bille d'acier s'enfonce à travers un disque de bitume contenu dans un anneau de métal dans des conditions définies de fabrication et d'essai voir la figure (fig.1.9).

À cette température, le bitume présente une structure interne telle que les contraintes auxquelles il est soumis, par les conditions même de l'essai, sont suffisantes pour permettre une déformation irréversible.

Dans cet essai, plus le point de ramollissement est élevé plus le bitume est dur [11].

Pour cela, une bille d'acier est placée sur un anneau de cuivre rempli préalablement de bitume ; l'ensemble est plongé dans un bain dont la température est élevée de 5°C par minute : la température de ramollissement est celle à laquelle la bille, entraînant la membrane de bitume, atteint un repère fixé. De bonnes corrélations existent entre la Température de ramollissement Bille et Anneau (TBA) et la pénétrabilité comme le montre le tableau 1.1 .et la résistance à l'orniérage pour les bitumes purs (conventionnels).



Fig.1.9 : Essai TBA

Tableau 1.1: Classification des Bitumes Selon la Pénétrabilité et TBA.

	unité	Classes								
		20/30	30/45	35/50	40/60	50/70	70/100	100/150	160/220	250/330
Pénétrabilité	0,1 mm	20/30	30/45	35/50	40/60	50/70	70/100	100/150	160/220	250/330
TBA	C ⁰	22-63	52-60	50-58	46-56	46-54	43-51	39-47	35-43	30-38

✓ **La densité relative**

Quoique la densité relative ne soit pas normalement spécifiée, il est préférable de la connaître pour le bitume utilisé. Cette information est nécessaire pour faire les corrections de volumes à des températures élevées. Elle est aussi utilisée dans la détermination des vides dans les mélanges bitumineux compactés. Par définition la densité relative est la proportion de la masse de n'importe quel volume du matériau à la masse d'un volume égale d'eau, les deux étant à une température spécifiée. Ainsi, une densité relative de 1.05 signifie que le matériau est 1.05 fois plus pesant que l'eau à la température indiquée [12].

c. Classification des bitumes routiers

La classification est susceptible d'évolution, pour prendre en compte notamment le vieillissement que provoque l'élévation de température que subit le bitume au cours de l'enrobage. L'effet de cette élévation de température peut être simulé par l'essai RTFOT, Rolling Thin-Film Oven Test (norme ASTM D 2872) qui consiste à soumettre un échantillon de bitume à la température de 163 °C en étuve ventilée pendant 75 min. On mesure ensuite la température bille et anneau et la pénétration du

bitume. Une évolution importante de ces deux grandeurs après RTFOT traduit une sensibilité excessive au vieillissement, l'essai est illustré sur la figure (fig.1.10).

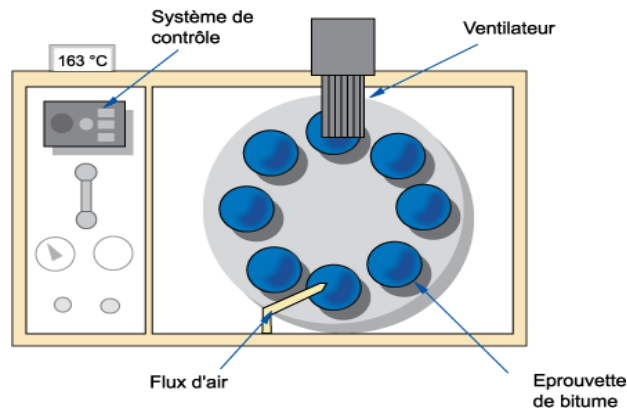


Fig.1.10 : Essai RTFOT.

Les bitumes 160-220 sont essentiellement utilisés pour la fabrication des émulsions et la réalisation d'enrobés fins mis en œuvre en couches minces.

Les bitumes 70-100, 400-70 et 35-50, s'ils sont également utilisés pour la fabrication des émulsions, sont surtout destinés à la confection des enrobés denses, des bétons bitumineux et des graves-bitumes.

Les bitumes 20-30 sont principalement utilisés pour la confection des couches d'assise en sable-bitume. Dans le cas de sables de concassage, on peut également employer le bitume 40-50.

Sous des climats plus chauds, on peut utiliser des bitumes de dureté supérieure [10].

1.2.3 Les Granulats

Les granulats utilisés dans les techniques routières peuvent être naturels ou artificiels. Ils sont dits naturels lorsqu'ils sont issus de roches meubles ou massives, extraites in situ, et qu'ils ne subissent aucun traitement autre que mécanique. On les qualifie d'artificiels lorsqu'ils proviennent soit de la transformation thermique de roches, minerais et déchets, soit de la démolition d'ouvrages divers [13]. Le rôle des granulats est d'abord mécanique. Ils sont choisis pour leur résistance aux usages, leur taille, leur origine et leur répartition afin de supporter au mieux les usages attendus. Les matériaux granulaires constituent environ 95% de la masse de l'enrobé (80-85% du volume).

a. Classification des granulats routiers

La granularité est la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat. Elle traduit la distribution pondérale des granulats élémentaires dans les matériaux étudiés. En portant en abscisse les ouvertures de mailles de tamis et en ordonnée les pourcentages de tamis cumulés, on obtient ainsi une courbe dite courbe granulométrique.

En construction routières les granulats se classent d'abord selon leur granularité, il existe six classe granulaires principales caractérisées par les dimensions extrêmes d et D des granulats rencontrés (norme XP P 18-540, octobre 1997) :

- Les fillers 0/D avec $D < 2$ mm et au moins 70 de passant à 0.063 mm.
- Les sablons 0/D avec $D \leq 1$ mm, et moins 70 de passant à 0.063 mm.
- Les sables 0/D avec $1 < D \leq 6.3$ mm.
- Les graves 0/D avec $D \geq 6.3$ mm.
- Les gravillons d/D avec $d \geq 1$ mm et $D \leq 125$ mm.
- Les ballasts d/D avec $d \geq 25$ mm et $D \leq 50$ mm.

La teneur en fines d'un granulat est définie par le passant à 0.063 mm [10].

b. Principaux essais propres aux granulats

L'aptitude des granulats à être utilisés dans les assises de chaussée est appréciée par un certain nombre d'essais:

- Celle qui tient à la nature de la roche d'origine (dureté, résistance au polissage, résistance aux chocs).
- Celle qui résultent de la fabrication des granulats (propreté, forme, granularité, angularité, homogénéité). En outre les essais mécaniques permettent d'établir un classement selon :
 - La résistance à la fragmentation par les essais Los Angeles (norme P18-573) ;
 - La résistance à l'usure et à l'attrition par l'essai Micro-Deval humide (norme P18572);
 - La résistance au polissage (norme P18-575).

✓ **Analyse Granulométrique (NF P 18-560)**

Les courbes granulométriques des différents granulats peuvent être déterminées par l'essai de l'analyse granulométrique (NF P 18-560). L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

On trace la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le pourcentage des tamis sous les tamis dont les mailles D sont indiquées en abscisse selon une graduation logarithmique.

✓ **Essai d'équivalent de sable (NF P 18-598)**

L'équivalent de sable (ES) est le rapport multiplié par 100 de la hauteur de la partie sableuse sédimentée (propre), à la hauteur totale du floculat et de la partie sableuse sédimentée.

L'essai consiste à faire flocculer les éléments fins d'un sable mis en suspension dans une solution lavante puis, après un temps de mise au repos donné, à mesurer la hauteur des éléments sédimentés. Il est effectué sur la fraction du sable passant au tamis à mailles carrées de 5 mm.

✓ **Essai au bleu de méthylène**

Cet essai, utilisé des manières courantes pour caractériser l'activité des argiles contenue dans le sol, est également utilisé pour évaluer l'influence des fines d'origines argileuses contenues dans les sables et graves d'origines naturelles ou artificielles. L'essai est conduit sur un échantillon contenant au moins 200g de fraction granulométrique 0/2 mm.

✓ **Essais de résistance à l'usure et au choc des granulats**

Déterminé par l'essai Micro Deval (MDE) en présence d'eau, on utilise un broyeur à billes d'acier, contenant de l'eau, provoque une usure des gravillons par frottements réciproques avec production d'éléments fins (passant au tamis 1,6 mm). Le MDE représente la proportion d'éléments fins produits pendant l'essai, plus MDE est faible meilleur sera la résistance à l'usure [18].

✓ **Résistance au choc (essai Los Angeles)**

Il consiste à placer dans un cylindre à axe horizontal de 70 cm de diamètre et 50 cm de longueur les granulats à essayer et des boules d'acier. On effectue 500 révolutions à 30 tr/min. Le poids et la granularité de la prise d'essai sont déterminés en fonction du diamètre maximal du granulat.

Après essai, les matériaux sont criblés au tamis de maille 1,6 mm et le poids de la fraction passante est rapporté au poids de la prise d'essai. Le rapport, multiplié par 100, est appelé coefficient Los Angeles (LA) [18].

✓ **Densité relative**

La densité relative des agrégats est ordinairement déterminée pour deux raisons :

- Pour permettre le calcul des vides dans le béton bitumineux à l'état compacté.
- Pour ajuster les quantités de fractions constituantes de l'agrégat dans le béton bitumineux, lorsque la densité relative de ces fractions constituantes varie sensiblement.

1.2.4 Les Enrobés

Nous avons vu le bitume et le granulat. Ces deux ensemble forment l'enrobé, lequel doit aussi répondre à certaines exigences.

On appelle enrobé tout mélange constitué de granulats agglomérés entre eux par un liant hydrocarboné ; ce mélange peut être enrichi par des fines et éventuellement contenir des additifs en

vue d'améliorer certaines propriétés. Généralement la composition d'un enrobé bitumineux est comme suit :

- **Granulats** : (environ 90% en poids) composés de plusieurs fractions en pourcentages variables :

- ✓ Les fines < 80 μm
- ✓ Les sables (0/3)
- ✓ Les graves (3/8, 8/15)

- **Bitumes** : (5 à 7 % en poids)

- **Vides** : (de 2 à 20% selon les matériaux) [17].

Les enrobés sont classés en catégorie, selon leur usage. On parle soit de béton bitumineux (BB) pour les couches de surface, soit de Grave Bitume (GB) pour les couches d'assise. Leurs formulations et dimensionnements sont réalisées par couche, entre autre, sélectionnées selon le trafic prévu : nombre de cycles de sollicitation [18].

Nous nous intéressons ici aux enrobés bitumineux à chaud qui résultent d'un mélange à chaud de gravillons, de sable, de fillers et de liants bitumineux.

a. Enrobé à chaud

Les enrobés bitumineux à chaud compactés sont fabriqués par mélange à chaud de gravillons, de sable avec ou sans fines, de filler, de liant bitumineux et d'éventuels dopes et/ou d'additifs, dans une proportion choisie. Dans ce mélange, le liant hydrocarboné (le bitume) est principalement responsable de la cohésion tandis que le squelette minéral constitué par les granulats assure la rigidité de l'ensemble [11].

Les enrobés à chaud fabriqués aux alentours de 180°C, dans une centrale d'enrobage. L'objectif est de produire un enrobé durable qui sera transporté à chaud vers le chantier d'épandage, pour former la couche supérieure du revêtement des infrastructures routières. Il est mis en œuvre à une température d'environ 150 °C au moyen d'un finisseur. En dessous de 130°C, un enrobé à chaud devient difficile à travailler, et la qualité de l'application peut en pâtir.

b. Méthodologies des études de formulations des enrobés bitumineux algérien

La formulation en Algérie est basée sur la vérification des caractéristiques des composants ainsi que sur les essais Duriez et Marshall en fonction des matériaux granulaires. On choisit une formule qui donne un mélange ayant la meilleure aptitude au compactage et qui pourrait donner une meilleure stabilité au mélange hydrocarboné.

On doit vérifier premièrement que la courbe granulométrique du mélange s'inscrit parfaitement dans le fuseau spécifique de référence au béton bitumineux 0/14 de SETRA- LCPC destiné pour une couche de roulement.

Les fractions granulaires du béton bitumineux 0/14 sont choisies parmi les granulats suivante : 0/3, 3/8, 8/15, le Fuseau des granulats sont représentés comme suit:

Tableau.1.2 : Fuseau Granulométrique BB 0/14

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

- Détermination de la teneur en bitume (TL):

On appelle teneur en bitume (TL) la masse de liant sur la masse des granulats secs exprimé en pourcentage, Duriez a établi la formule (Eq.1.1) pour déterminer la teneur en bitume des enrobés en fonction de la surface spécifique du mélange :

$$TL = k \cdot \alpha \cdot \sqrt[5]{\sqrt{\Sigma}} \quad (\text{Eq.1.1})$$

Tel que :

k : module de richesse

Il représente une quantité de liant en fonction de la surface spécifique du mélange sec. Il caractérise donc l'épaisseur du film de liant autour des granulats. Le module de richesse permet de classer les mélanges bitumineux :

- Les graves bitumes (2 < k grave bitume < 3,2)
- Les bétons bitumineux (3 < k béton bitumineux < 3,9)

α : coefficient correcteur

Ce coefficient permet de tenir compte de la masse volumique réelle des granulats), si Celle-ci diffère de 2.65 t/m³, on utilise la formule suivante (Eq.1.2):

$$\alpha = \frac{2.65}{M_v} \quad (\text{Eq.1.2})$$

Tableau.1.3: Les valeurs usuelles du module de richesse pour le béton bitumineux

Enrobé	Module de richesse (k)			
0/14	3.45	3.60	3.75	3.90

M_v : masse volumique des granulats

La méthode utilisée est la méthode classique au pycnomètre. On mesure un poids du granulat séché à 105°C, puis on détermine son volume par déplacement de liquide dans un pycnomètre comme suit : Une masse connue M_G de granulats séchés (par passage à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante) est introduite dans un récipient contenant de l'eau distillée. Les bulles d'air libérées sont aspirées par un vide d'air (trompe à eau). Après s'être assuré qu'aucune bulle d'air n'est piégée entre les granulats, on détermine avec un très grand soin le volume d'eau déplacé par les particules.

Le volume des granulats V_G, égale au volume d'eau déplacée.

M₁ : masse du pycnomètre contenant l'eau distillée avec son bouchon

M₂ : masse du pycnomètre contenant les granulats, l'eau distillée et le bouchon

$$M_2 = M_1 + M_G - M_{VE} \cdot V_G \tag{Eq.1.3}$$

Le volume des granulats s'exprime par la formule (Eq.1.4):

$$V_G = \frac{M_1 + M_1}{M_{VG}} - M_2 \tag{Eq.1.4}$$

Avec :

M_G : masse des granulats ;

M_{VE} : masse volumique de l'eau distillée ;

V_G : volume des granulats ;

M_{VG} : masse volumique des granulats.

Σ: surface spécifique conventionnelle

La surface spécifique d'un granulat représente la surface totale des particules par rapport à son volume. Elle est exprimée en m²/m³ de granulat. Cette façon d'exprimer la surface spécifique permet de faire la comparaison entre les différents granulats. Elle est exprimée ensuite en m²/kg, laquelle est essentiellement comparable entre les matériaux possédant une même densité [19].

$$\Sigma : 0.25 G + 2.3 S + 12s + 135 f \text{ en m}^2/\text{kg} \tag{Eq.1.5}$$

G : proportion pondérale des éléments supérieurs à 6.3 mm.

S : proportion pondérale des éléments compris entre 0.315 mm et 6.3 mm.

s : proportion pondérale des éléments compris entre 0.08 mm et 0.315 mm.

f: proportion pondérale des éléments inférieure à 0.08 mm

Dans certains cas, on utilise la formule simplifiée suivante :

$$\Sigma : 2.5 G + 1.3 f \text{ [m}^2\text{/kg]} \quad (\text{Eq.1.6})$$

La surface spécifique s'est influencée par :

✓ **Grosseur maximale des granulats** : la surface spécifique est inversement proportionnelle à la dimension maximale des granulats.

✓ **Granulométrie des granulats** : pour un granulats de même grosseur maximale, La surface spécifique sera proportionnelle aux pourcentages passants ou à la finesse du granulats.

✓ **Forme des granulats** : la surface spécifique d'une particule cubique est 2 fois plus grande que celle d'une particule sphérique [19]. Ce sont les particules plates et allongées qui ont la plus grande surface spécifique.

Cependant, Sidibé [20] précise que la méthode des surfaces spécifiques, qui utilise des facteurs prédéterminés pour chacun des tamis n'est pas toujours réaliste, car elle utilise les mêmes facteurs peu importe la forme du granulats. Cela constitue une source d'imprécision [18].

c. Essais sur enrobés bitumineux

Les formulations de bétons bitumineux sont déterminées au moyen d'essais dans le laboratoire permettant d'évaluer le comportement des matériaux au compactage (Presse à cisaillement Giratoire PCG), d'apprécier leurs caractéristiques mécaniques (essais de fatigue, essais MARSHALL, essais LCPC -DURIEZ) et d'estimer leurs risques de déformations permanentes (essais à l'ornièreur) [20].

- Essai Marshall

L'essai Marshall est toujours très utilisée au niveau international, pour la détermination direct de la stabilité (force maximale appliquée) ; et du fluage Marshall (valeur de déformation en 1/10 mm correspondant à la stabilité), deux grandeurs liées à la caractérisation empirique de l'ornièrage et il sert à choisir la formulation optimale [21].

L'essai Marshall est applicable à tous les enrobés à chaud ne comportant pas des granulats de dimension supérieure à 20 mm. La stabilité Marshall est la valeur de la charge maximale obtenue par un essai de compression exercée suivant une génératrice d'une éprouvette semi - traitée est

préalablement compactée. Le fluage Marshall est l'affaissement de cette même éprouvette au moment de la rupture par compression. La préparation du mélange et la confection des éprouvettes se fait dans un récipient métallique pouvant contenir environ 2000 cm³, la quantité de bitume et 1200 g de gâchée reconstituée à partir de 3 classes granulaires dont les pourcentages varient en fonction de l'enrobé désiré sont versés. Pour une composition donnée du granulat, l'étude a porté sur 3 teneurs en bitume différentes. Pour chaque teneur donnée, 5 éprouvettes ont été confectionnées (3 pour la stabilité et le fluage; 2 pour la densité apparente du mélange par pesée hydrostatique).



Fig.1.11 : Essai Marshall [21]

Le mélange est porté à 140°C avant d'être versé dans le moule puis compacté à raison de 50 coups de marteau de la dame sur chacune des deux faces de l'éprouvette; un disque de papier filtre est placé sur la surface de l'enrobé avant compactage. La durée de compactage (damage et manutention) ne doit pas excéder 3 minutes.

Afin d'éviter tout risque de refroidissement. Le moule est ensuite placé pendant 15 minutes sous un jet d'eau froide, maintenu de telle façon que l'enrobé ne soit pas mouillé. Après 5 heures à température ambiante, l'éprouvette est démoulée en exerçant une légère pression sur le piston extracteur placé au contact de l'enrobé avant d'être immergée dans un bain hydrostatique réglé à 60°C pendant 30 minutes. Enfin, l'éprouvette est placée dans l'appareil Marshall constitué de deux mâchoires s'appuyant sur deux génératrices opposées d'une presse pouvant développer un effort de 2 tonnes pendant l'écrasement diamétral à la vitesse de 0.846 mm/s.

Pour chaque composition nous déterminons :

- la densité apparente ;
- la stabilité à 60°C ;
- le fluage;
- la compacité ;
- le pourcentage de vides remplis par le bitume.

- **Essai Duriez (Essai de compression simple type LCPC) (NF P9 – 251 – 1)**

L'essai Duriez est effectué sur la formulation choisie précédemment afin de vérifier ses performances. La réalisation d'essais d'immersion - compression Duriez vise comme objectif de caractériser les qualités de résistance mécanique (statique) et de résistance au désenrobage par l'eau des matériaux enrobés et de fournir d'autres repères de résistance. L'essai Duriez est appliqué essentiellement aux matériaux denses ou semi-denses (enrobés avec du bitume, dont les agrégats passent en totalité au tamis 20 mm).

Dans l'essai LCPC Duriez le poids de granulats considéré est de 1000 g. Les granulats et le bitume sont mis dans un récipient métallique et placés au chauffage à 140°C. Puis, les éprouvettes sont confectionnées dans des moules cylindriques de 80 mm de diamètre intérieur et 150 mm de hauteur.

Le compactage est fait à la presse CBR. La pression est appliquée progressivement jusqu'à atteindre au bout d'une minute 120 kg/cm² sur la base de l'éprouvette. Elle est maintenue pendant 5 minutes, puis relâchée lentement. L'éprouvette est refroidie suffisamment pour que le démoulage puisse se faire sans déformation.

On réalise 7 éprouvettes :

- 1 pour la densité apparente du mélange par pesée hydrostatique;
- 2 pour la résistance à la compression à 18°C;
- 1 pour le pourcentage d'affaissement;
- 3 pour le pourcentage d'imbibition.

Enfin, l'écrasement des éprouvettes se fait à l'aide d'une presse à la vitesse de 1 mm/s et, à l'instant où se produit la rupture, le sens d'avancement est inversé. Un index mort, entraîné par une aiguille du manomètre de la presse permet de repérer la valeur maximale de la charge appliquée, c'est-à-dire la valeur cherchée de la résistance à la compression. En divisant cette valeur par 50, nous obtenons la résistance à la compression appelée stabilité Duriez.

Pour chaque composition on détermine:

- la densité apparente du matériau enrobé;
- la résistance à la compression à 18°C
- le pourcentage d'affaissement: c'est 100 fois la diminution relative de la hauteur de l'éprouvette provoquée par la charge d'écrasement;

Ces résultats montrent que la formulation optimale retenue a une bonne stabilité. Les valeurs de stabilité trouvées sont toutes nettement supérieures à la valeur spécifique.

- **Essai à la Presse à cisaillement Giratoire (PCG)**

L'essai à la presse à cisaillement giratoire (PCG) est un essai de formulation. La particularité de l'appareil réside dans le fait que l'échantillon n'est pas densifié par impact comme le cas de la méthode Marshall, mais plutôt sous l'action combiné d'un piston exerçant une pression fixée à 600 KPa et d'un moule cylindrique de 150 mm de diamètre incliné de 1.25 degré et décrivant un mouvement giratoire de 30 tr/min [21].

Le compactage est obtenu en effectuant le nombre de giration désiré, qui généralement de 200 tours. La température de l'échantillon est ajustée en fonction du bitume utilisé. Ce mode de compactage traduit la relation linéaire existant entre le nombre de passes d'un rouleau compacteur de chantier et le nombre de giration ; (ce n'était pas le cas avec le nombre d'impacts de la méthode Marshall). Alors que la méthode Marshall ne permet la mesure d'un pourcentage de vides que pour un effort de compactage unique, l'essai à la PCG permet de mesurer l'évolution du pourcentage de vides dans le mélange en fonction du nombre de giration. Cette courbe de pourcentage de vides en fonction du nombre de giration décrit la maniabilité du mélange, puis utilisée comme critère de formulation des enrobés. Les critères de maniabilité permettent d'exercer une discrimination entre des mélanges trop maniable, qui auront tendance à présenter des ornières, et de mélanges peu maniables, qui seront perméables et peu durables.



Fig.1.12 : Essai Presse à Cisaillement Giratoire (Pcg) [21]

- **Essai d'orniérage**

Cet essai est très important pour les routes fréquentées et avec un pourcentage de poids lourds assez élevé, il permettra de simuler au laboratoire la résistance de l'enrobé à l'orniérage.

L'essai d'orniérage est très populaire, car il est plus représentatif que les autres essais en laboratoire, l'évaluation de la résistance à la déformation permanente et les résultats

d'essai d'orniérage ont montré une excellente corrélation avec la déformation de chaussée en service [21].

Mode d'essai :

On détermine la profondeur de l'ornière au passage répété (plusieurs cycles sont appliqués 1000, 3000, 10 000, 30 000, 100 000) d'un pneumatique, selon l'épaisseur de l'enrobé. l'énergie de compactage est normalisée à 60°C, le résultat (profondeur d'ornière) est comparé à la norme (NF EN 12697-22) [17].



Fig.1.13 : Essai d'Orniérage [17]

- Essai de Fatigue

Cet essai permet d'étudier le comportement des enrobés bitumineux vis-à-vis de la fissuration, il est pratiqué sur des éprouvettes de forme trapézoïdales (fig.1.14), l'éprouvette est encastrée à la base, sollicitées en tête en flexion sinusoïdale par déplacement imposé d'amplitude constante choisie afin de caractériser la rupture à un million de cycle. L'essai est pratiqué à 10°C et à une fréquence de 25 Hz. La répétitivité des cycles de flexion alternée entraîne un endommagement de l'éprouvette (des fissures sont localisées). Les résultats obtenus sont reportés sur un diagramme (déformation - nombre de cycles à rupture).

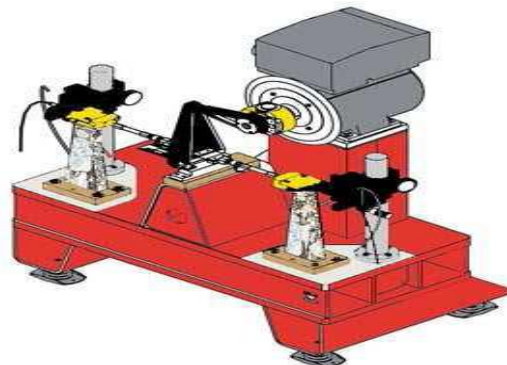


Fig.1.14 : Essai de Fatigue

1.3 Dégradations des Couches en Enrobes Bitumineux

Les structures routières sont exposées à des sollicitations externes dues au trafic de véhicules et aux agressions climatiques. Ces sollicitations, couplées à d'autres phénomènes comme le vieillissement du bitume, la présence d'eau ou de sels de déglacage, mèneront à la dégradation des revêtements routiers. Les phénomènes défavorables à la durabilité des revêtements routiers peuvent être classés suivant trois catégories.

1.3.1 Catégories des Phénomènes Défavorables à la Durabilité des Revêtements Routiers

a. Sollicitations de trafic

Chaque couche de chaussée subit des écrasements et des flexions sous l'effet du trafic. Les tractions répétées à la base des couches, sous l'effet du passage des véhicules, créent des micro-dégradations qui s'accumulent et peuvent entraîner la ruine du matériau. Il s'agit du phénomène de fatigue qui s'observe pour de nombreux matériaux. Une fissure peut également apparaître et se propager dans la chaussée. Les compressions répétées sous le passage de la charge peuvent créer des déformations permanentes induisant parfois un orniérage à la surface de la chaussée. Cet orniérage est peut-être dû au tassement des couches de béton bitumineux ou aux déformations de couches inférieures non traitées [22].

b. Sollicitations thermiques

Tout au long de sa vie, une chaussée est exposée à des conditions climatiques différentes et variées, le plus souvent sans aucune protection. C'est à la température, dans le comportement de la chaussée, que revient le rôle prépondérant, et ce particulièrement pour les chaussées souples en pouvant se manifester de trois manières que nous allons détailler.

- Impact sur la rigidité de l'enrobé

L'enrobé bitumineux est composé de granulats et de bitume. Bien que le pourcentage massique du bitume dans l'enrobé soit de l'ordre de 4 à 7 % seulement, le comportement de l'enrobé à plusieurs niveaux est régi par celui du bitume. Ce dernier, de par son comportement viscoélastique, confère un caractère thermo-susceptible à l'enrobé. La rigidité de l'enrobé diminue donc avec l'augmentation de sa température. Le module de rigidité est aussi impacté par la vitesse de sollicitation et diminue lorsque la vitesse de sollicitation diminue. Le module de l'enrobé varie donc de quelques centaines de méga pascals à haute température et basse vitesse, à plus de trente giga pascals à très basse température [23].

- Sollicitations thermiques des couches liées

La température à deux effets mécaniques principaux :

- ✓ Le changement du comportement du matériau ;
- ✓ La création de contraintes et déformations au sein du matériau en raison des dilatations ou contractions thermiques lors des changements de température.
- ✓ Lorsque des températures très basses sont appliquées, des fissures peuvent apparaître et se propager avec les cycles thermiques (journaliers ou autres) .

Le retrait empêché par le frottement à l'interface peut provoquer un fissure dans le revêtement en enrobé bitumineux. Cette fissure évolue avec les cycles thermiques et peut traverser la couche de roulement. Ce phénomène est connu sous le nom de remontée de fissure [24].

- Phénomène de gel

Dans les régions froides, le comportement de la chaussée peut être fortement impacté par l'action du gel ou par les cycles journaliers de gel-dégel. Trois conditions doivent être réunies pour mener au gonflement de la chaussée par le gel :

- ✓ un froid intense et persistant ;
- ✓ une nappe phréatique peu profonde ;
- ✓ un sol gélif permettant la remontée de l'eau par capillarité.

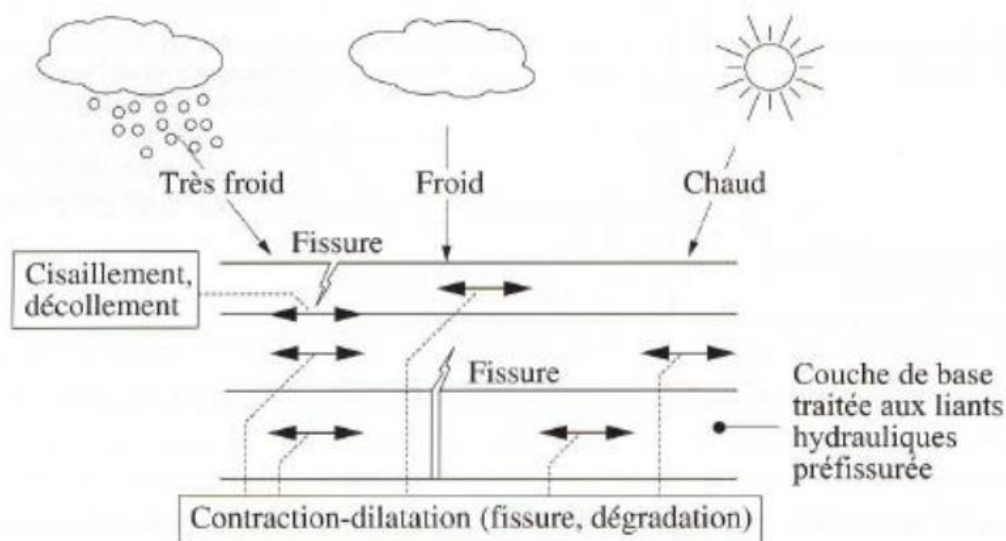


Fig.1.15 : Effet de la température sur le corps de chaussé [24]

1.3.2 Modes de dégradation et d'usures des revêtements routiers

Les modes de dégradation des chaussées peuvent être classés suivant trois catégories selon la nature de la détérioration.

a. Dégradation par fissuration

Les modes de dégradation présents dans cette catégorie sont ceux qui concernent les cas où le revêtement routier se dégrade *via* l'apparition de fissures sur sa surface. La fissuration par fatigue, la fissuration thermique, la rupture des joints et la remontée des fissures, cependant parmi ces phénomènes de dégradation.

b. Fissuration par fatigue

La fatigue est l'un des modes de dégradation de chaussées que l'on rencontre le plus souvent. Le passage d'un véhicule engendre des contraintes de tension et de contraction dans les différentes directions des couches de la chaussée. Chaque couche est assimilée à une poutre qui subit des efforts de flexion sous l'effet du trafic et qui engendrent donc des contraintes de tension. La répétition de ces efforts à la base des couches d'une chaussée, sous l'effet du passage des véhicules, provoque l'apparition de microfissures qui s'accumulent et remontent progressivement à la surface du revêtement comme le montre la figure (fig.1.16). Les fissures sont généralement concentrées dans les pistes de roulement dans le sens longitudinal de la chaussée. Avec le temps, ces fissures continuent à se propager et s'interconnecter et forment des zones fissurées qui ressemblent à une peau de crocodile ou de lézard.

Le phénomène de fatigue est pris en compte dans la méthode française de conception de chaussée comme un critère de dimensionnement des structures routières.

Au niveau de l'enrobé bitumineux, c'est le bitume qui joue le rôle le plus important quant à la résistance à la fatigue. L'utilisation de liants modifiés aux polymères augmente généralement la durée de vie des mélanges et ralentit l'endommagement [25].

Le pourcentage de bitume dans le mélange ainsi que son bon compactage jouent également un rôle pour augmenter la durée de vie.

Le collage des couches du revêtement routier avec un liant adapté est aussi très important pour éviter une fatigue prématurée.

Dans le cas où les couches sont mal ou pas collées, les couches fonctionnent comme des poutres séparées et superposées et les efforts de tension en bas des couches supérieures deviennent très importants et peuvent provoquer la rupture prématurée de ces couches. D'autres raisons peuvent également provoquer la fatigue prématurée du revêtement. Citons, parmi elles, le sous-dimensionnement de la structure, l'augmentation imprévue du trafic lourd, le sous compactage des couches liées ou non liées ou le manque de drainage des couches granulaires.



Fig.1-16: Fissuration du revêtement routier par fatigue [25]

c. Fissuration thermique

Le phénomène de fissuration thermique est souvent rencontré dans les pays nordiques où les conditions climatiques hivernales sont particulièrement sévères. La fissuration thermique est la conséquence d'un couplage de phénomènes thermiques et mécaniques.

Comme il a été expliqué précédemment, le comportement de l'enrobé bitumineux dépend fortement de sa température. À basse température, le bitume devient moins visqueux et plus fragile.

En laboratoire, lorsque la température de l'enrobé diminue dans une enceinte thermique, une petite éprouvette d'enrobé bitumineux se contracte. En revanche, lorsque l'enrobé se retrouve sur la chaussée, les grandes dimensions du revêtement empêchent la contraction thermique de l'enrobé. On parle donc d'un phénomène de « retrait thermique empêché ». Par conséquence, des contraintes de tension se développent et s'accumulent dans l'enrobé tant que la température continue à diminuer. Une sollicitation mécanique interne se crée donc par un le seul effet thermique. On parle alors de couplage thermomécanique très complexe [26]. Ces contraintes de tension entraînent donc la rupture de l'enrobé lorsqu'elles atteignent une valeur limite correspondant à la résistance à la traction de l'enrobé. Comme ces contraintes sont plus importantes dans la direction longitudinale de la chaussée (la dimension la plus importante), elles créent des fissures transversales quasiment parallèles et très régulières. La figure (fig.1.17) illustre ce type de fissuration et un phénomène de soulèvement par action du gel peut être constaté à l'endroit des fissures.



Fig.1.17 : Fissuration par retrait thermique empêché et soulèvement à petites longueurs d'onde.

d. Rupture de joint de construction

Le répannage ou la mise en œuvre de l'enrobé bitumineux lors de la construction d'une chaussée souple se réalise en plusieurs phases. D'une part, la largeur limitée des tables de répannage ne permet très souvent pas de réaliser le répannage sur toute la largeur de la chaussée. Des joints longitudinaux se créent donc sur le revêtement. D'autre part, des joints transversaux seront nécessaires au début et à la fin des travaux et lors des arrêts prolongés du répannage de l'enrobé. Dans la plupart des cas, le nouvel enrobé chaud se met en œuvre à côté de l'ancien enrobé froid ce qui crée ce qu'on appelle « un joint froid » qui peut devenir un maillon faible dans le revêtement.

La réalisation des joints longitudinaux et transversaux est une phase essentielle de la construction de la route qui requiert une grande rigueur. Un joint mal exécuté peut se dégrader prématurément.

Ceci se traduit par l'apparition d'une fissure tout au long du joint menant à des phénomènes qui réduisent la durée de vie du revêtement. Le nombre de joints dans le revêtement doit être réduit au minimum.



Fig.1.18 : Fissure longitudinale causée par la rupture de joint de construction longitudinal

e. Autres modes de fissuration

D'autres modes de fissuration peuvent être rencontrés, mais qui sont néanmoins peu fréquents.

- Le Faiënçages

Le faiënçage arrive lorsqu'une série de fissures se propage aléatoirement dans la couche de surface du revêtement. Ces fissures se croisent et forment des mailles polygonales de dimensions variables présenté sur la figure (fig1.19). Plusieurs causes, souvent combinées, conduisent à ce mode de fissuration. Ce mode surgit souvent sur des routes secondaires construites sans aucune étude de dimensionnement et fortement sollicitées par des engins agricoles lourds. Un autre facteur apparaitre, c'est le vieillissement du bitume par oxydation rendant l'enrobé cassant et particulièrement quand l'enrobé est posé en couche mince.



Fig.1.19 : Fissuration par faiënçage du revêtement routier

- Fissuration par ségrégation de l'enrobé

La figure (fig.1.20) illustre un cas de ségrégation au centre de la table de répandage due à un mauvais réglage de la table [27]. Ce phénomène surgit principalement avec des enrobés grenus qui contiennent un fort pourcentage de gravillon. Une ségrégation physique se crée au centre de la table suite à une forte concentration de gravillon dans cette zone ce qui mène à un phénomène de ségrégation thermique et donc au sous-compactage de l'enrobé au centre. Cette zone de ségrégation est souvent touchée par un phénomène de fissuration prématurée.



Fig.1.20 : Ségrégation au centre de la table de répandage conduisant à la fissuration de l'enrobé

- **Fissuration en rive**

La figure (fig.1.21) montre un cas de fissuration longitudinale proche de l'accotement de la chaussée, hors bandes de roulement. Ce mode de fissuration est connu sous le nom « fissure en rive ». La fissure peut être longitudinale, continue ou non, comme aux figures (fig.1.21), ou locales sous forme d'arc de cercle. Elle est plutôt causée par un manque de support latéral de la chaussée. Dans d'autres cas, il peut s'agir d'un sous-compactage de la fondation granulaire proche de l'accotement ou d'une discontinuité dans la structure suite à un élargissement des voies [28].



Fig.1.21 : Fissures longitudinale proche de l'accotement de la chaussée (fissure en rive)

- **Remontée de fissures**

Finalement, il est à noter que beaucoup de cas de fissuration peuvent être attribués au phénomène de remontée de fissures. Ce phénomène surgit lorsque l'on recouvre un revêtement fissuré par une

couche d'enrobé mince. Cette pratique d'entretien palliatif est très courante, mais elle est très peu efficace. Des dispositifs anti-remontée de fissures peuvent être utilisés, mais l'efficacité de ces solutions reste limitée en cas de dégradation sévère du substrat.

1.3.3 Dégradation par déformation (Phénomène d'orniérage)

Cette catégorie regroupe les différents modes de dégradation des revêtements routiers se traduisant par un déplacement vertical de la surface de revêtement. Le mode le plus fréquemment rencontré est l'orniérage. Les modes de déformation par l'action du gel sont moins fréquents en France.

a. Définition

Du point de vue analyse visuelle des dégradations de chaussée, l'orniérage est par définition une trace permanente creusée dans la chaussée par les roues des véhicules [22].

b. Les types d'orniérages

Les ornières sont classées généralement en trois catégories : petites (6 à 12,5mm), moyennes (12,5 à 25mm) et grandes (>25mm) ; [29]. Toutefois, on signale l'existence des trois types d'orniérage dans la couche de béton bitumineux:

- Les ornières d'usure

Elles sont dues à la perte progressive des particules de granulats de la couche de surface. Ce type d'orniérage est causé par la combinaison de l'environnement et du trafic [22].

- Les ornières structurelles

L'orniérage des structures résulte généralement d'un sous-dimensionnement de la chaussée pour les conditions de trafic dont elle est soumise. Plusieurs facteurs peuvent influencer ce mécanisme comme la construction de la chaussée, les facteurs liés au trafic (type de pneus, charge par essieu, vitesse de déplacement, pression de gonflage) et les facteurs environnementaux [22]

- Les ornières d'instabilité

Dans ce type d'orniérage il ne s'agit plus d'un problème de dimensionnement de structure mais d'un problème de formulation mettant en jeu les caractéristiques de divers constituants leurs dosage et la mise en œuvre des mélanges [30].

c. Le mécanisme d'orniérage

Plusieurs mécanismes peuvent être à la base du phénomène d'orniérage, parmi ces derniers la densification et l'augmentation du cisaillement [11]. L'orniérage initial est causé par la densification de la chaussée sous le passage des pneus. L'évolution de l'orniérage est liée au cisaillement qui conduit à la formation de bourrelet aux abords du passage des roues. Toutefois, pour les chaussées bien compactées, la contrainte de cisaillement dans la couche du béton bitumineux est le mécanisme principal d'orniérage. L'orniérage de la chaussée est provoqué par les mécanismes suivants :

- La déformation plastique verticale dans la couche de l'enrobé bitumineux.

- Le fluage latéral dans la couche de l'enrobé bitumineux (on peut définir la résistance à ce mécanisme par la capacité d'un enrobé bitumineux à maintenir intact son squelette minéral).
- La déformation des couches inférieures.

Plusieurs facteurs peuvent influencer ce mécanisme comme la construction de la chaussée, les facteurs liés au trafic (type de pneus, charge par essieu, vitesse de déplacement, pression de gonflage) et les facteurs environnementaux [22].



Fig.1.22 : a - Cas d'orniéage structural de sévérité majeure



Fig.1.22 : b- Cas d'orniéage d'usure « orniéage à petit rayon »

L'utilisation de matériaux recyclés, comme les fraisât d'enrobé et les bardeaux de toitures (rowing asphalt shingles) utilisés en Amérique du Nord, peut aussi améliorer la résistance à l'orniéage des enrobés. En effet, le bitume contenu dans ces matériaux est généralement assez dur par oxydation ce qui augmente la rigidité de l'enrobé à haute température et donc sa résistance à l'orniéage [26].

1.4 le recyclage

Depuis le sommet de Rio de 1992, la conscience environnementale des individus s'est affirmée et transparait maintenant dans l'activité économique et industrielle [33]. En réponse aux politiques environnementales de développement durable, des actions techniques sont mises en œuvre dans le domaine de la construction routière. Elles participent à l'amélioration du bilan environnemental des activités en réduisant l'utilisation de matières premières naturelles non renouvelables, et en réduisant l'énergie nécessaire à la fabrication des matériaux de construction. Le recyclage est aujourd'hui une réponse logique permettant de réduire la consommation de granulats et de liant bitumineux (matières premières naturelles non renouvelables). Il permet de plus de diminué le coût énergétique imputable à leur fabrication et de réduire celui de leur mise à disposition, Tout en cherchant à respecter l'environnement, le recyclage des enrobés doit aussi répondre à des éléments de performance technique et de rentabilité économique suivantes :



Fig.1.23 : Stockage des agrégats recyclés

a. Sur le plan environnemental

- ✓ une économie des ressources naturelles.
- ✓ une diminution de la quantité de rebuts, il n'y aura plus de possibilité d'ouvrir de site d'enfouissement et les sites actuels devront s'ajuster aux normes sans agrandir.
- ✓ une diminution des gaz à effet de serre (GES). Que ce soit par procédé à froid ou à chaud, le recyclage des enrobés diminue la quantité de GES émise ;
- ✓ une meilleure rentabilité énergétique. Lorsque le cycle de vie complet des enrobés est considéré, le recyclage à chaud a une meilleure rentabilité énergétique que la

fabrication et la mise en œuvre à partir de matériaux neufs. Quant au recyclage à froid, il consomme cinq fois moins d'énergie lors de l'opération de mise en œuvre routière que un enrobés à chaud conventionnels [34].

b. Sur le plan technique

- ✓ amélioration de la résistance au désenrobage;
- ✓ amélioration à l'essai de tenue à l'eau du mélange. Les mélanges d'enrobés contenant des GBR répondent aux mêmes exigences de performance que les enrobés constitués uniquement de matériaux neufs. Le seuil de recyclage généralement reconnu par les donneurs d'ouvrage est de 20 %. Pour le recyclage à froid en place, qui est une technique permettant uniquement la réhabilitation de chaussée, d'autres avantages techniques peuvent être observés :
- ✓ renforcement de la structure de la chaussée (pour le retraitement en place à froid) ;
- ✓ élimination du patron de fissuration de la chaussée existante ;
- ✓ ralentissement de la remontée de fissure dans le revêtement de surface ;
- ✓ prolongation de la durée de vie de la chaussée.

c. Sur le plan économique

Certaines techniques de recyclage et surtout, le recyclage à froid, permettent généralement une économie de coûts sur une intervention globale, notamment lors du transport des matériaux. Globalement, l'utilisation stratégique des techniques de recyclage permet de réduire les couts sur le cycle de vie complet de la chaussée.

1.4.1 Le recyclage dans le monde

En France, la quantité d'enrobés produite annuellement oscille entre 40 et 45 millions de tonnes. Chaque année, environ 6 millions de tonnes sont enlevées des chaussées, soit par fraisage, soit par relevage. En 2001, près de 40 % étaient réutilisés sans traitement, en accotements, sous-couches, chemins ruraux, pistes de chantier, etc. Seulement 10 % étaient recyclés – et valorisés – dans la fabrication de nouveaux enrobés. Depuis, ce recyclage valorisé augmente nettement, en raison de l'augmentation du prix des produits pétroliers (dont le bitume) et grâce aux investissements réalisés dans des postes d'enrobage. L'estimation pour 2007 est que 30 % des anciens enrobés récupérés sont recyclés dans de nouveaux enrobés [32]. La proportion d'enrobés recyclés en enrobés est proche de 100 % aux Pays-Bas, ce grâce à l'obligation légale d'inclure du recyclé dans chaque chantier d'enrobés [34]. Aux États-Unis, la quantité totale d'enrobés enlevés

annuellement des chaussées est d'environ 90 millions de tonnes. Un tiers, soit 30 millions de tonnes, est recyclé en enrobé (Federal Highway Administration) [34]. Au Québec, les premières opérations de recyclage en centrale ont débuté dans les années 1970. Le recyclage à froid, plus spécifiquement le retraitement en place, a commencé vers la fin des années 1980 [34]. Durant toutes ces années, le recyclage de chaussées souples s'est caractérisé par la combinaison de plusieurs actions afin d'améliorer la performance :

- ✓ intégration aux méthodes de formulation;
- ✓ évolution des équipements de recyclage;
- ✓ spécifications techniques adaptées aux chantiers routiers;
- ✓ adaptation des méthodes de dimensionnement structural;
- ✓ mise au point de méthode de contrôle de la qualité.

- Terminologie

Tout type d'enrobés peut être recyclé; qu'il provient de revêtement d'autoroutes, de routes municipales, de stationnements commerciaux et résidentiels ou d'aéroports, Il est aussi possible de recycler plusieurs fois les enrobés à la fin de leur vie utile [34]. Les enrobés sont des mélanges composés d'environ 5 % de bitume et de 95 % de granulats. Les enrobés sont des matériaux recyclables, mais surtout réutilisables grâce à la capacité du bitume à retrouver ses caractéristiques physiques. De ce point de vue, le bitume permet mieux que tout autre matériau de construction, de mettre en œuvre la règle des « 3 R » [34]: réduire les déchets à la source; réutiliser ou remployer les matériaux afin d'en prolonger la durée de vie; recycler les déchets pour d'autres usages.

Au niveau terminologique, il semble que l'aspect « réutiliser ou remployer » ait été inclus dans le terme de recyclage beaucoup plus connu. Voici une précision terminologique apportée par l'European Asphalt Pavement Association en ce qui concerne la distinction entre la « réutilisation » et le « recyclage » des chaussées souples :

- ✓ la réutilisation des enrobés décrit un processus de réinsertion des granulats bitumineux récupérés (GBR) dans des nouveaux mélanges avec la particularité que le vieux bitume et les granulats ont les mêmes fonctions que lors de leur application originale [34].
- ✓ le recyclage des enrobés décrit un processus d'utilisation des GBR dans des structures de la chaussée autres que le revêtement. Les vieux granulats et le bitume sont alors destinés à des applications moindres que leur application originale.

1.4.2 Les opérations de recyclage

Deux grands cas peuvent être distingués :

- ✓ les recyclages liés à de grandes opérations de fraisage;
- ✓ le recyclage « courant » dans le cadre de la marche normale d'un poste d'enrobage.

a. Grandes opérations

Le « gisement » d'enrobés à recycler est bien identifié et homogène (origine unique, archives, carottages). Il est stocké à part en vue de sa réutilisation programmée. Il est à noter, que les enrobés fraisés restent le plus souvent la propriété du maître d'ouvrage.

Une étude en laboratoire est effectuée avant chaque opération, afin d'évaluer l'état des vieux enrobés, le taux de recyclage, le type et le dosage du liant d'apport, etc., et de vérifier que les performances mécaniques du mélange final sont adéquates. Dans de telles opérations, le taux de recyclage est généralement fort [35].

b. Recyclage courant

Les enrobés à recycler proviennent essentiellement de petits chantiers, soit après fraisage, soit après relevage de plaques d'enrobés, soit encore des surplus de production du poste.

Dans un premier temps, ils sont stockés tels quels. Ensuite, la pratique courante est d'utiliser un matériel forain, qui fait la tournée régionale des postes et concasse, ou émiette, les matériaux à recycler. Il s'agit souvent d'un concasseur mobile, parfois d'un matériel spécifique appelé gradateur dans la figure (fig.1.24).

Les recyclats résultant de cette opération sont criblés à une dimension maximale allant, selon le produit final prévu, de 10 à 20 mm (exceptionnellement 25 mm pour recyclage en assise).



Fig.1.24 : Graduateur à Rouleaux

Il est impératif que les enrobés récupérés, que ce soit avant ou après fractionnement, soient stockés proprement, sur des aires dédiées et protégées de tout mélange avec d'autres matériaux. La limitation du taux de recyclage minimise l'impact de l'hétérogénéité du gisement. Il n'y a alors pas d'étude spécifique de recyclage et l'on se borne à un suivi « basique » des caractéristiques des agrégats d'enrobés [35].

1.4.3 Les procédés de recyclage

La première étape du recyclage commence par des opérations de récupération par enlèvement, soit de « planage », de « micro planage » et de « décohesionnement » de la chaussée. L'opération de planage s'effectue en couches sur des épaisseurs variant généralement de 5 à 10 cm, tandis que le décohesionnement permet de briser l'épaisseur complète de la chaussée. Cette dernière intervention produit des GBR recyclés en place. Il existe deux catégories de recyclage : à froid ou à chaud. Ces deux catégories sont divisées selon leur lieu d'intervention donc, soit « en place » signifiant au chantier même ou, soit « en centrale » lorsque les GBR sont transportés à la centrale d'enrobage. Grâce à cette gamme de procédés, le taux de recyclage de GBR dans le nouvel enrobé peut atteindre 40 % en centrale à chaud et 100 % en place. Chaque procédé nécessite de l'équipement spécialisé selon les techniques appliquées. On a quatre procédés :

- le recyclage en place à froid aussi dénommé ;
- le recyclage en centrale à froid ;
- le recyclage en place à chaud ;
- le recyclage en centrale à chaud.

a. Recyclage à chaud en centrale

✓ Taux de recyclage

La technique consiste à malaxer dans un poste à chaud des enrobés de récupération (« recyclats ») avec des granulats vierges et un liant bitumineux anhydre. On distingue :

- le recyclage à faible taux (10 à 25 % de recyclé) ;
- le recyclage à fort taux (30 à 65 %).

Quelques opérations de recyclage à taux encore plus élevé ont été réalisées, à titre d'expérience ou d'exploit, allant même jusqu'à 100 %. Bien entendu, elles ne sont viables qu'avec un stock d'enrobés récupérés très homogène et parfaitement identifié.

Le recyclage à fort taux n'est envisageable que si l'on dispose d'un gisement d'enrobés récupérés homogène et bien identifié. De plus, il n'est possible qu'avec les configurations de postes suivantes

- ✓ postes discontinus :
 - soit équipés d'un sécheur rallongé, avec anneau de recyclage,
 - soit à tambours parallèles ;
- ✓ postes continus :
 - soit équipés d'un anneau de recyclage,
 - soit comprenant un malaxeur à arbres en aval du tambour.

En pratique, le recyclage à fort taux concerne essentiellement des « grands chantiers ». Sur ce type de chantier, bien déterminé, les recyclas sont de provenance unique.

✓ **Études de formulation.**

Le principe de base est que l'enrobé avec recyclât doit satisfaire aux mêmes spécifications que l'enrobé neuf qui aurait été préconisé au même endroit. Les études préalables comprennent toujours les mêmes phases successives : identification des constituants, détermination de la formule, épreuve de formulation.

- caractérisation des granulats naturels,
- caractérisation des recyclats (granularité, teneur et consistance du liant vieilli);
- détermination des % des constituants,
- choix et caractérisation du liant d'apport,
- choix du taux de recyclage ;
- évaluation des performances du mélange prévu, vérification de la conformité à la norme.

1.4.4 Fabrication

Les possibilités de recyclage, et tout particulièrement son taux maximal, dépendent étroitement du type de poste d'enrobage.

a. Recyclage en poste discontinu

Les centrales de ce type voir figure (fig.1.25) comportent schématiquement une batterie de prédoseurs, un tambour sécheur, un élévateur, et un malaxeur à deux arbres à palettes, horizontaux et contrarotatifs. Le recyclage implique de chauffer les recyclats sans brûler leur bitume et de les doser précisément dans le mélange final [35]. Diverses méthodes d'introduction sont utilisées :

- Introduction à partir d'un prédoseur

Les recyclats (minimum 5 %) sont envoyés vers le sécheur avec les granulats neufs. Cette méthode est très peu employée, car, s'il y a récupération de granulats, le vieux bitume est incinéré et donc perdu.



Fig.1.25 : Vue d'ensemble d'un poste à chaud discontinu

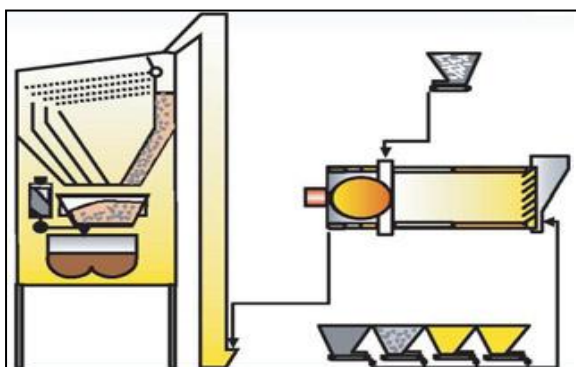
- **Introduction au pied de l'élévateur**

Les recyclats sont ajoutés aux granulats neufs préalablement surchauffés dans le sècheur. Le séchage et le chauffage des enrobés recyclés s'effectuent par conduction dans l'élévateur et il est nécessaire d'allonger le cycle de fabrication.

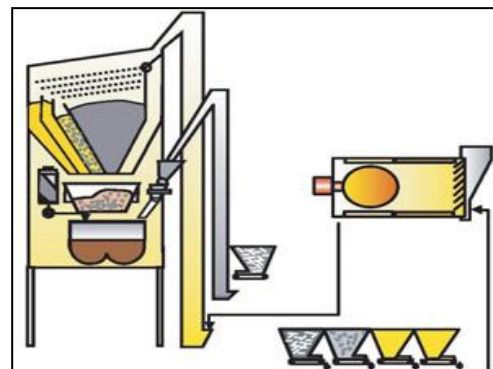
Cette méthode est simple et nécessite peu d'investissement.

Toutefois, la surchauffe des granulats vierges (jusqu'à plus de 200°C) est très consommatrice d'énergie. De plus, cette surchauffe peut dégrader superficiellement certains types de granulats, produisant une quantité non négligeable d'ultrafines. Par ailleurs, son efficacité est vite limitée par l'humidité des recyclats et la vaporisation dans l'élévateur à chaud.

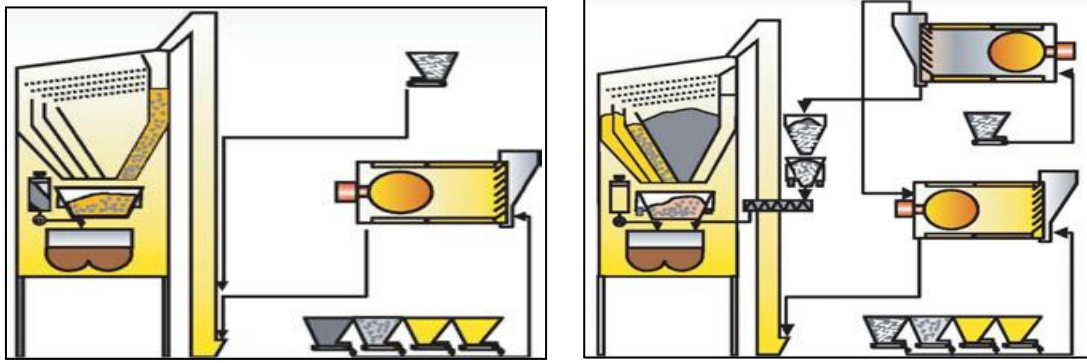
Le taux de recyclage maximum est de 10 % avec des recyclats secs. Il ne peut guère dépasser 5 % s'ils sont humides.



A- au pied de l'élévateur (jusqu'à 10 %)



B- dans le malaxeur (jusqu'à 25 %)



C- dans l'anneau de recyclage (jusqu'à 35 %)

D-dans le double tambour (jusqu'à 75 %)

Fig.1.26 : Les quatre méthodes de recyclage en poste discontinu

- Recyclage dans le tambour

Deux méthodes sont utilisables pour introduire les « agrégats » à recycler :

- par tapis lanceur installé en façade du sécheur ;
- par anneau de recyclage monté sur le sécheur (figure1-27).

Le taux de recyclage maximum dépend du type d'installation.

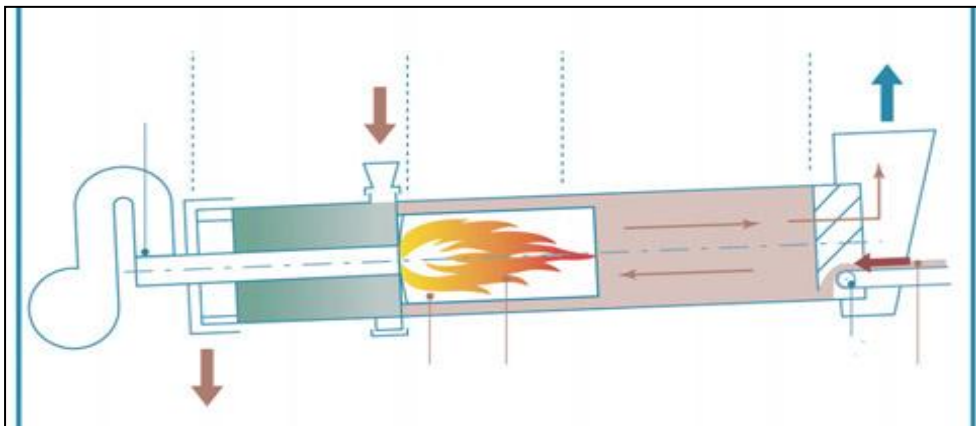


Fig.1.27 : Principe du recyclage dans le tambour d'un poste discontinu

- Recyclage dans le malaxeur

Les « agrégats d'enrobés » à recycler sont introduits par l'intermédiaire d'une trémie peseuse qui débouche directement dans le malaxeur. Cette méthode permet un taux de recyclage allant jusqu'à 10 % avec des recyclats très humides, 20 % avec des recyclats secs. Elle est parfois combinée avec une introduction de recyclats dans le tambour, auquel cas le taux de recyclage total peut atteindre 30 à 75 %, selon l'humidité des recyclés.

- Cas particulier des postes équipés de deux tambours

Quelques centrales fixes sont équipées de deux tambours (figure1.26 d). Les enrobés à recycler sont séchés et préchauffés vers 120°C dans un tambour parallèle. Ils sont stockés dans un silo calorifugé, puis dosés et envoyés dans le malaxeur. Parallèlement, les granulats vierges sont surchauffés dans le

tambour sécheur à contre-courant. Après dosage, ils sont envoyés dans le malaxeur et homogénéisés avec le recyclé et le bitume d'apport [35]. Dans ce type d'installation, le taux maximal de recyclage est de 35 à 40 %, lorsque les recyclats sont très humides. Il atteint 75 % avec des recyclats secs.

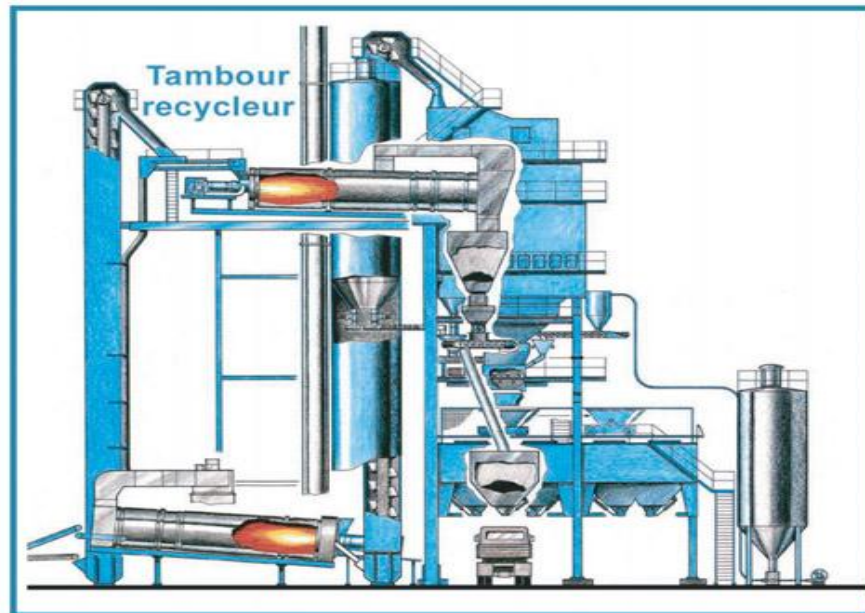


Fig.1.28 : Poste discontinu à tambours parallèles

b. Recyclage en poste continu

Les postes d'enrobage continus modernes sont, en quasi-totalité, de type « Tambour-Sécheur-Enrobeur » (TSE). On distingue deux familles de TSE, selon que le séchage s'effectue en fonctionnement à équicourant ou à contre-courant (figures 1-28).



Fig.1.29 : Poste continu TSE avec anneau de recyclage

c. Recyclage en TSE à éqicourant

Les enrobés à recycler sont introduits dans la partie centrale du tambour par un anneau de recyclage (figure 1-30 a). Les recyclats sont d'abord dosés en continu, puis séchés et chauffés par les gaz chauds issus du brûleur et par les granulats vierges sur chauffés dans la première partie du tube. Les recyclats sont protégés de la flamme du brûleur par l'écran que forment les granulats vierges grâce à la disposition des augets (bassin) situés à l'intérieur du tube. Les Granulats vierges et recyclât sont alors homogénéisés en granulométrie et en température. Le mélange passe ensuite dans la zone de malaxage, où sont injectés le bitume et le filler d'apport. Le taux maximal de recyclage dépend de l'humidité des constituants et du niveau de température visé pour le produit final ; il est de 20 à 30 %.

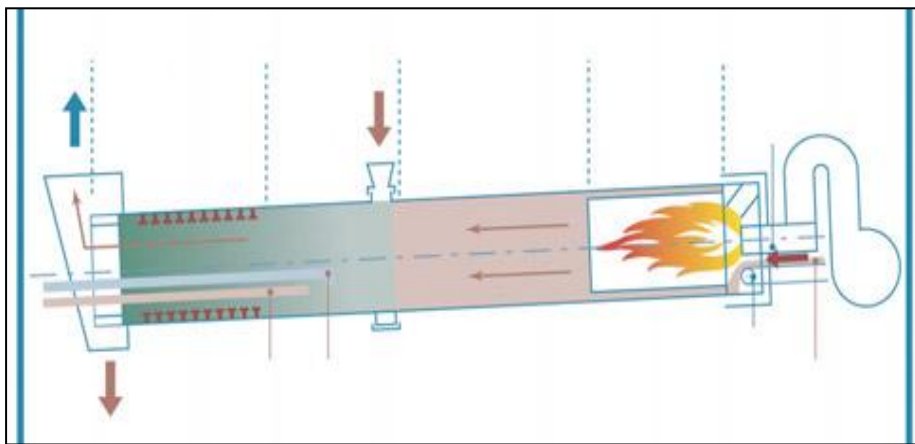


Fig.1.30 : a- Principe du poste continu TSE avec recyclage à éqicourant

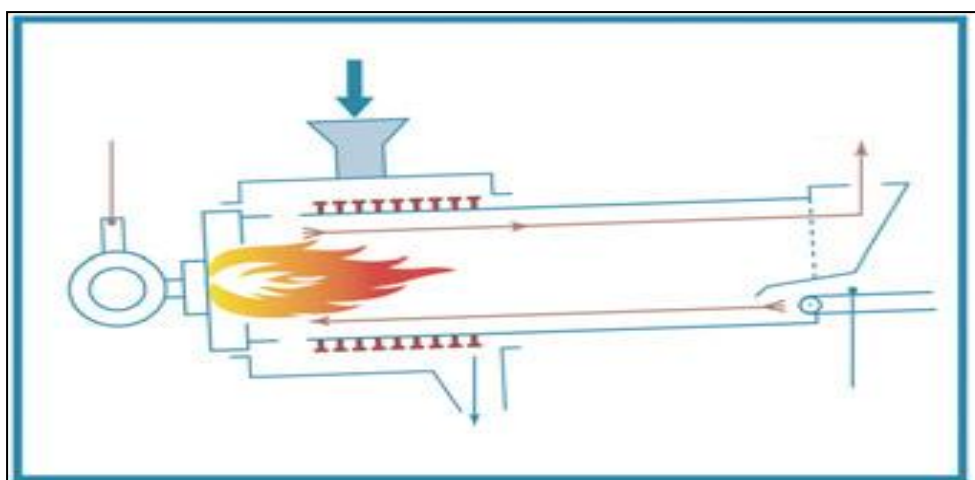


Fig.1.30 : b- Principe du poste continu double tambour à contre-courant

Recyclage en TSE à contre-courant

Les recyclât sont introduits par un anneau de recyclage positionné un peu plus loin que le milieu du tube (figure 1-30 c). Ils sont automatiquement protégés de la flamme du bruleur. Ils sont ensuite mélangés aux granulats vierges préalablement surchauffés dans la partie amont du tambour. Le bitume et le *filler* d'apport arrivent un peu en aval. L'ensemble passe alors dans la zone de malaxage. Le taux maximal de recyclage varie de 30 à 50 % selon l'humidité des recyclât et la température du mélange final. Le poste « à double tambour » est une variante de TSE à contrecourant, répandue, entre autres, aux États-Unis sous l'appellation de «*Double Barrel*». La partie aval est constituée d'un cylindre fixe concentrique dans lequel arrivent les granulats vierges surchauffés et sont introduits les recyclât, le bitume, et le *filler* d'apport. La partie tournante est munie de bras avec palettes, qui effectuent un malaxage énergétique [35].

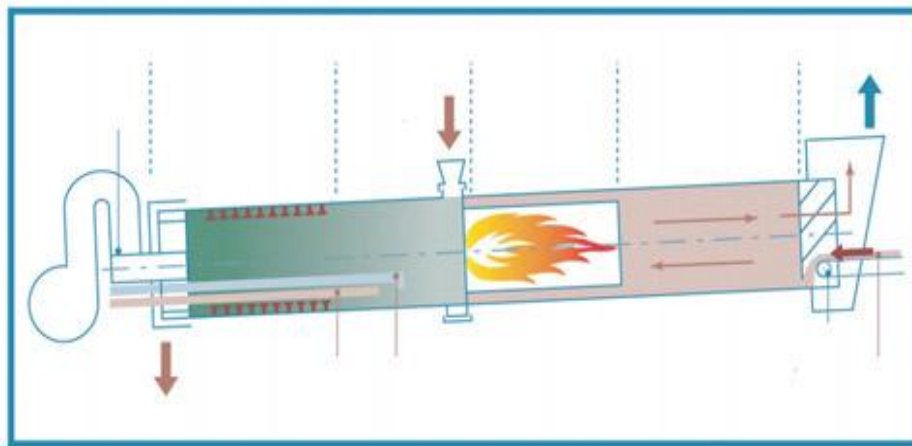


Fig.1.30 : c - Principe du poste continu TSE avec recyclage à contre-courant

1.4.7. Domaines d'emploi et Performances

Les préconisations d'emploi des enrobés contenant des recyclés varient d'un pays à l'autre. Des taux de recyclage plus élevés sont exceptionnellement pratiqués à l'occasion de grandes opérations de réhabilitation, en particulier sur autoroute, voie express, ou piste aéronautique. Elles comportent évidemment une reconnaissance précise du gisement à recycler, une étude de formulation poussée, et la mobilisation de matériels puissants et adaptés. L'incorporation de recyclât dans les formules de béton bitumineux mince (BBM) ou très mince (BBTM) n'est autorisée que pour des cas particuliers, après étude spécifique poussée démontrant, entre autres, la conformité du produit final aux exigences de macro texture et d'adhérence. Le recyclage des bétons bitumineux drainants (BBDR) est tout à fait possible, mais pas en BBDR. Ils sont aisément recyclables dans des formulations de couche d'assise, en particulier d'enrobés à module élevé (EME) compte tenu du durcissement de leur liant. Il convient toutefois d'être attentif à l'adhérence des couches de roulement contenant des recyclés. Outre la double limitation d'emploi en termes d'intensité de trafic

et de taux de recyclage, il faut être très prudent quant à l'emploi de recyclés dans les zones où les besoins d'adhérence sont très forts : zones de freinage, tracés sinueux, environnement humide, etc. Les qualités d'adhérence des granulats contenus dans le recyclât (angularité, micro texture) doivent, dans ces cas, être soigneusement vérifiées avant de décider de leur réemploi éventuel [35].

1.4.8. Recyclage à froid en centrale

Les centrales d'enrobage à froid sont, en Europe comme en Amérique du Nord, nettement moins nombreuses que les postes d'enrobage à chaud. Le recyclage à froid en centrale est donc moins développé que celui à chaud. Le recyclage à froid en centrale s'effectue majoritairement à **l'émulsion de bitume**. Compte tenu de sa relative rusticité, la mousse de bitume est surtout utilisée pour des retraits en place. Les centrales d'enrobage à froid sont, pour la plupart, des matériels faciles à déplacer. Certaines sont très mobiles, les plus simples ne nécessitant que deux semi-remorques pour leur transfert voir figure (fig.1.31). La majorité des recyclages à froid en centrale correspond à des opérations de taille suffisante pour justifier l'amenée d'une centrale tout près du chantier et ainsi minimiser les distances de transport.



Fig.1.31: Centrale d'enrobage à froid ultramobile

1.4.8. Recyclage au liant hydraulique

Il peut paraître paradoxal de recycler des enrobés en les mélangeant avec un liant hydraulique, la logique élémentaire voulant que le bitume qu'ils contiennent soit valorisé en tant que tel. Néanmoins, diverses recherches et études ont montré que ce type de traitement donne des résultats tout à fait intéressants. Ainsi, des formulations de « grave-ciment » constituées de recyclât d'enrobés, avec éventuellement un sable correcteur et ajout de ciment ou de liant hydraulique routier se caractérisent par :

- un module de rigidité très sensiblement moindre (autour de 50 %) que celui d'une grave-ciment classique ;
- une résistance en traction élevée, du même ordre de grandeur que celle d'une grave-ciment ;
- des déformations admissibles bien plus élevées (jusqu'à 4 fois plus) [35].

Les liants bitumineux doivent passer par des modifications pour produire un Liant «idéal» qui devrait avoir des performances requises pour être utilisable dans le projet de construction routière. Les résistances à la déformation permanente, à la rupture et à la fatigue devraient être fortes [36].

1.5. Les polymères

1.5.1. Définition des polymères

Les matériaux polymères, appelés aussi matières plastiques ou simplement plastiques, sont des matériaux organiques composés essentiellement d'atome de carbone et d'hydrogène [37].

1.5.2. Différents types de polymères utilisés pour la modification des enrobés

Pour qu'un polymère soit efficace, il faut qu'il soit compatible avec la matrice bitumineuse. Le polymère doit améliorer la résistance du bitume à des températures élevées sans pour autant le rendre trop visqueux à la température du malaxage ou bien trop rigide à des températures basses. Si ce bitume est appelé à être utilisé dans le mélange bitumineux, il doit être capable de se malaxer dans des équipements conventionnels. Les problèmes majeurs que posent les enrobés modifiés avec des polymères résident dans la mauvaise solubilité de certains polymères dans la matrice bitumineuse qui peut conduire à la séparation des phases. Actuellement, les enrobés sont modifiés surtout avec des caoutchoucs, aussi bien qu'avec des polymères.

b- Caoutchoucs naturels et synthétiques

Le caoutchouc naturel est susceptible à la décomposition et à l'oxydation. Il possède un poids molaire trop élevé pour être directement dissous dans le bitume. Le caoutchouc naturel doit être partiellement décomposé et mécaniquement homogénéisé. Les caoutchoucs naturels et synthétiques sont mieux dispersés sous forme de latex. Généralement, les caoutchoucs synthétiques fabriqués à partir des polydioléfinés sont plus faciles à incorporer dans les matrices bitumineuses et confèrent des caractéristiques d'élasticité d'une manière plus évidente que les matériaux thermoplastiques. le caoutchouc peut être directement utilisé dans un état vulcanisé sous forme de poudrette et pour bien le disperser dans la matrice bitumineuse.

1.5.3. Propriétés macroscopiques des polymères

Les propriétés macroscopiques des polymères sont essentiellement dues à l'état physique c'est-à-dire à la structure et aux liaisons intermoléculaires qui les constitue.

a- Structure à l'état solide

L'état physique des polymères dépend des interactions de type Van Der Waals (dipôle/dipôle) entre les macromolécules. Elles s'établissent surtout lorsque les macromolécules peuvent se rapprocher. Lorsque le polymère est branché, les ramifications empêchent une trop grande approche des molécules et les liaisons intermoléculaires restent faibles. Cela se traduit par une structure totalement désordonnée, analogue à celle du verre. Cette structure est dite amorphe (ou vitreuse). Le polymère est alors dur et cassant.

c -Propriétés thermiques

Les polymères sont dérivés de polymères linéaires ou légèrement ramifiés, lorsqu'ils sont chauffés, les chaînes moléculaires s'écoulent les unes sur les autres conduisant à un ramollissement et transformation en liquides plus ou moins visqueux. Par refroidissement, le matériau se solidifie en prenant une nouvelle forme. Le processus de ramollissement par chauffage et de durcissement par refroidissement peut être répété un nombre indéfini de fois. La plage de travail d'un polymère dit domaine de températures, où les chaînes sont mobiles permettant le moulage, est généralement comprise dans l'intervalle 100–250°C. On note que la température de fusion pour les divers polymères et corps plastiques est située entre 125 et 325 °C.

d -Propriétés mécanique

Les propriétés mécaniques décrivent leur comportement vis à vis des sollicitations mécaniques telles que pression, étirements, torsion, frottement, chocs et effets de la pesanteur. Certains polymères seront appréciés pour leur bonne stabilité dimensionnelle (par exemple les polyesters aromatiques). D'autres, les élastomères, seront recherchés pour leur élasticité qui leur confère une excellente capacité d'absorption des chocs, à cet effet, ils sont employés dans les pneus, les semelles de chaussures, les matelas, les fibres...

Le succès des polymères provient en partie de la facilité avec laquelle on peut leur donner des formes voulues (d'autant plus à l'état fondu). Ils sont très malléables, très plastiques, d'où leur nom. En fait, cette plasticité varie dans une large gamme, des plus rigides, durs et cassants, aux plus mous (pâtes) ou élastiques (élastomères).



Fig.1.32 : schéma de cycle de préparation de la poudre de caoutchouc

CHAPITRE II

EXPOSÉ DE LA MÉTHODE DES PLANS D'EXPÉRIENCES

2.1. Introduction

La méthodologie des plans d'expériences a pour but de planifier une recherche expérimentale appelée Plans d'expériences. L'expérimentation ne peut pas être quelconque : elle doit fournir l'information désirée. Cette démarche expérimentale va aider l'expérimentateur à structurer sa recherche de manière différente, à valider ses propres hypothèses, à mieux comprendre les phénomènes étudiés et à solutionner les problèmes. Le succès de cette méthodologie est pour changer la manière de faire des expérimentations [41]. Il faut ajouter les techniques d'aide à la formulation d'un problème qui mettent en évidence l'importance éminente de l'étape de réflexion qui devrait précéder toute expérimentation. Cette technique se compose en trois grandes parties [42] comme exposé sur la figure (fig.2-1).

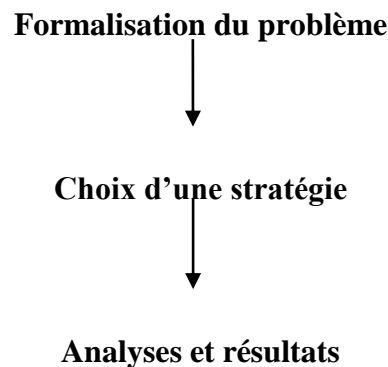


Fig. 2.1 : Les étapes d'un plan d'expérience

2.2. But des plans d'expérience

Les progrès des sciences et de la technologie sont liés aux réponses que l'homme a pu apporter aux interrogations que lui pose régulièrement la nature. Ces réponses résultent le plus souvent d'une analyse des observations expérimentales obtenues par une approche méthodologique rigoureuse [43]. Nous pouvons donc dire que, sans expérimentation physique ou numérique, il n'y a pas de solution. L'expérimentation est donc un des moyens privilégiés pour acquérir ou améliorer les connaissances. Mais, elle doit être optimisée car l'objectif est d'obtenir des informations les plus fiables possibles en un minimum d'essais.

2.2.1. Méthode Traditionnelle des Essais

Traditionnellement, les essais sont effectués de manière séquentielle en faisant varier les facteurs d'entrée du système étudié l'un après l'autre sans planification préalable de

l'ensemble des essais à réaliser. Il en résulte que la décision d'arrêter ou de continuer les essais, repose essentiellement sur des résultats obtenus pas à pas. L'expérimentateur tente un premier essai, en tire des conclusions qui vont induire un deuxième essai, et ainsi de suite, en faisant souvent varier un seul facteur à la fois entre deux essais consécutifs. L'interprétation des résultats de Cette méthode traditionnelle, appelée essais - erreurs, se fait pas à pas, en comparant le résultat de l'essai effectué avec un résultat précédent, afin d'en déduire l'effet sur la réponse du paramètre dont le niveau vient d'être modifié [44].

Cependant, compte tenu de la très grande difficulté des phénomènes mis en jeu dans certains procédés, le développement par une méthode essais - erreurs est parfois impossible.

Donc il est très utile d'utiliser les outils de connaissance scientifique structurés sous forme de modélisation multidimensionnelle. Dans ce cas, la méthode s'appuie sur l'expérimentation. Mais, on ne laisse pas le hasard choisir les expériences. Nous verrons par la suite, que ces outils permettent de fabriquer de l'expérience et d'en tirer de manière claire et simple de l'information [45].

2.2.2. Méthodologie des Plans d'expériences

La méthode des plans d'expériences est à la fois nouvelle et ancienne [45]. Nouvelle pour l'ingénierie, qui traditionnellement, est portée par des sciences exactes. On prend conscience aujourd'hui que loin de nier la connaissance technique, la méthode des plans d'expériences la valorise. Initialement développés et mis en pratique par le mathématicien britannique Sir Ronald Fisher [46-47], au début des années 30, les plans d'expériences ont servi à quantifier l'effet des facteurs contrôlés par l'expérimentateur dans un contexte soumis à de nombreuses sources d'hétérogénéité. Après 1945, les plans d'expériences suscitent de nombreuses publications et recherches. Des statisticiens comme Yates, Cochran, Plackett et Burmann, enrichissent et exposent la méthode [45], développent des méthodes particulières de construction de plans d'expériences fractionnaires à deux niveaux. Ils s'intéressent à l'étude des facteurs quantitatifs et introduisent, les modèles de surface de réponses associés à des plans comme des plans composites centrés [4].

Taguchi et Masuyama élaborent des tables permettant de construire des plans d'expériences adaptés à la majorité des problèmes industriels [48] [49]. Le mérite de Taguchi est d'avoir contribué à une méthodologie facile à appliquer. Initialement

difficiles d'accès, ces méthodes se laissent adapter, répandre pour conquérir un cercle d'utilisateurs de plus en plus large. Elles trouvent donc une nouvelle jeunesse en encourageant le travail de groupe et la réflexion préalable avant l'action [49].

Les applications des plans d'expériences ont tendance actuellement à se diversifier ; on voit donc l'émergence de nouveaux plans. Leur diffusion à grande échelle dans les entreprises, leur enseignement et leurs applications dans les universités en sont encore à leurs débuts. L'effort amené par Taguchi se poursuit et des logiciels de plus en plus conviviaux destinés à la construction et à l'analyse de plans d'expériences se développent.

2.3. Différents modelé des plans d'expériences

2.3.1. Plans factoriels complets

Un plan factoriel complet est un plan pour lequel toutes les combinaisons possibles aux limites du domaine d'étude auront été réalisées : c'est le nombre maximal d'essais pour un plan d'expériences factoriel. Le nombre d'essais N se calcule d'après la formule suivante : $N = 2^k$ où k est le nombre de facteurs.

2.3.2. Plan Taguchi

La méthodologie Taguchi de mise en œuvre des plans d'expériences est l'un des outils de la qualité, au même titre que l'Analyse des Modes de défaillance et l'Étude des Criticités ou l'Analyse de la Valeur. Comme tout outil, elle n'a d'intérêt que si l'on sait s'en servir, ce qui suppose à la fois de connaître la méthode et de pouvoir cerner les cas où elle apporte un "plus" par rapport aux techniques traditionnelles.

2.3.3. Les Plans des Surfaces de Réponse

Les plans du second degré ou plans pour surfaces de réponse permettent d'établir des modèles mathématiques du second degré. Ils sont utilisés pour les variables continues. Pour deux facteurs. Ces plans sont utiles à chaque fois que l'on se trouve près d'un maximum ou d'un minimum.

2.3.4. Les plans de Box-Behnken

Les points expérimentaux sont au milieu des arêtes de chacun des côtés du cube. Ce plan comporte douze essais auxquels on peut ajouter un (ou plusieurs) point central. Les plans de Box-Behnken répondent à un critère d'optimisation particulier :

l'erreur de prévision des réponses est la même pour tous les points d'une sphère centrée à l'origine du domaine expérimental.

2.3.5. Les plans de mélanges

Les facteurs d'étude des plans de mélanges sont les proportions des constituants du mélange . Or, ces constituants ne sont pas indépendants les uns des autres. La somme des proportions d'un mélange est toujours égale à 100%. Le pourcentage du dernier constituant est imposé par la somme des pourcentages des premiers composés. C'est la raison pour laquelle les plans de mélanges sont traités à part.

2.3.6. Les plans hybrides

Les plans hybrides ont été mis au point par Roquemore [45]. Leur objectif est d'essayer d'approcher deux critères d'optimalité, celui d'orthogonalité et celui d'isovariance par rotation. L'orthogonalité garantie la meilleure précision possible sur les coefficients du modèle et l'isovariance par rotation conduit à des erreurs de prévisions identiques à une même distance du centre du domaine. Si l'expérimentateur recherche ces deux propriétés, il doit penser à utiliser un plan hybride.

2.4. Les éléments d'un plan d'expérience

Le scientifique est souvent amené à comprendre comment réagit un système en fonction des facteurs susceptibles de le modifier. Pour visualiser cette évolution, il mesure une réponse et va ensuite essayer d'établir des relations de cause à effet entre les réponses et les facteurs. Parmi les facteurs on distinguera:

- ✓ les facteurs contrôlables qui dépendent directement du choix du technicien (pression, température, matériau ...)
- ✓ les facteurs non contrôlables qui varient indépendamment du choix du technicien (conditions climatiques, environnement d'utilisation...)
- ✓ les facteurs d'entrée dont on cherche à analyser une influence (matière première, vitesse d'agitation, température, rendement ...)

Les facteurs étudiés dans un plan d'expériences sont bien entendu les facteurs d'entrée. Un facteur est une grandeur le plus souvent mesurable mais il peut s'agir d'une grandeur qualitative comme les différents lots d'une matière première.

La réponse est la grandeur mesurée à chaque essai; le plan vise à déterminer quels facteurs l'influencent ou quelle est son évolution en fonction de ceux-ci. Cette grandeur est le plus souvent mesurable mais elle peut également être qualitative. Dans ce cas ce

peut être par exemple une appréciation visuelle sur l'état d'une surface ou une appréciation bonne, moyenne ou mauvaise sur un produit alimentaire. Une notion importante est celle d'interaction entre deux facteurs d'entrée. On parle d'interaction entre deux facteurs A et B quand l'effet du facteur A sur la réponse va dépendre de la valeur du facteur B. La figure (fig.2.2) illustre les éléments d'un plan d'expériences.

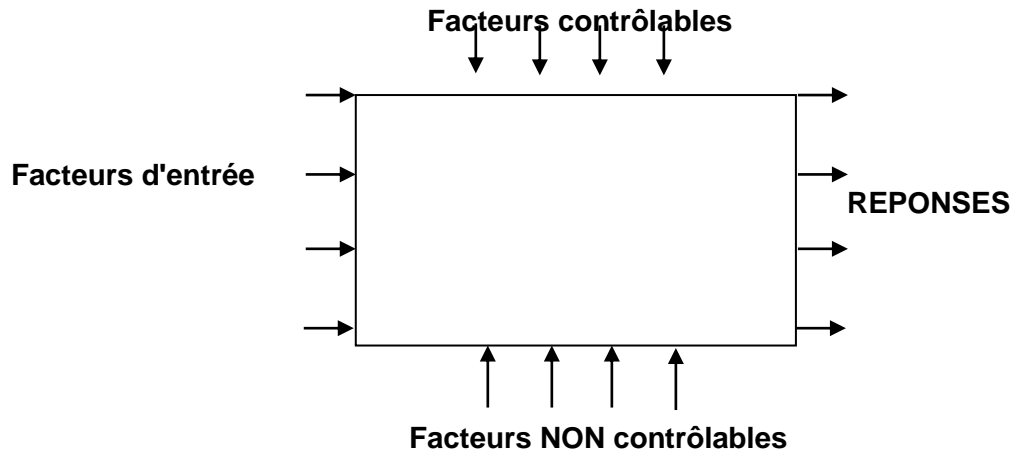


Fig. 2.2 : Les éléments d'un plan d'expérience

2.5. Les étapes d'un plan d'expériences

2.5.1. Première étape

✓ Détermination de la réponse et des facteurs d'étude

L'étude doit avant tout avoir un but précis, minimiser un coût de fabrication, chercher les paramètres influant la réponse, il est important de rassembler tous les données qui peuvent fournir une information essentielle pour les questions suivantes :

- choix de la réponse la plus judicieuse ;
- moyens de mesure adaptés ;
- facteurs potentiellement influents ;
- choix du domaine d'étude de ces facteurs ;
- éventuelles interactions à rechercher ;
- contrôle des facteurs non étudiés.

La connaissance du sujet acquise auparavant par le chercheur peut rendre de grands services à cette étape. Le résultat final peut avoir des conséquences catastrophiques pour le chercheur, si un facteur oublié se trouve être un facteur d'influence. Une difficulté

importante est la détermination du domaine d'étude. Le domaine de variation des facteurs doit permettre de couvrir le domaine réel d'utilisation des facteurs... mais pas plus.

✓ **Choix d'un modèle**

Les plans d'expériences dits factoriels utilisent tous le modèle mathématique suivant qui relie la réponse y aux facteurs $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$. Ce modèle théorique est postulé à priori. Il s'agit d'un modèle polynomial. Où $a_0, a_1 \dots$ sont les coefficients du polynôme.

Les termes produits de type par exemple $a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j$ correspondent aux interactions. Pour un plan factoriel à 3 facteurs x_1, x_2 et x_3 , on obtient l'équation (Eq.2.1) :

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + a_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + a_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + a_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + a_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (\text{Eq.2.1})$$

✓ **Choix des expériences à réaliser**

La méthode des plans d'expérience peut être sommairement comparée à la méthodologie traditionnelle dite de "variation facteur par facteur" Pour étudier l'influence de deux facteurs sur une réponse, on peut adopter deux stratégies expérimentales pour la conception des essais.

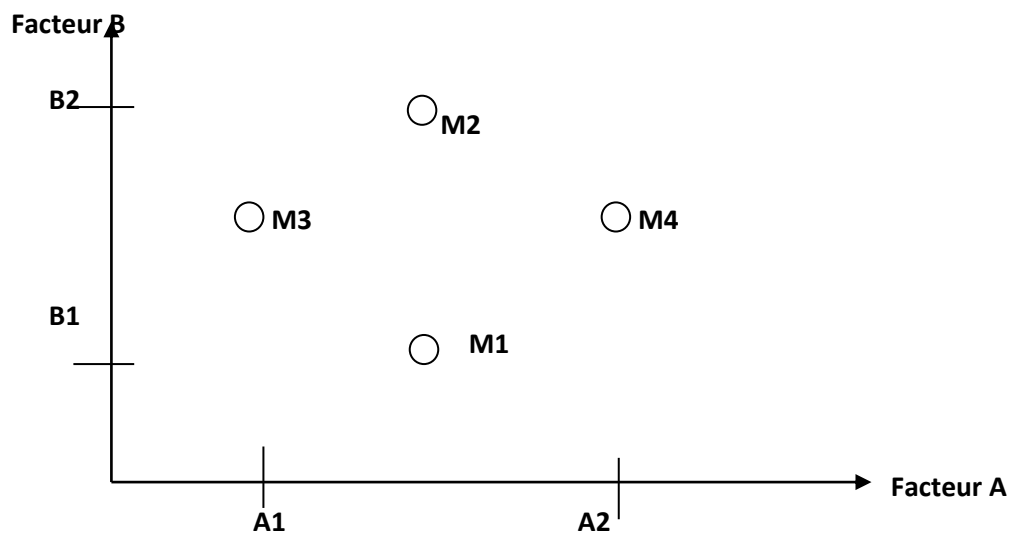


Fig. 2.3 : La méthode traditionnelle

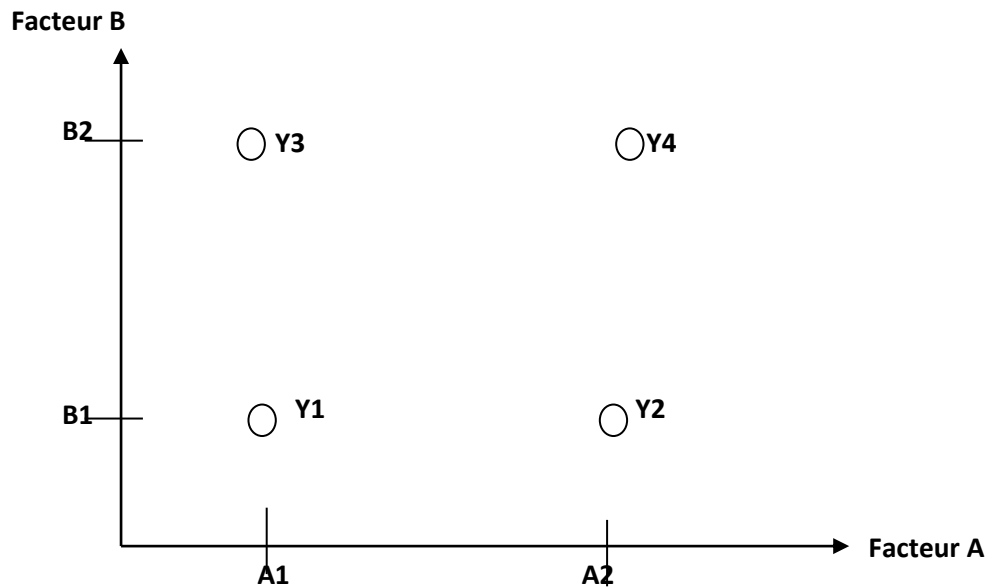


Fig. 2.4 : La méthode des plans d'expériences

Selon la méthode traditionnelle, on bloque le facteur A au centre du domaine de variation et on fait varier le facteur B aux deux extrémités de son domaine: on obtient les mesures M1 et M2. Avec le facteur A on réalise la même opération pour obtenir les points M3 et M4. Dans cette méthode, l'effet de B sera mesuré à partir des mesures M1 et M2 et celui de A à partir des mesures M3 et M4. Donc pour chaque facteur la moitié des mesures seulement est utilisée pour rendre compte d'un effet. La méthode des plans d'expériences consistera à réaliser 4 essais aux extrémités du domaine expérimental. L'effet de A apparaît comme la différence entre la moyenne $(Y2+Y4)/2$ et la moyenne $(Y1+Y3)/2$. Le même raisonnement s'applique pour l'effet de B. Dans cette deuxième stratégie toutes les mesures sont utilisées pour le calcul d'un effet. On comprend donc que la précision obtenue sera supérieure avec la méthode de plans d'expériences. Un autre avantage de la méthode des plans réside dans un nombre beaucoup plus faible d'expériences à réaliser que dans la méthode traditionnelle quand le nombre de facteurs augmente. Il reste néanmoins à connaître la méthode générale pour trouver les bonnes expériences à réaliser. La méthode dépend du modèle mathématique choisi.

✓ Réalisation des essais

Un soin tout particulier doit être apporté à l'exécution des essais. Si on ne réalise pas personnellement les essais, il faut notamment vérifier que les facteurs contrôlables soient bien fixés à des valeurs précises. De même si un des facteurs étudiés est un composé

chimique, il est bien sûr préférable de ne pas avoir à changer de lot de matière première durant l'ensemble de l'expérimentation.

2.5.2. Deuxième étape

✓ Codification des Variables

L'utilisation des variables centrées réduites présente l'intérêt de pouvoir généraliser la théorie des plans d'expériences quels que soient les facteurs ou les domaines d'études retenus. Remplacer les variables naturelles par les variables codées va permettre d'avoir pour chaque facteur le même domaine de variation (entre -1 et +1) et de pouvoir ainsi comparer entre eux l'effet des facteurs.

Le niveau bas est ainsi codé - 1 alors que le niveau haut est codé + 1. L'application suivante illustre le passage de la variable naturelle à la variable codée. On choisit d'abord pour un facteur son domaine d'étude. Par exemple la température va varier de 10° à 40°C. Les degrés 10° et 40°C correspondent respectivement aux niveaux bas et haut du facteur.

On affecte la valeur -1 à 10°C et la valeur +1 à 40°C. On note ici t la variable codée et T la variable naturelle. On peut les lier par la relation suivante où T_0 est le milieu de l'intervalle du domaine d'étude et ΔT la moitié de la largeur du domaine d'étude, T_0 et ΔT étant exprimé en variable naturelle. Ici $T_0 = 25^\circ\text{C}$ et $\Delta T = 15^\circ\text{C}$.

$$t = \frac{T-T_0}{\Delta T} \quad (\text{Eq.2.2})$$

Les variables centrées réduites sont sans dimension. Une température de 20°C correspond à une variable centrée réduite de -0,33.

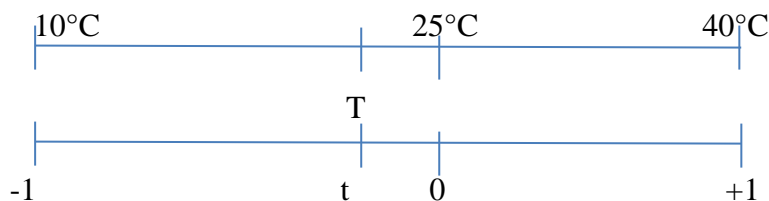


Fig. 2.5 : La méthode de codification d'un plan d'expérience

✓ Interprétation des résultats des essais

Comme première approche, le plan d'expérience peut être conçu comme un moyen de savoir quels sont les facteurs ou les interactions ayant une influence statistiquement significative sur la réponse étudiée. L'exploitation des résultats expérimentaux est souvent assez rapide surtout avec un logiciel. Le principe de l'exploitation est simple : il consiste à

calculer les coefficients du modèle polynomial ; plus la valeur absolue du coefficient est élevée, plus le terme correspondant (facteur simple ou interaction) sera influent sur la réponse étudiée. La difficulté est plutôt de pouvoir distinguer une véritable influence et le rôle de l'incertitude entachant inévitablement toute mesure. En conclusion de l'étude on fournit la liste des facteurs influents la plupart du temps l'expression du modèle en ne retenant que les coefficients jugés statistiquement significatifs.

Il est bon de signaler que le modèle obtenu ne peut être utilisé qu'à l'intérieur du domaine d'étude (d'où l'utilité d'une étude préalable correcte: toute extrapolation est très risquée, car elle pourrait apporter des résultats bien différents de ceux attendus. On ne signalera jamais assez que le modèle fourni n'a pas de signification physique et ne saurait être assimilé à une loi physique.

Une dernière étape obligatoire avant l'utilisation du modèle en production sera de tester par une expérience au centre du domaine expérimental si la valeur prédite par le modèle est proche de la valeur expérimentale. En effet les modèles de plans d'expériences factoriels étudiés ne prennent pas en compte une "courbure" possible au centre du domaine mais considèrent uniquement un comportement linéaire. Si la vérification n'est pas concluante il importe d'envisager des modèles plus compliqués (modèles avec termes du second degré).

✓ **Application simple de calcul des coefficients [46]**

Une application simple est fournie par le plan d'expériences suivant où les calculs peuvent s'effectuer manuellement. On examine l'influence de la pression et de la température (deux facteurs) sur le rendement y d'une réaction chimique (réponse). Le modèle choisi à priori est le suivant :

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (\text{Eq.2.3})$$

où x_1 et x_2 représentent respectivement les variables codées représentatives des facteurs pression et température.

Le choix des expériences réalisées sera explicité par la suite. On utilise un tableau nommé matrice d'expériences pour récapituler l'ensemble des essais.

Elle comprend plusieurs colonnes; la première identifie les essais, les suivantes indiquent les états des facteurs exprimés en "unités codés", chaque colonne étant représentative d'un

facteur. La dernière colonne indique les réponses obtenues pour chaque essai. Les lignes inférieures rappellent les valeurs des niveaux en unités naturelles.

À partir du modèle, on peut écrire les 4 relations suivantes en remplaçant les variables x_1 et x_2 par leurs valeurs dans chaque expérience.

Tableau .2.1 : Le codage des facteurs

N° essai	Pression	Température	Rendement
1	-1	-1	60
2	1	-1	78
3	-1	1	63
4	1	1	89
niveau - 1	2 bars	50 °C	
niveau + 1	4 bars	70 °C	

✓ **Analyse Statistique des Résultats**

Toutes les hypothèses que nous avons vue sur les plans d'expérimentation doivent être vérifiées pour pouvoir valider ensuite les conclusions. Dans cette étape nous utilisons les outils statistiques. On peut estimer la qualité descriptive et prédictive des modèles obtenus. Dans tous les cas, l'utilisateur des tests statistiques est étroitement lié à la connaissance de l'écart type expérimental R^2 . Le coefficient R^2 est aussi appelé coefficient de détermination. Plus R^2 sera grand, le modèle sera meilleur (les réponses calculées seront fortement corrélées avec les réponses expérimentales), estimé par des essais de répétabilité.

Les valeurs expérimentales introduites dans le modèle sont entachées d'erreurs (somme d'erreurs systématiques et aléatoires) qui se transmettent aux coefficients b_j du modèle puis aux valeurs calculées. Des tests statistiques permettent d'évaluer la qualité du modèle (descriptive et prédictive), sa validation (Analyse de la variance) et la significativité des coefficients (test de Student).

✓ **Intervalle de confiance des coefficients**

Le but d'étudié la variance d'un coefficient et pour connaitre son intervalle de confiance.

Dans un plan factoriel complet ou fractionnaire de N essais, les réponses Y_i et les coefficients a_i sont des valeurs de variables aléatoires. On a vu que tout coefficient a_i du modèle se calcule par une formule du type:

$$a_i = [\sum_{j=1}^N \bar{y}_i] / N \quad \text{Donc } var(a_i) = [\sum_{j=1}^N var(y_i)] / N \quad (\text{Eq.2.4})$$

On introduit alors σ^2 (variance connue des mesures) ou s^2 (variance estimée des mesures). σ ou s sont des écarts-types expérimentaux Dans le cas où on dispose d'une connaissance importante sur le domaine étudié et où on peut donc se baser sur les résultats tirés d'un "historique", on utilisera σ .

Dans le calcul suivant on suppose que l'écart-type est inconnu a priori ; pour déterminer s on utilisera souvent l'une des méthodes suivantes : réalisation de plusieurs points au centre du domaine d'étude ou réalisation de plusieurs fois la totalité du plan d'expériences.

✓ **Analyse Graphique des Résultats**

Un des grands avantages des plans d'expériences est la présentation des résultats sous forme graphique comme elle le montre les figures Fig 2.6 et Fig 2.7.

Les graphiques sont avant tout un outil d'aide à l'interprétation des résultats mais, ils permettent également de manière plus communicative lors d'une réunion de tirer plus rapidement des conclusions et ainsi d'orienter la poursuite d'une étude.

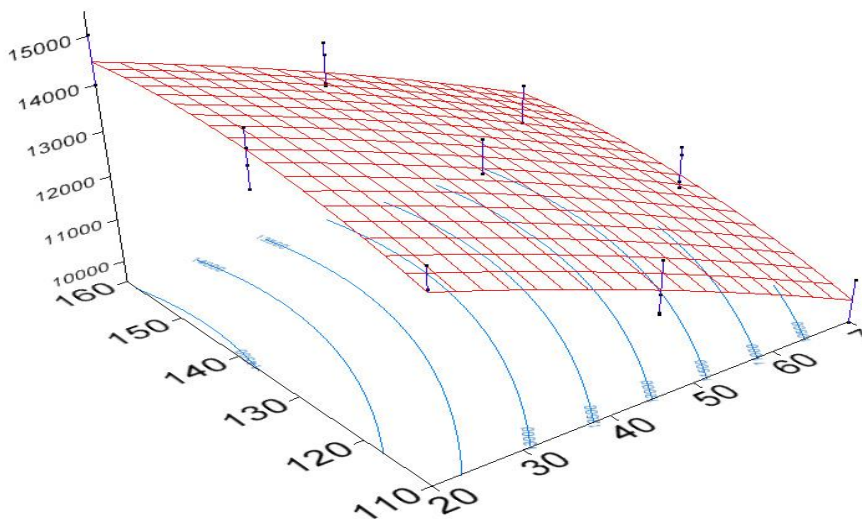


Fig. 2.6 : Représentation des résultats d'un plan d'expérience en surface de réponse

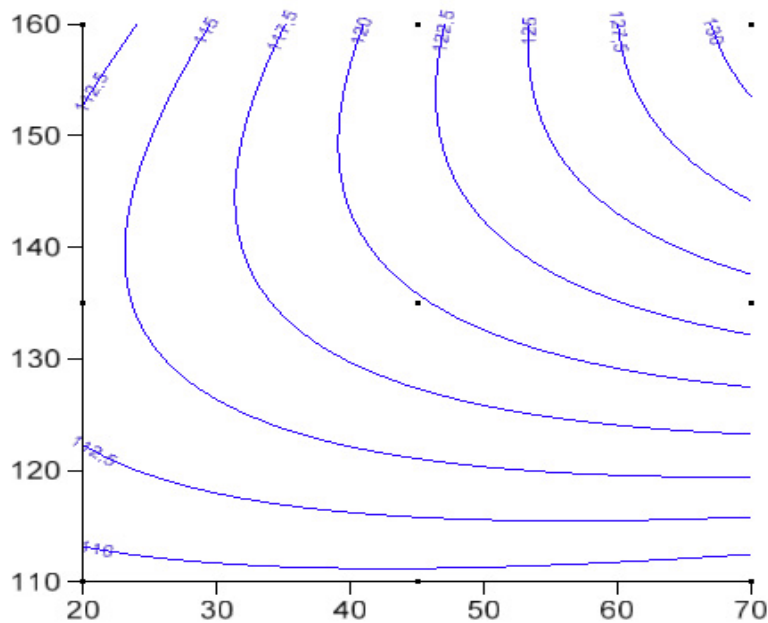


Fig. 2.7 : Représentation des résultats d'un plan d'expérience en iso-réponse

Conclusion

Le gain de temps, de coût et de main d'œuvre fait de la méthodologie des plans d'expérience un outil incontestablement efficace pour mettre en œuvre des expériences.

Nous avons vu à travers cette partie, les différentes articulations méthodologiques des plans d'expériences.

La méthodologie des plans d'expériences ne nous donne pas d'informations sur les corrélations des réponses entre elles. Mais, chaque plan d'expériences générant des données, il sera donc possible d'utiliser ensuite des méthodes d'analyses multidimensionnelles des données.

L'optimisation est un objectif de toutes études qualitatives ou quantitatives, et la méthode des plans d'expérience sert à résoudre cette exigence scientifique.

CHAPITRE III
ETUDE EXPÉRIMENTALE

3.1. Introduction

Ce chapitre regroupe les résultats des essais qui ont été effectués sur les enrobés recyclés dans le but de la possibilité de formuler un enrobé à base d'agrégats d'enrobé et poudrette des caoutchoucs possédant une grande performance mécanique. Cette campagne comporte deux phases : la première est de formuler un enrobé sain pour l'utiliser comme une référence dans les prochaines études. Dans la deuxième phase deux types d'enrobés recyclés ont été formulés, le premier avec l'ajout des différents pourcentages d'agrégats d'enrobé et le deuxième l'enrobé recyclé contient des pourcentages différents de la poudrette du caoutchouc.

Tous ces mélanges ont été l'objet des essais de Marshal et Duriez. La température de fabrication a été fixée à 120° et 160° pour tous les mélanges (avec agrégats d'enrobé ou poudrette des caoutchoucs) afin d'assurer une bonne remobilisation des liants vieillis ainsi que la transformation de la poudrette des caoutchoucs en un liant. Le temps de malaxage aussi est fixé à 5 min (le temps nécessaire pour que le mélange prend la forme d'homogénéité et le liant modifié prend les caractéristiques d'un liant neuf).

3.2. Le béton bitumineux semi grenus (BBSG)

La couche de roulement est la couche supérieure d'une chaussée. C'est elle qui est en contact direct avec les pneus des véhicules. Elle doit donc offrir des conditions convenables de sécurité et de confort compatibles avec la classe et le niveau de service de l'itinéraire considéré. La couche de roulement subit des actions qui lui sont directement appliquées par des agents extérieurs tels que la météorologie, les pneus. Elle représente donc le but ultime de la technique routière en matière de chaussée, donc elle doit jouer son rôle convenablement.

De nos jours la plupart des revêtements sont en enduits superficiels ou en enrobés (enrobés denses, bétons bitumineux). L'enrobé le plus rencontré dans la chaussée Algérienne est de type béton bitumineux semi grenus (BBSG), il est de granulométrie 0/14 et il est utilisé comme couches de roulement et de liaisons de la Chaussées, cet enrobé devra être conforme à la norme NF P 98-130. L'épaisseur moyenne d'application du BBSG 0/14 est de 6 à 8 cm. La classe de bitume pur conseillée pour le BBSG utilisé est 35/50 pour un niveau de sollicitation fort et une altitude inférieure à 500 m. La zone relative par cette étude est la région Est de l'Algérie donc la classe 35/50 est la plus accordée.

3.3. Matériaux utilisés

3.3.1. Choix des agrégats neuf

Compte tenu de leur position à la surface de la chaussée, au contact direct des pneumatiques et des intempéries, toutes les qualités mécaniques du granulat entrent en ligne de compte. Ces qualités sont de deux ordres :

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

La dureté est définie par les essais Los Angeles et Micro-Deval humide. La résistance au polissage est définie par un essai normalisé de polissage accéléré. Donc le choix des agrégats est un passage très importants dans la formulation des enrobés. L'analyse consiste à préparer des échantillons, et les analysés à la base de la norme NF EN 932-3.

3.3.2. Identification des échantillons neuf

Cette identification a pour but de vérifier que les granulats proposés sont conformes aux recommandations de la norme NF EN 932-3, pour ce qui concerne leur granularité, dureté et propreté. Les résultats des essais sont regroupés dans le tableau 3.1. Les granulats utilisés sont les fractions 0/3, 3/8, et 8/14. La provenance des agrégats de cette étude est la roche de Maouna (région Gualmoise) à l'Est de l'Algérie, cette région est connue par la dureté de ses roches et les résultats des essais granulométriques sont présentés aux figures (fig.3.1.a, fig.3.1.b et fig. 3.1.c).

Tableau 3.1 : les caractéristiques physique des agrégats sains

Essais Granulats	0/3	3/8	8/14	Spécifications
Poids spécifique (g/cm)	2.85	2.90	2.90	---
Los Angeles	-	22	21	<22
Micro- Deval	-	19	19	≤ 20
Coefficient d'aplatissement (%)	-	25	16	≤25
Équivalent de Sable ES (%)	80			50≤

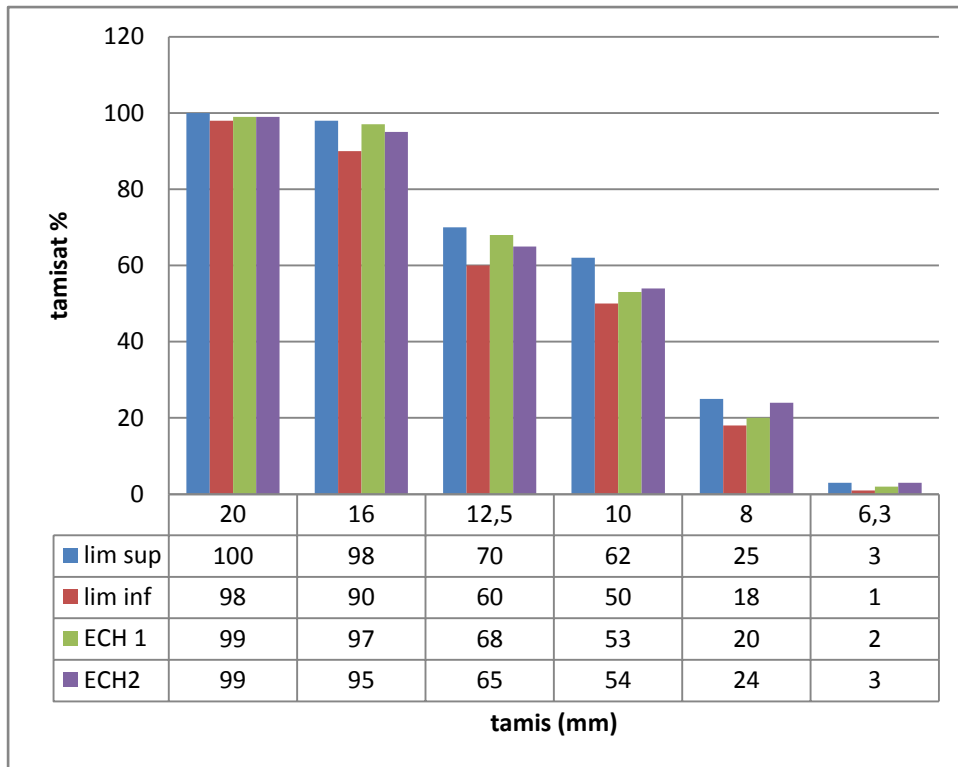


Fig.3.1.a : Analyse granulométrique 8/14

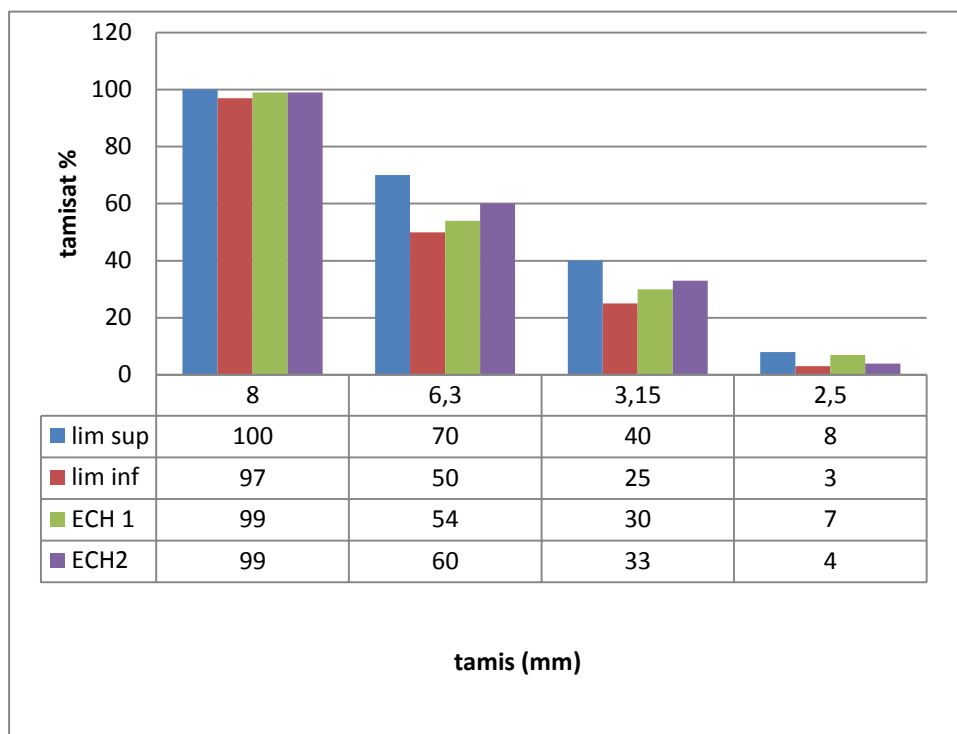


Fig.3.1.b : Analyse granulométrique 3/8

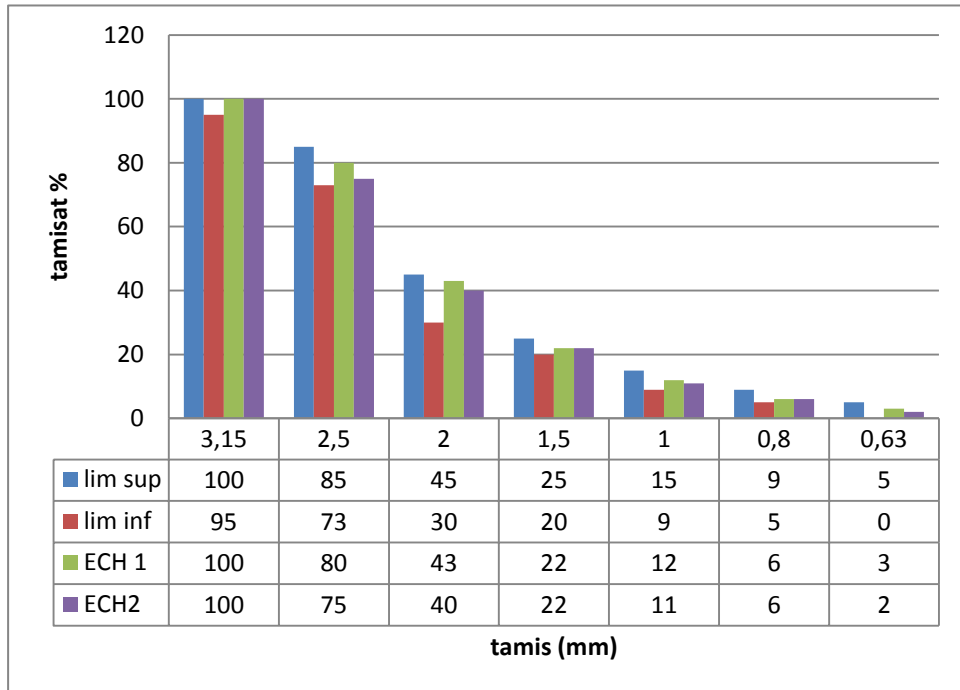


Fig.3.1.c : Analyse granulométrique 0/3

3.3.3. Nettoyage des granulats

Le nettoyage de l'échantillon granulaire a été réalisé au jet d'eau, dans un tamis de 3 mm comme présenté sur la figure (fig.3.2). Cette étape permet l'élimination des fines résiduelles qui pourraient fausser les tests ultérieurs et facilite la reconnaissance de la pétrographie dans les cas de granulats sales ou poussiéreux.

Les granulats humides doivent être ensuite séchés dans une étuve à 100°C. À partir de cette étape, les échantillons doivent être identifiés dans leur bac de séchage pour éviter toute confusion. Après s'être assuré que l'eau présente au fond des contenants soit évaporée et que les granulats sont superficiellement secs, les granulats doivent être mis à température ambiante pour permettre leur refroidissement avant la poursuite de l'analyse.



Fig.3.2 : Moyen de nettoyage des agrégats 8/14 et 3/8

3.3.4. Essais chimique

Ces essai consistent à déterminer les matières agressives enrobant les agrégats utiliser, l'existence de cette dernière provoque une dégradation des enrobés ce qui va dévier notre interprétation des résultats. Ces essais montrent que le pourcentage de la matière aggressive dans le corps des agrégats composant le mélange sain des enrobés est presque nul comme le montre le tableau.3.2.

Tableau 3.2 : Résultats de l'analyse chimique des agrégats sain

Fraction	0/3	3/8 et 8/14
Insolubles	2.5	5.6
Sulfate $SaSO_4$	1.1	1.0
Carbonates	5	9
Chlorures Cl^+	0.0080	0.0071

3.3.5. Le liant neuf

Les caractéristiques du liant bitumineux traduisent principalement la consistance à une température ambiante (NF EN 1426 - mesure de la pénétrabilité) et la susceptibilité de ce liant à la température (EN 1427 - Mesure de la température de la bille et de l'anneau). Ces données permettent de classer les liants bitumineux en grade (NF EN 12591 - Spécification des bitumes routiers). Les grades de bitumes sont désignés par une gamme de pénétrabilité dans laquelle se situe celle du liant considéré (Grade 35/50, ..., Grade 160/220). Le liant bitumineux confère aux enrobés ses propriétés viscoélastiques. Ainsi en fonction de la température, la rigidité de l'enrobé repose sur la consistance du liant bitumineux dont il est composé, ainsi que la proportion de celui-ci.

Le bitume utilisé dans notre étude est de classe 35/50 provenant de la Société Nationale des Hydrocarbures SONATRACH. Ses caractéristiques sont présentées au tableau.3.3. elles montrent que le bitume analysé à des caractéristiques répond conformément à la norme de la classe 35/50.

Tableau.3.3 : Caractérisation du Liant Neuf

	Ech 01	Ech 2	moyen	Spécifications
Pénétrabilité à 25°C, (1/10 mm)	43	40	41.5	35-50
La température de la bille et de l'anneau C°	53	53	53	50-58
Densité relative à 21° C (au pycnomètre)	1.02	1.01	1.01	1.0-1.05

3.3.6. La Poudrette des Caoutchoucs

La poudrette des caoutchoucs utilisée est celle en provenance de la société SAEL d'Oued Smar à Alger, cette société est spécialisée dans la transformation du caoutchouc par la dévulcanisation de cette dernière.

La granularité de la poudrette des caoutchoucs est assez fine, car elle à un diamètre compris entre 0.1 à 1 mm, sa température de fusion est de 100 à 150°C et sa densité de 0.8.

Les résultats d'essai granulométrique et d'identification physique de la poudrette des caoutchoucs sont présentés dans le tableau.3.4 et la figure (fig.3.3.).

Tableau.3.4 : Carecteristique Reglementaires de la Poudrette des Caoutchoucs

Densité (g/cm ³)	Température de fusion C°	Diamètre max (mm)
0.91 – 0.96	100-150	1 mm

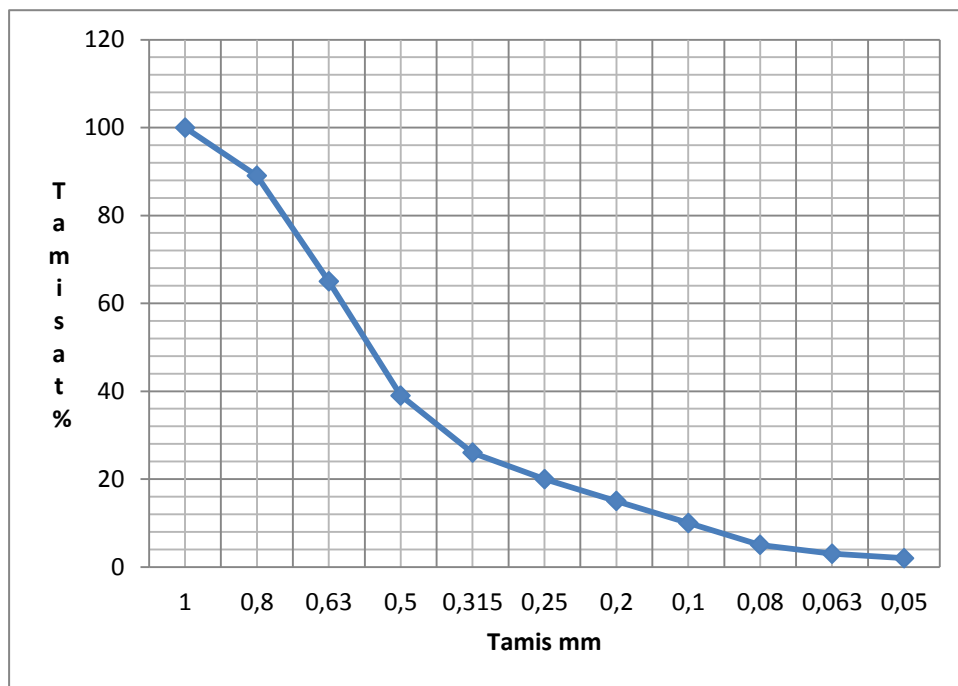


Fig.3.3: Courbe Granulométrique de la Poudrette de Caoutchouc.

3.3.7. Agrégat d'enrobé (fraisât)

Dans cette étude les agrégats d'enrobé (fraisât) utilisé sont issus de la scarification de la couche de roulement de la route RN 21 (Guelma – Annaba). Ces derniers ont un âge de cinq ans et sont d'origine de la carrière de Bouzitoune (Héliopolis Guelma). Ces caractéristiques d'origine montrent qu'ils sont des matériaux apte pour la confection d'enrobé capable à résister le trafic roulant entre Annaba et Guelma (T3).

Taableau.3.5 : classification du trafic

Catégorie de trafique proposé	Nbr cumulé d'essieux équivalents de 13 T
T1	$1*10^5 \leq T < 5*10^5$
T2	$5*10^5 \leq T < 1.5*10^6$
T3	$1.5*10^6 \leq T < 4*10^6$
T4	$4*10^6 \leq T < 1*10^7$
T5	$1*10^7 \leq T < 2*10^7$

✓ **Stockage**

Les agrégats d'enrobés ont été récupéré lors de l'exécution des travaux (Mars 2014) de scarification ensuite stocké et étalé sur la surface d'hangar pour éliminer l'humidité à l'intérieur du corps des agrégats d'enrobés comme le montre la figure (fig.3.4).



Fig.3.4 : Stockage des agrégats d'enrobé avant l'essai

✓ **Sélection et calibrage**

Dans l'étude bibliographique, il a été montré que un enrobé recyclé peut atteint les 100 % des agrégats d'enrobé si il est bien calibré, pour cette raison que les agrégats d'enrobé utilisé ont été passé dans le tamis 14 mm afin d'éliminer les éléments supérieurs à 14 mm.

Après la sélection des éléments inférieur à 14 mm un analyse granulométrique a été effectué comme montrer sur la figure (fig.3.5).

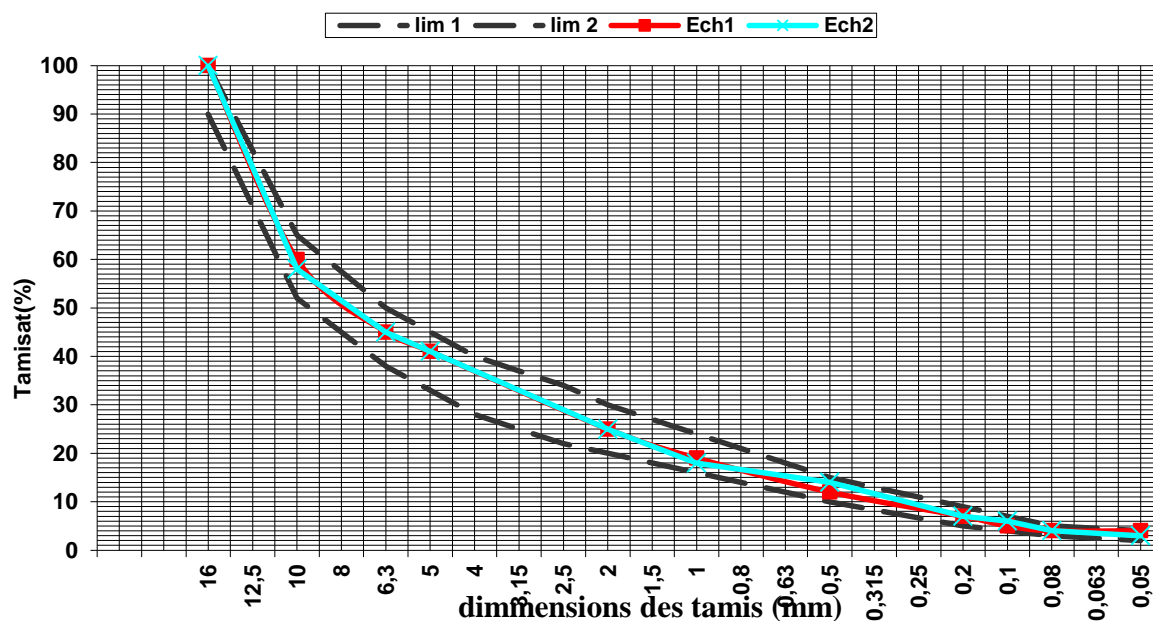


Fig.3.5 : Analyse de calibrage des agrégats d'enrobé sélectionné par le tamis 14 mm

3.4. Formulation d'un enrobé sain

L'enrobé à formuler est un BBSG, sa composition granulométrique est des fractions 0/3, 3/8 et 8/15. Le choix de la formule se passe sur la détermination d'un mélange ayant la meilleure aptitude au compactage et qui pourrait donner une meilleure stabilité au mélange hydrocarboné.

Pour déterminer le pourcentage des fractions dans le mélange, on effectue une analyse granulométrique pour les trois mélanges suivants:

- ✓ Premier mélange : (8/16: 25% ; 3/8 : 30% ; 0/3 : 45%) ;
- ✓ Deuxième mélange : (8/16: 35% ; 3/8 : 30% ; 0/3 : 35%) ;
- ✓ Troisième mélange: (8/16: 45% ; 3/8 : 30% ; 0/3 : 25%).

La courbe granulométrique du mélange retenu est celle du troisième mélange représentée à la figure (fig.3.5). Ce mélange a donné une continuité granulométrique parfaitement dans le fuseau spécifique de référence au béton bitumineux 0/14 de la SETRA- LCPC destiné pour couche de roulement. Le pourcentage du bitume se détermine par la formule (1.1) est de 5.4 %. Il est nécessaire de confirmer ou modifier les différentes compositions et choix de la formulation optimale et à la fin la vérification avec la formulation optimale des niveaux de performances obtenues aux essais d'immersion – compression de Duriez – LCPC.

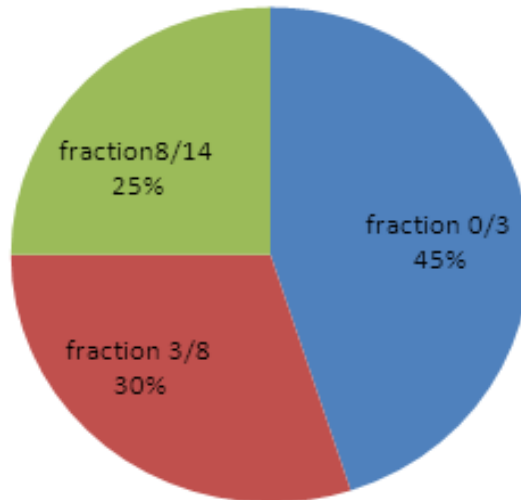


Fig.3.6 : Représentation des dosages de la formule retenue

3.4.1. Etude Marshall

Le but de cet essai est de faire ressortir la variation des performances (stabilité, compacité) de mélanges réalisés avec les granulats et différentes proportions de bitume. Aussi, il sert à déterminer le fluage Marshall et le choix de la formule optimale.

✓ Préparation du Mélange et Confection des Éprouvettes d'essais

Dans un récipient métallique pouvant contenir environ 2000 cm³, la quantité de bitume est 1200 g de gâchée reconstituée à partir du troisième mélange retenu, dont les résultats présentés à la figure (fig.3.5). L'étude a porté sur trois teneurs en bitume différentes (5.0%, 5.5% et 6.0%). Pour chaque teneur donnée, 5 éprouvettes ont été confectionnées (3 pour la stabilité et le fluage; 2 pour la densité apparente du mélange).

Concernant le mode opératoire, il a été bien éclairé dans la partie étude bibliographique à la section (1.2.4.c) pages (17-18).

Tableau.3.5 : Résultats de l'essai Marshall pour différents taux de liant

Composition (%)	8/16 : 25 3/8 : 30 0/3 : 45 Bitume: 5.0	8/16 : 25 3/8 : 30 0/3 : 45 Bitume: 5.5	8/16 : 25 3/8 : 30 0/3 : 45 Bitume: 6.0
Densité apparente	2.447	2.484	2.468
Stabilité à 60°C (daN)	1717	1740	1833
Compacité (%)	88.6	95.2	91.1
% de vide	11.6	8.8	7.9
Fluage (mm)	2.2	2.7	3

Tableau.3.6 : Optimisation vis à vis CTTP¹

Données	Expérimentales	CTTP
Bitume %	5.5	≈ 5.4
Compacité (%)	95.2	93 < C
Stabilité à 60°C (daN)	1740	S>1000
Fluage (mm)	2.7	F<4

- Analyse des résultats de l'essai Marshall

D'après les résultats on constate que le pourcentage de liant dans le corps du mélange sain déterminé par la méthode présentée dans le chapitre I formule (1.1) est égale 5.4, il est accepté aussi par l'essai Marshall, car avec 5.5 % de liant la compacité est bonne ainsi que la résistance au fluage. Donc pour un mélange contenant les fractions est le pourcentage présenté sur la figure (fig.3.6), un taux de 5.4% de liant (type 35/50) est adapté pour avoir un enrobé de qualité conforme aux exigences du CTTP pour la route RN21 (Guelma –Annaba).

3.4.2. Essais D'immersion - Compression Lcpc - Duriez

La réalisation d'essais d'immersion - compression Duriez vise comme objectif de caractériser les qualités de résistance mécanique (statique) et de la résistance au désenrobage par l'eau des matériaux enrobés et de fournir d'autres repères de résistance. L'essai Duriez est appliqué essentiellement aux matériaux denses ou semi-denses (enrobés avec du bitume), dont les agrégats passent en totalité au tamis 20 mm.

✓ Préparation du Mélange et Confection des Éprouvettes d'essai

Dans le cas de l'essai LCPC Duriez le poids de granulats considéré est de 1000 g. Les granulats et le bitume sont mis dans un récipient métallique et placés au chauffage à 140°C. Puis, les éprouvettes sont confectionnées dans des moules cylindriques de 80 mm de diamètre intérieur et 150 mm de hauteur.

Le compactage est fait à la presse CBR. La pression est appliquée progressivement jusqu'à atteindre au bout d'une minute 120 kg/cm³ sur la base de l'éprouvette. Elle est maintenue pendant 5 minutes puis relâchée lentement. L'éprouvette est refroidie suffisamment pour que le démoulage puisse se faire sans déformation. Concernant le mode opératoire est éclairé dans la partie étude bibliographique (1.2.4.c) pages (18).

¹ Contrôle technique des travaux publics

Tableau.3.7 : Résultats de l'essai Duriez pour un taux de liant 5.4

Composition (%)	8/16 : 25, 3/8 : 30, 0/3 : 45, Bitume : 5.4			
Densité Mélange	2.769			
24 heures à 18°C	Stabilité (kg)	2917	Rc (Mpa)	5.8
7 jours à l'air à 18°C		3050		6.1
7 jours immersion à 18°C		2233		4.4
Rapport immersion / compression	0.74			
Compacité (%)	91.5			

- Analyse des résultats de l'essai Duriez

Les résultats dans le tableau 3.7 montrent que la formulation optimale retenue a une bonne stabilité. Les valeurs de stabilité trouvées sont toutes nettement supérieures à la valeur spécifique. Cependant, la compacité et le rapport immersion /compression sont au-dessus de frontière inférieur, mais avec des valeurs proche à celle-ci :

- ✓ Compacité: 91,5 % < 92 % ;
- ✓ Rapport immersion /compression: 0.74 < 0.75

Cela traduit l'existence de vide dans le corps d'enrobé après compactage .Un enrobé poreux résiste mal au désenrobage.

Ce phénomène se manifeste sur le terrain par un enrobé ouvert donnant une chaussée susceptible aux dégradations en général et aux arrachements en particulier.

Pour tenter de remédier à ces problèmes, L'ajout d'un filler d'apport s'est avéré nécessaire, 3% de filler de sable de carrière dans la fraction 0/3 a la capacité d'amélioré la compacité car les résultats après correction ont donné une compacité supérieur à 92% et r/R supérieur à 0.75.

3.5. Formulation d'un enrobé recyclé

3.5.1. À base d'agrégats d'enrobé

a- Méthode

Dans cette étude l'enrobé recyclé qu'a été fabriqué contient les agrégats d'enrobé avec des différents pourcentages. Les ajouts des agrégats d'enrobés ont bien respecté les pourcentages des fractions déterminer dans la formulation des enrobés sains. Le pourcentage des agrégats d'enrobé ajouté est enlevé de chaque fraction avec le même pourcentage.

Aussi, le liant d'apport a suivi la même convention avec les agrégats d'enrobé, ou le taux de liant vieil est de 2.5%, ce pourcentage est enlevé du pourcentage de nouveau liant d'apport donc il devient 2.9%.

Ces formules ont été l'objet de contrôle par les essais Marshall et Duriez pour déterminer les performances mécaniques autorisant l'utilisation de ces formulations comme couche de roulement pour la route nationale RN21 classé T3².

Deux chemins ont été suivis, dans le premier les agrégats d'enrobé ont été ajoutés sans enlèvement du liant vieil par contre dans le dixième chemin le liant vieil est enlevé pour le but de comprendre l'effet de ce dernier sur les performances mécaniques recherchées, l'opération d'extraction du liant vieil est appliquée sur les agrégats d'enrobés (fraisât), la méthode est de mettre les agrégats d'enrobés dans un récipient doté par une base perforée qui assure la récupération de liant vieil à l'état liquide, l'ensemble est mis sur un brûleur de température 160° qui assure la décomposition de le liant vieil et les agrégats d'enrobés, comme il est montré dans la figure (fig3.8).

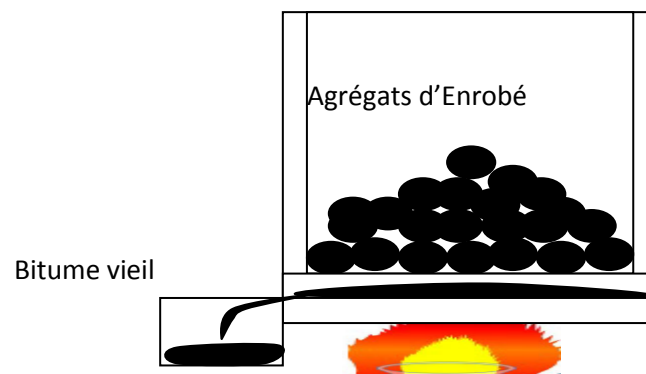


Fig.3.7 : Récupération de liant vieil d'agrégat d'enrobé

L'analyse granulométrique des chemins étudiés a donné des mélanges bien rétrécis dans les limites de la courbe des enrobés sains de type BBSG-0/14 comme le montre la figure (fig.3.8). Les essais ont suivi la même procédure dans la formulation des enrobés sains. Ces essais ont été réalisés à des températures (160° et 120°) afin de déterminer l'influence de ce paramètre sur l'amélioration de ces caractéristiques.

b- Analyse des résultats

Les résultats obtenus par les essais sur les enrobés recyclés à base d'agrégats d'enrobé montrent que la température joue un rôle primordial dans la modification des caractéristiques du mélange et leur compacité ainsi que la résistance au fluage. Le pourcentage des agrégats a aussi une influence remarquable sur le comportement du mélange vis-à-vis les caractéristiques testées. Pour les formules avec agrégats d'enrobés

² T3 est la classe des routes où le trafic est $1.5 \cdot 10^5 \leq T < 1.5 \cdot 10^6$

sans liant (AESL³) le comportement du mélange vis-à-vis la compacité est quasiment proche au enrobé sain, car il se manifeste comme un mélange sain ou la distribution des agrégats d'enrobés dans le corps d'enrobé recyclé est compatible avec le pourcentage sain enlevé, sauf pour un pourcentage élevé la compacité se démunie est prend une position inférieur à la compacité acceptable égale à 92 % pour les formules avec une température de 120° à la figure (fig.3.8), est cela traduit l'incapacité de remobilisé le liant vieil résidu qui reste après l'extraction.

Pour les formules des enrobés recyclé à base des agrégats d'enrobés avec liant vieil (AEAL⁴), sauf le mélange avec 10% d'agrégat d'enrobé qui a une compacité normalisé, les résultats des autres mélanges à la figure (fig.3.9), ont donné un enrobé de compacité inférieur à la norme 92 % avec une température égale à 120° et la compacité se diminuée en fonction de pourcentage des agrégats des enrobés dans le mélange, plus le pourcentage est élevé plus la compacité est faible. Cela traduit l'incapacité de liant vieil à se remobilisé à prendre l'état d'un liant qui peut constituer un mélange avec le liant neuf un liant modifié avec les caractéristiques normalisé. Pour les mélange à base d'agrégat d'enrobé a une température de 160° la compacité est acceptable jusqu'à un taux d'agrégat d'enrobé inférieur à 45 % au-delà de ce pourcentage la compacité commence à se diminué ce qui justifie qu'un taux élevé nécessite une température élevé pour que l'ensemble de liant dans le corps des agrégats d'enrobé ajoutés peuvent se remobiliser et prennent les caractéristiques d'un liant neuf.

Le fluage est une caractéristique très importante dans la qualité des enrobés utilisés comme couche de roulement, il est exigé dans le cahier de charge du maitre d'ouvrage. Dans les résultats des essais sur les enrobés recyclés à base d'agrégat d'enrobé, les essais ont donné des résultats proches à la linéarité, car plus le pourcentage des agrégats est élevé plus le fluage est grand pour les deux chemins. Pour le chemin avec mélange sans liant vieil (AESL) on peut atteindre à un pourcentage de 55% d'agrégat d'enrobé pour une température 160° avec un fluage normalisé. Pour une température 120°, le taux des agrégats d'enrobé sans liant vieil est limité à 40% pour avoir un fluage acceptable à la norme (fig.3.11). Par contre pour le mélange qui contient de liant vieil le fluage est autorisé jusqu'à 40% des agrégats d'enrobés avec une température 160° et 15% pour une température 120° comme le montre la figure (fig.3.10).

³ Agrégat d'enrobé sans liant vieil

⁴ Agrégat d'enrobé avec liant vieil

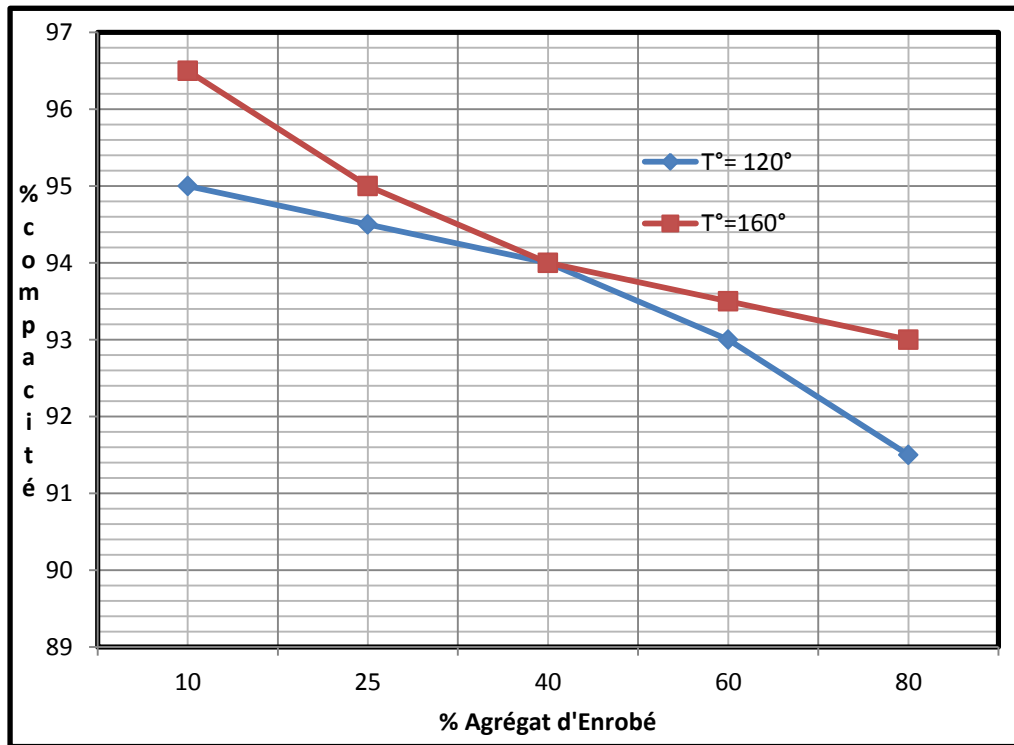


Fig.3.8 : La compacité en fonction du % agrégat d'enrobé pour un mélange avec AESL

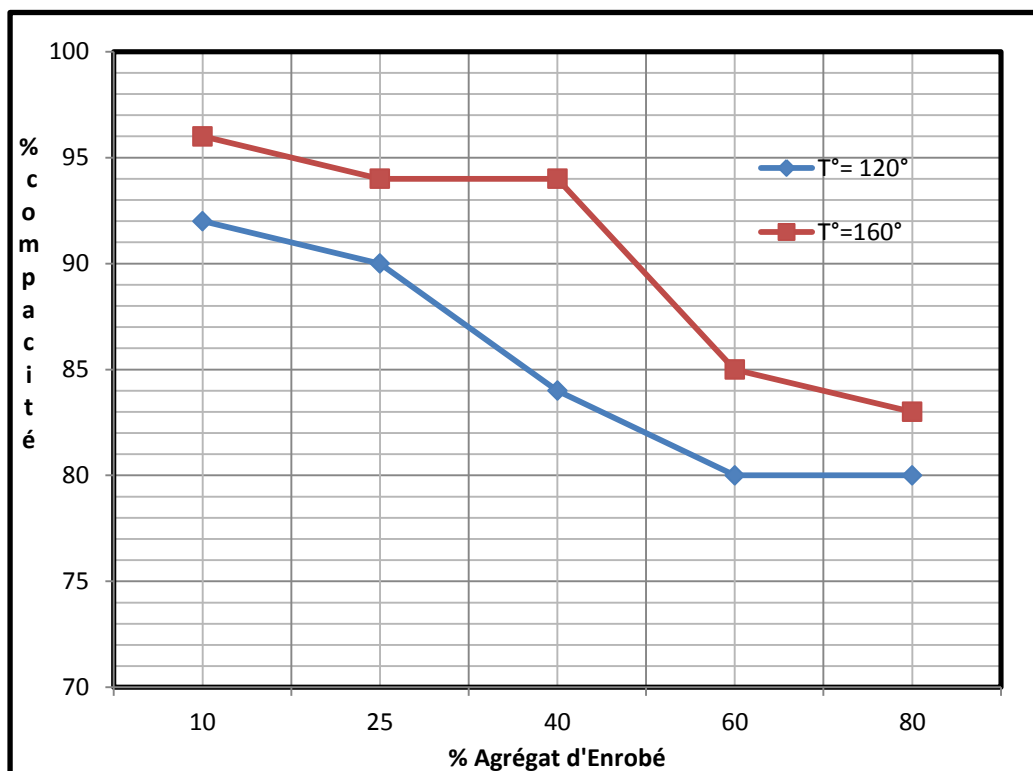


Fig.3.9: La compacité en fonction du % agrégat d'enrobé pour un mélange avec AEAL

D'après ces résultats on constate que la température et le pourcentage des agrégats d'enrobés ont une influence remarquable sur la qualité des enrobés recyclés. Cela se traduit par la capacité du liant vieil de changé leurs caractéristiques est devient proche au liant sain comme indique le tableau (3.8) ou la pénétrabilité a connu une amélioration avec la température 160°. Concernent le taux des agrégats d'enrobés, la compacité ou le fluage deviennent non acceptable avec des taux très élevés. Pour les agrégats d'enrobés sans liant vieil on peut aller jusqu'à un taux élevé avec des caractéristiques acceptables par le CTPP, mais cela est le contraire de notre objectif car ce chemin consomme une quantité importante d'énergie et devient indésirable pour les orientations du sommet de rio de Janeiro.

Tableau.3.8 : La pénétrabilité des mélanges avec AEAL

% AE	Pénétrabilité à 25°C (1/10 mm)	% AE	Pénétrabilité à 25°C (1/10 mm)
10 % avec 120°	37	60 % avec 120°	34
10 % avec 160°	43	60 % avec 160°	39
25 % avec 120°	35	80 % avec 120°	33
25 % avec 160°	40	80 % avec 160°	38
40 % avec 120°	34		
40 % avec 160°	41		

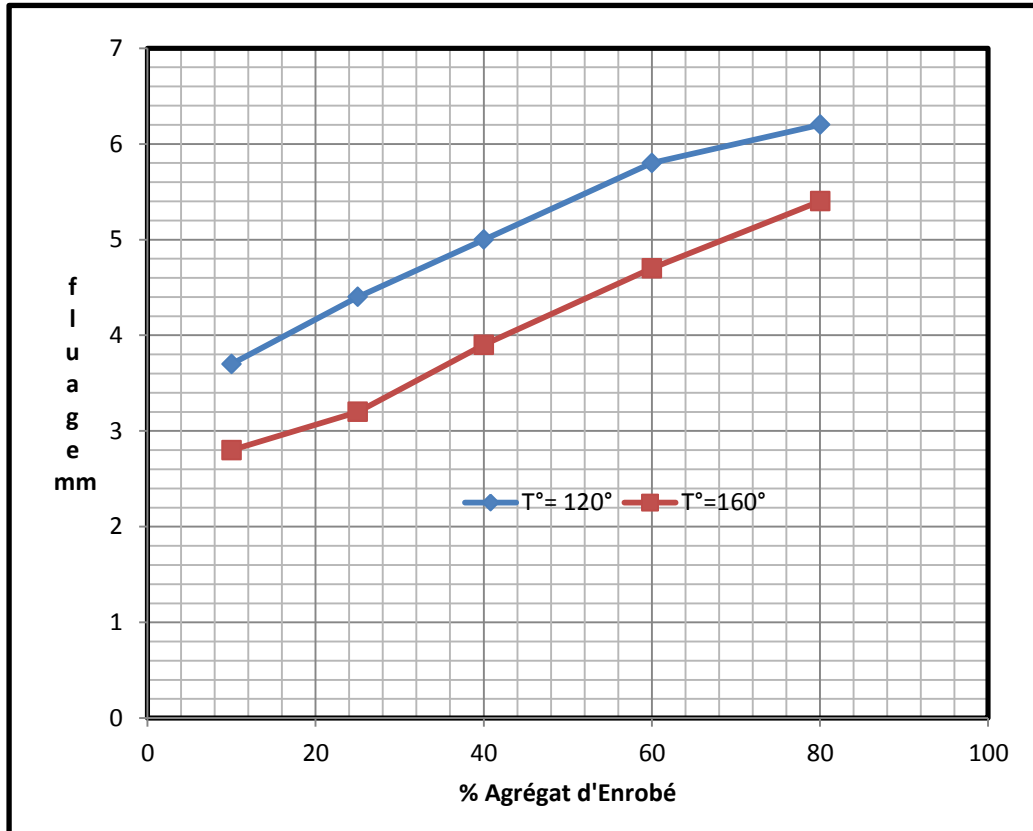


Fig.3.10 : Le fluage en fonction du % agrégat d'enrobé AE pour un mélange avec AEAL

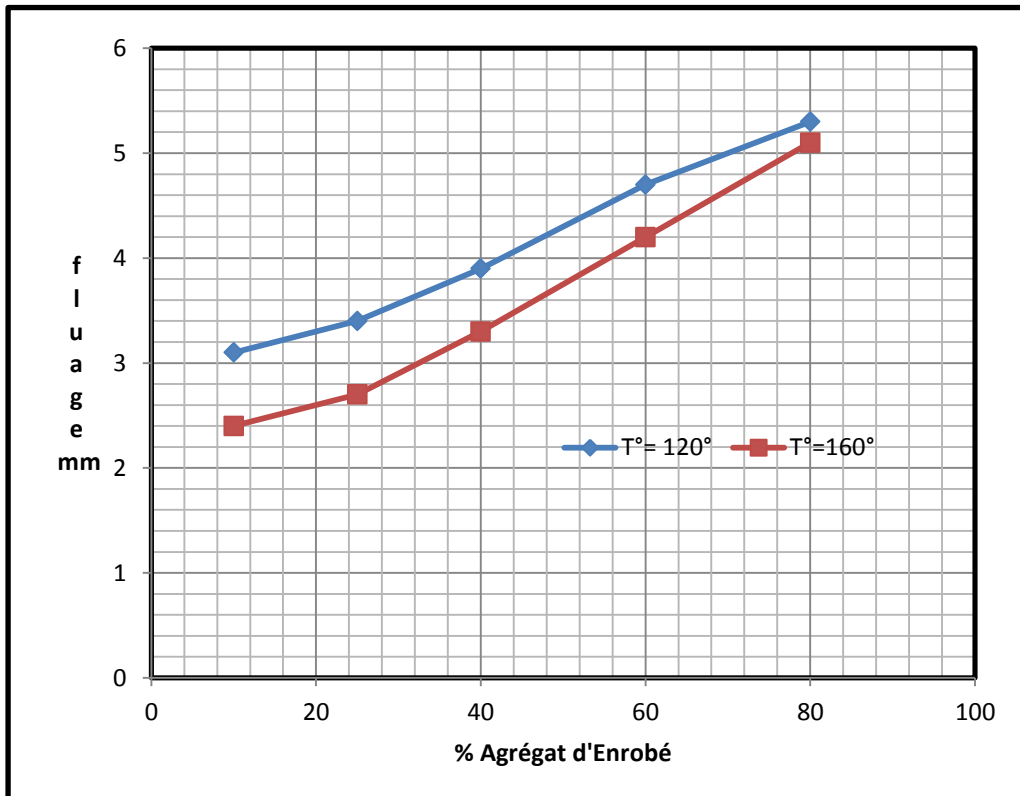


Fig.3.11 : Le fluage en fonction du % agrégat d'enrobé AE pour un mélange avec AESL

3.5.2. À base de la poudre de caoutchoucs

a- Méthode

Dans cette partie on suppose que la poudre de caoutchoucs est utilisée, dans les mélanges d'enrobé recyclé, comme agent modifiant, lors de l'opération de malaxage de l'enrobé ayant la capacité de remplacer le filler qui étant proposé comme solution de rattrapage de la compacité dans la formulation des enrobés sains. Ainsi que, elle donne une cohésion au mélange après qu'elle prend l'état d'un liant et forme avec le liant sein un liant modifié. Ce liant offre aux enrobés recyclés une performance en termes de qualité d'usage et de durabilité. Le mélange est composé de pourcentages des matériaux sains déterminé dans la première phase du chapitre III , et un pourcentage de la poudre de caoutchoucs dans chaque formule (2% , 4% ,6%).

Les essais ont suivi la même procédure que dans la formulation des enrobés sains. Ces essais ont été réalisés à des températures (160°,140° et 120°) afin de déterminer l'influence de la température sur l'amélioration des caractéristiques mécaniques d'enrobés.

b- Analyse des résultats

D'après les résultats de la figure (fig.3.12) on constate que la température joue un rôle primordiale dans la qualité de la compacité d'enrobé recyclé à base de poudrette des caoutchoucs. Car pour un pourcentage de poudrette de caoutchouc égale 2%, la compacité s'améliore avec la température et elle passe de la valeur de 93% pour 120° à 96% pour une température de 140° et 160°. Les mêmes remarques ont été enregistrées à la figure (fig.3.12) pour les pourcentages de 4% et 6%, de même, on peut signaler que la compacité est très proche pour les différents pourcentages (2%,4% et 6%) de poudrette du caoutchouc à la température 140° et 160°. Donc, on peut conclure que pour une température supérieur à 120° la poudrette du caoutchouc commence à prendre l'état d'un liant et le mélange liant neuf et liant du caoutchouc donnent un liant modifié qui possède les caractéristiques d'un liant neuf compatible avec la norme.

Pour le fluage, les résultats de la figure (fig.3.13) présentent un changement très faible pour les pourcentages de 2% et 4% à des températures de fabrication (120°,140°et160°) par contre pour 6% de poudrette du caoutchouc le fluage prend des valeurs dépassant la norme (4mm). Donc, on peut conclure que pour des taux élevés en poudrette du caoutchouc la ductilité du matériau augmente ce qui explique ces résultats. D'après, les résultats de la compacité et le fluage en se trouve à une condition de ne pas dépasser un taux de 4% de poudrette du caoutchouc avec une température supérieur à 120 ° et inférieure 140° pour fabriquer un enrobé recyclé avec la poudrette du caoutchouc.

Tableau.3.9 : La pénétrabilité des mélanges avec poudrette des caoutchoucs

% Addit	Pénétrabilité à 25°C (1/10 mm)
2 % avec 120°	35
4 % avec 120°	32
6 % avec 120°	31
2 % avec 140°	41
4 % avec 140°	41
6 % avec 140°	38
2 % avec 160°	45
4 % avec 160°	43
6 % avec 160°	43

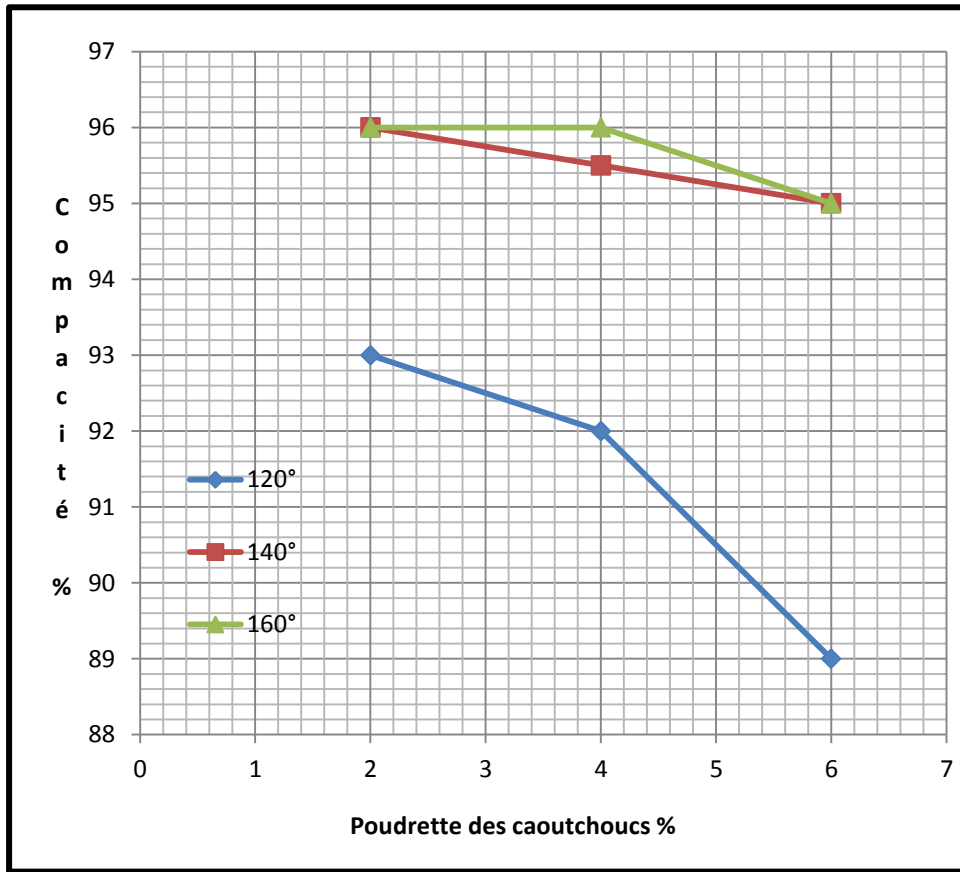


Fig.3.12 : La compacité en fonction du % Poudrette du caoutchouc

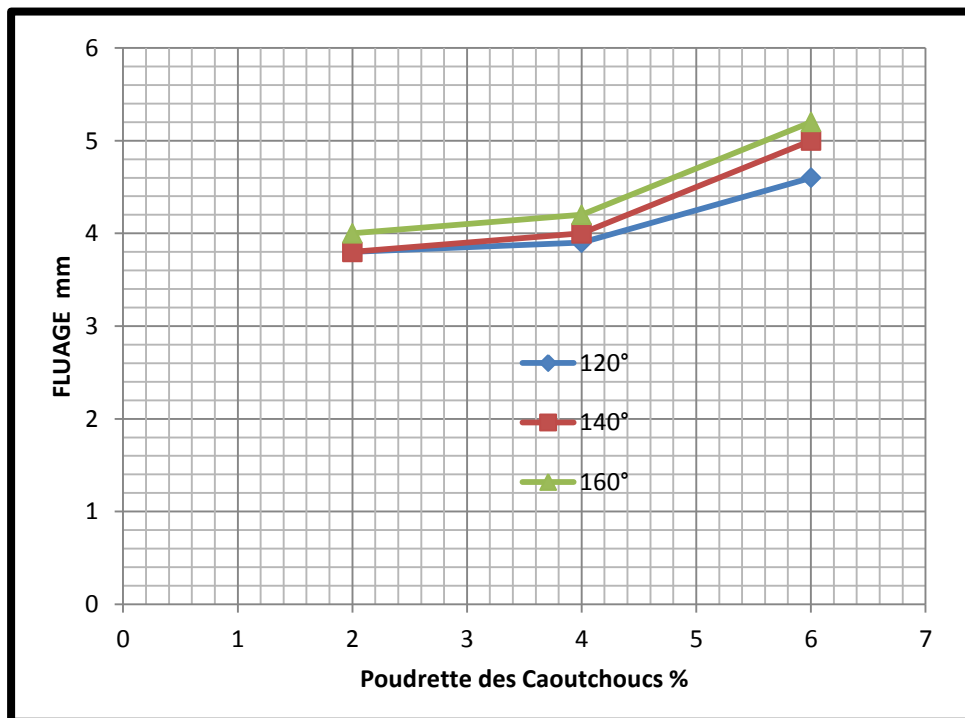


Fig.3.13 : Le fluage en fonction du % Poudrette du caoutchouc

Conclusion

Ce chapitre a traité la possibilité de formuler un enrobé recyclé à base d'agrégat d'enrobé ou poudrette du caoutchouc. Dans cette étude la température et le pourcentage des ajouts ont joué un rôle très influant sur qualité des enrobés recyclés. Pour l'enrobé à base d'agrégat d'enrobé avec liant vieil, le pourcentage a été limité à 45% avec une température de fabrication supérieur à 120° pour avoir un enrobé recyclé de bonne qualité respectant les limites autorisés de la compacité et le fluage dans les tableaux (3.6 et 3.7). Par contre pour l'enrobé sans liant vieil on peut aller à des pourcentages élevés et ce qui explique l'exigence d'une température adapté avec la quantité d'agrégat d'enrobé afin d'assurer une remobilisation du liant vieil, composant avec le liant neuf un liant modifié, ce dernier (liant modifié) doit avoir les caractéristiques exigé par la norme.

Pour les enrobés à base de poudrette d'enrobé la température exigée de fabrication est supérieur à 120° avec un pourcentage inférieur à 4% de poudrette du caoutchouc pour avoir un enrobé recyclé de qualité acceptable. La poudrette prend l'état d'un liant à une température supérieur à 120°. Dans cette étude les essais classiques n'ont pas la capacité de déterminer la température exacte pour laquelle le liant vieil et la poudrette du caoutchouc prennent l'état d'un liant. Pour le pourcentage d'agrégat d'enrobé et le pourcentage de poudrette des caoutchoucs, les essais n'ont pas limité ou optimisé les pourcentages de ces ajouts.

Donc, on peut conclure que les essais classiques ne permettent pas toujours d'optimiser le produit ou le processus. En effet, le principe même des essais conduit le plus souvent à emprunter un chemin labyrinthique et à s'arrêter dans le meilleur cas à la première solution jugée satisfaisante. Par suite, la solution retenue n'est pas nécessairement optimale dans la mesure où d'autres solutions non explorées, auraient peut-être pu permettre d'atteindre de meilleures performances ou, pour des résultats identiques, d'obtenir une solution plus économique. Cette méthode ne met pas forcément en lumière les interactions entre les différents paramètres. Certains effets, ainsi calculés en comparant deux à deux les résultats d'essais, ne sont valables que pour des valeurs particulières des paramètres et ne peuvent souvent se transposer à d'autres conditions d'essais. De plus, les expérimentations selon les méthodes classiques ne permettent pas de tenir compte facilement de la variabilité des grandeurs observées, occasionnées par une multitude de sources de fluctuation.

Donc, cela nous oblige à faire appel à une méthode qui pouvant fournir des informations précises. La méthode des plans d'expériences est la réponse à cet appel, présenté dans le

chapitre II. On va l'utiliser au prochain chapitre pour optimiser une formulation d'un enrobé recyclé résistant à l'orniérage.

CHAPITRE IV
OPTIMISATION D'UNE FORMULATION
D'ENROBÉ RECYCLÉ RÉSISTANT À L'ORNIÉRAGE ET LES
CHANGEMENTS CLIMATIQUE

4.1. Introduction

Ce chapitre est composé de deux parties, la première a pour objectif d'étudier la possibilité d'utilisation de la méthode des plans d'expérience dans la recherche d'une formule d'optimisation pour la fabrication d'un enrobé recyclé à base des agrégats d'enrobé et de poudrette des caoutchoucs. A la deuxième partie nous avons passé à l'échelle réelle des changements climatiques, ou nous avons vérifié l'effet de la température maximale de l'été et celle minimale de l'hiver sur la résistance à l'orniérage des enrobés recyclés.

4.2. Formulation d'un enrobé recyclé

Cette partie étudie la faisabilité de formuler un enrobé recyclé possédant les caractéristiques mécaniques respectant les normes en vigueur. La théorie de développement durable est applicable dans cette phase ou nous avons utilisé la méthode d'optimisation cherchant un maxima des ajouts (agrégats d'enrobés et poudrette du caoutchouc) et un minima de température de fabrication et de temps du malaxage. Dans cette logique, le temps et la température ont été modifiés pour les différents mélanges.

Suite aux remarques présentées dans la conclusion du chapitre trois, les essais effectués par la méthode classique n'ont pas la capacité de donner des résultats fiables sur les degrés des pourcentages dans le mélange en fonction de la qualité mécanique désirée, ce qui a orienté l'étude vers l'utilisation de la méthode des plans d'expérience comme une solution donnant les pourcentages avec une fiabilité maîtrisable.

Cette méthode, comme elle a été expliquée dans le chapitre II, a pour but de réduire le nombre d'essais expérimentaux nécessaires pour une étude et avoir le maxima des informations. Elle exige la préparation des matériaux utilisés (granulats sains, liant sain, agrégats d'enrobé et poudrette des caoutchoucs).

Dans la présente étude les matériaux utilisés visent la formulation d'un enrobé possédant une courbe granulométrique et une teneur en liant vérifiant les conditions exigées par la réglementation.

L'hypothèse de formulation utilisée ici, cherche à augmenter le taux des agrégats d'enrobé et la poudrette du caoutchouc au maximum et de minimiser le temps du malaxage et la température de fabrication d'enrobé au maximum. Ainsi, on suppose une remobilisation totale du liant vieille dans les agrégats d'enrobé. Ce qui nous a conduit à suivre l'évolution de la pénétrabilité et la température de ramollissement pour chaque essai, Elle permet de plus, de contrôler l'influence de ces paramètres sur les performances mécaniques des enrobés recyclés.

4.3. L'approche par plan d'expérience

4.3.1. Méthode du plan factoriel complet

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais accompagnant une étude scientifique ou des études industrielles [6]. Dans notre cas, le nombre des essais a été rapporté de plan de base $4 \times 16 = 64$ à 16 avec trois essais de contrôle (points centraux).

Le plan d'expérience utilisé est un plan factoriel complet, il nous a permis de caractériser l'évolution d'une grandeur en fonction de 4 paramètres. Pour cela, les points expérimentaux devront être caractérisés. Ils sont la partie fixée par le plan d'expérience. L'expérimentateur choisit les paramètres à considérer, ainsi que la gamme de valeurs sur laquelle chaque paramètre évolue : une valeur minimale et une valeur maximale.

La théorie des plans d'expériences impose que le point médian de cette gamme soit un point à caractériser. Les trois points médians de chaque paramètre définissent le centre du domaine expérimental d'étude. Le tableau 4.1 présente les points des plans d'expériences. Le modèle a priori s'inscrit sous la forme $Y=f(X_i)$ ou la fonction f est un développement polynomial d'ordre plus ou moins élevé des X_i , l'ordre du polynôme dépend du degré de précision souhaité et il s'écrit sous la forme de l'équation (Eq.4.1).

$$\begin{aligned}
 Y(X_1, X_2, X_3, X_4) = & a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + a_3 \cdot X_3 \\
 & + a_4 \cdot X_4 + a_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + a_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 \\
 & + a_{14} \cdot X_1 \cdot X_4 + a_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 \\
 & + a_{24} \cdot X_2 \cdot X_4 + a_{34} \cdot X_3 \cdot X_4 + e
 \end{aligned}
 \tag{Eq.4.1}$$

Les valeurs des coefficients a_i et du résidu e de l'équation sont les inconnues. Ils sont déterminés par la résolution d'un système de (n) équations, obtenues grâce à l'ensemble des points expérimentaux réalisés durant la réalisation du plan factoriel complet.

L'expertise consiste donc à identifier les facteurs X_i . La forme du modèle qui peut intégrer des couplages éventuels entre facteurs. On choisit ensuite les valeurs que prendront les facteurs pour chacune des expériences.

Pour faciliter le traitement des résultats, il est judicieux de travailler avec des facteurs adimensionnels, en renormant les valeurs. Par exemple, si le facteur X_i varie dans l'intervalle $[X_i^-, X_i^+]$, on le renorme dans l'intervalle $[-1, +1]$, par la relation (Eq.4.2):

$$X_i = \frac{2X_i - (X_i^+ + X_i^-)}{(X_i^+ - X_i^-)}
 \tag{Eq.4.2}$$

Ainsi, toutes les constantes du modèle polynomial sont exprimées dans la même unité, celle de la réponse Y_i . L'amplitude de chaque constante est directement proportionnelle au degré de sensibilité de la réponse au facteur ou à l'interaction de plusieurs facteurs.

La régression mathématique permet l'estimation des effets des différentes actions (facteurs et interactions). L'optimisation est une solution pour déterminer la plage préférée de la réponse (optimisation P) qui se définit sous la forme générale suivante : $P = \text{Min } y(x)$ ou $b_{\text{inf}} \leq x \leq b_{\text{sup}}$ d'où b_{inf} et b_{sup} sont les limites des facteurs. En fin, on peut évaluer le degré de fiabilité du modèle proposé, en comparant la variance expérimentale totale V_{exp} et la variance expliquée par le modèle V_{mod} . Le rapport entre $V_{\text{exp}}/ V_{\text{mod}}$ peut nous indiquer le degré de la fiabilité.

Tableau 4.1 : Codage des Facteurs

Codage	Agrégat d'enrobé	Poudrette du caoutchouc	Température de fabrication	Temps de fabrication
+1	75%	6%	160°	5mn
-1	15%	0%	120°	3mn
0	45%	3%	140°	4mn

4.4. Les paramètres d'étude

Dans notre étude, nous avons choisi les quatre paramètres suivants :

- 1- Le pourcentage des agrégats d'enrobés,
- 2- Le pourcentage des additives de la poudrette des caoutchoucs,
- 3- La température de fabrication,
- 4- La durée du malaxage

La variation de ces paramètres est conditionnée comme suit :

a. Pourcentage des agrégats d'enrobé

Le pourcentage des agrégats recyclés est choisi pour couvrir une gamme allant du cas du recyclage à faible taux (15%), réalisable communément avec la plupart des centrales existantes, au cas du recyclage à fort taux (75%) correspondant à la capacité maximale de recyclage à chaud des centrales de type doubles tambours dédiées à la fabrication d'enrobés recyclés à fort taux. Le choix de ces deux valeurs, maximale et minimale, impose un point intermédiaire à 45% de recyclé correspondant au taux de recyclage des centrales à brûleur déporté.

b. Pourcentage de poudrette

La poudrette des caoutchoucs est ajoutée avec soin. Car, d'après les conclusions du chapitre trois un déplacement de 5% peut démunir les caractéristiques mécaniques (fluage

et compacité) des enrobé recyclé. Pour cette raison, un pourcentage minimal de 3% est choisi, car il est le taux ou le liant d'apport sain commence à changer ses caractéristiques. Le maximal atteint le pourcentage de 6%, puisque il représente le taux ou le liant modifié ne respecte pas la norme du liant choisis pour la région ou se déroule l'étude (type 35/50).

c. Température de fabrication

Pour la fabrication des enrobés, on utilise le liant de type 35/50. La température de la fusion des poudrettes des caoutchoucs est comprise entre 120° et 150°. La remobilisation des liants vieillis dépassent la température de 110°. À partir de ces conditions le choix est fixé comme suit :

La température maximale utilisée est fixée à 160°C. Elle reflète la température maximale de fabrication qu'on peut atteindre en laboratoire.

La température minimale est choisie égale à 120°C. Elle représente le cas de remobilisation minimale du liant d'agrégats d'enrobé. Car les agrégats d'enrobé sont préchauffés à 110°C.

Le choix de ces deux valeurs, maximale et minimale, impose un point intermédiaire à 140°C proche de la température de fabrication des enrobés normalisé.

d. Durée de malaxage

La norme [NF EN 12697-35 2007] encadrant le malaxage en laboratoire stipule que la durée maximale du malaxage des constituants est de 3 minutes pour la fabrication d'un enrobé sans agrégats d'enrobé et elle est de 5 minutes si des agrégats d'enrobé sont utilisés. Une valeur intermédiaire de 4 minutes a été choisie.

4.5. Les matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans cette campagne d'essais sont les mêmes que nous avons utilisés dans les essais du chapitre trois.

Maintenant, le mélange contient deux ajouts à la fois (agrégat d'enrobé et poudrette du caoutchouc), ce qui exige à effectuer une analyse granulométrique pour déterminer la courbe des mélanges. Les agrégats d'enrobés ajoutés sont passés dans le tamis 0/14 afin d'éliminer les agrégats supérieurs à 14 mm. Pour éviter l'influence de l'humidité sur l'interprétation des résultats les matériaux recyclés sont séchés dans un espace couvert pour que l'humidité soit nulle dans le mélange. Les résultats dans la figure (fig.4.1) montrent que les mélanges ont donné des résultats satisfaisants. Car, ils sont dans la plage

règlementaire qui exigent une continuité granulométrique et créant une homogénéité dans la fabrication.

Le protocole de dosage se fait en fonction des résultats de l'analyse granulométrique de chaque fraction dans le mélange sain d'enrobé. Le dosage se fait par l'annulation de la quantité d'agrégats sains dans chaque fraction et de la remplacer par les agrégats d'enrobés ajouté, le tableau (4.2) détermine les nouveaux pourcentages des fractions à la présence des agrégats d'enrobés. Le mélange a été réalisé en fonction des pourcentages déterminés au chapitre III.

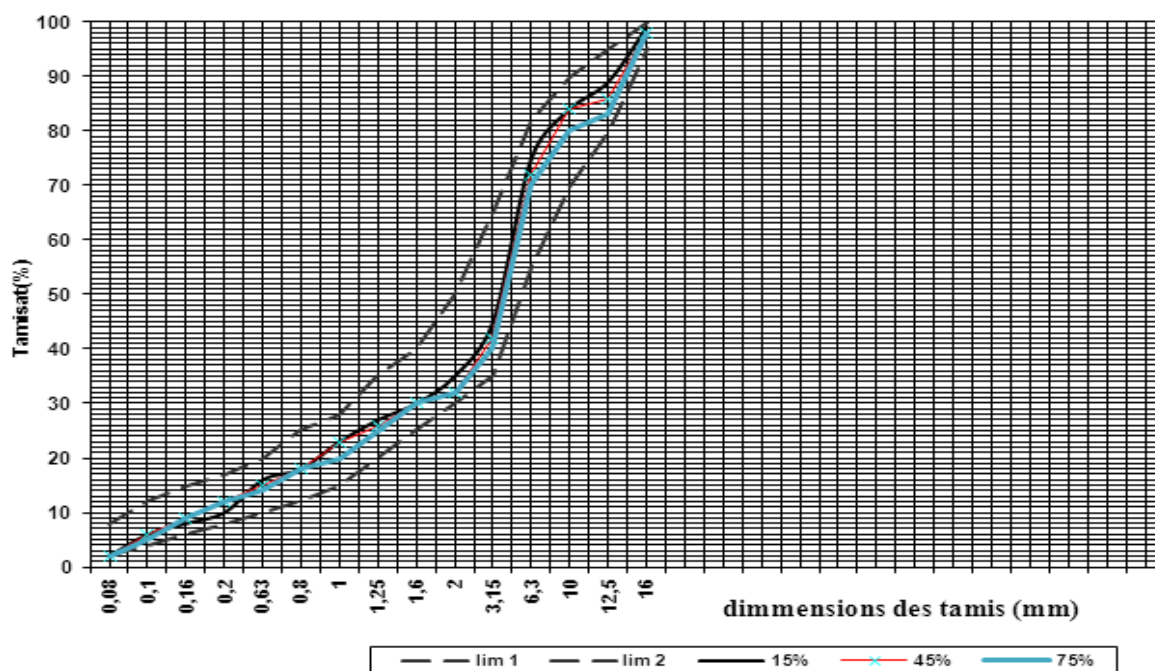


Fig. (4.1) : Courbe des essais granulométrique des mélanges

Tableau (4.2) : Protocole de Dosage

Les fractions %	0/3	3/8	8/14	AE
Sain	45	30	25	0
Pourcentage maintenu Pour le mélange avec 15 % AE	38	25	22	15
Pourcentage maintenu Pour le mélange avec 45% AE	24	17	14	45
Pourcentage maintenu Pour le mélange avec 75% AE	11	08	06	75

4.5. Préparation des corps d'épreuve

4.5.1. Malaxage des éprouvettes

Le moulage des éprouvettes consiste à déposer une masse déterminée d'enrobé recyclé, fabriqué dans une centrale d'enrobé de laboratoire doté d'un doseur et régulateur de température, comme le

montre la figure (fig.4.2). Dans un moule de volume fini, puis à compacter cette masse dans le moule afin d'obtenir une plaque de largeur A , de longueur B et d'épaisseur E . La connaissance de la masse volumique de l'enrobé recyclé non compacté et du pourcentage de vides désiré de l'éprouvette permettent, par un calcul volumique, de déterminer la masse d'enrobé nécessaire.



Fig. (4.2) L'appareil de préparation d'enrobé

4.5.2. Moulage des éprouvettes

Le moulage est réalisé au moyen d'un compacteur à pneu conformément à la norme [NF EN 12697-332004] (fig.4.3). Le compactage se réalise au moyen de roues équipées de pneumatiques : roue unique pour le compactage des plaques dont la largeur est de 180 mm et roues doubles jumelées pour le compactage des plaques dont la largeur est de 400 mm.



Fig.4.3 : Compacteur d'enrobé (préparation de la plaque)

Le moulage se réalise en réduisant progressivement la hauteur de l'échantillon compacté jusqu'à l'obtention de l'épaisseur voulue. Le compactage commun à toutes les

fabrications ne permet pas d'obtenir des corps d'épreuve dont la teneur en vides est identique. La méthode de compactage classique a donc été adaptée.

4.5.3. Préparation des éprouvettes

À la suite du compactage d'une plaque, un délai de murissement de deux semaines à la température de la pièce entre le moment de la confection de la plaque et celui du carottage est préconisé et respecté afin d'assurer une cure adéquate de l'enrobé bitumineux. Chaque plaque est d'abord sciée au centre suivant l'axe transversal, en utilisant un outil approprié pour obtenir des faces parallèles (Figure 4.5),

Les échantillons objet de cette étude ont été confectionnés dans des moules normalisés de 180 mm x 500 mm x 100 mm (9000 cm³) constituant les corps d'épreuve pour mesurer la résistance à l'orniérage.



Fig.4.5 : Confection des moules

4.5.4. Mode opératoire

La résistance à l'orniérage est mesurée conformément à la norme [EN 12697-22]. Les essais ont été réalisés sur les éprouvettes après 48 h de la préparation des corps d'épreuves. Chaque point du plan d'expériences est évalué en réalisant les essais sur deux corps d'épreuves. L'orniérage est mesuré après 30000 passages de roues à 60°C.

Dans chaque essai de points d'expérience un essai de pénétrabilité sur le liant d'apport est réalisé afin de saisir l'influence des ajouts sur la pénétrabilité comme un caractère très influant sur les performances mécaniques des enrobés, ce changement est causé par le liant vieilli et la poudrette des caoutchoucs.

4.6. L'approche par la méthode des plans d'expérience

Dans le plan expérimental proposé, quatre facteurs ont été procuré, ce qui implique la réalisation de seize essais, plus trois essais médian. La réponse recherchée est le comportement de l'enrobé recyclé à l'orniérage et l'influence des facteurs étudiés sur la réponse pour chaque formule, ainsi que la compatibilité des liants avec la performance souhaitée, est le but principale de l'utilisation des plans d'expériences.

Les résultats des essais exigés par le plan d'expérience objet de l'étude ainsi que les résultats de l'orniérage calculé sont présentés au tableau (4.3). Le contrôle des modifications apportés sur les caractéristiques physique du liant d'apport après l'ajout des agrégats d'enrobé (liant vieilli) et d'additif (poudre de caoutchouc), est très utile pour déterminer la compatibilité du liant modifié (liant neuf + liant vieilli + additif) avec l'enrobé recyclé. Pour mieux comprendre ce changement, une campagne d'essais est effectuée pour déterminer la pénétrabilité de liant modifié pour les différentes formules étudiées tableau (4.4). La température d'essais est fixée entre 160° et 120°. Les résultats obtenus permis de suivre la mobilisation des liants vieillis dans le liants modifié en fonction des pourcentages ajoutés des agrégats d'enrobé et le pourcentage de la poudre de caoutchouc.

Tableau (4.3) : Résultats d'essais d'orniérage suivant le plant d'expérience (expérimentaux et calculé) [50]

Ordre d'Essai	AE%	Addit %	T° C°	Tm	% Orniérage expérimentale	% Orniérage calculé
1	1	-1	1	1	6,6	6,256
2	1	-1	-1	1	6,0	5,856
3	0	0	0	0	5,2	5,318
4	-1	1	-1	1	4,9	4,681
5	-1	1	1	1	4,6	4,330
6	-1	-1	1	1	5,4	5,231
7	-1	1	-1	-1	5,0	4,781
8	1	1	-1	1	5,7	5,406
9	1	-1	1	-1	6,4	6,381
10	0	0	0	0	5,0	5,318
11	1	1	1	-1	5,9	5,481
12	-1	-1	-1	1	5,2	5,056
13	-1	-1	1	-1	5,7	5,431
14	1	-1	-1	-1	6,1	5,806
15	-1	1	1	-1	4,7	4,606
16	0	0	0	0	5,1	5,318
17	1	1	-1	-1	5,5	5,431
18	-1	-1	-1	-1	5,3	5,081
19	1	1	1	1	5,3	5,281

4.8.1. Analyse des résultats

L'exploitation du plan d'expérience factoriel choisi comme un modèle de qualité, se fait en l'exploitant le MINITAB.17. Il nous a aidés à programmer les essais nécessaires et la résolution des équations polynomiales.

Les résultats recherchés sont la détermination des inconnues du polynôme de l'équation (4.3) exprimant la résistance d'enrobé recyclé à l'orniérage (la réponse) en fonction des paramètres du plan d'expérience (les facteurs). Cette relation permet de déterminer la résistance à l'orniérage en fonction des variables (facteurs). De même, cette équation est une justification préalable pour les fabricants d'enrobé devant le maître d'ouvrage.

$$\begin{aligned} \text{Orn} = & 5.5187 + 0.4188 \cdot \text{AE} - 0.3187 \cdot \text{Addit} \\ & + 0.0562 \cdot T^\circ - 0.0563 \cdot T_m - 0.0187 \cdot \text{AE} \cdot \text{Addit} \\ & + 0.0563 \cdot \text{AE} \cdot T^\circ + 0.0187 \cdot \text{AE} \cdot T_m \\ & - 0.1313 \cdot \text{Addit} \cdot T^\circ - 0.0188 \cdot \text{Addit} \cdot T_m - 0.2 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Avec :

- Orn : orniérage,
- AE : agrégats d'enrobé,
- Addit : additif,
- T° : température de la fabrication,
- Tm : temps du malaxage),

Ces facteurs sont des variables réduites dont la variation est par définition comprise entre -1 et +1. Afin de ne pas surcharger l'écriture, les changements de variables permettant d'exprimer l'orniérage en fonction des variables non réduites ne sont pas effectués. Ces changements de variables sont les suivants.

$$\text{AE} = \frac{(\text{AE}_{\text{reel}} - 45\%)}{(75\% - 45\%)} \text{ avec } 15\% \leq \text{AE}_{\text{reel}} \leq 75\% \quad (4.4)$$

$$\text{Addit} = \frac{(\text{Addit}_{\text{reel}} - 3\%)}{(6\% - 3\%)} \text{ avec } 0\% \leq \text{Addit}_{\text{reel}} \leq 6\% \quad (4.5)$$

$$T^\circ = \frac{(T_{\text{reel}} - 140^\circ)}{(160^\circ - 140^\circ)} \text{ avec } 120^\circ \leq T_{\text{reel}} \leq 160^\circ \quad (4.6)$$

$$T_m = \frac{(T_{m_{\text{reel}}} - 4\text{mn})}{(5\text{mn} - 4\text{mn})} \text{ avec } 3\text{mn} \leq T_{m_{\text{reel}}} \leq 5\text{mn} \quad (4.7)$$

a. Analyse de la fiabilité du modèle

L'analyse de la variance permet de calculer le paramètre statistique (R^2) très utile, permettant d'évaluer la qualité de la réponse des essais. Ce paramètre (R^2) est le rapport entre la somme des carrés des réponses (orniérage) calculées et la somme des carrés des

résultats d'orniérage mesuré [42]. Plus R^2 est proche à 1 plus la qualité est excellente. Dans notre cas (R^2) égale 95,07 (fig.4.6), cela indique que le modèle est de bonne qualité et les essais ont été réalisés dans les mêmes conditions.

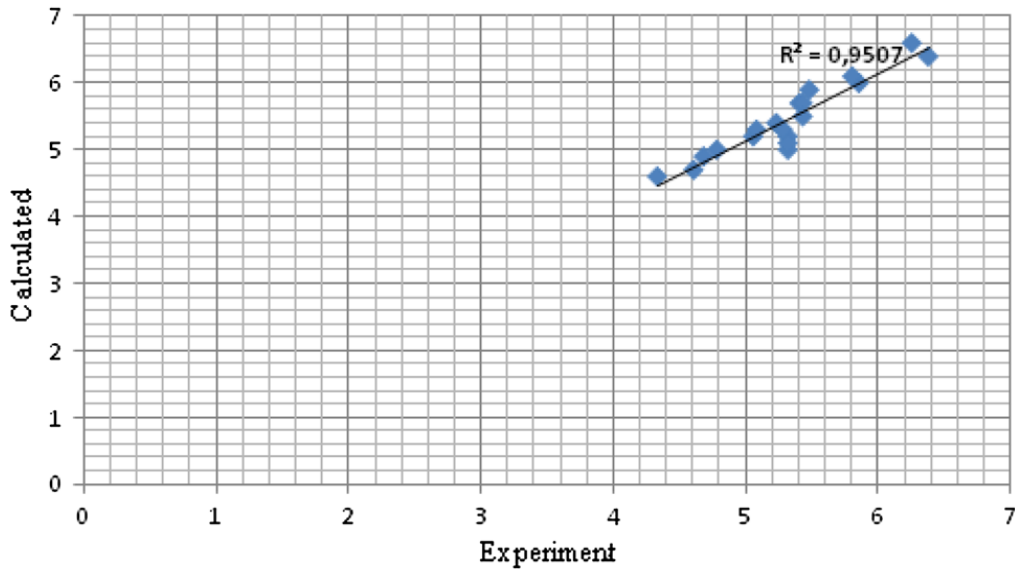


Fig. 4.6 : Analyse de la variance R^2 [50]

b. Échantillonnage

En statistiques, un échantillon de taille (n) est la liste des (n) résultats obtenus par (N) répétitions indépendantes de la même expérience aléatoire. Un intervalle de fluctuation au seuil de 95 %, relatif aux échantillons de taille (N), est un intervalle où se situe la fréquence (f) observée dans un échantillon de taille (n) avec une probabilité supérieure à 0,95.

La figure (fig.4.7) est la représentation graphique de l'ensemble de toutes les valeurs de l'échantillon. En remarque que l'ensemble des mesures sont dans la zone de confiance.

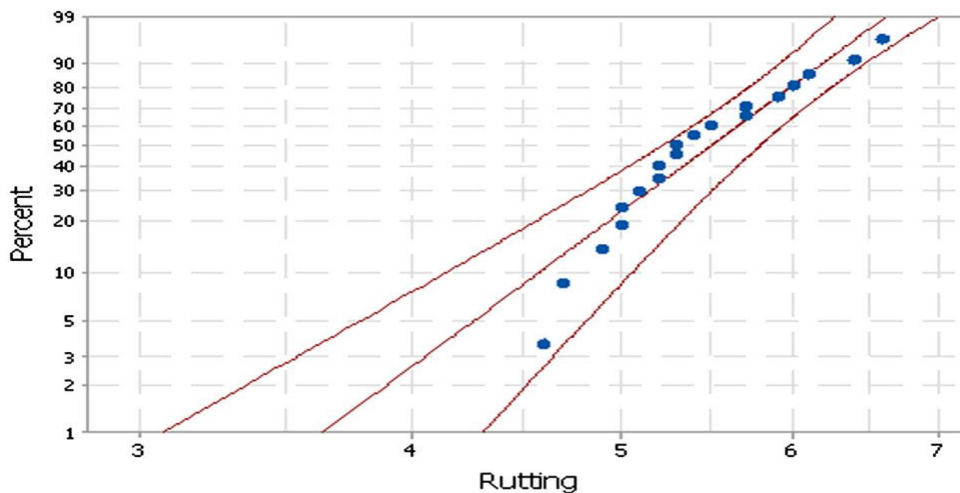


Fig.4.7: Probabilité d'Orniérage [50]

4.6.1. Effet de la température sur la pénétrabilité de liant modifié

Les résultats du tableau. (4.4) montrent l'influence de la température sur les performances mécaniques des enrobés recyclés, elle se traduit par l'interaction entre la température et le liant modifié. On remarque que pour une température de 120° la pénétrabilité est très faible par comparaison avec la norme exigeant une pénétrabilité entre 35 et 45. Plus la température est élevée jusqu'à 140°C° un changement est apporté à la pénétrabilité et devienne supérieur à 35. À une température de 160° C°, une mobilisation de l'ensemble des ajouts (poudrette + liants vieilli) se manifeste, est la pénétrabilité devienne normalisé entre 35 et 45. On remarque que plus le pourcentage des ajouts (agrégats d'enrobé ou poudrettes des caoutchoucs) est élevé plus la pénétrabilité se diminuée.

Tableau .4.4 : Pénétrabilité des liants modifier d'enrobé recyclé en fonction des taux d'agrégats d'enrobés dans le mélanges et le taux d'additif par rapport au pourcentage du liant d'apport

Temperature C°	Agregats d'enrobé %	Additif %	Penetrabilité mm
120	15 %	0 %	32
160	15 %	0 %	28
120	75%	0 %	35
160	75%	0 %	38
120	15 %	6%	40
160	15 %	6%	40
120	75%	6%	33
160	75%	6%	38
140	45%	3%	38

4.6.2. Effets des facteurs sur la réponse

D'après Les résultats présentés sur le graphe de PARITO (fig.4.7), on constate que les deux facteurs influençant la résistance des enrobés recyclés sont les agrégats d'enrobé et l'additif avec l'interaction entre la température et l'additif. Ce dernier justifie la conclusion précédente sur la mobilisation des liants car la poudrette des caoutchoucs et le liant vieilli changent leurs caractéristiques rhéologiques après l'application d'une température élevée. Ainsi, le graphe de PARITO montre que le taux de pourcentage des agrégats d'enrobés joue un rôle très important sur la qualité des enrobés vis-à-vis l'orniérage, car un pourcentage élevé de AE nécessite un liant modifié de caractéristiques compatibles avec la résistance désiré qu'est difficile à l'atteindre.

Concernant l'effet des facteurs étudiés sur l'orniérage optimisé à une valeur de référence maximale égale à 5,45mm. D'après (fig.4.8), un temps du malaxage de durée comprise entre 5 min et 3 min 30 secondes peut fabriquer un enrobé recyclé de qualité (l'orniérage inférieur 5,45 %) c'est-à-dire qu'il faut assurer toujours un minimum de temps de malaxage dépassant les trois minutes. Cette limite à la résistance d'orniérage exige une température entre 120°C et 155°C. Concernant l'additif, on remarque que plus le taux d'additif est supérieur à 1% plus la résistance de l'enrobé recyclé est bonne vis-à-vis l'orniérage. Cela traduit le remplacement des fillers par la poudrette des caoutchoucs comme mentionné au chapitre précédent. Par contre pour les agrégats d'enrobé un taux supérieur à 60% peut augmenter l'orniérage et un taux de 15% jusqu'à 45 % donne un enrobé recyclé de qualité.

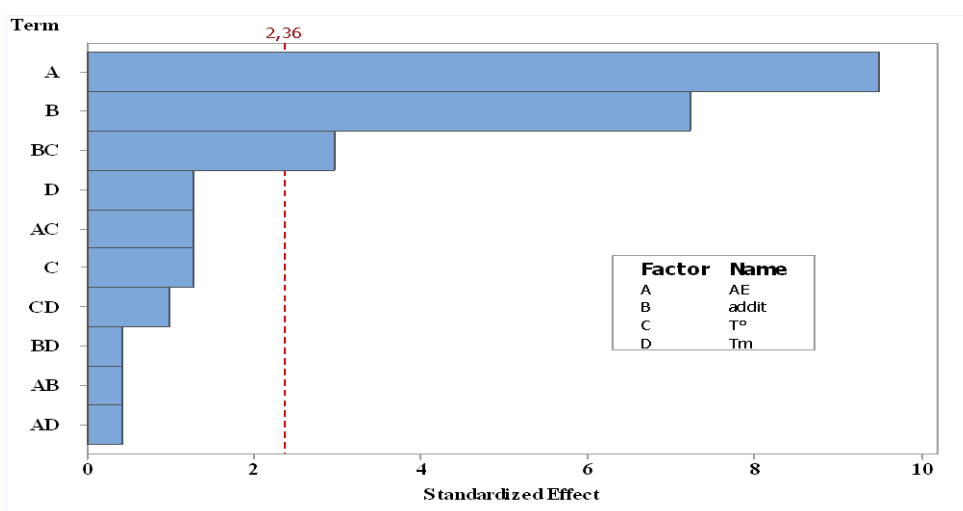


Fig. 4.7. Effets des facteurs sur l'orniérage suivant le graphe de PARITO

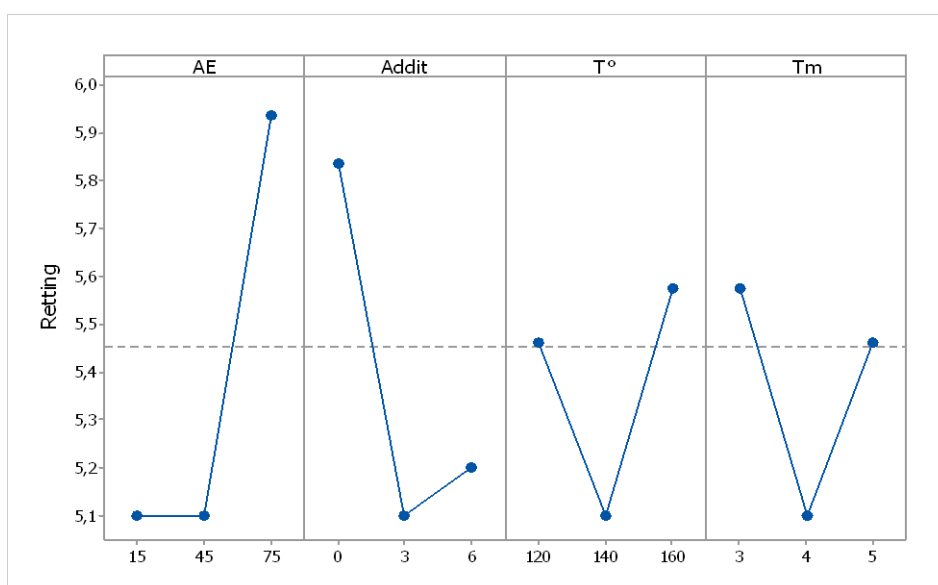


Fig. 4.8 : Effets des facteurs sur l'orniérage

4.7. Optimisation de la fabrication des enrobés recyclés

L'optimisation a pour tâche de chercher une réponse (Orniérage) rapide et efficace soit pour les scientifiques ou pour l'industriel. Dans cette étude l'efficacité se trouve entre la qualité des enrobés recyclés et la maîtrise du dosage des différents composants lors de la fabrication, pour ce but que les résultats des essais précédents ont été exploités afin de créer un graphique qui servira de référence pour les exploitants de la centrale d'enrobé pour confectionner un enrobé recyclé suivant les recommandations du cahier de charge du maître d'ouvrage. Comme il a été mentionné dans ce chapitre, la performance mécanique recherchée est la résistance à l'orniérage (un faible orniérage).

D'après (fig.4.9), représentant les surfaces d'orniérage en fonction des agrégats d'enrobé et la poudre de caoutchouc avec une température fixée à 160° et un temps de malaxage de 4 minutes, on remarque que pour un pourcentage d'agrégats d'enrobé de 0% à 40% et un pourcentage de poudre de caoutchouc de 0,4% à 6% l'orniérage est de bonne qualité, car il est inférieur à l'orniérage de référence. Cela traduit la remobilisation du liant vieil ainsi que la transformation de l'additif en un liant et le liant modifié devient compatible avec la formulation, par contre au-delà de 40% des agrégats d'enrobé et le même pourcentage d'additif, l'orniérage commence à se développer et il dépasse la valeur de 5,40 %.

Dans ce cas, le pourcentage du liant dans le corps d'enrobé recyclé commence à s'augmenter, ce qui empêche la remobilisation de l'ensemble du liant vieil. Ainsi, ce pourcentage donne une flexibilité élevée au enrobé recyclé. Pour un taux d'additif de 0% à 2% et pour un pourcentage de 0% à 40% d'agrégats d'enrobé, l'orniérage est dans la plage acceptable.

D'après (fig.4.9), on peut se limiter à 40% pour avoir un enrobé de bonne qualité vis-à-vis l'orniérage avec un pourcentage de 1% jusqu'à 6% de poudre de caoutchouc d'après la figure (fig.4.10).

Aussi, l'optimisation a permis de déterminer les Courbes d'iso-réponses d'orniérage dans la figure (fig.4.10). C'est un outil pour faciliter au bureau d'étude et au fabricant des enrobés le choix des doses en fonction de la résistance à l'orniérage désiré.

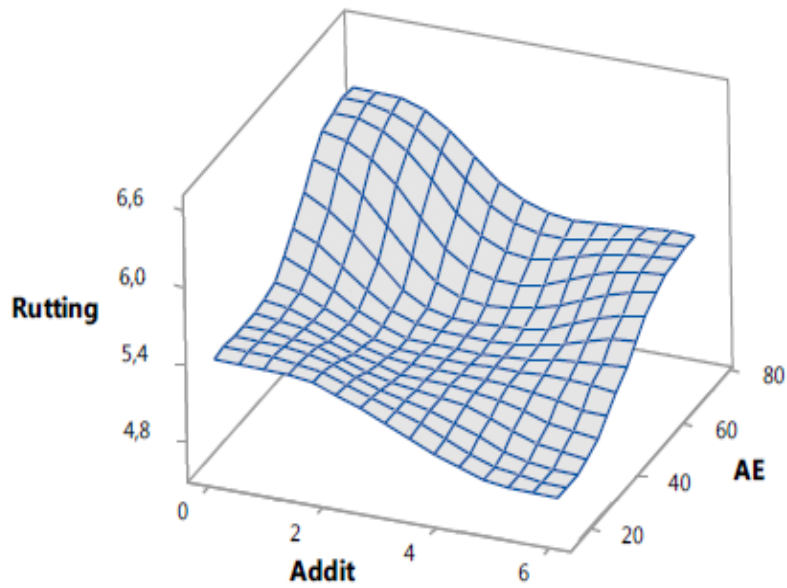


Fig.4.9 : diagramme de surface d'orniérage Agrégat d'enrobé et l'additif [50].

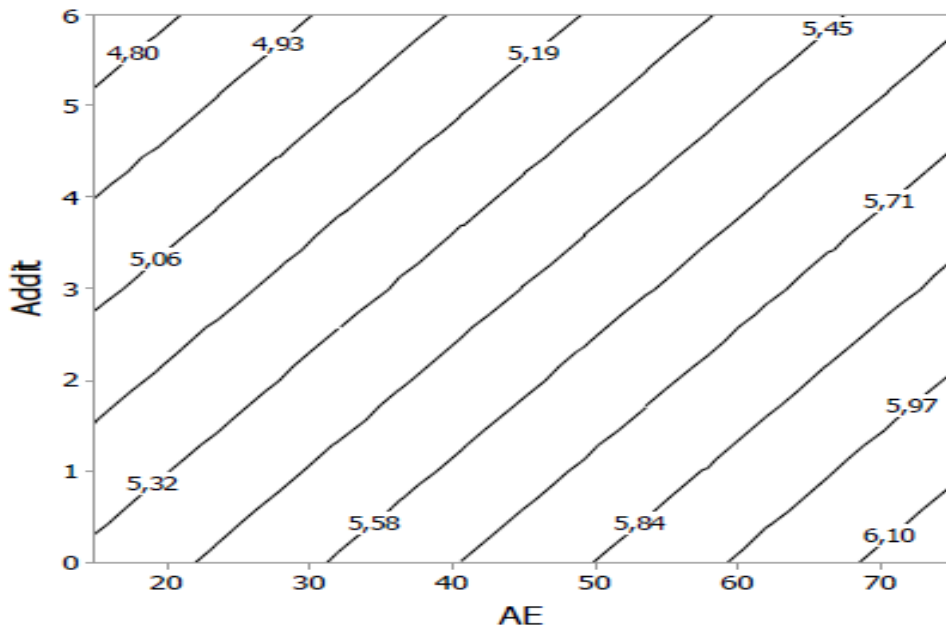


Fig.4.10 : la Courbes d'iso-réponses d'orniérage Agrégat d'enrobé et l'additif [50].

4.8. Effet de l'environnement sur les performances mécanique des enrobé recyclés

Cette deuxième partie est consacrée à la vérification du comportement des enrobés recyclés vis-à-vis de l'environnement. Il est bien connu que les chaussées subissent des chargements consécutifs aux variations de température. Ces variations thermiques entraînent des changements de la rigidité du mélange. On se basant sur l'hypothèse qui

dit, si la température est basse le mélange bitumineux devient rigide et fragile, tandis qu'à haute température la rigidité du mélange chute et sa ductilité augmente. Pour cette raison nous avons programmé la campagne des essais suivant :

Les échantillons des essais dans les chapitres précédents sont réalisés à une température ambiante. Pour valoriser la fabrication des enrobés recyclé, un contrôlé a été effectué sur l'orniérage pour des échantillons conservés à des températures reflétant le climat de la région d'étude. Une température qui dépasse les 50°C dans la période estival et -2,5°C dans la période hivernal. Le découpage géographique de l'Algérie se répartie en trois zones climatiques I, II et III, leurs caractéristiques sont illustrées dans le tableau suivant (Guelma zone II).

Tableau (4.6): Les zones climatiques dans l'Algérie [51]

caractéristiques Zones	Température maximale C°	Température minimale C°	Hauteur de précipitation annuelle
I	≤ 45° C	-2,5°c≤Tmin≤2,5°c	H ≥ 600 mm
II	45°C< Tmax ≤ 50°C	< -2,5° C	H < 600 mm
III	> 50°C	≥ -5° C	H < 100 mm

4.8.1. Protocole d'essais

Les éprouvettes ont été confectionnées de la même manière que les essais précédents sous des températures de fabrications de 140°, mais elles ont été conservées à des températures extrêmes pendant 20 jours (la période la plus longue enregistré par les services météo de la wilaya de Guelma).

Aussi, les échantillons d'essais sont confectionnés par la même procédure du programme de plan d'expériences précédent, mais elles ont été traité avec trois procédés. Dans le premier procédé le mélange contient que les agrégats d'enrobé avec les pourcentages (0%,15%,45% et 75%), dans le deuxième procédé la poudrette des caoutchoucs a été ajouté au mélange avec un pourcentage de 3% et dans le dernier procédé la poudrette prend le pourcentage de 6%.

4.8.2. Résultats des essais et discussions

Dans l'analyse des résultats de cette partie en garde toujours l'orniérage de référence égale 5.4 mm et on adopte un orniérage autorisé inférieur à 7.5 % suivant la norme [EN 126976-22].

D'après les résultats de la (fig.4.11) en remarque qu'à une température de conservation de 50°, les caractéristiques mécanique des enrobés recyclés ont connu des changements

vis-à-vis la résistance à l'orniéage. Pour l'enrobé sain le développement d'orniéage est très faible mais pour un ajout de la poudrette jusqu'à 6% l'orniéage passe de la valeur de 5.4 % à 5.6 %, ce qui traduit que le liant modifié dans le corps d'enrobé recyclé a commencé de changer ses caractéristiques, malgré que la pénétrabilité a gardé sa valeur dans les conditions normales.

Pour le mélange contenant 15% d'agrégat d'enrobé, les résultats ont donné une résistance satisfaisante à l'orniéage ($Orn \leq 7.5\%$) malgré l'évolution de ce dernier à la présence de la poudrette des caoutchoucs. Cela explique l'excès du pourcentage du liant modifié dans le corps d'enrobé recyclé provoquant le changement rhéologique du mélange. L'orniéage commence à prendre des valeurs élevées égale (6.8 %) avec 6% d'additif et la pénétrabilité aussi passe à des valeurs importantes.

Pour les mélanges contenant 45% à 75% d'agrégat d'enrobé, l'orniéage enregistre une augmentation importante pour les mélanges avec poudrette des caoutchoucs. Les valeurs inscrites ont dépassé la norme et la pénétrabilité atteignent des valeurs très élevés voir tableau.4.4.

À partir de la (fig.4.11), on peut limiter les pourcentages des agrégats d'enrobé donnant un enrobé recyclé de qualité acceptable par la norme, à un mélange contenant 3% de poudrette de caoutchoucs et jusqu'à 65 % d'agrégat d'enrobé. Par contre pour un mélange ou la poudrette des caoutchoucs est de 6%, les agrégats d'enrobé ajoutés doivent être inférieur à 40%, pour avoir un enrobé recyclé résistant à l'orniéage ($Orn \leq 7.5\%$).

Pour les mélangé sans poudrette des caoutchoucs la résistance à l'orniéage est très satisfaisante pour tous les ajouts en agrégats d'enrobé (0%,15%,45% et 75%).

Pour une température de conservation très basse $\leq 2.5\text{ C}^\circ$, les résultats de la figure (fig.4.12) montrent que les enrobés recyclés, sans poudrette de caoutchouc ont bien résisté à l'orniéage quel que soit le pourcentage des agrégats d'enrobés. En opposition, les enrobé recyclés avec 6 % d'additif résistent bien à l'orniéage pour 15% d'agrégat d'enrobé. Mais avec 45% d'agrégat d'enrobé et 6% de poudrette de caoutchoucs, l'enrobé recyclé a connu une cassure lors d'essais d'orniéage dans le cycle 9800.

Ce phénomène est justifié par la pénétrabilité réduite enregistré dans le tableau.4.7. Tandis que pour l'enrobé recyclé de 3% d'additif, l'échantillon avec 75 % d'agrégat d'enrobé se casse après 10200 cycle par contre pour un taux de 45% ou 15% d'agrégat d'enrobé mélanges ont enregistré une résistance à l'orniéage de 6.8% pour 45% d'agrégat d'enrobé et 5.7% pour 15% d'agrégat d'enrobé. Ce comportement de résistance se traduit par la pénétrabilité normalisé du liant modifié.

À partir de ces résultats, on peut conclure que la poudrette de caoutchoucs est un ajout qui peut diminuer la résistance d'enrobé recyclé et limite le taux des agrégats d'enrobés dans le mélange à la présence d'un climat extrême comme mentionné dans les essais précédents et la 4.13 présente la zone autorisée pour déterminer la résistance à l'orniérage des enrobés recyclés par les Courbes d'iso-réponses d'orniérage d'un enrobé recyclé en fonction de la poudrette des caoutchoucs et des agrégats d'enrobés d'agrégat d'enrobé.

Tableau .4.7 : Pénétrabilité des liants modifier d'enrobé recyclé

Temperature de conservation	Agregats d'enrobé	additif	Penetrabilité
50 °	0%	0 %	42
	15 %	0 %	42
	45 %	0 %	40
	75%	0 %	41
	0%	3%	40
	15 %	3%	39
	45 %	3%	39
	75%	3%	35
	0%	6%	41
	15 %	6%	40
	45 %	6%	37
	75%	6%	38
-2.5°	0%	0 %	37
	15 %	0 %	37
	45 %	0 %	35
	75%	0 %	35
	0%	3%	37
	15 %	3%	35
	45 %	3%	34
	75%	3%	32
	0%	6%	35
	15 %	6%	35
	45 %	6%	29
	75%	6%	28

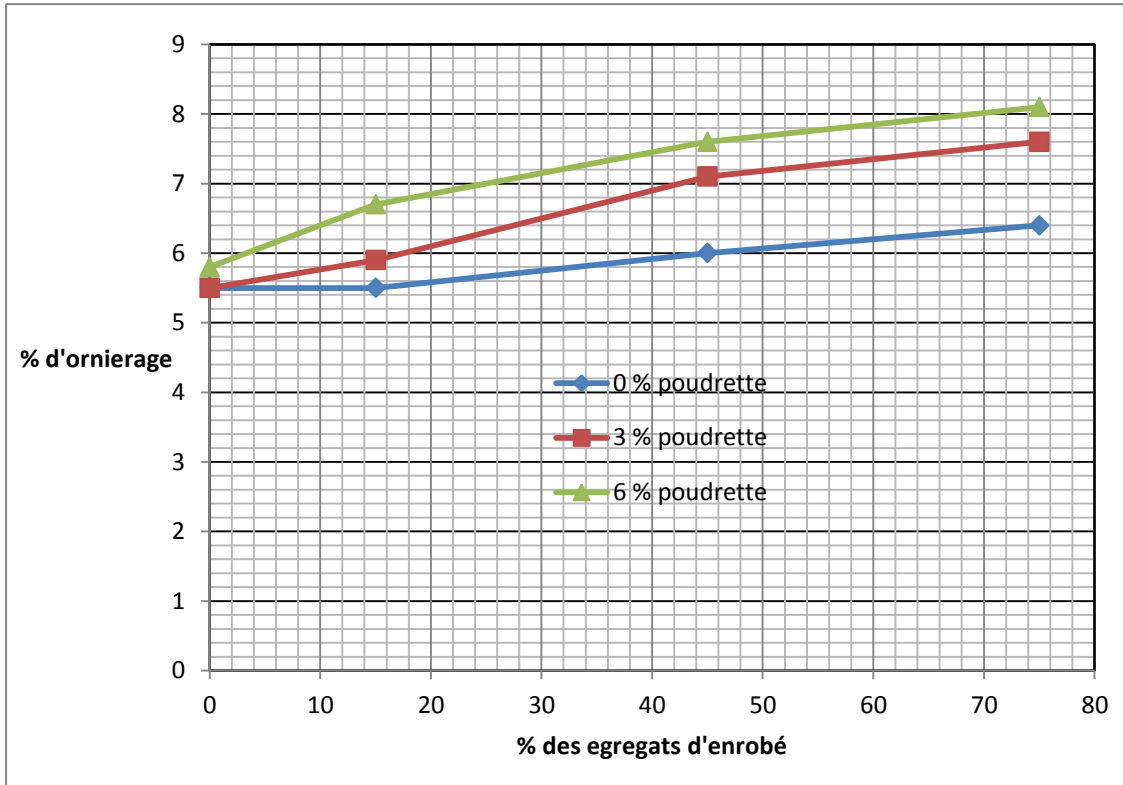


Fig.4.11 : Comportement des enrobés recyclé à l'ornièrage dans un climat chaud (50°).

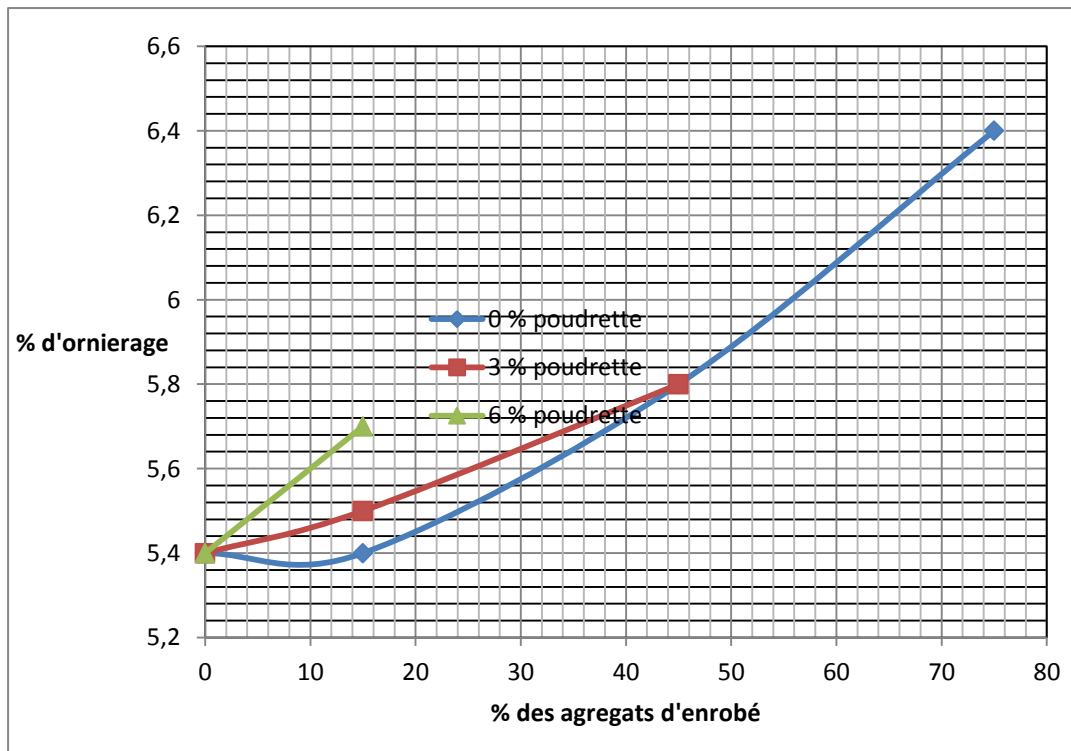


Fig.4.12 : Comportement des enrobés recyclé à l'ornièrage dans un climat chaud (-2°)

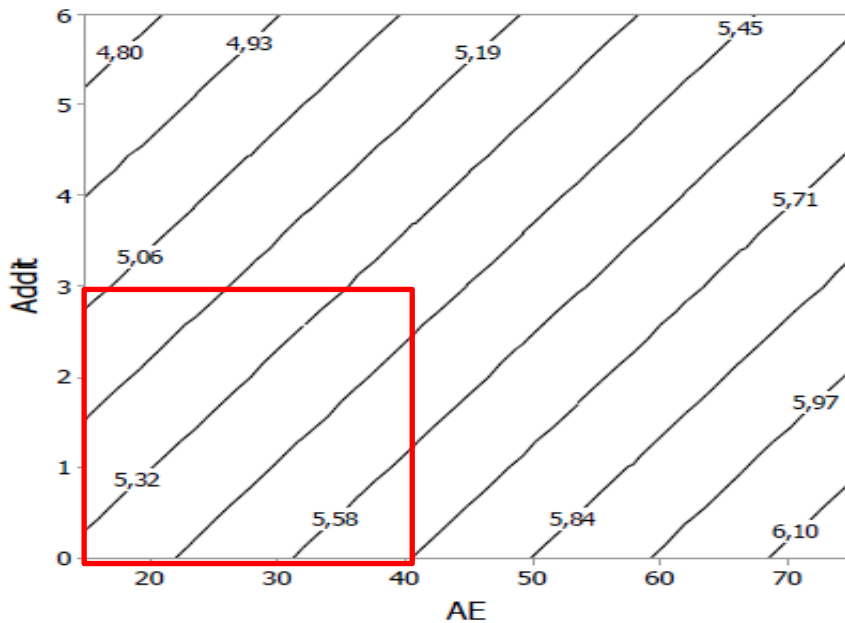


Fig.4.13 : Limite de la Courbes d'iso-réponses d'orniérage Agrégat d'enrobé et l'additif

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons déterminé le domaine de qualité d'orniérage en fonction de la poudre de caoutchouc est déterminé. Donc, le contrôleur ou le fabricant des enrobés recyclés ont la capacité, à partir de la formule Eq.4.3 et le fig.4.10, de prévoir l'orniérage. À partir des résultats obtenus, on peut conclure que :

1. L'effet de la poudre de caoutchouc est très important, car il assure une augmentation de la résistance vis-à-vis d'orniérage par son pouvoir d'améliorer les caractéristiques du liant modifié (liant neuf, liant vieilli, ajout). D'enrobé recyclé et le rendant compatible avec les enrobés recyclés.
2. La modélisation par l'utilisation des méthodes des plans d'expérience permet de déterminer l'équation (Eq.3.3) et le diagramme de surface d'orniérage par lesquelles on peut estimer l'orniérage pour différents taux des facteurs étudiés.
3. L'étude montre qu'on peut atteindre un taux de 75 % d'agrégats d'enrobé dans le mélange d'enrobé recyclé tout en gardant les performances mécaniques de bonne qualité suite à l'ajout de la poudre.
4. Ce travail montre que le temps de malaxage lors de la préparation des enrobés recyclés, se limite à 3 minutes pour un faible taux par contre on peut arriver à 5 minutes pour des taux élevés. Ainsi, la température de malaxage se limite de 120° à 150°C.

5. Cette étude nous a permis de maîtriser la préparation du liant d'apport modifié (liant neuf + additif) dans le but d'avoir les mêmes caractéristiques du liant d'enrobé recyclé (liant neuf+additif+liant vieilli) lors de l'ajout des agrégats d'enrobés. Cela facilite la fabrication des enrobés recyclés à fort taux d'agrégats d'enrobés en centrale.
6. À basse température le bitume possède un comportement fragile.
7. On peut éviter la fissuration à basse température si on utilise un bitume de grade élevé, c'est-à-dire un bitume moins "dur", et donc moins "cassant" à basse température.
8. À température élevée le bitume ne résiste pas bien à l'orniérage (déformations permanentes de la chaussée).
9. Le bitume idéal doit donc être à la fois le moins susceptible possible aux phénomènes de fissuration thermique (à basse température) et d'orniérage (à température élevée).

CONCLUSION GENERAL

CONCLUSION GENERAL

La présente recherche répond à une question d'environnement, d'une part et de performances mécaniques des enrobés d'autre part par, la prise en compte des critères de développement durable concrétisée dans le domaine de la construction routière et cela par la mise en œuvre d'actions visant à réduire l'utilisation de matières premières non renouvelables.

Les objectifs de ce travail étaient :

- La fabrication d'un enrobé à base des déchets des route et des caoutchoucs.
- Étudier les Limites des méthodes traditionnelles d'essais-erreurs, car les essais classiques ne permettent pas toujours d'optimiser le produit ou le processus. En effet, le principe même des essais conduit le plus souvent à emprunter un chemin labyrinthique et à s'arrêter dans le meilleur cas à la première solution jugée satisfaisante.
- Proposer une solution par l'utilisation de la méthode des plans d'expérience, et déterminer les performances mécaniques désirées en optimisant les facteurs suivant les exigences souhaitées.

Dans ce cadre une campagne d'essais a été effectuée dans les laboratoires de constructeur routier Japonais et le laboratoire CETE d'ANGERS France. Le programme d'essais est commencé avec un objectif de vérifier la possibilité de formuler un enrobé recyclé par l'ajout d'agrégat d'enrobé récupéré de fraisage de la route national RN21 Pk 45.00 Ppk 46.00, et la poudrette des caoutchoucs issu des pneus et raffiné à l'unité de Oued Smar Alger. Une formulation avec des matériaux sains est réalisé servant de référence, puis des formules avec des dosages différent d'agrégat d'enrobé et de la poudrette.

Les essais de la première phase ont été bien confectionnés et ils sont réalisés suivant les protocoles normalisés. L'essai Marshal cherche à déterminer le fluage comme un facteur primordial dans la qualité des enrobés et les prélèvements cylindrique ont été l'objet de la vérification de la compacité comme une qualité à contrôlé lors de l'exécution. Les résultats ont donné une lecture très claire des facteurs influençant la formulation des enrobés recyclés. Le premier est l'influence de température de la fabrication. Elle a une limite inferieur de (+120°C) pour remobiliser les caractéristiques du liant vieil et la poudrette des caoutchoucs qu'il devient un liant possédant les caractéristiques d'un liant neuf. Le mélange (liant neuf +liant vieil remobilisé ou liant neuf + liant de la poudrette) donne une compatibilité proche à celle du liant neuf. La deuxième lecture concerne

l'influence du taux des ajouts (agrégat d'enrobé ou poudrette des caoutchoucs) sur la qualité des enrobés recyclés. Elle se traduit par la limitation des pourcentages des ajouts afin de ne pas consommer une température très élevée, d'où la nécessité de chercher une formule d'optimisation définissant les différents facteurs (température, agrégat d'enrobé et poudrette des caoutchoucs) en amont pour une qualité désirée. Cette démarche est impossible à l'effectuer par les essais classiques qui :

- Conduisent à des conclusions nécessitant des remises en cause fréquentes,
- Impliquent une durée de campagne expérimentale longue,
- Donnent une connaissance très relative des influences des facteurs,
- Ne permettent pas de prévoir le comportement du système étudié pour des valeurs non testées des paramètres,
- Manquent un peu de formalisme, de rigueur et de méthode pour capitaliser et valoriser l'expérience technique.

Cet handicap a fait appel à une méthode qui peut répondre à la question d'optimisation comme une solution pour les techniciens de suivi ou dans les centrales de fabrications des enrobés recyclés, cette méthode est la méthode des plans d'expérience.

Le programme des essais, pour contrôler l'orniérage et la pénétrabilité est choisi par cette méthode, dont les facteurs sont désignés et ainsi que la réponse, comme élément de qualité. Les résultats ont donné une réponse claire par l'optimisation des différents facteurs de l'équation (Eq4.3) qui a la capacité de prévenir l'orniérage en fonction des facteurs (agrégats d'enrobé, poudrette des caoutchoucs, la température de fabrication et le temps de manufacturations). Ainsi, cette étape a éclaircie l'interaction entre les facteurs à travers le graphe du PARITO justifiant la conclusion du chapitre III. Concernant l'effet de la température sur la remobilisation des liants vieillis et la transformation de la poudrette à un liant. Par ailleurs, l'étude permet d'obtenir un graphe en d'iso- réponse servant comme solution très rapide pour évaluer l'orniérage par les acteurs techniques.

Pour valoriser l'exactitude à cette optimisation, les résultats obtenus ont été testé dans un environnement réel. Puisque pour avoir un enrobé recyclé se comportant bien à l'orniérage et résistant aux effets climatique, on doit limiter le pourcentage de dosage en agrégat d'enrobé et poudrette des caoutchoucs dans la figure (fig.4.13).

Par cette recherche, on a pu déterminer l'influence du liant d'apport sur la qualité visée, ainsi que, les différents paramètres en interaction avec le liant d'apport.

La présente étude est réalisé sur des BBSG, en perspectives il est possible d'étudier d'autres types d'enrobés recyclés tel que les BBME qui commence à dominer les

autoroutes algérienne. L'étude va être élargie aussi au cycle de vie des enrobés recyclés dans le but d'améliorer les performances et les méthodes de réalisation.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [01] J.PACKER., M.TENNEY, C.AND WHITE, (1980). 'The bible almanac', Thomas Nelson, Nashville, pp. 297.).
- [02] Doncaster College (E), (1999). 'Bituminous materials: Manufacture', Doncaster, pp. 21-22,34.
- [03] J.NICHOLLS, (1997). 'Asphalt surfacings' E&F Spon, London and New York, pp. 1-4.
- [04] Education Resources, (2002). 'Key dates in land, road, building Great Britain 1200 -1899'.
- [05] Department for Transport, United Kingdom (2004) the changing climate: its impact on the Department for Transport. Report from the Department for Transport, United Kingdom.
- [06] The European Union Road Federation (EURF), (2002). 'European road statistics 2001.
- [07] A.Bacmi , (1992). 'Bituminous mixes and flexible pavements: An introduction',Bacmi Ltd, London, pp. 104.
- [08] Shell Bitumes, Techniques et Utilisations, Ed. Société des Pétroles Shell, 1991.
- [09] O.FRANÇOIS «Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux aux basses températures : relations entre les propriétés de liant et de l'enrobé »Thèse de Doctorat, paris : Ecole Nationale des Travaux Publics de l'État 2003, 175 p.
- [10] R .DUPAIN, R .LANCHON, C.SAINT ARROMAN « Granulats, Sols, Ciments Et Bétons» 2e édition conforme aux normes européennes 2009.
- [11] L.EL BEZE « recyclage à chaud des agrégats d'enrobes 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.
- [12] J.BERTHIER «Granulats et liants routiers» techniques de l'ingénieur, traité construction.
- [13] B.LOMBARDI «liants hydrocarbonés» Edition T.I 2006.
- [14] J.MALLOUK « Les Enrobées Bitumineux » Tome : 1 Théorie Edition Modulo 2006.
- [15] Comité technique AIPCR des routes souples, Comité technique AIPCR des caractéristiques de surface « Les Enrobes Drainants» Belgique1993, P135.
- [16] S.LAMOTHE «Enrobe Grenu : Influence Du Dosage En Filler Et De L'ajout D'un Sable Roule Sur La Couple Ouvrabilité Orniérage» Mémoire présenté à l'école de technologie supérieur de l'université de Québec ,2004.
- [17] A.ZEMMIRI «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, 112 p.
- [18] R.PARANHOS « Approche Multi-Echelles Des Emission D'un Procédé D'élaboration Des Enrobes A Chaud» thèse du doctorat de l'université de ROUEN, février 2007.
- [19] Guide technique «Recommandations sur l'utilisation des bitumes et des enrobés bitumineux à chaud», fascicule 2 (La formulation), CTTTP, Février 2004.

- [20] S.MAÏMOUNA «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.
- [21] J.D.BERTHE «Caractérisation Des Déformations D'orniérage Des Chaussées Bitumineuses » Thèse de doctorat de l'institut national des sciences appliquées des Lyon., 2005, 264 p.
- [22] B.ALI, I.SHAHROUR, K.WOZNICA «Etude du comportement mécanique des chaussées souples application à la prévision de l'orniérage» communication au 17ème Congrès Français de Mécanique.
- [23] H.BAAJ., P.DORCHIES, D.PERRATON et B.TESSIER , Module Complexe et Comportement à Basse Température des Enrobés Bitumineux Modifiés aux Bardeaux d'Asphalte, Proceedings, Canadian Technical Asphalt Association, 26, 315-240 (2004).
- [24] M.NGUYEN « Étude de la fissuration et de la fatigue des enrobés bitumineux» Thèse de doctorat de l'institut national des sciences appliquées des Lyon. 2009, 264 p.
- [25] H.BAAJ, H.Di BENEDETTO et P.CHAVEROT. Effect of binder characteristics on fatigue of asphalt pavement using an intrinsic damage approach, Journal, Road Materials and Pavement, 28, 147-174 (2005).
- [26] H.Di BENEDETTO et J-F.CORTÉ (J-F.), Matériaux routiers bitumineux, Tome2, Hermès, ISBN 2-7462-0960-8
- [27] Caterpillar Paving Products. (2000). – Understanding Mat Defects. An interactive CD-ROM from Caterpillar Paving Products, Caterpillar, Inc. Champlin , MN.
- [28] Ministère des Transports du Québec. – Guide de mesure et d'identification des dégradations des chaussées souples, Québec 2007, ISBN 978-550-49456-0.
- [29] A.CHETTAH «Comportement vibro acoustique des structures élaborées à partir de poudrettes de pneus recyclés» Thèse de doctorat de l'École Centrale de Lyon : Université de Reims, Novembre 2008, 237 p.
- [30] VERSTRAETEN «Enrobés Bitumineux à Haut Résistance à L'orniérage Par Fluage » Comité Technique AIPCR des routes souples, Belgique.
- [31] H.BAAJ, M.ECH, N.RICHARD (N.), E.VILLARD , P.TOUBEAU et S.BROCAS, Procédé de fabrication d'une composition hydrocarbonée, Brevet, numéro de publication WO/2011/042647.
- [32] M.ECH, Durabilité de la surface de chaussée : influence de la nature du bitume sur la pérennité des couches de roulement, thèse de doctorat, Univ. Bordeaux I, No.D'ordre 3530, Année 2007.
- [33] J.NAVARO, « cinétique de mélange des enrobés recyclés et influence sur les performances mécaniques» thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers ,le 25 mai 2011
- [34] Technique bitume Québec numéro 03 Octobre 2010
- [35] Recyclage en centrale des matériaux de chaussée Techniques de l'Ingénieur Date de publication : 10/08/2008
- [36] A.OLGA , «comportement rhéologique et propriétés cohésives et adhésives des liants bitumineux» Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l'Université de Laval, avril 1998, 172 P.
- [37] W .GOTTFRIED et F.MONTAGNE « Matériaux polymères : structure, propriétés et applications » paris, editor 2000 : hermès science publication.

- [38] J. BONNOT et F. PEREZ « Matériaux bitumineux spéciaux » Bulletin de Liaison du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1986.
- [39] A. AIT-KADI, B. BRAHIMI et S. KAUB « Rheological Properties of Polymer Modified Asphalt » Proceedings ANTEC 94, San Francisco, (1994).
- [40] A. AIT-KADI et B. BRAHIMI et M. BOUSMINA , « Polymer Blenders for Enhanced Asphalt Binders » J. Polym .Eng.Sci, 36, N°12.
- [41] G. SADO, M. C. SADO, Les plans d'expériences, de l'expérimentation à l'assurance qualité, Collection AFNOR, 1991.
- [42] P. SCHIMMERLING, J.C. SISSON, A. ZAIDI, Pratique des plans d'expériences, Technique & documentation, 1998.
- [43] R.A. FISHER, The Design of Experiments, Oliver and Boyd, Ed. Edimbourg 5^{ème} édition, 1949.
- [44] W.G. COCHRAN, G.M. COX, Experimental design, 2^e édition Wiley, 1957
- [45] YATES, the Design and Analysis of Factorial Experiments, Bulletin 35, Imperial Bureau of Soil Sciences, Harpenden Macmillan, 1937.
- [46] L. PLACKETT, P. BURMAN, The design of optimum multifactorial experiments, Biometrika n°3, 1946.
- [47] G.E.P. BOX, W.G. HUNTER, J.S. HUNTER, Statistics for Experimenters, An introduction to design, Data analysis, and Model Building, Wiley, Ed. New York, 1978.
- [48] G. TAGUCHI, Introduction to quality Engineering, Asian Productivity Organisation. American Supplier Institute Inc. Unipub-Kraus, 1986.
- [49] G. TAGUCHI, S. KONISHI, Taguchi Methods- Orthogonal Arrays and Linear Graphs, American Supplier Institute Inc. Dearborn, U.S.A. 1987.
- [50] A. BORDJIBA , A. HACENCHAOUCH ABDELMADJID , M. GUENFOUD, H. GUENFOUD, Effect of Recycled Asphalt Aggregates on the Rutting of Bituminous Concrete in the Presence of Additive, Arab J Sci Eng (2016) 41:4139–4145
- [51] MTP (Ministère des travaux publics) : « Protocole de contrôle revêtement béton bitumineux de CTTP et les recommandations de CTTP sur l'utilisation des bitumes et des enrobés bitumineux à chaud » 2004.