

République Algérienne Démocratique et Populaire

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



Ecole Nationale Supérieure
des Travaux Publics
المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية

Mémoire

Pour l'Obtention du Diplôme de MASTER

Filière : travaux publics

Spécialité : Infrastructures de Base

Thème

**Etude de l'influence de l'ajout de chaux hydratée
sur la sensibilité à l'eau d'un béton bitumineux**

Encadré par :

MABROUKI Khaled
GUERIDI Fatima

Présenté par :

NECIB Walid

Proposé par :

CTTP ALGER

Promotion 2015

Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics. Garidi. Kouba.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

SOMMAIRE

SOMMAIRE

SOMMAIRE	i
REMERCIEMENT	x
DÉDICASE	ix
RÉSUMÉ	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAP I.GÉNÉRALITES SUR LES ENROBÉS	3
1. INTRODUCTION.....	3
2. ENROBÉ BITUMINEUX.....	4
3. LIANT HYDROCARBONÉ.....	4
4. FAMILLES D'ENROBÉS BITUMINEUX.....	6
4.1 Produits Chauds.....	6
4.2 Produits Froids.....	6
5. PRINCIPAUX TYPES D'ENROBÉS BITUMINEUX.....	7
5.1 Béton Bitumineux Noir (Enrobés Noir).....	7
5.2 Enrobés Colorés.....	8
5.3 Enrobes Drainants.....	9
6. Qualité.....	10
7. Mise en œuvre.....	10

CHAP II . DÉGRADATIONS DES CHAUSSÉES SOUPLES	12
1. INTRODUCTION.....	12
2. TYPES DE DÉGRADATIONS DES ASSISES DE CHAUSSÉE	12
2.1 DÉFORMATIONS DE CHAUSSÉES.....	12
2.1.1. Orniérage à grand rayon	12
2.1.2. Affaissement de rive.....	13
2.1.3. Affaissement hors rive (flashe)	13
2.2 Fissuration	14
2.2.1 Fissuration transversale.....	14
2.2.2 Fissuration longitudinale en bande de roulement.....	14
2.2.3 Fissuration longitudinale non spécifique à bande de roulement.....	15
2.2.4 Fissuration d'adaptation	15
2.2.5 Faïençage dans les bandes de roulement	16
3. DÉGRADATIONS DE COUCHE DE ROULEMENT	16
3.1 Glaçage Ou Indentation	16
3.2 Ornière à petit rayon	17
3.3 Fissuration Anarchique.....	17
3.4 Désenrobage	18
4. FORMATION DES NIDS DE POULE.....	18
5. CAUSES PROBABLES DES DÉGRADATIONS.....	19
5.1 ROLE DU TRAFIC.....	19
5.2 ROLE DE LA TEMPERATURE.....	19
5.2.1 TEMPÉRATURES ESTIVALES	19
5.2.2 Températures Hivernales	20
5.3 ROLE DE L'EAU	20
6. SOLUTIONS ENVISAGEABLES.....	21
CHAP III . TRAITEMENT D'ENROBÉ BITUMINEUX A LA CHAUX.....	23
1. HISTORIQUE DE TRAITEMENT A LA CHAUX.....	23
2. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.....	24
2.1 PUBLICATION DE MOHAMMED H. AL-SAYED.....	24
2.2 PUBLICATION DE BAHA VURAL KOK ET MEHMET YILMAZ.....	25
2.3 OBJECTIF DE L'ETUDE.....	27
2. DÉFINITION DE LA CHAUX.....	28
3. CYCLE DE LA CHAUX	28

4. TYPES DE CHAUX	29
4.1. Chaux vive	29
4.2. Chaux Eteinte(Hydratée).....	29
5. AMELIORATIONS APPORTEES AUX ENROBÉS.....	30
5.1 Résistance au désenrobage	30
5.2 Résistance à l'orniérage	31
5.3 Ralentissement du vieillissement du bitume	31
5.4 Diminution De La Fragilité.....	32
6. MÉTHODE D'INCORPORATION DES RÉACTIFS.....	33
6.1 Méthode humide	33
6.2 Méthode sèche.....	33
6.3 Ajout en centrale d'enrobage.....	33
7. TECHNIQUE DE L'AJOUT DE CHAUX A L'ENROBÉ.....	34
7.1 Problématique De Tenue A L'eau Et L'action Gel/Dégel	34
7.2 Mécanismes Du Traitement Des Enrobes A La Chaux Hydratée	34
7.21 EFFET SUR GRANULATS	34
7.22 EFFET SUR BITUME	35
CHAP VI .PRÉSENTATION DES ESSAIS DISPOSITIFS UTILISÉS	38
1. INTRODUCTION.....	38
2. PROVENANCE DES MATÉRIAUX D'ÉTUDE	38
3. CLASSIFICATION DES GRANULATS ROUTIERS	38
4. PRINCIPAUX ESSAIS PROPRES AUX GRANULATS.....	39
4.1 Analyse Granulométrique (NA 2607).....	39
4.2 Essai d'équivalent de sable (NF P 18-598).....	39
4.2. Essais de résistance à l'usure et au choc des granulats (NA 5129)	40
4.3. Résistance au choc (essai Los Angeles) (norme NA5130).....	40
4.4. Densité réel (norme NA255)	40
5. PRINCIPAUX ESSAIS DES BITUMES ROUTIERS.....	41
5.1. Pénétrabilité (NF EN 1426).....	41
5.2. TEMPÉRATURE RAMOLLISSEMENT BILLE ET ANNEAU (NF EN 1427)	41
5.3. ESSAI DE DUCTILITÉ A 25°C (NORME NA 5223).....	42
5.4. DENSITÉ RELATIVE.....	42

CHAP V .FORMULATION DE L'ENROBÉ BITUMINEUX	44
1. INTRODUCTION.....	44
2. DÉMARCHE DE FORMULATION DE L'ENROBÉ BITUMINEUX	44
3. MÉTHODOLOGIE DE FORMULATIONS DES ENROBÉS ALGÉRIENNE.....	45
4. APPLICATION SUR NOTRE PROJET	47
4.1 MATÉRIAUX UTILISÉS.....	47
4.2 IDENTIFICATION DES CONSTITUANTS.....	48
4.2.1 GRANULATS.....	48
4.2.2 BITUME.....	51
4.3 FORMULATION DU MÉLANGE BB 0/14	52
4.3.1 DÉTERMINATION DU MÉLANGE GRANULAIRE OPTIMAL	52
4.3.2 DÉTERMINATION DES TENEURS EN BITUME.....	53
4.3.3 COMPOSITION DES MÉLANGES.....	53
CHAP VI .INFLUENCE DE L'AJOUT DE LA CHAUX SUR L'ENROBÉ.....	59
1. INTRODUCTION.....	59
2. FABRICATION DE L'ENROBÉ MODIFIÉ A LA CHAUX.....	59
2.1 PRÉPARATION DES MÉLANGES.....	59
2.2 ÉTAPES DE FABRICATION DE L'ENROBÉ MODIFIÉ	60
2.3 ESSAI DE DÉTERMINATION DE SENSIBILITÉ AL'EAU DES ÉPROUVETTES BITUMINEUSES	62
3. ANALYSE DE BÉTON BITUMINEUX TRAITÉ A LA CHAUX	65
3.1 Éprouvettes conservées à sec :	66
3.2 Éprouvettes après l'immersion pendant 3 jours :	67
3.3 Calcul de la tenue à l'eau :	68
4. INTERPRETATION DES RESULTATS	69
5. CONCLUSION.....	70
CONCLUSION GÉNÉRALE	72
BIBLIOGRAPHIE.....	82

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1:DIFFERENTES CLASSES DE CHAUX HYDRATEE	30
TABLEAU 2:CLASSIFICATION DES BITUMES SELON LA PENETRABILITE ET TBA.....	42
TABLEAU 3:FUSEAU GRANULOMETRIQUE BB 0/14	45
TABLEAU 4: LES VALEURS USUELLES DU MODULE DE RICHESSE POUR LE BETON BITUMINEUX	45
TABLEAU 5:PROVENANCE DES GRANULATS UTILISES.....	47
TABLEAU 6:CARACTERISTIQUES INTRINSEQUES DES GRANULATS.....	48
TABLEAU 7:RESULTATS DES ESSAIS.....	49
TABLEAU 8: RESULTATS DE L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE.	51
TABLEAU 9: RESULTATS DES ESSAIS EFFECTUES SUR LE BITUME UTILISE.	51
TABLEAU 10: COMPOSITION DU MELANGE GRANULOMETRIQUE.....	52
TABLEAU 11: TENEURS EN BITUME RETENUES.....	53
TABLEAU 12: PARAMETRE DE CHAQUE MELANGE	59
TABLEAU 13: CARACTERISTIQUE DE CHAQUE EPROUVETTE CONSERVEE A SEC.....	66
TABLEAU 14: CARACTERISTIQUE DE CHAQUE EPROUVETTE IMMERGEE.....	67
TABLEAU 15 : RÉSULTATS DE CALCUL DE TENUE A L'EAU	68
TABLEAU 16: COMPARAISON ENTRE LES POURCENTAGES DE CHAUX AJOUTE.....	70

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1: COUCHE DE FONDATION D'UNE ROUTE EN ENROBE DE TYPE GRAVE BITUME	3
FIGURE 2: ROUTE AVEC REVETEMENT EN ENROBE NOIR	3
FIGURE 3: COMPOSITION DES L'ENROBE BITUMINEUX	4
FIGURE 4: COMPOSITION DE BITUME.....	5
FIGURE 5: VEGETAUX DANS LES FISSURES	7
FIGURE 6: ENROBE COLORE SUR CARREFOUR.....	8
FIGURE 7: CHAUSSEES D'AUTOROUTE AVEC ET SANS ENROBE DRAINANT.....	9
FIGURE 8: FINISSEUR (OU FINISHER)	10
FIGURE 9: UN COMPACTEUR A BILLES	10
FIGURE 10: ORNIERAGE DE CHAUSSEE.....	12
FIGURE 11: EXEMPLE D'UN AFFAISSEMENT DE RIVE.....	13
FIGURE 12: EXEMPLE D'UN AFFAISSEMENT HORS RIVE	13
FIGURE 13: EXEMPLES DE FISSURATION TRANSVERSALE.....	14
FIGURE 14: EXEMPLE DE FISSURATION LONGITUDINALE EN BANDE DE ROULEMENT.....	14
FIGURE 15: EXEMPLE DE FISSURATION LONGITUDINALE NON SPECIFIQUE AUX BANDES DE ROULEMENT.....	15
FIGURE 16: EXEMPLE DE FISSURATION D'ADAPTATION	15
FIGURE 17: EXEMPLE DE FAÏENÇAGE DANS LES BANDES DE ROULEMENT	16
FIGURE 18: GLAÇAGE DE SURFACE DE CHAUSSEE.....	16
FIGURE 19: EXEMPLE D'ORNIERE A PETIT RAYON	17
FIGURE 20: EXEMPLE DE FISSURATION ANARCHIQUE.....	17
FIGURE 21: EXEMPLE DE DESENROBAGE DE L'ENROBE BITUMINEUX.....	18
FIGURE 22: EXEMPLE DE NID DE POULE	18
FIGURE 23: PHASES DE FORMATION DE NID DE POULE	18
FIGURE 24: CIRCULATION D'EAU DANS LA PLATE-FORME ET LA CHAUSSEE	20
FIGURE 25: RESURGENCE D'EAU AU JOINT DE CHAUSSEE	21
FIGURE 26: EFFETS DE L'EAU SUR LE COUPLE GRANULAT-BITUME.....	21
FIGURE 27: CARRIERE DE CALCAIRE A BRØNNØYA, EN NORVEGE.	28
FIGURE 28: CYCLE DE LA CHAUX.....	28
FIGURE 29: CHAUX HYDRATEE.....	29
FIGURE 30: DESENROBAGE DE GRANULATS PROVENANT	30
FIGURE 31: ORNIERAGE D'UN ENROBE BITUMINEUX.....	31
FIGURE 32: VIEILLISSEMENT D'UN ENROBE BITUMINEUX	31
FIGURE 33: FISSURE DE FATIGUE DANS UN ENROBE BITUMINEUX	32
FIGURE 34: ARRACHEMENT (DE GRANULATS) CAUSE PAR DU DESENROBAGE.....	34
FIGURE 35: L'EFFET DE LA CHAUX HYDRATEE SUR LA SURFACE DES GRANULATS.....	35
FIGURE 36: LA POROSITE SECHE DE LA CHAUX HYDRATEE ET CELLE DES FILLERS MINERAUX.....	36
FIGURE 37: MATERIEL DE L'ESSAI GRANULOMETRIQUE	39

FIGURE 38:ESSAI D'EQUIVALENT DE SABLE	39
FIGURE 39:ESSAI DE MICRO DEVAL (MDE).....	40
FIGURE 40: MACHINE DE LOS ANGELES.....	40
FIGURE 41: APPAREILLAGE ET PRINCIPE D'ESSAI DE PENETRABILITE	41
FIGURE 42: APPAREILLAGE D'ESSAI TBA	41
FIGURE 43: PRINCIPE DE L'ESSAI DE DUCTILITE.....	42
FIGURE 44:FRACTIONS GRANULAIRES 0/3, 3/8 ET 8/15 UTILISEES.	47
FIGURE 45: COURBES GRANULOMETRIQUES DES FRACTIONS GRANULAIRES.....	50
FIGURE 46: COURBE GRANULOMETRIQUE DU MELANGE ET FUSEAU 0/14	52
FIGURE 47: PRINCIPE D'ESSAI DE MARSHALL.....	54
FIGURE 48: ÉTUVE DE CHAUFFAGE.....	54
FIGURE 49: ENROBE APRES MALAXAGE	55
FIGURE 50: REMPLISSAGE DES MOULES MARSHALL.....	55
FIGURE 51: DAME ELECTRIQUE DE COMPACTAGE.....	55
FIGURE 52:ÉPROUVETTES MARSHALL.....	56
FIGURE 53: BAIN-MARIE	56
FIGURE 54:PRESSE MARSHALL.....	56
FIGURE 55: AJOUTER LA CHAUX HYDRATEE AU MELANGE.....	60
FIGURE 56: QUATRE MELANGES DE CETTE ETUDE.....	60
FIGURE 57: MALAXEUR UTILISE AU NIVEAU DU LABORATOIRE CTTP	61
FIGURE 58: PRESSE DE L'ESSAI DE TRACTION INDIRECTE	62
FIGURE 59:ÉCRASEMENT D'UNE EPROUVETTE.....	64
FIGURE 60: VARIATION DE RESISTANCE A LA TRACTION INDIRECTE (SEC) EN FONCTION DU TENEUR EN CHAUX.....	66
FIGURE 61: VARIATION DE RESISTANCE A LA TRACTION INDIRECTE (IMMERSION) EN FONCTION DU TENEUR EN CHAUX.....	67
FIGURE 62 : VARIATION DE LA TENUE A L'EAU EN FONCTION DU TENEUR EN CHAUX.....	68
FIGURE 63 : RESULTATS DE L'ESSAI DE LA SENSIBILITE A L'EAU EN CHAQUE MELANGE	69

REMERCIEMENTS

Toute notre parfaite gratitude, grâce et remerciement sont à Allah le plus puissant, clément et Miséricordieux qui m'avoit accordé des connaissances de la science et me donner la force pour effectuer notre présent travail.

En second lieu, Je tiens à remercier mes encadreurs Mr MABROUKI Khaled pour son présence permanente, son amour du travail, son générosité de donner tout ce qu'il a comme savoir et Mme GARIDI pour ses orientations et conseils, nous somme satisfait de ses encadrements.

Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail, et qui nous feront le plaisir d'apprécier.

Aussi, je remercie les membres de l'Organisme National de Contrôle Technique des Travaux Publics CTTP Alger pour l'accueil et la disponibilité.

Je remercie ma famille pour ses conseils permanents, ses sacrifices afin d'y arriver à ce moment-là.

Je souhaite exprimer mes gratitudes à tous les enseignants qui m'ont formé dès la 1^{ère} à la 5^{ème} Année.

Je remercie également toute la promotion 2015 sans exception qui m'a accompagnée durant notre formation.

Enfin nous remercions toutes les personnes qui de loin ou près ont contribué à la réalisation de ce modeste travail.

DÉDICACE

Au nom d'ALLAH, le tout Miséricordieux, le très Miséricordieux

Je remercie ALLAH le tout Puissant, clément et Miséricordieux de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience pour établir ce Modest travail, ensuite je remercie infiniment mes parents, qui m'ont encouragé et aidé à arriver à ce stade de formation.

Je Dédie Fortement Ma Très Chère Mère, (رحمها الله), Qui A Toujours Envie Dans Mon Cœur) Et A Mon Père Qui A Sacrifié Sa Vie Afin De Me Voir Grandir Et Réussir Dans Le Parcours De L'enseignement Et Tout Qui Est Proche De La Famille Necib Sans Exception.

A Tous La Promotion 2015 et Mes Amis Et A Tous Ceux Qui Ont Contribué De Loin Ou De Près A L'ELABORATION De Ce Modeste Travail.

Enfin, A Toutes Personnes Que J'ai Connues Et J'ai Aimé. Je Vous Dis A Tous Merci D'être Dans Ma Vie.

RÉSUMÉ

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم الأداء الميكانيكي على وجه التحديد الحساسية تجاه الماء للخرسانة الزيتية المتحصل عليها عن طريق اضافة مسحوق الجير المعالج بالماء الى تركيبة الحبيبات (الحصى و الرمل) الداخلة في تكوين المزيج الزيتي. الجزء الأول من الدراسة متعلق بإيجاد صيغة تكوينية للمزيج حيث تكون لديها أفضل قابلية للتصنيع والرص ، ويمكن من خلالها الحصول على منتج زفتي اكثر استقرار . و توازن .

اما الجزء الثاني فيتمحور حول عملية تكوين عدة خلطات خرسانية تختلف في نسبة الجير المضاف وذلك بهدف دراسة تأثير الجير على الأداء الميكانيكي للمزيج و يتم كل ذلك عن طريق اجراء الاختبارات المعملية اللازمة. وقد أكدت الاختبارات ان إدماج الجير في الخرسانة الزيتية بنسب معينة ، له تأثير كبير على أداءه الميكانيكي و الريولوجي بما في ذلك تحسين مقاومته للماء وسلسلة تجمد / ذوبان و التي هي العوامل الرئيسية المسببة لتدهورات الأسفلت المختلفة خاصة التعرية، التحدد والحفر .

الكلمات الاستدلالية

الأسفلت الخرسانة، الجير، الجير المعالج بالماء ، الأداء الميكانيكي، مقاومة للماء ، التعرية، التحدد ، الحفر .

RÉSUMÉ

La présente étude a pour objectif, d'évaluer les performances mécaniques spécifiquement la sensibilité à l'eau d'un enrobé bitumineux obtenu à partir d'un squelette granulaire traité par l'ajout de la chaux hydratée.

La première partie est pour un objectif de trouver une formule de l'enrobé qui possède meilleure aptitude à la confection et au compactage et pourrait conférer une meilleure stabilité au mélange.

La deuxième partie concerne la modification effectuée selon plusieurs formulations vise à suivre l'influence du dosage en chaux sur les performances mécaniques du béton bitumineux par l'intermédiaire d'essais au laboratoire.

Les essais réalisés ont confirmés que l'incorporation de la chaux éteinte, dans un certain intervalle de pourcentage, possède un effet significatif sur les performances rhéologique-mécaniques notamment l'amélioration de la tenue à l'eau et au gel/dégel qui sont les facteurs principaux provoquant les dégradations du béton bitumineux tel que le désenrobage, l'orniérage et le nid de poule.

Mot clés :

Enrobée bitumineux, chaux éteinte, hydratée, performances mécaniques, tenue à l'eau, désenrobage, orniérage, nid de poule.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the mechanical performance specifically the water sensitivity of bituminous mix obtained from a granular skeleton treated by the addition of hydrated lime.

The first part has an objective of finding a formula of the mix has better ability to manufacture and compaction and could impart greater stability to the mix.

The second part concerns the modification performed according to several formulations aimed at monitoring the influence of lime dosage on the mechanical performance of the bituminous concrete by means of laboratory tests.

The tests have confirmed that the incorporation of slaked lime, in a percentage range, has a significant effect on the rheological-mechanical performance including improved resistance to water and freeze/thaw which are the main factors causing the deterioration of asphalt tell the rutting and potholes.

Keywords:

Asphaltic concrete, Slaked lime, hydrated lime, mechanical performance, water resistance, rutting, potholes.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INRODUCTION GÉNÉRALE

La route est un élément essentiel à l'économie, elle assure le déplacement des personnes et des biens. Depuis plusieurs décennies, la croissance du transport par camions des matières premières et des produits finis a mis davantage à l'épreuve les réseaux routiers dans les pays. Dans ce contexte, ces pays se voient dans l'obligation d'investir de plus en plus d'argent dans l'entretien et l'amélioration de leurs réseaux routiers.

La structure d'une chaussée est en général composée de trois groupes de couches superposés qui sont : couche d'assise, la plate-forme support, et le couche de surface.

Les couches de surface comprennent essentiellement la couche de roulement, qui a pour rôle de protéger les couches d'assises contre les altérations et d'améliorer la qualité de la surface de la chaussée, elle est souvent constituées par des couches d'enrobés ou une simple couche d'enduit.

Les matériaux bitumineux, qui sont des mélanges de granulats et de liant hydrocarboné, sont de très loin les plus utilisés pour constituer les enrobés des structures routières. Dans le mélange, le liant assume le rôle d'agent de cohésion entre les particules granulaires pour former un corps rigide. Les mélanges bitumineux sont thermiquement et cinétiquement susceptibles, propriétés héritées des caractéristiques du liant hydrocarboné. Ceci confère aux enrobés bitumineux une vaste variation du comportement mécanique suivant les sollicitations externes du trafic et des conditions environnementales (eaux pluviales et la neige), et différents modes de dégradations parmi lesquels le désenrobage et le départ des matériaux, la rupture par fissuration, l'endommagement ou la fatigue et l'orniérage.

Depuis plus de 50 ans, la chaux hydratée est l'additif de référence dans le monde pour améliorer la tenue à l'eau des enrobés bitumineux. Cependant, au fur et à mesure de son emploi, d'autres propriétés se sont révélées et ont pu être quantifiées à la fois au laboratoire et sur chantier. En conséquence, la chaux est maintenant reconnue comme un additif polyvalent pour les enrobés bitumineux.

Dans ce travail on va concentrer sur l'effet de l'infiltration des eaux a l'endommagent probables subit dans l'enrobé bitumineux et l'influence de l'ajout de la chaux hydratée sur la tenue à l'eau de l'enrobé bitumineux.

CHAPITRE I.

GÉNÉRALITES SUR LES

ENROBÉS

1. INTRODUCTION
2. ENROBÉ BITUMINEUX
3. LIANT HYDROCARBONÉ
4. FAMILLES D'ENROBÉS BITUMINEUX
 - 4.1 Produits Chauds
 - 4.2 Produits Froids
5. PRINCIPAUX TYPES D'ENROBÉS BITUMINEUX
 - 5.1 Béton Bitumineux Noir (Enrobés Noir)
 - 5.2 Enrobés Colorés
 - 5.3 Enrobes Drainants
6. Qualité
7. Mise en œuvre

1. INTRODUCTION



Figure 1: Couche de fondation d'une route en enrobé de type grave bitume

Un enrobé est un mélange de graviers, de sables, de fines et de liant, appliqués en une ou plusieurs couches, pour constituer le revêtement des chaussées, des trottoirs, des zones de stationnement... La présence de sable en quantité plus ou moins importante permettra de favoriser la perméabilité du revêtement.

Il s'agit d'un matériau compacté lors de sa mise en œuvre. Il est plus ou moins rugueux en fonction de la taille du granulat utilisé.

Pour les revêtements de surface appelés aussi « couche de roulement ». Le type de liant déterminera le type d'enrobé. On distingue deux grandes familles :

- Le liant bitumineux, utilisé pour les revêtements de chaussées et de trottoirs.

Il est généralement noir. Toutefois, des formulations différentes permettent d'obtenir d'autres teintes. Il s'agit d'un dérivé du pétrole.

- Le liant végétal, utilisé principalement pour les usages modes doux. Celui-ci est de couleur miel et n'utilise pas de bitume dans sa composition.



Figure 2: Route avec revêtement en enrobé noir

La mise en œuvre des enrobés se fait toujours par compactage. Elle doit se faire avec des conditions atmosphériques adaptées (éviter les épisodes froids et les épisodes pluvieux importants) [11].

2. ENROBÉ BITUMINEUX

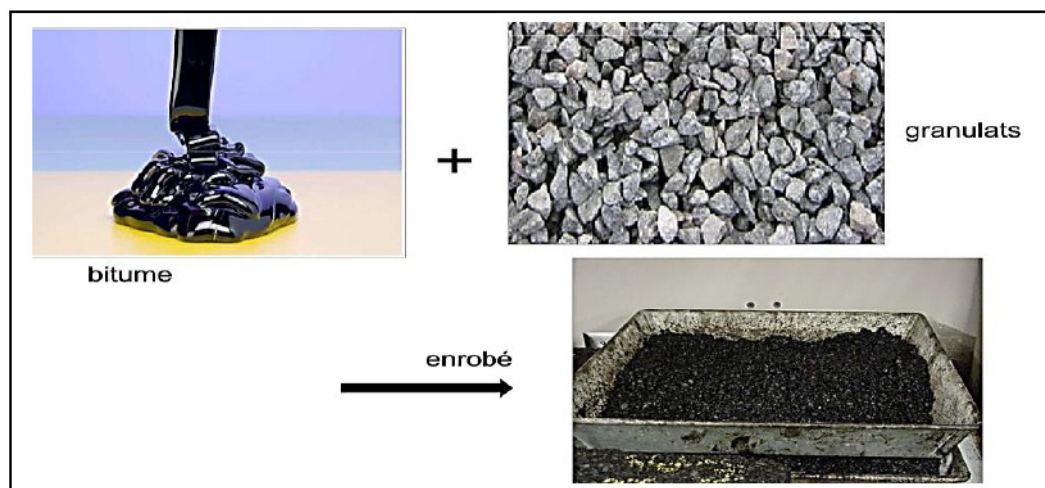


Figure 3: Composition dès l'enrobé bitumineux

Un enrobé bitumineux est un mélange uniforme de granulats enrobés de bitume.

Parmi les enrobés à liant bitumineux, on signalera les enduits superficiels d'usure (monocouche, bicouche, tricouche) qui sont utilisés pour un entretien peu couteux du revêtement de chaussée, les enrobés clairs servent souvent à marquer des espaces « modes doux », les enrobés à liant végétal sont actuellement en phase expérimentale donc peu utilisés.

3. LIANT HYDROCARBONÉ

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

- **les goudrons**, qui proviennent de la pyrogénéation (à l'abri de l'air) de matières d'origine végétale : houille, lignite, tourbe, bois,... Les goudrons routiers sont essentiellement tirés de la houille.
- **les liants naturels**, que l'on trouve en l'état dans la nature, le plus souvent associe à des matières minérales, et qui sont utilisés depuis des temps très anciens. Il s'agit des roches aspartiques qui, après broyage, donnent la poudre d'asphalte ainsi que des bitumes naturels.
- **les bitumes**, qui sont produits en raffinerie à partir de la distillation fractionnée de certains pétroles bruts dits "bruts à bitume".

Dans la pratique, lorsqu'on parle de liant hydrocarboné, il s'agit pratiquement toujours de bitume. [10].

✓ Composition de bitume

Le bitume se présente, à température ambiante, sous l'aspect d'un corps visqueux, plus ou moins viscoélastique, de couleur noire. Il est liquide à des températures supérieures à 100°C.

L'analyse élémentaire d'un bitume met en évidence des atomes de carbone (80 à 87 % en masse) et d'hydrogène (8 à 12 %). En outre, des hétéroatomes tels que le soufre (1-9 %), l'azote (0 à 1,5 %) et l'oxygène (0,5 à 1,5 %) sont présents. On trouve également dans les bitumes des métaux (essentiellement vanadium ou nickel mais aussi aluminium, silicium, chrome, cuivre, zinc, plomb, ...) à l'état de traces. La composition élémentaire d'un bitume dépend essentiellement de l'origine de son brut et d'une manière moindre, des techniques de raffinage.

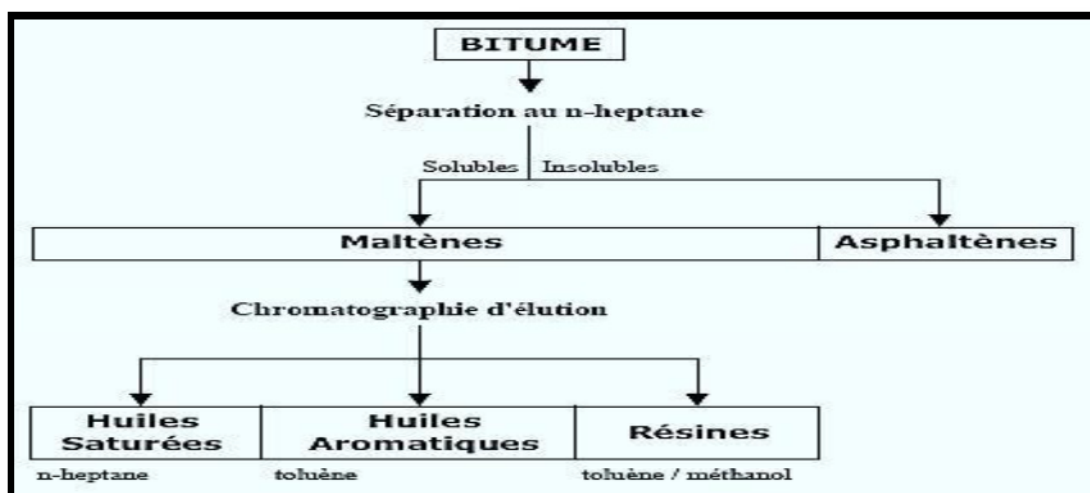


Figure 4: Composition de bitume

- **Asphaltènes** : produits solides apportant au bitume sa cohésion et sa dureté et constitue entre 5 et 20 % du bitume.
- **Maltènes**: produit huileux (molécules moins grosses) dans lequel baignent les asphaltènes.

Les molécules de maltènes peuvent être encore séparées par chromatographie en d'autres hydrocarbures:

- **Saturés (dont les paraffines)**: Ils sont incolores ou légèrement jaunâtre. Ils affectent la viscosité du bitume,
- **Aromatiques**: sont des huiles visqueuses de couleur rouge brun foncé. Ils affectent aussi la viscosité du bitume.
- **Aromatiques polarisés (les résines)**: influencent son adhérence [10]

4. FAMILLES D'ENROBÉS BITUMINEUX

4.1 Produits Chauds

Il s'agit des enrobés fabriqués à chaud (aux alentours de 180°C) et appliqués à chaud (aux alentours des 150°C)

- Béton bitumineux : Ultra Mince (BBUM), Très Mince (BBTM), Mince (BBM)
- Grave bitume :
- Enrobé à Module Élevé (EME) utilisés en couche d'assise
- Enrobé drainant
- Enrobé avec adjonction de colorant
- Enrobé avec adjonction de verre pilé

4.2 Produits Froids

Il s'agit d'enrobés fabriqués et appliqués à froid, par adjonction d'émulsion de bitume garantissant la malléabilité du matériau.

- Enrobé froid : enrobé de faible granulométrie (0/4 ou 0/6 en principe) avec une forte teneur en liant et en fines, généralement utilisé de manière temporaire pour permettre la circulation de véhicules sur des voies en cours de travaux, ou encore pour reboucher des petites tranchées, trous, et nids de poules sur des chaussées déformées. Cet enrobé est très utilisé au printemps en période de dégel, pour réparer les détériorations de la chaussée dus au gel.
- Grave émulsion : mélange de grave avec une faible proportion d'émulsion de bitume.
- Il existe aussi des enrobés bitumineux à froid qui sont destinés à la réalisation de couches de roulement. Ce sont des enrobés hydrocarbonés à froid (non stockables) ou tous les granulats sont recouverts de liant. [11].

5. PRINCIPAUX TYPES D'ENROBÉS BITUMINEUX

5.1 Béton Bitumineux Noir (Enrobés Noir)

✓ Usages

Très confortable pour l'ensemble des usagers.

✓ Caractéristiques

L'enrobé noir est imperméable (gestion des eaux pluviales obligatoire). Sa surface est résistante et plus ou moins rugueuse. Il a de très bonnes qualités d'adhérence.

Il est de couleur noire puis devient gris au fil du temps. Son intégration aux sites sensibles peut être difficile. Sa surface est entièrement composée :

- de granulats de granulométrie 0/6 ou 0/10 (grains dont le diamètre est compris entre 0 et 6 mm ou entre 0 et 10 mm)
- de liant (essentiellement du bitume)

Sa formulation diffère selon le type d'usage qu'il supporte (voirie légère, lourde...).

Plus les granulats utilisés sont de petites tailles, moins le revêtement entraîne de nuisances sonores.

✓ Durée de vie

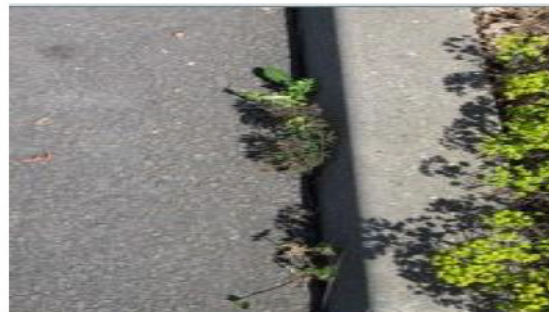


Figure 5: Végétaux dans les fissures

La durée de vie de l'enrobé noir est liée à la structure mise en place au regard des usages qu'elle supporte. Elle est diminuée par les tranchées que le revêtement subit. Toutefois, elle reste importante, environ 20 ans pour une couche de roulement. [9].

5.2 Enrobés Colorés



Figure 6: Enrobé coloré sur carrefour

✓ Usages

Très confortable pour l'ensemble des usagers.

Revêtement ponctuel des couches de roulement de voiries en zones urbanisées.

A favoriser sur les voies douces.

✓ Caractéristiques

Les enrobés colorés sont imperméables (gestion des eaux pluviales obligatoire).

Leurs surfaces sont résistantes et plus ou moins rugueuses.

_ Très bonnes qualités d'adhérence.

Ils peuvent être réalisés selon une large teinte de couleur (rouge, beige, jaune, vert, bleu...).

_ Très bonnes qualités d'intégration paysagère.

Leur utilisation aide à la distinction de la fonctionnalité des espaces et renforce la sécurité routière.

Comme pour les enrobés noirs, la surface des enrobés colorés est entièrement composée de granulats et de liant. La couleur est obtenue par ajout d'oxydes métalliques au bitume lors de la fabrication (exemple : enrobé rouge = bitume + oxyde de fer).

✓ Durée de vie

La durée de vie de l'enrobé coloré est liée à la structure mise en place au regard des usages qu'elle supporte. Elle est diminuée par les tranchées que le revêtement subit et par les tâches et autres salissures qui nuisent à l'intégration du matériau dans son environnement. Toutefois, elle reste importante, environ 15 à 20 ans pour une couche de roulement [9].

5.3 Enrobes Drainants



Figure 7: Chaussées d'autoroute avec et sans enrobé drainant

✓ Usages

Très confortables pour l'ensemble des usagers, il est recommandé pour les autoroutes, les voies express, les routes nationales car par temps de pluie, il limite les projections d'eau (diminution du risque d'aquaplaning, amélioration des conditions de conduite...).

Offre un gain sonore pour les véhicules légers au-delà de 50 km/h. Ne supporte pas les girations de poids lourds ou les manœuvres.

✓ Caractéristiques

Les enrobés drainants sont bien entendus perméables et leur mises-en œuvre doit être associée à une sous couche et à un sous-sol entièrement drainants.

La surface des enrobés drainants est entièrement composée de granulats et de liant à la différence de l'enrobé noir, il n'y a quasiment aucun sable dans sa composition.

On obtient alors un matériau ouvert, avec des espaces entre les granulats (25 à 30 % de vide), ce qui lui donne ses caractéristiques drainantes.

La surface des enrobés drainants est résistante et rugueuse avec une très bonne qualité d'adhérence. Toutefois, les enrobés drainants peuvent s'avérer dangereux et glissant :

✓ Durée de vie

La durée de vie de l'enrobé drainant est largement compromise par :

- Présence de réseaux _ intervention nécessaire sur le revêtement
- Pollution accidentelle _ colmatage du revêtement
- Présence de végétaux à proximité immédiats (colmatage par le pollen, feuilles).
- Travaux à proximité _ colmatage par divers matériaux de chantier

Si l'enrobé drainant a une durée de vie reste entre 15 à 20 ans pour une couche de roulement. [9].

6. Qualité

Tant au niveau de la fabrication qu'au niveau de l'application, les entreprises et les clients, notamment les collectivités, effectuent un contrôle qualité.

Les principaux essais effectués sont les suivants :

- Essais de résistance et de comportement en laboratoire lors de l'élaboration de nouvelles formules d'enrobés (coefficient d'orniérage, ...)
- Contrôle d'échantillons de bitume prélevés à l'approvisionnement des centrales (viscosité).
- Analyse granulométrique, hygrométrie, coefficient d'aplatissement, taux d'argile dans les fines (valeur au bleu de méthylène) sur des échantillons de matériau prélevés à l'approvisionnement des centrales.
- Teneur en bitume et analyse granulométrique sur échantillons d'enrobé prélevés lors de l'application (par un processus d'extraction de bitume et de lavage des matériaux au perchloroéthylène).
- Analyse de rugosité, compacité effectués sur la chaussée une fois l'application d'une couche d'enrobée effectués.

7. Mise en œuvre

Avant la mise en œuvre de la couche d'enrobé, il faut :

- S'assurer de la portance de la structure
- Vérifier le profil en travers de la voirie (pente en travers de l'ordre de 2 à 3 %)
- Tenir compte de la gestion des eaux pluviales
- L'application de l'enrobé est effectuée selon l'utilisation comme suit :
 - ✓ Manuellement sur des espaces de faible surface, peu accessibles et non ou faiblement circulés
 - ✓ A l'aide d'une mini pelle
 - ✓ Plus fréquemment à l'aide d'un finisseur

La majorité des enrobés sont mis en œuvre « à chaud » et la température d'application doit alors être environ de 150 °C. [9].



Figure 8: Un compacteur à billes



Figure 9: Finisseur (ou finisher)

CHAPITRE II.

DÉGRADATIONS DES CHAUSSÉES

SOUPLES

1. INTRODUCTION
2. TYPES DE DÉGRADATIONS DES ASSISES DE CHAUSSÉE
 - 2.1 DÉFORMATIONS DE CHAUSSÉES
 - 2.1.1. Orniérage à grand rayon
 - 2.1.2. Affaissement de rive
 - 2.1.3. Affaissement hors rive (flashe)
 - 2.2 Fissuration
 - 2.2.1 Fissuration transversale
 - 2.2.2 Fissuration longitudinale en bande de roulement
 - 2.2.3 Fissuration longitudinale non spécifique à bande de roulement
 - 2.2.4 Fissuration d'adaptation
 - 2.2.5 Faiénçage dans les bandes de roulement
3. DÉGRADATIONS DE COUCHE DE ROULEMENT
 - 3.1 Glaçage Ou Indentation
 - 3.2 Ornière à petit rayon
 - 3.3 Fissuration Anarchique
 - 3.4 Désenrobage
4. FORMATION DES NIDS DE POULE
5. CAUSES PROBABLES DES DÉGRADATIONS
 - 5.1 ROLE DU TRAFIC
 - 5.2 ROLE DE LA TEMPERATURE
 - 5.3 ROLE DE L'EAU
6. SOLUTIONS ENVISAGEABLES

1. INTRODUCTION

La dégradation de surface de chaussée constitue dans la plupart des cas, un des indicateurs les plus précoces et les plus sensibles de l'évolution des caractéristiques structurelles et de surface des chaussées. Le revêtement routier est sensible à plusieurs agents agressifs (circulation des véhicules, infiltrations des eaux pluviales, viabilité hivernale...).

Un revêtement altéré laisse entrer l'eau, modifie l'uni longitudinal, impacte la macrotexture et donne une mauvaise image de l'état du réseau routier. La dégradation des assises sont autant de points faibles dans lesquels l'eau s'infiltrer et accélère la ruine de la chaussée pour arriver dans la plupart des cas à des départs de matériaux en surface de la chaussée, aux niveaux des fissures, des faïençages pouvant aller jusqu'à la formation de nids de poule.

2. TYPES DE DÉGRADATIONS DES ASSISES DE CHAUSSEE

2.1 DÉFORMATIONS DE CHAUSSEES

2.1.1. Orniéage à grand rayon



Figure 8: Orniéage de chaussée

Déformation permanente longitudinale qui se crée sous le passage des roues et dont la largeur est supérieure à 80 cm de large.

- **Cause**

Sous-dimensionnement de l'assise/réduction de portance du support dû à un mauvais drainage ou l'action du dégel.

- **Évolution**

Faïençage dans l'ornière. [1]

2.1.2. Affaissement de rive



Figure 9: Exemple d'un affaissement de rive

Enfoncement prononcé localisé à la partie de la chaussée comprise entre le bord et la bande de roulement de rive.

- **Cause**

Sous-dimensionnement de l'assise ou sol support ou épaulement/drainage défectueux/retrait hydrique du sol (climat-végétation).

- **Évolution**

Faïençage au droit de l'affaissement, dégradation aggravée par la présence d'eau qui reste stockée dans le bas-côté. [2]

2.1.3. Affaissement hors rive (flashe)



Figure 10: Exemple d'un affaissement hors rive

Enfoncement ponctuel, flashe quand l'affaissement a une forme circulaire.

- **Cause**

Sous-dimensionnement localisé de l'assise ou du sol support/présence d'eau provenant des couches supérieures (défaut de portance)

- **Évolution**

Faïençage puis départ de matériaux. [1].

2.2 Fissuration

2.2.1 Fissuration transversale



Figure 11: Exemples de fissuration transversale

Fissuration sensiblement perpendiculaire à l'axe de la chaussée, isolée ou périodique d'espacement variable sur tout ou partie de la largeur de chaussée

- **Cause**

Remontée en surface d'une fissure de prise ou de retrait thermique ou d'un joint transversal de mise en œuvre de l'assise traitée ou joint de reprise d'un tapis d'enrobé.

- **Évolution**

Ouverture fine au début puis ramification, épaufrure puis faïençage puis départ de matériaux.

2.2.2 Fissuration longitudinale en bande de roulement



Figure 12: Exemple de fissuration longitudinale en bande de roulement

Fissuration sensiblement parallèle à l'axe de la chaussée, apparaissant exclusivement dans une bande de roulement.

- **Cause**

Fatigue de la structure par excès de contrainte des couches traitées causé par le sous dimensionnement ou défauts de construction (mouvement de sols, retrait sol argileux)

- **Évolution**

Ouverture fine au début puis ramification, épaufrure puis faïençage puis départ de matériaux. [1]

2.2.3 Fissuration longitudinale non spécifique à bande de roulement



Figure 13: Exemple de fissuration longitudinale non spécifique aux bandes de

Fissuration sensiblement parallèle à l'axe de la chaussée, non limitée aux bandes de roulement.

- **Cause**

Remontée d'un joint de mise en œuvre ou d'une fissure dans les couches inférieures, Gonflement différentiel dû au gel.

- **Evolution**

Ouverture fine puis ramification et épaufrure.

2.2.4 Fissuration d'adaptation



Figure 14: Exemple de fissuration d'adaptation

Fissuration provenant de mouvements de sols : tassements d'épaulements, retrait hydrique, tassement de remblais, etc...

- **Évolution**

Anarchique (fonction de la localisation sur la chaussée) [1].

2.2.5 Faïençage dans les bandes de roulement



Figure 15: Exemple de faïençage dans les bandes de roulement

Ensemble de fissures entrelacées ou maillées.

- **Cause**

Fissures de fatigue dédoublées, décollement de la couche de roulement, portance insuffisante.

- **Évolution**

Ouverture progressive des fissures jusqu'au départ des matériaux.

3. DÉGRADATIONS DE COUCHE DE ROULEMENT

3.1 Glaçage Ou Indentation



Figure 16: Glaçage de surface de chaussée

Usure ou enfoncement des gravillons de la couche de roulement conférant à la surface.

- **Cause du glaçage**

Manque de dureté des granulats.

- **Cause indentation :**

Surdosage liant/qualité insuffisante du liant.

- **Évolution**

Apparition par plaque au début puis généralisation à l'ensemble de la bande de roulement. [1].

3.2 Ornière à petit rayon

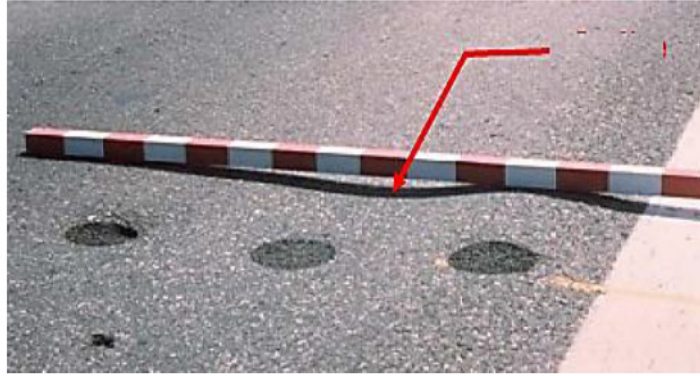


Figure 17: Exemple d'ornière à petit rayon

Déformation permanente longitudinale inférieure à 80 cm qui se forme sur le passage des roues.

- **Cause**

Formulation inadéquate/ Trafic lourd canalisé/ Zone de rampe, de freinage ou à forte giration/Maniabilité élevée de l'enrobé.

- **Évolution**

Augmentation de la profondeur d'ornière et formation de bourrelets. [1].

3.3 Fissuration Anarchique



Figure 18: Exemple de fissuration anarchique

Fissuration provenant du vieillissement de l'enrobé.

- **Cause**

Âge de l'enrobé, utilisation d'un liant dur, liant trop chauffé à la fabrication des enrobés.

3.4 Désenrobage



Figure 19: Exemple de désenrobage de l'enrobé bitumineux

Diminution du lien bitume-granulat, le granulat est désenrobé par la présence d'eau et la vapeur d'eau. Enlèvement des fines et du bitume (mastic) pour laisser les gros en relief rendant la surface du revêtement rugueuse.

4. FORMATION DES NIDS DE POULE



Figure 20: Exemple de nid de poule

Les nids de poule sont généralement causés par le gel et le dégel successifs des routes. Ils surviennent suite à une infiltration d'eau sous la chaussée en période de dégel. Si un gel survient par la suite, l'eau devient solide (glace) et soulève la chaussée. Lors d'une seconde période de dégel, la glace fond et l'eau résultante s'écoule, laissant ainsi une cavité sous la chaussée. [1]

Les phases successives menant à la formation d'un nid de poule se laissent expliquer de la façon suivante :

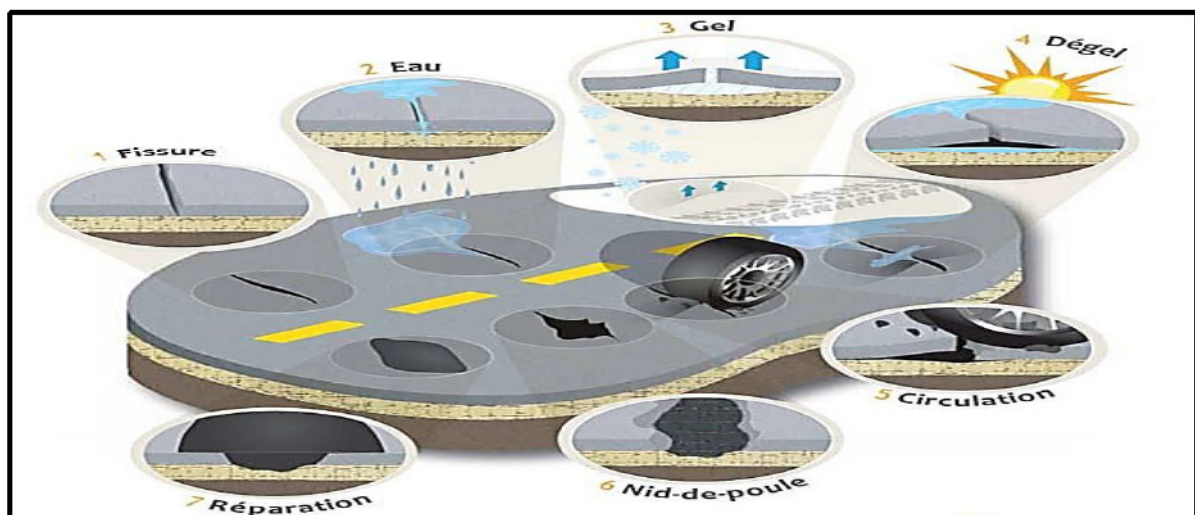


Figure 21: Phases de formation de nid de poule

5. CAUSES PROBABLES DES DÉGRADATIONS

5.1 ROLE DU TRAFIC

Le trafic, exprimé en millions de poids lourds attendus sur la durée de vie de la chaussée, est généralement considéré comme le facteur prépondérant de la dégradation par fatigue à long terme des chaussées.

Dans la méthode de catalogue de dimensionnement des chaussées neuves, c'est le trafic qui détermine les dimensions des couches structurales.

Ce facteur joue sans doute un rôle lors de la phase d'évolution rapide, comme en atteste la localisation des nids de poule, situés essentiellement en bandes de roulement.

Le trafic énorme et répétées peut contribuer à une fatigue à long terme en partie haute de la chaussée et il peut rendre elle plus particulièrement vulnérable au gel/dégel.

Mais un éventuel mécanisme de la sorte est à rechercher hors du schéma de fonctionnement habituellement admis pour les chaussées bitumineuses, qui suppose un comportement en compression et donc sans fatigue des couches situées en haut de chaussée et qui ne tient pas compte non plus des cisaillements répétés aux interfaces. [2]

5.2 ROLE DE LA TEMPERATURE

5.2.1 TEMPÉRATURES ESTIVALES

En période estivale, l'effet de l'ensoleillement et des températures est connu comme pouvant engendrer le fluage et l'orniérage des couches bitumineuses en haut de chaussée sous l'effet du trafic, en fonction du squelette granulaire et des grades de bitume présents.

Ce mécanisme est identifié spécialement dans les zones qui se caractérisent par un climat très chaud et sec (dans l'Algérie on a un exemple concret qui est la Sahara algérienne).

Il est également admis que l'ensoleillement et les rayons ultraviolets accélèrent le vieillissement des matériaux en surface de chaussée par oxydation du bitume, en le durcissant et en le fragilisant. Les conséquences éventuelles sur l'intégrité des couches et des interfaces situées en partie supérieure de chaussée ne sont pas négligeables car ils peuvent entraîner une fatigue en cette partie comme la fissuration verticale et longitudinale dans les couches, décohésion dans les interfaces, et faire le lit des désordres observés lors des épisodes de gel/dégel. [2]

5.2.2 Températures Hivernales

Comme les températures estivales peuvent avoir un effet de long terme fragilisant les structures de chaussée avant leur dégradation subite, il se peut que les hivers successifs subis par les chaussées aient aussi contribué à un endommagement progressif trouvant éventuellement son origine dans le même mécanisme que celui provoquant les nids de poule, mais de façon moins exacerbée.

Il est fort probable également que ces conditions ont un impact particulier en raison de la présence d'eau dans les enrobés bitumineux et qu'à ce titre les précipitations pluvieuses (et/ou neigeuses) tombées au cours de ces cycles peuvent jouer un rôle. [2]

5.3 ROLE DE L'EAU

Dans la plupart de des cas de dégradation de chaussée souple on remarque bien la présence systématique d'eau dans les sections de chaussée dégradées et ceci préalablement à l'apparition des désordres.

On peut donc penser que l'eau, à l'état liquide ou à l'état de glace, a joué un rôle moteur important à long et/ou court termes dans le mécanisme de dégradation. Rappelons que l'accumulation d'eau dans une chaussée bitumineuse peut se produire de différentes façons (figure 24).

La cause la plus courante est par précipitation puis infiltration à des degrés plus ou moins importants au travers du revêtement de surface de la chaussée, qu'il soit sain ou dégradé. [2]

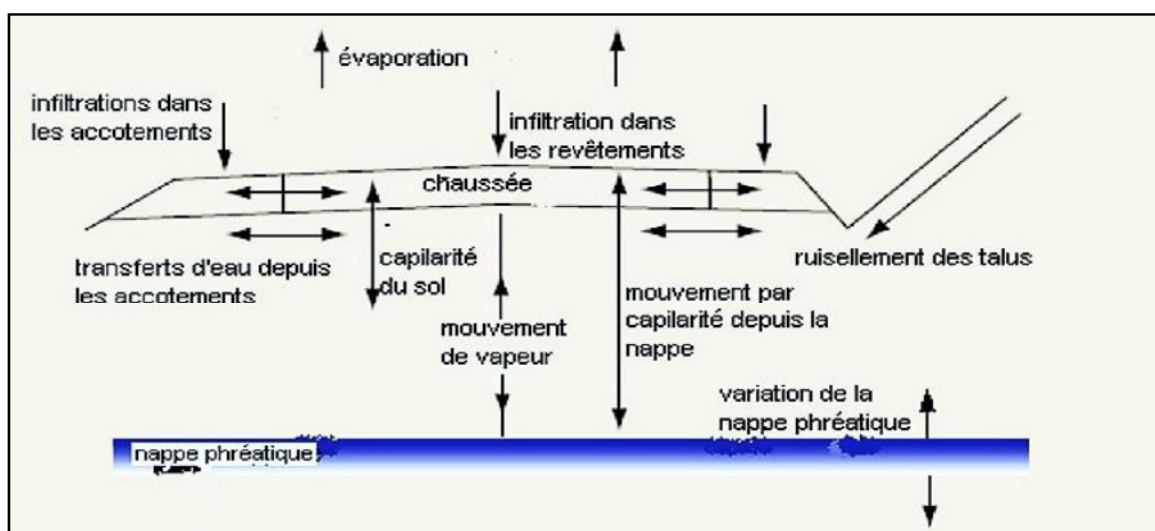


Figure 22: Circulation d'eau dans la plate-forme et la chaussée

On peut assister également à des infiltrations depuis les bords de la structure (eaux venues des coteaux, des fossés...) ou par absorption capillaire de l'eau des nappes phréatiques ou remontée de ces dernières.

Plusieurs facteurs qui peuvent provoquer l'arrivée et/ou la stagnation de l'eau de ruissellement dans les chaussées : un système d'évacuation des eaux défectueux, mal positionné ou absent, une géométrie mal étudiée ou mal respectée - notamment lors des travaux d'entretien - à l'échelle de la chaussée ou de la superposition des couches, un tracé défavorable, la présence d'une source, la multiplication des interfaces lors d'entretiens successifs...etc.

Les zones entières peuvent devenir gorgées d'eau de façon temporaire ou permanente et conduire à plus ou moins long terme à un désenrobage du matériau. [2]

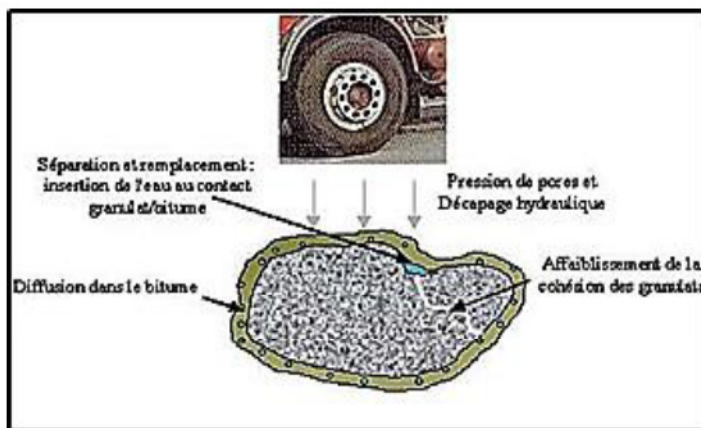


Figure 24: Effets de l'eau sur le couple granulat-bitume



Figure 23: Résurgence d'eau au joint de chaussée

6. SOLUTIONS ENVISAGEABLES

Il existe plusieurs techniques utilisés pour l'amélioration du comportement de l'enrobé bitumineux vis-à-vis la résistance contre les facteurs qui conduit vers la dégradation de chaussée tel que :

- Utilisation, en partie, de granulats de natures différentes, de bitumes différents;
- Ajout la poudrette de caoutchoucs ;,
- Ajout de produits anti désenrobage ;
- Ajout de chaux hydraté ;

Dans ce travail on va détailler la dernière solution qu'est l'utilisation de la chaux éteinte (hydraté) comme un ajout dans l'enrobé bitumineux (béton bitumineux) de couche de roulement.

CHAPITRE III.

TRAITEMENT DE L'ENROBÉ

A LA CHAUX

1. HISTORIQUE DE TRAITEMENT A LA CHAUX
2. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE
 - 2.1 PUBLICATION DE MOHAMMED H. AL-SAYED
 - 2.2 PUBLICATION DE BAHA VURAL KOK ET MEHMET YILMAZ
 - 2.3 OBJECTIF DE L'ETUDE
3. DÉFINITION DE LA CHAUX
4. CYCLE DE LA CHAUX
5. TYPES DE CHAUX
 - 5.1. Chaux vive
 - 5.2. Chaux Eteinte(Hydratée)
6. AMELIORATIONS APPORTEES AUX ENROBÉS
 - 6.1 Résistance au désenrobage
 - 6.2 Résistance à l'orniérage
 - 6.3 Ralentissement du vieillissement du bitume
 - 6.4 Diminution De La Fragilité
7. MÉTHODE D'INCORPORATION DES RÉACTIFS
 - 7.1 Méthode humide
 - 7.2 Méthode sèche
 - 7.3 Ajout en centrale d'enrobage
8. TECHNIQUE DE L'AJOUT DE CHAUX A L'ENROBÉ
 - 8.1 Problématique de Tenue à l'eau et l'action gel/dégel
 - 8.2 Mécanismes du traitement des enrobés à la chaux hydratée
 - 8.2.1 Effet sur les granulats
 - 8.2.2 Effet sur le bitume

1. HISTORIQUE DE TRAITEMENT A LA CHAUX

L'utilisation de chaux hydratée dans les enrobés bitumineux est une pratique éprouvée qui remonte à leur apparition au début du XXe siècle.

Depuis plusieurs décennies, La chaux hydratée est l'additif de référence dans le Monde pour améliorer la tenue à l'eau des enrobés bitumineux, elle est utilisée comme additif dans la fabrication des enrobés bitumineux. Elle est employée comme agent d'adhésivité pour limiter les phénomènes de désenrobage, Cependant, au fur et à mesure de son emploi, d'autres propriétés se sont révélées et ont pu être quantifiées à la fois au laboratoire et sur chantier tel que la réduction de l'oxydation des bitumes, amélioration de la tenue à froid, et résistance accrue aux déformations des enrobés.

L'usage s'est réellement développé à la fin des années 1970 aux Etats-Unis en réponse à l'apparition généralisée et prématurée de dégâts liés au désenrobage, dus en partie à une baisse de qualité des bitumes survenue après la crise pétrolière de 1973. Actuellement, environ 40 Mt d'enrobés bitumineux contenant de la chaux hydratée sont fabriqués chaque année aux Etats-Unis.

En Europe, l'usage est croissant, principalement (mais pas uniquement) en couche de roulement, et les Pays-Bas possèdent la plus grande expérience puisque les enrobés drainants, qui recouvrent 70 % de leur réseau autoroutier, y contiennent systématiquement 2 % de chaux.

D'autres pays, tels que l'Angleterre, l'Autriche, la France et la Suisse, commencent à y recourir à plus hydratée associée à un bitume 70/100 non-modifié depuis les années 1990 grande échelle. Ainsi, la société autoroutière du Nord et de l'Est de la France (SANEF) prescrit de la chaux hydratée dans ses couches de roulement de manière systématique depuis 2005. Dans ce contexte, l'expérience Belge est particulièrement intéressante, puisque les premiers essais avec les enrobés drainants dans les années 1980 faisaient usage de chaux hydratée. [4]

En Algérie jusqu'à maintenant cette technique n'est pas largement utilisée dans la construction routière.

2. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Ce travail d'initiation à la recherche est débuté après avoir constaté les différents problèmes (géotechnique, matériaux de construction) souffris par les autoroutes algériennes et pour le but de trouver des solutions d'entretien de dégradations et de planification pour les projets à venir

Il est scientifiquement prouvé que l'ajout des fines de chaux hydratée dans les enrobés a des effets bénéfiques (ralentissement de vieillissement, amélioration de la sensibilité à l'eau,...etc.) sur les mélanges bitumineux utilisés pour la construction des routes.

Cette procédure de traitement de l'enrobé bitumineux nous a particulièrement intéressés car elle est une solution forte probable pour les différents dégradations des chaussées subit par les réseaux routiers de l'Algérie.

2.1 PUBLICATION DE MOHAMMED H. AL-SAYEDT

- **Titre original de l'article:**

“PROPERTIES OF ASPHALTIC PAVING MIXES CONTAINING HYDRATED LIME WASTE”

- **Résumé de contenu de l'article**

L'étude menée à utiliser les déchets de chaux de carbure (hydratée) comme une filler dans les mélanges bitumineux de pavage, et d'étudier l'effet de l'incorporation des déchets sur les propriétés des mélanges bitumineux de l'enrobé de couche de roulement.

Le mélange bitumineux c'est le béton bitumineux ordinaire utilisé à Bahreïn se compose d'environ 55% de gros gravier, 48% de granulat fin (sable), et 7% de filler minérale.

Un total de 450 mélanges de béton bitumineux a été préparé à cinq différents pourcentages en poids des déchets et le calcaire (contrôle).

Les pourcentages utilisés dans les mélanges étaient de 2, 4, 6, 8, et 10 en poids de l'agrégat.

Méthodes d'essai Marshall ont été utilisés pour évaluer la densité du mélange compacté, pourcentage de vide, les vides dans l'agrégat minéral, la stabilité et le fluage. La stabilité Marshall était réalisée à 40 ° C, 60 ° C et 70 ° C.

- **Conclusion de l'étude :**

D'après l'interprétation des résultats des essais qui suit peut être conclu:

- 1) La stabilité Marshall de tous les mélanges de déchets de chaux étaient bien au-dessus du minimum de 8 KN (critères spécifiés par la spécification Bahreïn).
- 2) L'augmentation de teneur en bitume optimale que la concentration de déchets augmente.
- 3) Le pourcentage de vide dans le mélange, les vides dans les agrégats minéraux, et les valeurs de débit Marshall de tous les mélanges traité aux déchets conformes aux normes Bahreïn.
- 4) Les mélanges modifiés par les déchets résistent les changements de température élevée beaucoup mieux que la conventionnel filler de calcaire à l'égard de la stabilité Marshall. Ceci suggère que les mélanges modifiés par les déchets sont adaptés pour les environnements arides.
- 5) A 70 °C, les meilleurs résultats ont été obtenus à une concentration de 8% de déchets, et teneur en liant optimal de 6.1%
- 6) les déchets de carbure de chaux peuvent être utilisés comme un filler minérale dans le béton bitumineux utilisé à Bahreïn.

2.2 PUBLICATION DE Baha Vural Kok et Mehmet Yilmaz

- **Titre original de l'article:**

“The effects of using lime and styrene-butadiene-styrene on moisture sensitivity resistance of hot mix asphalt “

- **Résumé de contenu de l'article**

Cette étude vise à déterminer les effets de styrène-butadiène-styrène (SBS) et en utilisant minérale filler avec de la chaux sur les différentes propriétés des enrobés à chaud en particulier la sensibilité à l'eau.

Le liant bitumineux était modifié avec 2%, 4% et 6% de SBS. Les mélanges traités à la chaux contenant 2% de chaux en poids de l'agrégat totale comme un filler.

Les propriétés physiques et mécaniques des mélanges de liant modifiée par le polymère et le liant-agrégat ont été évalués par leurs propriétés techniques fondamentales telles que le cisaillement dynamique rhéomètre (DSR), viscosimètre rotatif (RV) pour les liants, la stabilité Marshall, module de rigidité, résistance à la traction indirecte et la sensibilité à l'eau pour les mélanges.

La stabilité conservée Marshall (RMS) et le rapport de résistance à la traction (TSR) valeurs ont été calculées pour déterminer la sensibilité à l'eau des mélanges.

Pour étudier clairement l'effet de SBS et de la chaux, sept cycles gel-dégel a été appliquée à des spécimens de la TSR test. Les résultats indiquent que l'application de liants modifiés par SBS et de la chaux comme filler minérale un par un améliore la stabilité, rigidité et la résistance caractéristique des enrobés à chaud.

- **Conclusion de l'étude :**

- 1) Pénétration, point de ramollissement, viscosité à haute température et DSR des tests ont prouvé que le contenu SBS augmente la rigidité.
- 2) L'indice de pénétration de SBS liants modifiés augmente avec l'augmentation du niveau SBS. Ceci suggère que l'addition de SBS, contribue à la diminution de la fragilité et de la température sensibilité du liant.
- 3) Dans l'essai de stabilité Marshall, valeurs de stabilité Marshall augmentées avec le contenu SBS avant et après conditionnement. La stabilité des mélanges traités à la chaux non conditionnée était d'environ 8% plus élevées que celles du mélange témoin non conditionné. Toutefois cette valeur a augmenté jusqu'à 21% pour les mélanges conditionnés.
- 4) Dans les tests de module de rigidité de traction indirecte, l'amélioration de l'effet de la chaux était pas si élevé en raison de l'essai a été effectué dans une situation inconditionnée. Cependant chaux raidit les mélanges et les échantillons préparés avec 2% de chaux et 6% SBS avait le module le plus élevé, ce qui est 2,3 fois plus élevés que ceux de la mélange témoin.
- 5) Dans le test de résistance à la traction indirect, il a été obtenu que la diminution des valeurs TSR des seuls des mélanges modifiés par SBS avec l'augmentation des cycles de gel-dégel était stable, mais le diminuer la valeur TSR des mélanges de chaux traitée avec l'augmentation des cycles gel-dégel n'a pas été régulière. Cela signifie que la chaux significative améliore la performance TSR des mélanges.

- 6) Il a été déterminé que les mélanges faits avec 2% de chaux et 6% de SBS a montré le moins la réduction de la TSR et seulement ceux-ci mélanges maintenaient un rapport de résistance à la traction relativement élevé (environ 0,70) après sept cycle gel-dégel. Même à la fin de la septième période, la valeur de TSR y compris les mélanges 2% de chaux et 6% SBS était supérieure à 0,70 qui est la plus faible limite dans la norme ASTM D4876.
- 7) Selon stabilité Marshall, il a été conclu que l'ajout de seulement 2% de chaux avait environ même effet avec plus de 6% de SBS à l'égard de sensibilité à l'eau de l'enrobé.
- 8) D'après les résultats des tests de laboratoire, il a été conclu que l'ajout de chaux et SBS ensemble dans l'enrobé bitumineux traité à chaud expose conformément haute et significative améliore les performances de mélanges en particulier la résistance à l'agressivité des eaux (la sensibilité à l'eau). C'est aussi considéré que, dans les cas dans lesquels SBS et de la chaux utilisés ensemble, la déformation permanente prématurée aux côtés de dégradation causé par les eaux peuvent être évités.

2.3 OBJECTIF DE L'ÉTUDE :

Dans les deux articles précédents on remarque bien que les deux auteurs essayent d'appliquer la technique de l'ajout de chaux hydratée pour le but d'améliorer les caractéristiques et le comportement de l'enrobé bitumineux notamment la sensibilité à l'eau.

Enfin ils ont des résultats positives sur la nature de l'influence de chaux sur les enrobés bitumineux, et ils ont trouvée des spécifications certains à propos la méthode de l'incorporation de l'additif sans les mélanges c à d la quantité et l'état climatique appropriés pour obtenir les meilleurs résultats possible tout ça en fonction de qualité des matériaux et les propriétés intrinsèques de leurs pays.

On va essayer dans cette étude d'effectuer cette technique ancienne dans l'Algérie et étudier l'influence de la chaux hydratée sur la sensibilité à l'eau de l'enrobé bitumineux construit à partir des matériaux algériennes (granulats et bitume) et trouver des résultats de bien décrits et proposer des spécifications et recommandations sur la mise en œuvre (la quantité de l'additif ajouté et le mode opératoire) qui peut faciliter l'utilisation de cette technique dans l'Algérie.

3. DÉFINITION DE LA CHAUX



Figure 25: Carrière de calcaire à Brønnøya, en Norvège.

Le terme « chaux » désigne les produits dérivés du calcaire, notamment la chaux vive et la chaux éteinte. Le calcaire est une pierre d'origine naturelle comportant des niveaux élevés de carbonates de calcium et/ou de magnésium. On extrait le calcaire dans des carrières et des mines à travers le monde. [11]

4. CYCLE DE LA CHAUX

Les produits dérivés du calcaire (CaCO_3) possèdent la capacité unique d'être transformés et de reprendre leur forme originale. Le cycle de la chaux consiste à cuire le calcaire pour former la chaux vive (CaO). La chaux éteinte (Ca(OH)_2) peut alors être produite en ajoutant de l'eau à la chaux vive. Dans cet état, le dioxyde de carbone contenu dans l'atmosphère ou provenant de précédés industriels peut alors réagir avec la chaux éteinte pour la reconvertir en calcaire. Cette réaction représente la première réaction de durcissement des mortiers historiques. Ce cycle de continuité s'appelle le cycle de la chaux. Le temps requis à la chaux pour retourner à l'état de calcaire peut-être de quelques minutes avec l'aide de procédés industriels à plusieurs années si elle est laissée aux conditions atmosphériques.

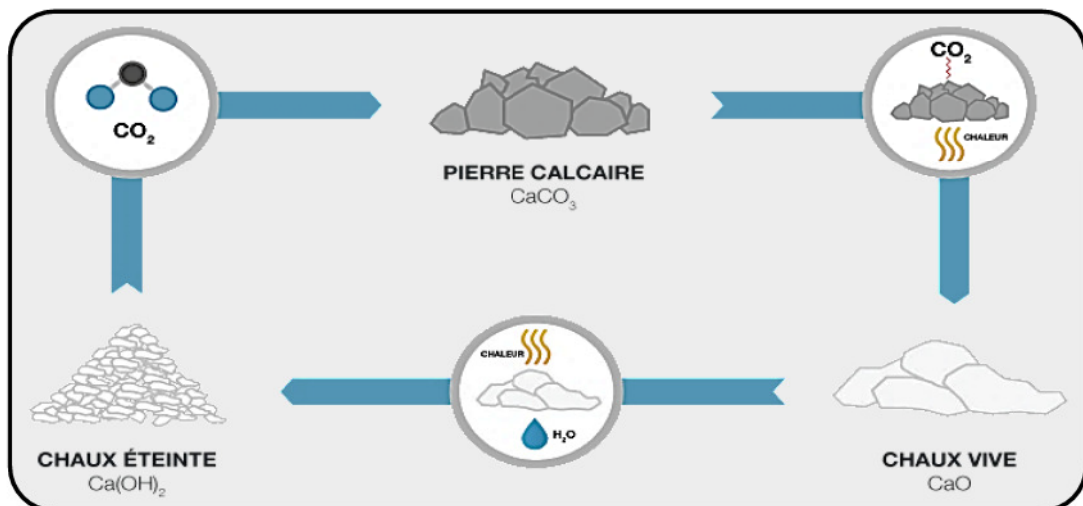


Figure 26: Cycle de la chaux

5. TYPES DE CHAUX

4.1. Chaux vive

La chaux vive est la chaux sortie du four à chaux. Elle prend l'apparence de pierres pulvérulentes en surface. Le principal constituant de la chaux vive est l'oxyde de calcium, qui a pour formule CaO . La chaux vive est une chaux qui n'a pas été éteinte. La chaux vive pouvait être amenée sous cette forme sur chantier où elle était éteinte ou transportée sur de longues distances dans des sacs, à l'abri de l'humidité.

4.2. Chaux Eteinte(Hydratée)



Figure 27: Chaux hydratée

Chaux vive est transformée en chaux éteinte par immersion dans l'eau. Cette immersion, provoque une dislocation, un foisonnement, ainsi qu'une forte chaleur (autrement dit la réaction est exothermique). Le résultat est une pâte, qui prend le nom de chaux éteinte (portlandite), qui a pour formule, Ca(OH)_2 , soit de l'hydroxyde de calcium. La présence d'argile associée au calcaire de calcination conduit à différents types de chaux :

- chaux aérienne: le phénomène de cristallisation s'opère en présence d'air. Les chaux aériennes se répartissent en :
 - chaux grasses, obtenues à partir de calcaires très purs ou contenant de 0,1 à 1 % d'argile,
 - chaux maigres, obtenues à partir de calcaires contenant de 2 à 8 % d'argile,
- chaux hydrauliques: le phénomène de cristallisation s'opère aussi en milieu aqueux, obtenues à partir de calcaires contenant plus de 8 % d'argile. [11]

La chaux hydratée et la chaux vive (comprenant les chaux dolomitiques) sont spécifiées, pour des applications de construction ou d'ingénierie civile, dans la norme européenne EN 459-1. Les principales qualités de chaux hydratée utilisées dans le domaine routier sont résumées dans le Tableau 2. Ces classes s'écrivent : **CL XX S**

Où **CL** identifie la chaux aérienne calcique et le nombre **XX** indique la pureté exprimée en pourcentage massique de CaO+ MgO. La lettre S, qui signifie « éteinte » (slaked en anglais), identifie les produits hydratés sous forme pulvérulente.

Cela permet de faire la différence avec la chaux vive (Q) et la chaux hydratée sous forme de pâte (SPL) ou de lait de chaux (S ML). [11]

Tableau 1: Différentes classes de chaux hydratée

Classe	CaO + MgO [%m]	Chaux disponible [%m]
CL 90 S	≥ 90	≥ 80
CL 80 S	≥ 80	≥ 65
CL 70 S	≥ 70	≥ 55

6. AMELIORATIONS APPORTEES AUX ENROBÉS

6.1 Résistance au désenrobage



Figure 28: Désenrobage de granulats provenant

Le désenrobage se produit lorsque le lien physique entre le bitume et le granulat s'affaiblit, phénomène accentué en présence d'eau et lors de la formation de composés hydrosolubles.

Cela débouche sur des dégradations telles que l'arrachement de granulats, ce qui peut dégénérer en nids de poule. Lorsque de la chaux hydratée est ajoutée à l'enrobé, elle réagit avec le granulat, améliorant la liaison bitume-granulat. De plus, la chaux hydratée réagit avec certains composés polaires du bitume, limitant la quantité de composés hydrophiles. Ces composés sont facilement déplacés par l'eau, et contribuent ainsi au désenrobage. Au contraire, la chaux hydratée provoque la formation de sels de calcium insolubles qui maintiennent l'eau hors du complexe. [3]

6.2 Résistance à l'orniérage



Figure 29: Orniérage d'un enrobé bitumineux

L'orniérage correspond à l'apparition de déformations permanentes au niveau des couches supérieures de la chaussée. Des circonstances de trafic lourd intense et lent ainsi que des températures élevées favorisent ce type de dégradation. A la différence de la plupart des fillers minéraux, la chaux hydratée est poreuse. [5]

Lorsqu'elle se retrouve dans l'enrobé, sa porosité se remplit de bitume, générant une rigidification de l'enrobé et améliorant de ce fait sa résistance à l'orniérage.

A basse température, l'effet rigidifiant ne provoque pas de risque additionnel de fissuration, puisqu'il devient alors similaire à celui obtenu avec des fines inertes.

6.3 Ralentissement du vieillissement du bitume



Figure 30: Vieillissement d'un enrobé bitumineux

Le vieillissement chimique du bitume se développe dans le temps en grande partie suite à des réactions d'oxydation, ce qui fragilise l'enrobé. En particulier, les groupements polaires du bitume réagissent, ce qui rigidifie l'enrobé et diminue sa capacité à relaxer les contraintes. Fissuration et baisse générale de la qualité de roulement sont des symptômes courants des enrobés vieillis.

Les charges lourdes liées au trafic deviennent d'autant plus dommageables sur des chaussées déjà fragilisées. La chaux hydratée limite le vieillissement des enrobés en ralentissant celui de la plupart des bitumes. [5]

Ceci provient des réactions acido-basiques entre les composés polaires du bitume et la chaux hydratée. Ces réactions isolent les composés polaires qui sont plus sensibles à l'oxydation, limitant ainsi la quantité d'espèces chimiques oxydables.

En conséquence, la chaussée maintient sa souplesse originelle plus longtemps et voit son niveau de résistance à la fissuration plus longuement conservé en présence de chaux hydratée.

6.4 Diminution De La Fragilité



Figure 31: Fissure de fatigue dans un enrobé bitumineux

Avec le vieillissement de l'enrobé, la fissuration intervient souvent, d'abord sous forme de microfissures qui coalescent ensuite pour former des macro-fissures. Ces phénomènes sont accentués par les charges répétées liées au trafic et la présence d'un enrobé vieilli, plus fragile. La fissuration peut également provenir des contraintes climatiques, par exemple en conséquence de fortes variations thermiques diurnes ou de températures très basses générant un fort retrait. Les particules de chaux hydratée interviennent alors comme un obstacle à la propagation des microfissures et gênent ainsi leur coalescence dès leur formation. Combiné à l'effet chimique sur le vieillissement du bitume, cette propriété contribue à améliorer la résistance à la fissuration des enrobés additives de chaux hydratée. [5]

7. MÉTHODE D'INCORPORATION DES RÉACTIFS

La chaux hydratée peut être ajoutée à l'enrobé bitumineux de différentes manières. On distingue principalement trois méthodes d'incorporation de la chaux hydratée :

7.1 Méthode humide

Par le prétraitement du granulat avant séchage. La chaux hydratée est alors utilisée sous forme pulvérulente ou en suspension (lait de chaux : mélange de chaux et d'eau) qui est ajouté en quantités contrôlées aux granulats. Cette méthode garantit une excellente répartition de la chaux hydratée à la surface des granulats. Les granulats traités peuvent alors être envoyés directement dans la centrale d'enrobage, où ils peuvent être stockés en tas quelques temps (un délai de maturation de 24 h, respecté lors du stockage des granulats traité) permettant une meilleure réaction de la chaux avec les surfaces granulaires et les particules argileuses qui augmente l'efficacité du traitement et permet de lutter efficacement contre les phénomènes de désenrobage.

7.2 Méthode sèche

Avec une introduction de chaux avant incorporation du bitume dans les agrégats. La chaux hydratée est alors utilisée pure ou en mélange avec du filler inerte (filler actif), que l'on introduit dans le tambour ou le malaxeur du poste d'enrobage ou encore sur l'élévateur à froid des granulats. Cette méthode s'accommode des équipements traditionnels d'une centrale d'enrobage, silo et doseur à pulvérulent.

7.3 Ajout en centrale d'enrobage

Dans le Monde entier, la chaux hydratée est surtout utilisée dans sa forme sèche pure, mais peut également être mélangée à un filler calcaire pour former un filler actif (filler mixte). Selon le type de centrale utilisée, la chaux peut être incorporée directement dans le tambour ou le malaxeur de la même manière qu'un filler d'apport. [5]

8. TECHNIQUE DE L'AJOUT DE CHAUX A L'ENROBÉ

8.1 Problématique De Tenue A L'eau Et L'action Gel/Dégel

Les dégradations causées par l'eau et les cycles de gel/dégel sont fréquentes pour les mélanges bitumineux. Elles se manifestent habituellement par la perte progressive de granulats en surface comme le montre la Figure 34 : Le lien entre les granulats et le bitume s'affaiblit en présence d'eau, jusqu'au point où il n'est plus suffisant pour retenir les granulats.

Ce phénomène est généralement qualifié de désenrobage. Il peut également être observé dans les couches inférieures de la chaussée (couche de liaison), en conséquence de la pression d'eau induite par le trafic. Si elles ne sont pas traitées, ces dégradations peuvent entraîner la formation de nids de poule. Les cycles de gel et de dégel ont tendance à amplifier ces effets indésirables. [3]



Figure 32: Arrachement (de granulats) causé par du désenrobage

8.2 Mécanismes Du Traitement Des Enrobes A La Chaux Hydratée

8.2.1 EFFET SUR GRANULATS

✓ Modification de la surface

Il est bien connu dans le domaine routier que les granulats siliceux ont des propriétés adhésives avec le bitume inférieures à celles des granulats calcaires. Les raisons en sont qu'aussi bien les tensioactifs anioniques que cationiques naturellement présents dans le bitume forment des liaisons fortes avec les ions calcium, alors que seuls les tensioactifs cationiques forment des liaisons fortes avec les groupements siliceux. Aussi, les tensioactifs anioniques sont facilement déplacés par l'eau sur les granulats siliceux.

Un des effets de la chaux hydratée consiste à précipiter les ions calcium sur la surface des granulats, les rendant plus favorables au bitume.

Il en résulte qu'un traitement de surface améliore déjà l'adhésion bitume-granat, même en l'absence de particules de chaux hydratée restantes dans le mélange. [4]

En outre, du carbonate de calcium peut être précipité en présence d'eau (lors de la fabrication ou sous la pluie après la pose) et il peut ainsi créer une plus grande rugosité qui est aussi favorable à l'adhésion du bitume

Toutefois, la modification de la surface n'est pas le seul mécanisme. En fait, ce mécanisme serait virtuellement inexistant avec les granulats calcaires. Pourtant, la chaux hydratée améliore aussi l'adhésion des granulats calcaires [4].

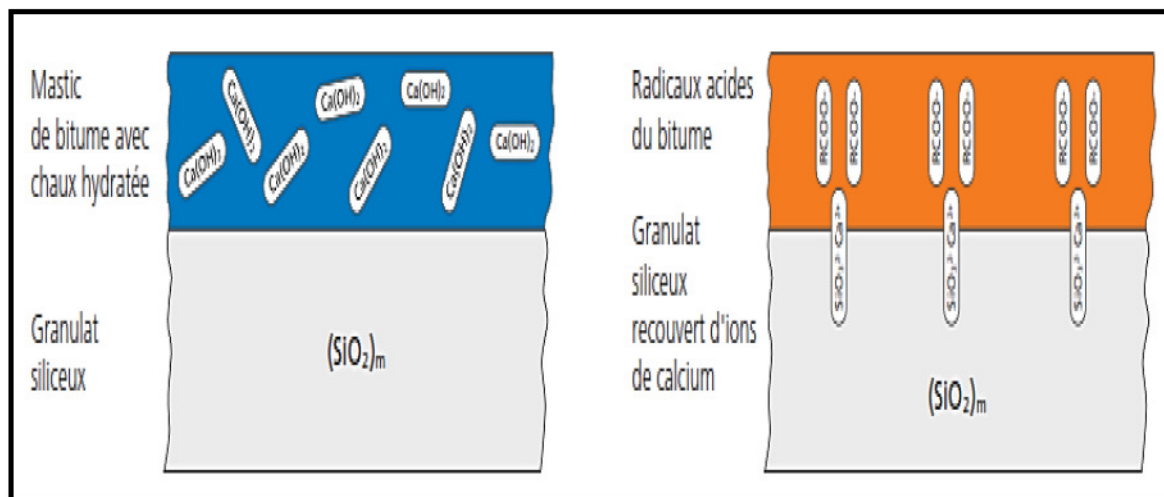


Figure 33: L'effet de la chaux hydratée sur la surface des granulats

✓ Floculation des argiles

Dans le cas des granulats argileux, la chaux hydratée permet d'augmenter considérablement la résistance au désenrobage.

C'est la raison pour laquelle la chaux hydratée est utilisée dans les zones dont les granulats sont contaminés par de grandes quantités d'argile. Plus spécifiquement, les argiles sont généralement présentes sous forme de petites inclusions dans la roche et sont libérées au concassage. Dans ce cas, le rôle de la chaux hydratée est similaire à celui qu'elle joue en traitement de sol. La chaux flocule les particules d'argile, ce qui les empêche de former une barrière facilement déplaçable par l'eau, entre le bitume et le granulat. [4]

8.22 EFFET SUR BITUME

✓ Effet physique sur le bitume

On peut résumer que l'effet physique de la chaux hydratée repose essentiellement sur sa forte porosité qui génère un effet rigidifiant supérieur à celui des fillers minéraux classiques, un phénomène mesuré par l'indice des vides de Rigden. La différence vient d'une plus grande porosité des particules de chaux hydratée. [4]

Pour les fillers minéraux, la porosité vient essentiellement des vides entre les particules et pour la chaux hydratée, la porosité à l'intérieur des particules s'ajoute à la porosité entre les particules, entraînant donc une valeur plus élevée.

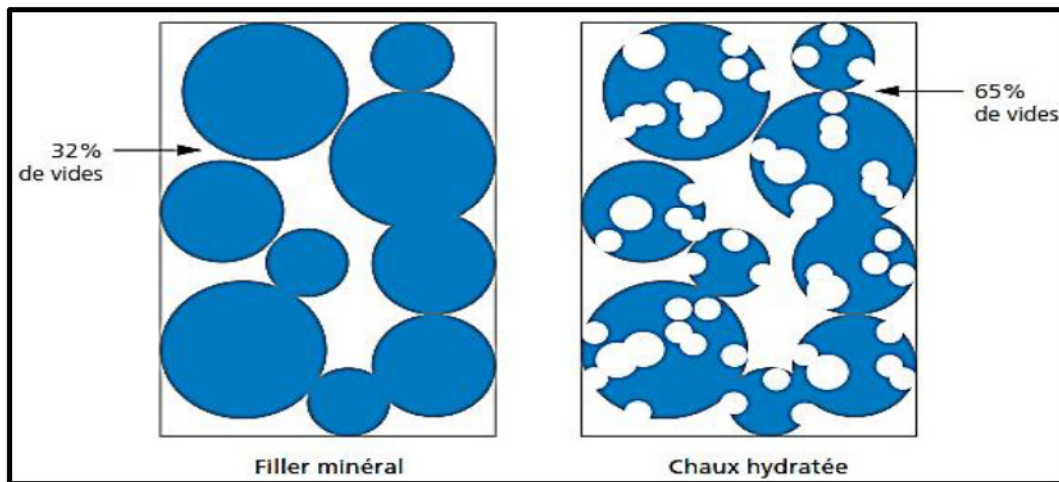


Figure 34: La porosité sèche de la chaux hydratée et celle des fillers minéraux

Néanmoins, la contribution à l'effet rigidifiant d'une éventuelle couche de composants bitumineux adsorbée sur les particules de chaux hydratée reste à quantifier.

✓ **Effet chimique sur le bitume**

Les interactions chimiques entre le bitume et la chaux hydratée ont deux effets :

- En premier lieu, les molécules polaires du bitume neutralisées par la chaux hydratée restent fortement adsorbées sur les particules de chaux hydratée. Cela les rend moins susceptibles au vieillissement chimique. Comme elles sont particulièrement susceptibles au vieillissement, leur disparition de la matrice bitume ralentit la cinétique globale de vieillissement, comme nous l'avons vu dans une section précédente. [4]

- Deuxièmement, ces molécules polaires neutralisées par les particules de chaux hydratée ne peuvent plus diffuser à la surface des granulats. En conséquence, seuls les tensioactifs non acides sont disponibles à la surface des granulats. Ces tensioactifs non acides sont typiquement Aminés et ne sont pas facilement déplacés par l'eau, contrairement aux tensioactifs anioniques acides. [4]

Cet effet est confirmé par l'observation que lorsque l'on met de la chaux hydratée directement dans le bitume, la tenue à l'eau des enrobés bitumineux correspondants augmente.

En conclusion, les interactions chimiques entre la chaux hydratée et les fractions acides du bitume contribuent à la fois à améliorer la résistance au vieillissement et l'adhésion des enrobés traités à la chaux hydratée.

CHAPITRE IV.

PRÉSENTATION DES ESSAIS ET DISPOSITIFS UTILISÉS

1. INTRODUCTION
2. PROVENANCE DES MATÉRIAUX D'ÉTUDE
3. CLASSIFICATION DES GRANULATS ROUTIERS
4. PRINCIPAUX ESSAIS PROPRES AUX GRANULATS
 - 4.1 Analyse Granulométrique (NA 2607)
 - 4.2 Essai d'équivalent de sable (NF P 18-598)
 - 4.2. Essais de résistance à l'usure et au choc des granulats (NA 5129)
 - 4.3. Résistance au choc (essai Los Angeles) (norme NA5130)
 - 4.4. Densité réel (norme NA255)
5. PRINCIPAUX ESSAIS DES BITUMES ROUTIERS
 - 5.1. Pénétrabilité (NF EN 1426)
 - 5.2. TEMPÉRATURE RAMOLLISSEMENT BILLE ET ANNEAU (NF EN 1427)
 - 5.3. ESSAI DE DUCTILITÉ A 25°C (NORME NA 5223)
 - 5.4. DENSITÉ RELATIVE

1. INTRODUCTION

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.

On va présenter dans ce chapitre le programme des essais effectués au laboratoire dans le cadre de cette étude. On va identifier les matériaux utilisés et on va exposer les méthodes expérimentales suivies pour réaliser les différents essais.

2. PROVENANCE DES MATÉRIAUX D'ÉTUDE

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 les usages attendus.

Les granulats (Graviers et sable concassé) objet de l'étude est un matériau de carrière d'Ain-Touta dans la wilaya de Batna.

Les bitumes purs utilisés dans notre étude expérimental proviennent de la raffinerie de l'unité de production NAFTAL (bitume pur de grade 30/45) utilisés en Algérie en enrobés pour la confection des couches de roulement.

3. CLASSIFICATION DES GRANULATS ROUTIERS

Selon leurs dimensions, les granulats sont classés par classes granulaires. La classe granulaire «d/D» est composée de granulats dont le diamètre est compris entre d et D.

Selon la norme NF P 18-101, les granulats ont été répartis dans les différentes familles:

- Les fines 0/D avec $D \leq 0,08$ mm.
- Les sables 0/D avec $D \leq 6,3$ mm.
- Les gravillons d/D avec $d \geq 2$ mm et $D \leq 31,5$ mm.
- Les cailloux d/D avec $d \geq 20$ mm et $D \leq 80$ mm.
- Les graves d/D avec $d \geq 6,3$ mm et $D \leq 80$ mm.

En Algérie, les granulats sont classés d'une manière différente. En effet, les différentes fractions granulaires sont: 0/3, 3/8, 8/15 et 15/25. La fraction granulaire 3/8, par exemple, ne comprend que des granulats de diamètres compris entre 3mm et 8mm.

4. 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:

4.1 Analyse Granulométrique (NA 2607)

Les courbes granulométriques des différents granulats peuvent être déterminées par l'essai de l'analyse granulométrique (NA 2607)

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 tamisât sous les tamis dont les mailles D sont indiquées en abscisse selon une graduation logarithmique.



Figure 35: Matériel de l'essai granulométrique

4.2 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 la vante 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.

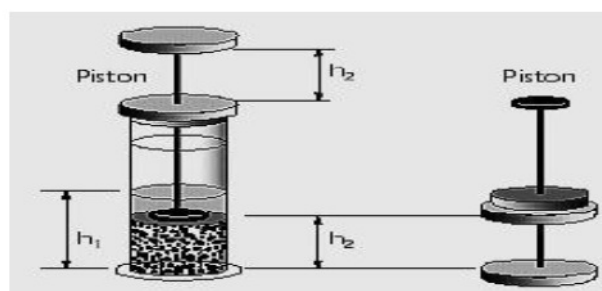


Figure 36: Essai d'équivalent de sable

4.2. Essais de résistance à l'usure et au choc des granulats (NA 5129)



Figure 37: Esaii de Micro Deval (MDE)

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

4.3. Résistance au choc (essai Los Angeles) (norme NA5130)



Figure 38: Machine de Los Angeles

Il consiste à placer dans un cylindre à axe horizontal de 70 cm de diamètre et 50 cm de longueur les granulats ainsi que 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).

4.4. Densité réel (norme NA255)

La densité réel 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.

5. PRINCIPAUX ESSAIS DES BITUMES ROUTIERS

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

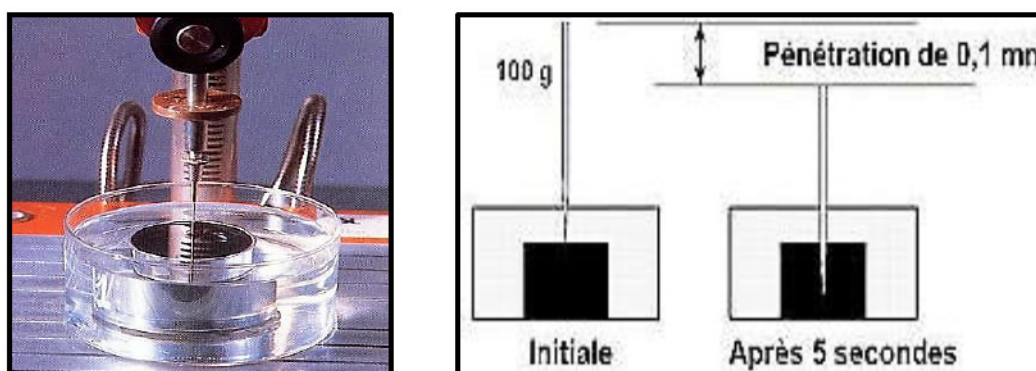


Figure 39: Appareillage et principe d'essai de pénétrabilité

Il existe, en Algérie, trois classes de bitumes routiers qui sont dans le sens des duretés croissantes il s'agit du 80/100, du 40/50 et du 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.

5.2. TEMPÉRATURE RAMOLLISSEMENT BILLE ET ANNEAU (NF EN 1427)



Figure 40: Appareillage d'essai TBA

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.

A 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, elle-même définie. 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. Ces deux derniers essais permettent de définir à quelle classe de pénétrabilité (ou grade) le bitume appartient.

Tableau 2: Classification des bitumes selon la pénétrabilité et TBA (NF EN 1427)

	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	55-63	52-60	50-58	46-56	46-54	43-51	39-47	35-43	30-38

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

5.3. ESSAI DE DUCTILITÉ A 25°C (NORME NA 5223)

Cet essai consiste à mesurer l'allongement, à l'instant précis de sa rupture d'une éprouvette de forme déterminée, étirée à une vitesse de 50mm/min, et à une température de 25°C.

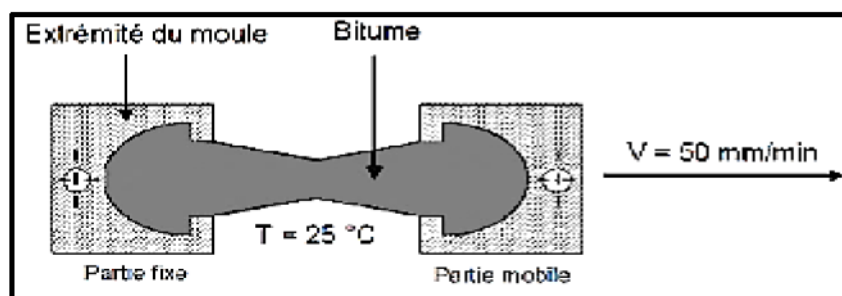


Figure 41: Principe de l'essai de ductilité

La mesure de la ductilité du liant permet de s'assurer du non fragilité de ce dernier.

5.4. DENSITÉ RELATIVE

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.

CHAPITRE V.

FORMULATION DE L'ENROBÉ

BITUMINEUX

1. INTRODUCTION
2. DÉMARCHE DE FORMULATION DE L'ENROBÉ BITUMINEUX
3. MÉTHODOLOGIE DE FORMULATIONS DES ENROBÉS ALGÉRIENNE
4. APPLICATION SUR NOTRE PROJET
 - 4.1 MATÉRIAUX UTILISÉS
 - 4.2 IDENTIFICATION DES CONSTITUANTS
 - 4.2.1 GRANULATS
 - 4.2.2 BITUME
 - 4.3 FORMULATION DU MÉLANGE BB 0/14
 - 4.3.1 DÉTERMINATION DU MÉLANGE GRANULAIRE OPTIMAL
 - 4.3.2 DÉTERMINATION DES TENEURS EN BITUME
 - 4.3.3 COMPOSITION DES MÉLANGES

1. INTRODUCTION

On appelle enrobé tout mélange constitué de granulats agglomérés entre eux par un liant hydrocarboné, les enrobés bitumineux sont des composants essentiels dans la construction des chaussées. Ce mélange peut être enrichi par des fines et éventuellement contenir des additifs en vue d'améliorer certaines propriétés.

Toutefois après avoir traité d'une manière très succinct le bitume et le granulats. On notera que la combinaison des deux forment l'enrobé, lequel doit aussi répondre à certaines exigences.

Alors, une bonne conception de ces matériaux garantit une durabilité et une tenue de l'ouvrage réalisé. Les gains d'une étude de formulation se traduisent par un confort et une sécurité accrues pour l'utilisateur de la route et aussi par une diminution des coûts d'entretien pour le gestionnaire de la route.

L'objet de l'étude de formulation est de définir les dosages des divers constituants capables d'atteindre et d'assurer, au cours de la vie de la chaussée, le maintien à un niveau satisfaisant des performances. L'étude de formulation de ces matériaux consiste en une série de compromis, puisque le comportement de l'enrobé oscille entre sensibilité aux déformations permanentes et à la fissuration par fatigue ou au désenrobage par arrachement des granulats.

2. DÉMARCHE DE FORMULATION DE L'ENROBÉ BITUMINEUX

La formulation de matériaux hydrocarbonés peut donc être décomposée en trois phases principales :

- Sélection et l'identification des constituants (granulats et bitume);
- Formulation et la mise au point du mélange;
- Épreuve de formulation pour la validation des mélanges bitumineux.

Les caractéristiques de laboratoire du mélange bitumineux étudié constituent des indicateurs des futures propriétés d'usage.

Généralement la composition d'un enrobé bitumineux est comme suit:

- ❖ **Granulats** : (Environ 93% à 95% 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)

3. MÉTHODOLOGIE DE FORMULATIONS DES ENROBÉS ALGÉRIENNE

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 3: Fuseau granulométrique BB 0/14

Tamis (mm)	Passant BB 0/14
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 note que la teneur en bitume (TL) correspond à la masse de liant sur la masse des granulats secs exprimé en pourcentage. Duriez a établi une formule pour déterminer la teneur en bitume des enrobés en fonction de la surface spécifique du mélange :

$$TL = k \cdot \alpha \cdot \sqrt[5]{\Sigma} \quad [6]$$

✓ **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 bétons bitumineux ($3 < k$ béton bitumineux $< 3,9$)

Tableau 4: Les valeurs usuelles du module de richesse pour le béton bitumineux

Enrobé	Module de richesse (k)			
0 / 14	3.45	3.6	3.75	3.90

✓ **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 :

$$\alpha = 2,65 / MVRg \quad \text{Guide technique CTTP [6]}$$

- Mv : masse volumique des granulats utilisés

✓ **Σ : surface spécifique conventionnelle**

La surface spécifique d'un granulats représente la surface totale des particules par rapport à son volume. Elle est exprimée en m²/m³ de granulats. 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.

$$\Sigma = 0.25 G + 2.3 S + 12s + 135f \quad \text{en m}^2/\text{kg} \quad \text{Guide technique CTTP [6]}$$

- 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 :

$$\Sigma = 2.5 G + 1.3f \quad \text{[m}^2/\text{kg]} \quad \text{Guide technique CTTP [6]}$$

✓ **ÉPREUVE DE FORMULATION**

L'épreuve de formulation a pour objectif d'établir, pour une composition donnée, les caractéristiques du béton bitumineux :

- pourcentage de vides ;
- tenue à l'eau ;
- performances mécaniques si nécessaire : orniérage, fatigue et module.

Les essais qui chaque épreuve peut contenir sont :

- Essai PCG (NF P 98-252) ;
- Essai Duriez à 18 °C (NF P 98-251-1) ;
- Essai d'orniérage (NF P 98-253-1) ;
- Essai de caractérisation des performances mécaniques par essai de module complexe (NF P 98-260-2), ou par essai de traction directe (NF P 98-260-1)
- Essai de fatigue (NF P 98-261-1).

4. APPLICATION SUR NOTRE PROJET

Dans le cadre de notre recherche, nous intéressons aux enrobés bitumineux à chaud qui résultent d'un mélange à chaud de gravillons, de sable, de fillers et de liants bitumineux.

4.1 MATÉRIAUX UTILISÉS

Les granulats utilisés dans le cadre de la présente étude sont les fractions couramment utilisées en Algérie pour la fabrication des enrobes bitumineux destinées aux couches de roulement. La provenance des fractions granulaires 0/3, 3/8, 8/15 sont affichés dans ce tableau

Tableau 5:Provenance des granulats utilisés

Matériau	Carrières
Sable 0/3	Ain-Touta (Batna)
Gravier 3/8	Ain-Touta (Batna)
Gravier 8/15	Ain-Touta (Batna)

Les fractions granulaires utilisées dans notre formulation



Figure 42: Fractions granulaires 0/3, 3/8 et 8/15 utilisées.

4.2 IDENTIFICATION DES CONSTITUANTS

4.2.1 GRANULATS

✓ Caractéristiques intrinsèques des granulats

Afin de déterminer les caractéristiques intrinsèques des granulats, les essais suivants ont été réalisés :

- La masse volumique réelle (NA 255).
- La résistance aux chocs : essai LOS ANGELES (NA 5130).
- La résistance à l'usure en présence d'eau : essai MICRO-DEVAL (NA 5129).

Les résultats sont donnés par le tableau suivant :

Tableau 6:Caractéristiques intrinsèques des granulats.

Essais	Référence	0/3	3/8	8/15
Masse volumique réelle [t/m ³]	NA 255	2,67	2,68	2,68
LA [%]	NA 5130	-	21.4	24.92
MDE [%]	NA 5129	-	8	6.74

Commentaire : Du point de vue caractéristiques intrinsèques des granulats, les résultats obtenus en fonction de leur utilisation en béton bitumineux et en grave bitume sont conformes aux spécifications de la classe « C » de la norme NF P 18 - 545.

✓ Caractéristiques de fabrications des granulats

Pour ce qui est des caractéristiques de fabrication des granulats, les essais suivants ont été réalisés :

- L'analyse granulométrique (NA 2607).
- L'essai d'aplatissement (NA 256).

Les résultats de ces essais sont regroupés dans le tableau 8.

Tableau 7: Résultats des essais

SABLE 0/3	Essais		Résultats	Spécifications
	Analyse granulométrique	Tamis	Tamisât (%)	Limite (NFP 18-545)
		2D	100	100.00
		1,4 D	98	98 – 100
	D	91	85 – 99	
Gravillon 3/8	Essais		Résultats	Spécifications
	Coefficient d'aplatissement (%)		17.92%	≤ 25
	Analyse granulométrique	Tamis	Tamisât (%)	Limite (NF P 18-545)
		2D	100	100.00
		1,4 D	100	98 – 100
		D	98	85 – 99
		D/1,4	76	25 – 80
		d	26	0 - 20
d/2	11	≤ 5		
Gravillon 8/15	Essais		Résultats	Spécifications
	Coefficient d'aplatissement (%)		14.518%	≤ 25
	Analyse granulométrique	Tamis	Tamisât (%)	Limite (NF P 18-545)
		2D	100	100
		1,4 D	100	98 – 100
		D	99	80 – 99
		d	23	0 – 20
d/2	1.96	≤ 5		

Commentaires :

Pour ce qui est des caractéristiques de 'fabrication' des granulats ; les résultats sont conformes aux spécifications exigées vis-à-vis de la forme, la granulométrie et la teneur en fines, Ces caractéristiques de fabrication les classent dans la catégorie « IV ». Les caractéristiques de fabrication du sable le classent dans la catégorie « a ».

De ce fait, les granulats analysés peuvent être utilisés dans la confection d'un béton bitumineux semi grenu et d'un grave bitume. Les résultats de l'analyse granulométrique de chaque fraction sont donnés dans la figure.

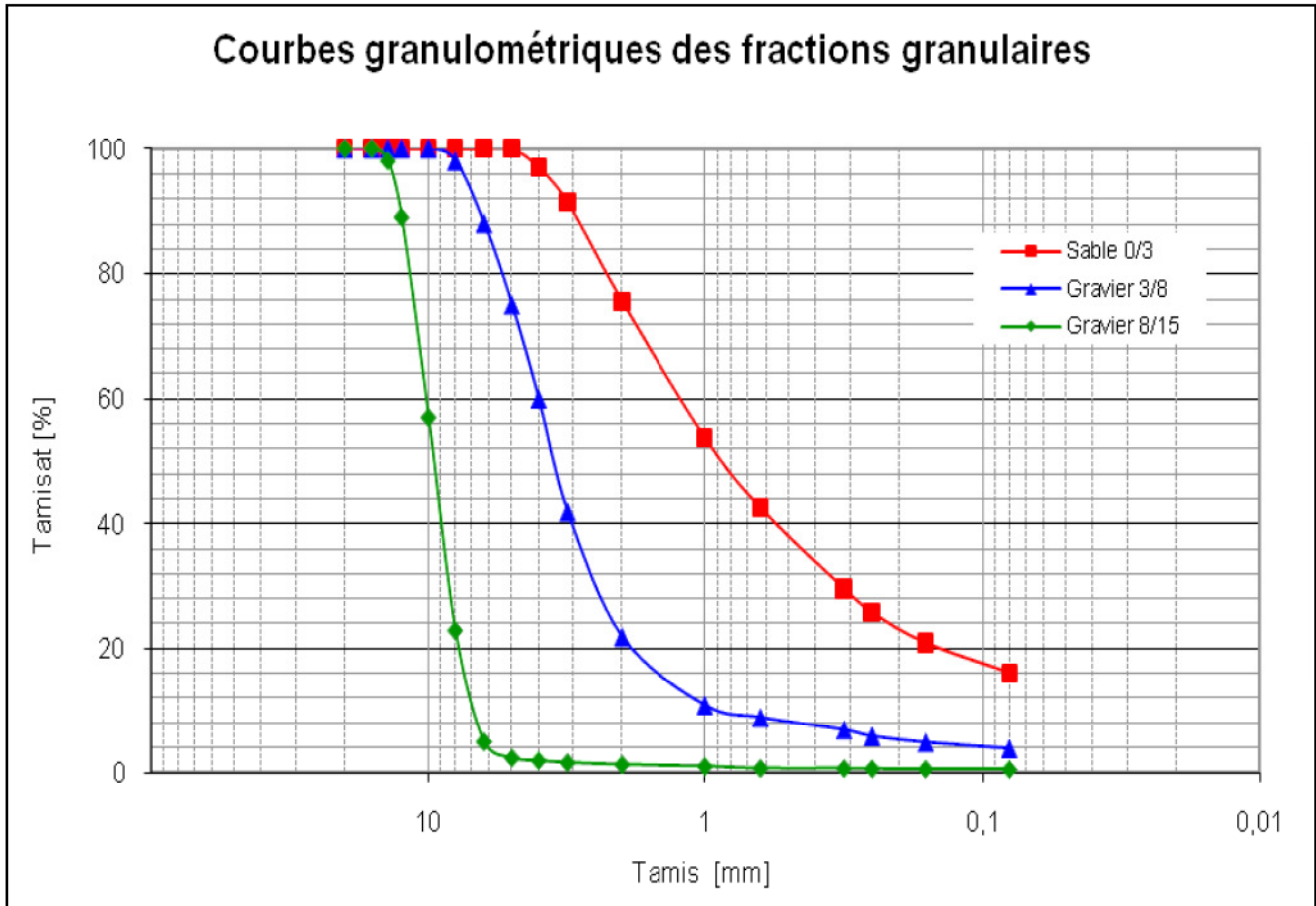


Figure 43: Courbes granulométriques des fractions granulaires

Tableau 8: Résultats de l'analyse granulométrique.

Tamis (mm)	0/3 (%)	3/8 (%)	8/15 (%)
40	100	100	100
31.5	100	100	100
25	100	100	100
20	100	100	100
16	100	100	100
14	100	100	98
12.5	100	100	89
10	100	100	57
8	100	98	23
6.3	100	88	5
5	100	75	2.4
4	97	60	1.96
3.15	91.4	42	1.63
2	75.6	22	1.33
1	53.8	11	1.03
0.63	42.6	9	0.73
0.315	29.7	7	0.7
0.25	25.9	6	0.65
0.16	21	5	0.6
0.08	16.2	4	0.56

Commentaire :

Nous remarquerons que les trois classes granulaires présentent une granulométrie continue.

4.2.2 BITUME

Les bitumes purs utilisés dans notre étude expérimental s'agit un bitumes purs de grade (35/40) souvent utilisés en Algérie en enrobés des couches de roulement.

Des essais de caractérisation ont été effectués sur ceux-ci; Il s'agit des essais de:

Tableau 9: Résultats des essais effectués sur le bitume utilisé.

Caractéristique	Norme	Résultat	Recommandations (NTF 65001)
Pénétrabilité à 25°C (1/10 mm)	NA 5192	33	30 à 45
T.B.A (°C)	NA 2617	52	52 à 60
Ductilité à 25°C (cm)	NA 5223	Sup100	Sup60

Commentaire :

Les résultats obtenus montrent que le bitume 30/45 analysé a des caractéristiques qui répondent conformément à la norme.

4.3 FORMULATION DU MÉLANGE BB 0/14

La formulation étudiée concerne un béton bitumineux semi grenu 0/14 catégorie "C" confectionné à partir des classes granulaires 0/3, 3/8 et 8/15 et un bitume de classe 30/45, ce type de BB est fréquemment utilisé en revêtement dont les gammes d'épaisseur d'application sont comprises entre 7 et 9cm (minimum absolu 6cm).

4.3.1 DÉTERMINATION DU MÉLANGE GRANULAIRE OPTIMAL

L'objectif visé est de maîtriser la disposition granulaire du squelette minéral et choisir une formule qui donne un mélange ayant la meilleure aptitude au compactage et qui pourrait conférer une meilleure stabilité au mélange hydrocarboné.

La composition suivante a été retenue.

Tableau 10: Composition du mélange granulométrique

Fractions	Pourcentage (%)
Sable 0/3	39
Fraction 3/8	20
Fraction 8/15	41

La courbe granulométrique du mélange issue de cette formule s'inscrit parfaitement dans le fuseau spécifique de Béton Bitumineux Semi Grenu défini dans les recommandations algériennes pour l'utilisation des bitumes et enrobés bitumineux de Février 2004.

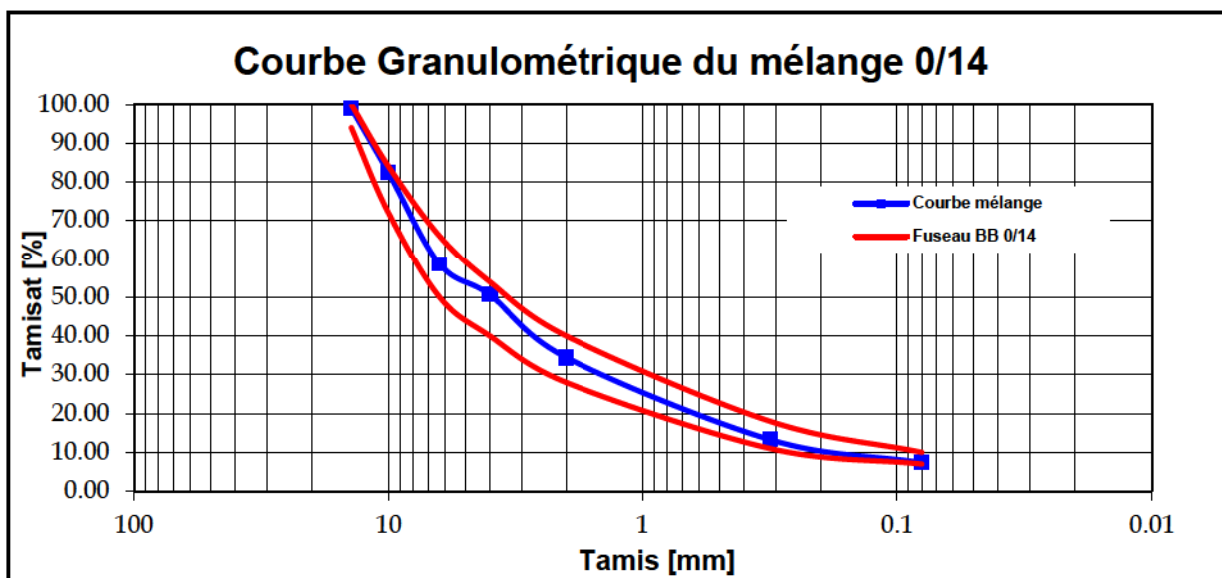


Figure 44: Courbe granulométrique du mélange et fuseau 0/14

4.3.2 DÉTERMINATION DES TENEURS EN BITUME

Pour déterminer cette teneur en liant optimale, on introduit la notion de surface spécifique des granulats notée Σ et exprimée en m^2/kg , c'est-à-dire la surface développée qu'auraient les granulats assimilés à des sphères $TL = \alpha \cdot K \sqrt{\Sigma}$.

- **La Surface spécifique des granulats Σ :**

La surface spécifique c'est-à-dire la surface développée qu'auraient les granulats assimilés à des sphères et qui calculé par l'équation suivante,

$$100\Sigma = 0.25 G + 2.3 S + 12s + 135 f \text{ en } m^2/kg.$$

On obtient une valeur de la surface spécifique $\Sigma = 11,78 m^2/kg$

- **Coefficient correcteur α :**

Le coefficient de correction α destiné à tenir compte de la masse volumique des granulats si cette masse volumique est égale à $2,65 \text{ g/cm}^3$, $\alpha = 1$.

Dans le cas contraire, $\alpha = 2,65 / Mv$.

Ou : Mv : masse volumique du granulat

Dans notre cas $Mv = 2.66$ alors $\alpha = 0.996$.

- **Détermination de la teneur en liant en fonction du module de richesse (k)**

Le module de richesse k qui caractérise l'épaisseur moyenne de fin autour des granulats peut prendre les valeurs comprises entre 3,45 et 3,9 dans le cas d'un béton bitumineux.

Tableau 11: Teneurs en bitume retenues

Formule	A	B	C
Module de richesse	3.45	3.60	3.75
Teneur en liant	5.59	5.83	6.07

4.3.3 COMPOSITION DES MÉLANGES

La fabrication de l'enrobé bitumineux au niveau du laboratoire a été réalisée conformément à la norme NFP 98-250-1.

Dans notre cas on va utiliser la formulation MARSHALL afin de choisir la meilleure composition (stabilité et fluage) de mélange (teneur en liant hydrocarboné) qui sera utilisé lors la confection de mélange modifiée à l'additif (chaux hydratée) du béton bitumineux Semi Grenu.

✓ **ESSAI MARSHALL**

Les enrobés bitumineux sont compactés dans des moules à l'aide d'une dame en vue de réaliser des éprouvettes cylindriques.

Ces éprouvettes (température: 60°C) sont placées entre les deux mâchoires semi-cylindriques d'une presse qui se rapprochent l'une de l'autre à une vitesse constante.

Au cours de l'essai, la charge et la déformation sont enregistrées jusqu'à la rupture. Cet essai rentre dans la catégorie des essais empiriques à chargement unique qui, vu la complexité des sollicitations engendrées, ne permet pas la détermination d'une propriété intrinsèque du matériau. Il conduit à la détermination directe de deux grandeurs : le fluage (mm) et la stabilité Marshall (KN), deux grandeurs liées à la caractérisation empirique de l'orniérage.

► **Principe de l'essai**

L'essai consiste à compacter des éprouvettes par damage selon un processus déterminé, puis les soumettre à un essai de compression (diamètre) suivant une génératrice dans des conditions définies.

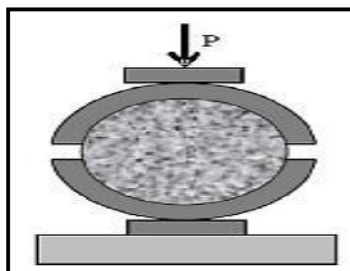


Figure 45: Principe d'essai de Marshall

► **Mode opératoire**

- Mettre à l'étuve le mélange retenu d'un poids total dépendant du nombre de moule ainsi que le bitume et les moules Marshall à une température spécifiée pendant 2 heures.



Figure 46: Étuve de chauffage

- Sortir de l'étuve la cuve contenant le mélange granulaire et la poser sur la plaque chauffante ainsi que le bitume.

- Peser la quantité de bitume relative à chaque mélange.
- Malaxer le mélange granulaire pour homogénéiser pendant 30 secondes.
- Peser et verser la quantité du liant préconisée en actionnant le malaxeur pendant 2 à 5 minutes



Figure 47: Enrobé après malaxage

- Remplir le moule d'enrobé à raison de 1200g à 1g près.



Figure 48: Remplissage des moules Marshall

- Compacter à la dame électrique à 50 coups par face.



Figure 49: Dame électrique de compactage

- Laisser refroidir le moule sous jet d'eau pendant 15minutes.

- Démouler les éprouvettes et les laisser refroidir pendant 5 heures à une température ambiante.



Figure 50:Éprouvettes Marshall

- Mesurer les dimensions des éprouvettes au 0.1mm près en 5 zones différentes (en hauteur)
- Préparer le bain-marie à $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.



Figure 51: Bain-marie

- Immerger les éprouvettes et les mâchoires d'écrasement dans l'eau à 60°C pendant 40Minutes, échelonné à 5 minutes par éprouvette.
- Sortir l'éprouvette du bain et la placer sur les mâchoires d'écrasement, l'ensemble est porté entre les plateaux de la presse réglée à une vitesse de 0.86mm/s.



Figure 52:Presse Marshall

- Procéder à l'écrasement et lire la valeur en KN correspond à la charge maximale d'écrasement.
- Mesurer la valeur de l'affaissement de l'éprouvette selon son diamètre vertical au moment de la rupture (fluage en 1/10) mm à l'aide du pied à coulisses.

RÉSULTATS DES ESSAIS

Formule granulaire	A	B	C	Spécifications
Teneur en bitume (%)	5.59	5.83	6.07	-
Densité vraie	2.464	2.456	2.449	-
Densité apparente	2.4	2.4	2.39	-
Vides %	3	2	2	3 - 5
Stabilité (KN)	12.29	10.2	9.009	> 10,5
Fluage (mm)	3.616	4.266	4.4	< 4
Quotient Marshall	3.4	2.39	2.05	-

Commentaires :

D'après les résultats des essais effectués dans notre expérimentation au niveau du laboratoire du CTPP, nous remarquons que :

- Les compacités des éprouvettes ne sont pas acceptables, à l'exception de la formule « A » où le pourcentage de vide est acceptable.
- Les stabilités de MARSHALL ne sont pas conformes aux spécifications à l'exception de la formule « A » où la stabilité est acceptable.
- La résistance au fluage de la formule « A » conforme à la spécification.
- La formule « A » présente des bonnes performances en termes de compacité, stabilité, fluage, quotient Marshall,

Pour ces raison on opte la formulation « A » pour une étude de confection d'un enrobé bitumineux traité par la chaux hydraté qui sera détailler dans le prochain chapitre

NB: Le quotient Marshall est un indicateur pour la résistance aux déformations, permanentes, contraintes de cisaillement et aussi pour l'orniérage des enrobés bitumineux. Les plus grandes valeurs du quotient indiquent que les mélanges sont plus résistants aux déformations permanentes.

CHAPITRE VI.

INFLUENCE DE L'AJOUT DE

CHAUX SUR L'ENOBÉ

1. INTRODUCTION
2. FABRICATION DE L'ENROBÉ MODIFIÉ A LA CHAUX
 - 2.1 PRÉPARATION DES MÉLANGES
 - 2.2 ÉTAPES DE FABRICATION DE L'ENROBÉ MODIFIÉ
 - 2.3 ESSAI DE DÉTERMINATION DE LA SENSIBILITÉ DE L'EAU (EN 12697-12)
3. ANALYSE DE BÉTON BITUMINEUX TRAITÉ A LA CHAUX
 - 3.1 Éprouvettes conservées à sec
 - 3.2 Éprouvettes après l'immersion pendant 3 jours
 - 3.3 Calcul de la tenue à l'eau :
4. INTERPRETATION DES RESULTATS
5. CONCLUSION 74

1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre il sera question sur l'étude et l'exploitation des résultats quant à l'incorporation de la chaux hydratée afin de voir et d'apprécier l'influence du pourcentage de la chaux ajouté sur la sensibilité de l'enrobé bitumineux à l'eau (tenue à l'eau).

On notera que ce travail de recherche sur la chaux hydratée est d'actualité, vu l'ampleur et l'importance du projet et vu la campagne expérimentale dans notre projet étant très importante avec plusieurs essais, et vu le temps très court imparti à notre thèse de Master, nous nous sommes basés sur la présentation de nos résultats et avec une interprétation comparatif avec les quelques résultats antérieures.

2. FABRICATION DE L'ENROBÉ MODIFIÉ A LA CHAUX

La fabrication de l'enrobée modifié par ajout d'un pourcentage de chaux hydratée est généralement assurée par un malaxeur à cuve thermostatée où en ajoute les granulats mélangé et traité avec la chaux hydraté, le bitume, ensuite le malaxage.

2.1 PRÉPARATION DES MÉLANGES

Dans cette étude on va préparer quatre mélanges trois mélange contient trois différents pourcentages de la chaux et le quatrième mélange sera le témoin.

Les paramètres de chaque mélange sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 12: Paramètre de chaque mélange

N°	POURCENTAGE DE LA CHAUX %	MASSE DE LA CHAUX AJOUTÉE (G)	MASSE DE L'EAU AJOUTÉE (G)	MASSE DE GRANULATS (G)
1	0	0	0	7000
2	1	70	68	7000
3	2	140	70	7000
4	4	280	69	7000

2.2 ÉTAPES DE FABRICATION DE L'ENROBÉ MODIFIÉ

Les différentes étapes de fabrication sont :

- L'échantillonnage des classes granulaires entrant dans la composition du mélange est assuré par quartage qui doit être réalisé avec les matériaux légèrement humide pour éviter la perte d'éléments fins selon la norme P 18-553 « Préparation d'un échantillon pour essai».
- Les granulats sont séchés dans une étuve ventilée à une température comprise entre 90 et 110°C jusqu'à masse constante sachant que chaque classe granulaire est pesée, à 0.1% près.
- Pour chaque pourcentage de la chaux hydratée on enlève la masse de cette quantité d'additif de la masse totale de fins ($\geq 80 \mu\text{m}$) pour assurer la masse de fins nécessaire et donnée par la formulation de base.



Figure 53: Ajouter la chaux hydratée au mélange

- Les granulats secs et la chaux ont mélangé manuellement dans un bac avec certain quantité d'eau pour assurer l'adhérence entre l'additif et les granulats.



Figure 54: Quatre mélanges de cette étude

- Les quatre mélanges sont couverts et conservée pendant 7 jours dans une zone exposé à la température ambiante.
- Après une semaine les matériaux et le bitume à mélanger sont posés dans l'étuve sous une température 150 C° pendant 2 heures pour être prés au malaxage un par un.
- La cuve contenant le granulat qu'il faut mélanger est placée sur le malaxeur en essayant de limiter au maximum les déperditions de température.
- Ensuite on a ajouté la quantité de bitume nécessaire au mélange dans la cuve.
- Le malaxeur est actionné afin de bien homogénéiser les granulats et le bitume qui doit être maintenu à une température de l'ordre de 170C°, la durée de malaxage doit conduire à un mélange visuellement homogène est qui doit être comprise généralement entre 5 à 7 min.



Figure 55: Malaxeur utilisé au niveau du laboratoire CTTT

- Après le malaxage du premier mélange, on verse l'enrobé résultant dans un autre bac et on poursuit le malaxage du prochaine mélange et etc...
- Le reste d'étapes de remplissage des éprouvettes et le compactage ont les même de l'essai de MARSHALL qui a été bien détailler le chapitre précédent.

2.3 ESSAI DE DÉTERMINATION DE LA SENSIBILITÉ DE L'EAU DES ÉPROUVETTES BITUMINEUSES (EN 12697-12)

► Principe de l'essai

Un ensemble de corps d'épreuve cylindriques est divisé en deux lots équivalents et mis en conservation. Un lot est conservé sec à la température ambiante tandis que l'autre est saturé d'eau et conservé dans un bain à température de conservation élevée.

Après conservation, la résistance à la traction indirecte de chacun des deux lots est déterminée conformément à l'EN 12697-23 à la température d'essai prescrite. Le rapport entre la résistance à la traction indirecte du lot conservé dans l'eau et celle du lot sec est déterminé et exprimé en pourcentage. [7]

► Presse d'essai

Presse de type Marshall conforme au EN 12697-34 ou appareil similaire, ayant une capacité minimale recommandée de 28 kN et permettant d'appliquer sur les éprouvettes d'essai des charges à une vitesse de déformation constante de (50 ± 2) mm/min après une période transitoire représentant moins de 20 % du temps de chargement. La vitesse de déformation doit être maintenue.



Figure 56: Presse de l'essai de traction indirecte

► Préparation des échantillons

• Nombre d'éprouvettes

Préparer au moins trois éprouvettes par échantillon soumis à l'essai (dans cette étude pour chaque mélange il y a deux éprouvettes à immerger et deux éprouvettes non à immerger). [7]

Remarque :

Les étapes de fabrications des éprouvettes (préparation des matériaux, malaxage, remplissage des éprouvettes et le compactage sont identiques à ceux d'essai de MARCHAL.

- **Dimensions des éprouvettes**

Les éprouvettes cylindriques utilisées ont un diamètre de (100-3) mm, la granulométrie du mélange bitumineux ne doit pas excéder 22 mm.

Sauf spécifications contraires, les éprouvettes doivent avoir une hauteur comprise entre 35 mm et 75 mm. [7]

- ▶ **Conditionnement**

1. **Corps d'épreuve secs**

Conserver le lot de corps d'épreuve « sec » sur une surface plane à température ambiante (20 ± 5) °C.

2. **Corps d'épreuve humides**

- Placer le lot de corps d'épreuve « humides » sur la plaque perforée dans un cristalliseur rempli d'eau distillée à (20 ± 5) °C à un niveau tel que la face supérieure des corps d'épreuve soit à au moins 20 mm de la surface de l'eau. [7]

Remarque :

L'utilisation d'eau potable du réseau au lieu d'eau distillée est permise à condition qu'il ait été démontré que les approvisionnements locaux en eau conduisent au même résultat qu'avec de l'eau distillée.

- Mettre sous vide pour obtenir une pression absolue (résiduelle) de ($6,7 \pm 0,3$) kPa en moins de (10 ± 1) min. Faire chuter la pression lentement pour éviter un endommagement des corps d'épreuve du à leur dilatation.
- Laisser les corps d'épreuve immergés dans l'eau pendant une durée supplémentaire de (30 ± 5) min.
- Mesurer les dimensions des corps d'épreuve conformément à EN 12697-29.
- Calculer le volume des éprouvettes. Écarter tous les corps d'épreuve dont le volume s'est accru de plus de 2 %.
- Placer le lot de corps d'épreuve humides dans un bain d'eau à (40 ± 1) °C pendant une période comprise entre 68 h et 72 h. [7]

► **Mode opératoire**

- La température d'essai doit être choisie entre 5 °C et 25 °C avec une tolérance de $\pm 2^\circ\text{C}$; $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ est la température standard recommandée.
- Porter le lot des corps d'épreuve secs à la température d'essai en le plaçant :
 - Dans un bain d'eau ;
 - Protéger de l'eau le corps d'épreuve au moyen d'un sac en plastique souple ou d'une autre protection étanche appropriée et s'assurer que la protection étanche est bien appliquée sur la surface de l'éprouvette pour permettre une transmission correcte de la chaleur
 - Dans une enceinte thermostatique.
- Porter le lot des corps d'épreuve humides à la température d'essai en le plaçant :
 - directement dans le bain d'eau ; ou
 - dans des sacs étanches en plastique souple remplis d'eau et placés dans une enceinte thermostatique.
- Laisser les corps d'épreuve dans le bain d'eau ou dans l'enceinte pendant au moins 2h pour des corps d'épreuve d'un diamètre inférieur à 150 mm et pendant au moins 4h pour les corps d'épreuve d'un diamètre supérieur ou égal à 150 mm.
- En cas d'utilisation d'une enceinte pour la mise à la température d'essai, la température doit être contrôlée en plaçant parmi les corps d'épreuve une éprouvette factice équipée d'un thermomètre incorporé.
- Sécher la surface des corps d'épreuve humides avec un chiffon et effectuer immédiatement. [7]
- **Déterminer la résistance à la traction indirecte sur les éprouvettes conformément au mode opératoire de l'EN 12697-23. L'essai de traction indirecte doit être réalisé moins de 1 min après que le corps d'épreuve ait été sorti du bain :**



Figure 57: Écrasement d'une éprouvette

- ✓ Aligner l'éprouvette sur la bande de chargement inférieure, pour pouvoir la charger diamétralement.

- ✓ Exercer une compression sur l'éprouvette. Appliquer la charge diamétrale de manière continue, sans à-coups, à une vitesse de déformation constante de (50 ± 2) mm/min après une période transitoire représentant moins de 20 % du temps de chargement, jusqu'à atteindre la charge maximale ;
- ✓ Enregistrer la charge maximale P appliquée, i : l'indice de détermination. [8]

► **Calculs**

Pour chaque éprouvette, calculer la résistance à la traction indirecte, ITS , selon la formule suivante :

$$ITS = \frac{2 \times 0.232 \times P}{\pi \times D \times H} \quad [8]$$

- ITS est la résistance à la traction indirecte, exprimée en giga pascals (GPa), arrondie à trois chiffres significatifs ;
- P est la charge maximale, exprimée en kilo newtons (kN), arrondie à trois chiffres significatifs ;
- D est le diamètre de l'éprouvette, exprimé en millimètres (mm), à une décimale près ;
- H est la hauteur de l'éprouvette, exprimée en millimètres (mm), à une décimale près.

Tenue à l'eau :

I/C (r/R) : tenue à l'eau = aptitude de l'enrobé à résister au désenrobage sous l'action de l'eau. Elle est calculée selon la formule ci-dessous

$$ITSR = \frac{100 \times ITS_w}{ITS_d}$$

- $ITSR$ est le rapport en pourcentage (%) des résistances à la traction indirecte ;
- ITS_w est la résistance à la traction indirecte moyenne en kilo pascals (kPa) arrondie à trois chiffres significatifs du lot "humide" ;
- ITS_d est la résistance à la traction indirecte moyenne en kilo pascals (kPa) arrondie à trois chiffres significatifs du lot "sec". [8]

3. ANALYSE DE BÉTON BITUMINEUX TRAITÉ A LA CHAUX

Dans l'expérimentation nous avons l'enrobé de référence qui servira de base de référence, puis on passe par l'ajout de la chaux hydratée tout en faisant varier le pourcentage pondéral de 1 % à 2 % et 4 % afin de voir et d'apprécier la variation des différentes performances et caractéristiques de l'enrobé en fonction de la variation de la teneur en chaux éteinte.

Il est intéressant d'étudier dans un premier temps les différentes caractéristiques de l'enrobé modifié puis par la suite de faire une étude comparative sur les caractéristiques et les performances obtenues par rapport à celui de l'enrobé de référence.

Les résultats de l'essai de détermination de la sensibilité à l'eau de l'enrobé modifiées à la chaux sera présentés dans les tableaux suivants.

3.1 Éprouvettes conservées à sec :

Tableau 13: Caractéristique de chaque éprouvette conservée à sec

Sensibilité à l'eau pour les éprouvettes conservées à SEC						
Mélange	Densité	Epaisseur (mm)	Diamètre (mm)	Lecture (KN)	R _T indirecte (GPa)	R _T indirecte (Moy) (GPa)
Témoin	2.31757263	64.28	101.5	53	1.19978124	1.29283422
	2.30780234	65.42	101	62	1.3858872	
0.01	2.32384077	68.28	98.5	68	1.49330073	1.58278125
	2.34614834	65.62	99.6	74	1.67226178	
0.02	2.3735011	66.76	98.6	76	1.70525157	1.66781879
	2.30992356	65.04	101.4	67	1.50046	
0.04	2.3482019	66.48	100.1	81	1.79774479	1.7359919
	2.35768486	64.92	101	77	1.73443867	

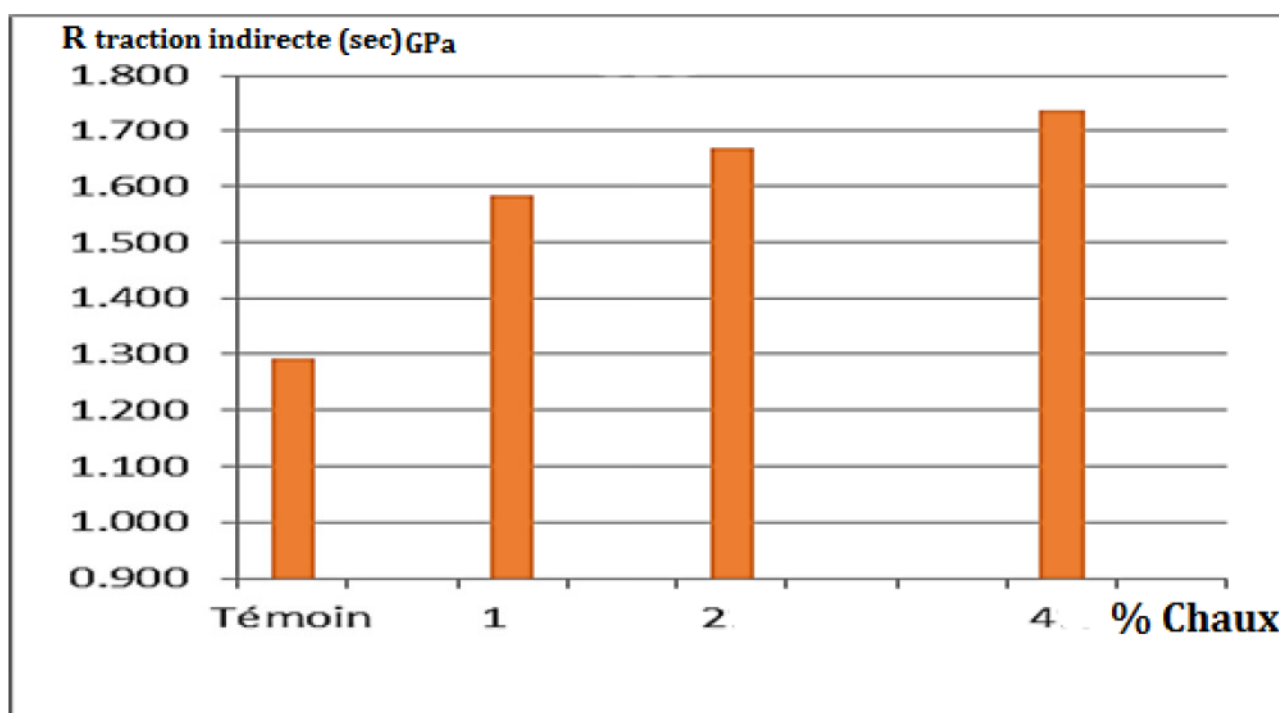


Figure 58: Variation de résistance à la traction indirecte (sec) en fonction du teneur en chaux

3.2 Éprouvettes après l'immersion pendant 3 jours :

Tableau 14: Caractéristique de chaque éprouvette immergée

Sensibilité à l'eau pour les éprouvettes après l'immersion						
Mélange	Densité	Épaisseur (mm)	Diamètre (mm)	Lecture (KN)	R _T indirecte (GPa)	R _T indirecte (Moy) (GPa)
Témoin	2.21166314	68.54	100.5	46	0.98631532	1.14964173
	2.31757263	64.28	101.5	58	1.31296815	
0.01	2.34878337	65.42	99.8	71	1.60614731	1.43593303
	2.3228845	66.78	99.6	57	1.26571874	
0.02	2.37209332	66.88	98.5	68	1.52456002	1.52456002
	2.37214776	64.02	100.6	72	1.65115162	
0.04	2.35768486	64.02	101	70	1.59892872	1.56662138
	2.31249407	68.34	98.6	70	1.53431404	

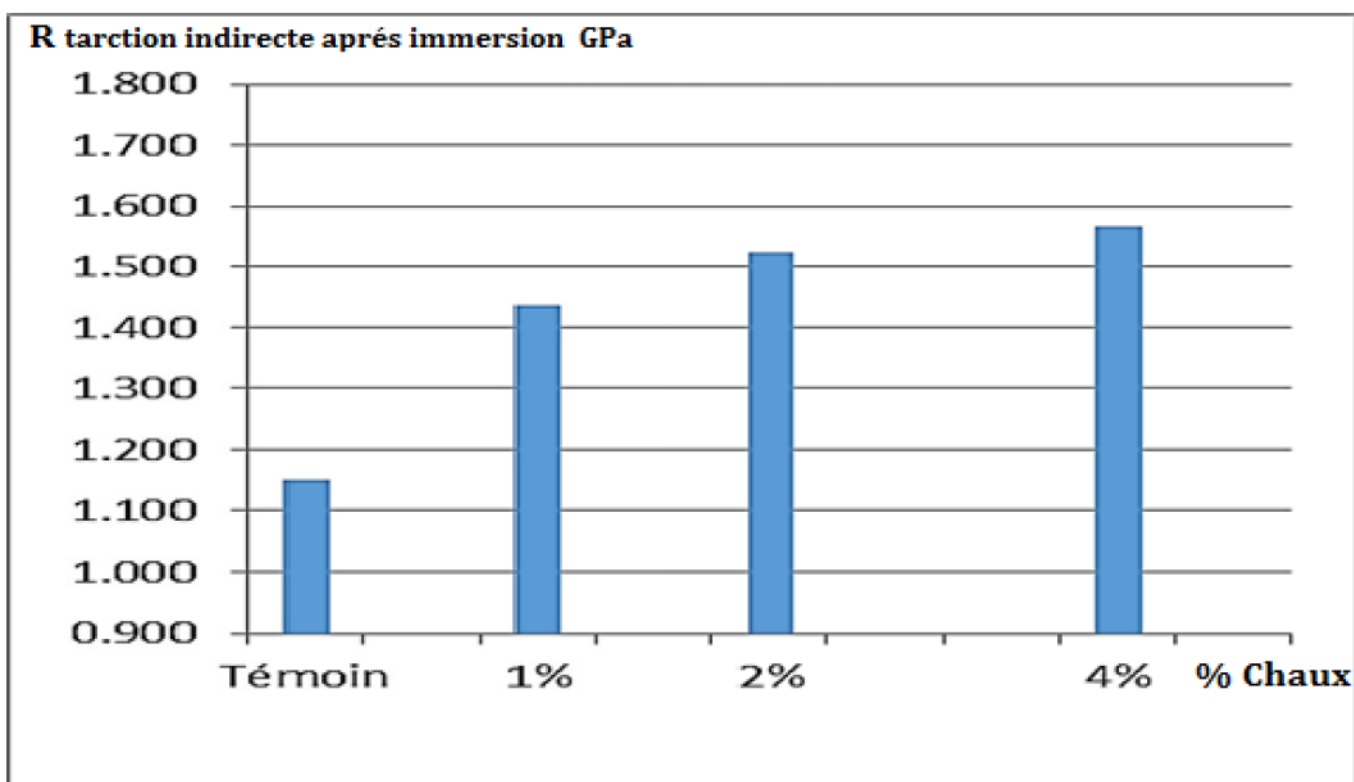


Figure 59: Variation de résistance à la traction indirecte (immersion) en fonction du teneur en chaux

✓ **COMMENTAIRE :**

- On remarque dans les deux graphes que la résistance à la traction indirecte augmente avec l'augmentation de pourcentage de chaux ajoutée.
- On remarque aussi bien la grande différence de résistance à la traction indirecte entre le mélange témoin (sans l'ajout de la chaux) et les autres mélanges traités à la chaux.

3.3 Calcul de la tenue à l'eau :

ITSR : tenue à l'eau = aptitude de l'enrobé à résister au désenrobage sous l'action de l'eau. Elle est calculée selon la formule ci-dessous

$$\text{ITSR} = \frac{100 \times \text{ITS}_w}{\text{ITS}_d}$$

- **ITS_w** est la résistance à la traction indirecte moyenne en kilo pascals (kPa) arrondie à trois chiffres significatifs du lot "humide" ;
- **ITS_d** est la résistance à la traction indirecte moyenne en kilo pascals (kPa) arrondie à trois chiffres significatifs du lot "sec". [8]

✓ **Les résultats de calcul de la tenue à l'eau :**

Tableau 15 : Résultats de calcul de tenue à l'eau

Mélange	Sec	Immersion	I/S	Spécifications Limite (NFP 98-251-1)
Témoin	1.29283422	1.14964173	0.88924142	>0.85
0.01	1.58278125	1.43593303	0.9072214	>0.85
0.02	1.66781879	1.52456002	0.91410412	>0.85
0.04	1.7359919	1.56662138	0.90243588	>0.85

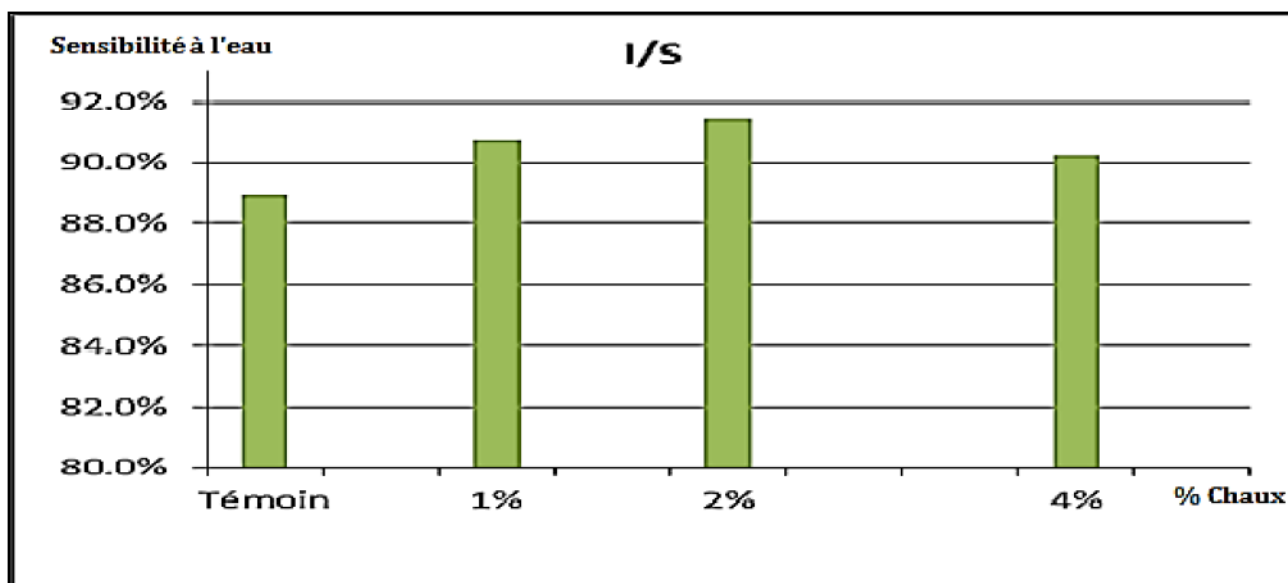


Figure 60 : Variation de la tenue à l'eau en fonction du teneur en chaux

COMMENTAIRE :

La variation que la tenue à l'eau en fonction du teneur en chaux ajoutée dans ce graph se décompose en deux parties :

- **Pourcentages [0% -1%- 2%]**

L'augmentation de tenue à l'eau avec l'augmentation de pourcentage de chaux ajouté.

- **Pourcentage 4%**

On remarque bien dans ce point la chute de la valeur de tenue à l'eau.

4. INTERPRETATION DES RESULTATS

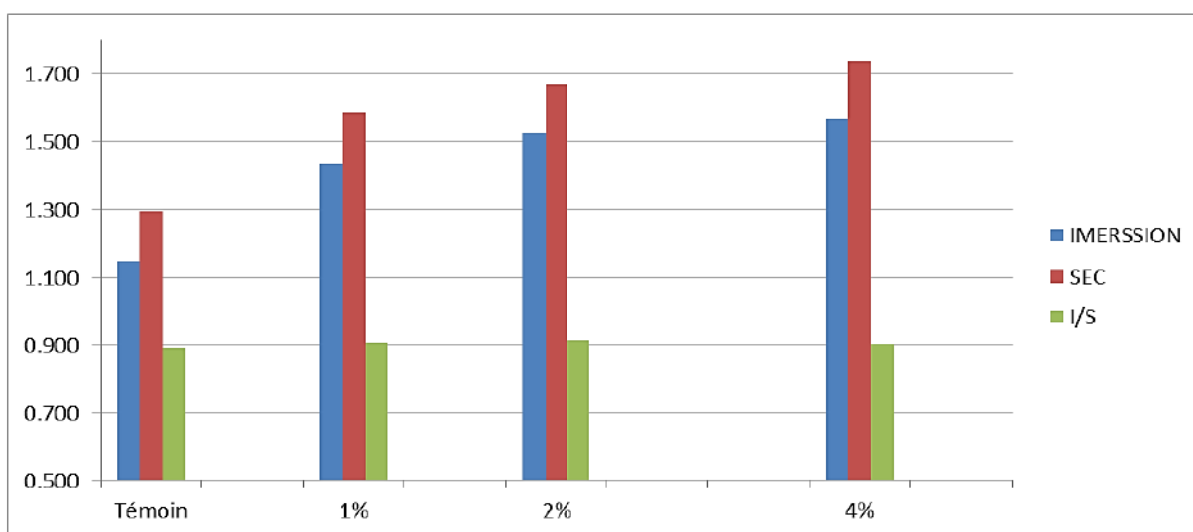


Figure 61 : Résultats de l'essai de la sensibilité à l'eau en chaque mélange

Après l'analyse des résultats ci-après on a constaté les points suivants :

1. D'après les spécifications de la norme NFP 98-251-1, la tenue à l'eau du béton bitumineux semi grenu doit être supérieure à 0.85 qu'est vérifiée dans cette étude.
2. Pour chaque mélange traité à la chaux (pourcentage de la chaux ajouté) on remarque que les résistances de béton bitumineux à la traction indirecte sans immersion et la résistance après immersion sont supérieurs aux résistances à traction indirecte sans immersion et après immersion de mélange témoin qui confirme l'effet positive de la chaux hydratée sur la sensibilité à l'eau de l'enrobé bitumineux.
3. L'augmentation de pourcentage de chaux ajouté à l'enrobé accroît encore plus sa résistance à la traction indirecte soit après l'immersion ou bien sans immersion qui prouve que la quantité de l'additif (chaux hydratée) joue un rôle important dans l'amélioration de l'adhérence entre les granulats et le bitume .
4. Contrairement à la résistance à la traction indirecte l'augmentation de quantité de la chaux hydratée ajoutée à l'enrobé n'est pas toujours implique l'amélioration de la tenue à l'eau, le graph dans la figure 63 montre bien la chute de la valeur de tenue à l'eau de l'enrobé dans le quatrième mélange ou on a utilisé le pourcentage 4 % de la chaux éteinte qui confirme que l'effet de la chaux sur la sensibilité à l'eau de l'enrobé a une valeur optimale qui est 2%.

Tableau 16: Comparaison entre les pourcentages de chaux ajouté

Pourcentage de chaux dans le mélange	Comparaison avec recommandation de sensibilité à l'eau par la norme	Résistance à la traction indirecte après immersion	Résistance à la traction indirecte sans immersion
0%	0.88924142 > 0.85 => vérifiée (suffisante)	1.14964173	1.29283422
1%	0.9072214 > 0.85 => vérifiée (suffisante)	1.43593303	1.58278125
2%	0.91410412 > 0.85 => vérifiée (suffisante)	1.52456002	1.66781879
4%	0.90243588 > 0.85 => vérifiée (suffisante)	1.56662138	1.7359919

5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, il a été questions de la présentation et de l'interprétation des résultats de notre étude qui s'est avéré très longue quant à la préparation et la manipulation des éprouvettes. Cette campagne nous parait très riche en renseignements afin de l'exploiter à la lumière de la recherche bibliographique, tant du point de vue qualitatif que quantitatif.

On signalera que l'ajout de la chaux hydratée dans la limite de notre étude a amélioré d'une manière générale les performances de l'enrobé bitumineux spécialement la tenue à l'eau qui est l'objectif de cette étude en fonction de plusieurs pourcentages de chaux hydraté ajouté mais avec une valeur idéale de sensibilité à l'eau en utilisant le pourcentage 2 % qui est la valeur optimale a ajouter pour obtenir la meilleure sensibilité à l'eau de l'enrobé bitumineux.

Néanmoins, on sait que chaque enrobé (chaque composition d'enrobé) a un seuil de tenue à l'eau suffisante pour lutter contre l'agressivité de l'eau (cette valeur est donnée par la recommandation de la norme en fonction de plusieurs critères : zone climatique, qualité de matériaux, dans notre cas cette valeur égale à 0.85).

Donc si on analyse de point de vis la suffisance de la tenue à l'eau a certain point on peut dire que le pourcentage 4 % est la quantité optimale pour cette formulation car elle donne en plus de la sensibilité à l'eau nécessaire, la meilleure résistance à la traction indirecte.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

A travers la bibliographique la valorisation de la chaux hydraté possède beaucoup d'aspects et avantages. Parmi, la multitude d'utilités, nous sommes intéressés dans le cadre de notre travail de recherche, au béton bitumineux traité à la chaux hydraté utilisé dans le domaine routier dans les travaux publics.

On notera que dans les applications routières la chaux hydraté est de plus en plus incorporées dans le bitume pour doter la couche de roulement en béton bitumineux 0/14 afin d'améliorer les performances intrinsèques notamment la sensibilité à l'eau qui fait l'objet de notre étude.

Il a été présenté la formulation adoptée dans notre recherche, relatif à un béton bitumineux semi grenu 0/14 catégorie "C" confectionné à partir des classes granulaires 0/3, 3/8 et 8/15 et un bitume de classe « 30/45 ». On notera que l'objectif visé est de choisir une formule qui donne un mélange ayant la meilleure aptitude au compactage et qui pourrait conférer une meilleure stabilité au mélange hydrocarboné.

De même, il a été questions de faire une tentative d'interprétation à partir de nos résultats et de certaines recherches antérieures, tout en faisant une comparaison entre les paramètres influent sur la sensibilité à l'eau de l'enrobé, ou on a constaté l'effet positive de l'ajout de la chaux hydraté, cet effet comporte une augmentation de la résistance à la traction indirecte (sèche ou immersion) proportionnelle au pourcentage de chaux ajouté ; et une relation composé entre la sensibilité à l'eau et le pourcentage de chaux ajouté qui a une valeur optimale « 2% » qui donne la plus grand valeur de tenue à l'eau de l'enrobé bitumineux ,mais si on prend en considération la résistance a la traction indirecte on trouve que la meilleure pourcentages c'est la pourcentage « 4 % » car elle donne la sensibilité à l'eau nécessaire et d'autre part la meilleure résistance à la traction indirecte.

Enfin, Il parait que la combinaison de ces avantages la longévité de vie de chaussées et l'économie de coût (coût chaux éteinte et de procédure de traitement) prouvent que la solution de traitement de l'enrobé à la chaux hydraté est plus rentable comparé aux autres solutions, mais il reste à prouver par d'autres recherches.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Damien LESBATS/Henri PEJOUAN(2013), Journée séminaire ATR-COTITA Les dégradations des chaussées, BORDEAUX.
- [2] Valery MAUDUIT/Caroline Mauduit(2013), Dégradation subite des enrobes bitumineux par période de gel/dégel, PARIS.
- [3] DIDIER LESUEUR/RÉGIS LORANT(2013), Chaux hydratée pour augmenter la durabilité des enrobés.
- [4] European Lime Association(2011), Chaux hydratée un additif reconnu pour des enrobes bitumineux plus durables, BRUSSELS.
- [5] Union des Producteurs de Chaux (2011), La chaux hydratée Un additif éprouvé Pour des chaussées bitumineuses plus durables, PARIS.
- [6] Guide technique «Recommandations sur l'utilisation des bitumes et des enrobés bitumineux à chaud», fascicule2 (La formulation), CTTT, Février 2004.
- [7] NORME EUROPÉENNE EN 12697-12, Décembre 2003, Détermination de la sensibilité de l'eau des éprouvettes bitumineuses
- [8] NORME EUROPÉENNE EN 12697-23 Juillet 2003, Détermination de la résistance à la traction indirecte des éprouvettes bitumineuses.
- [9] Syndicat Mixte d'Action pour l'Expansion de la Gâtine (2011), Les matériaux de revêtement : Les enrobés, Paris.
- [10]K. AIT MOKHTAR, (1994) « influence de l'affinité liant Hydrocarboné granulat sur les caractéristiques mécaniques de Mélanges hydrocarbonés »Thèse de Magister, USTHB génie civil.
- [11] Clément Louis Treussart (1829). Mémoire sur les mortiers hydrauliques et sur les mortiers ordinaires, Paris.
- [12] Baha Vural Kok, Mehmet Yilmaz, (2009), The effects of using lime and styrene-butadiene-styrene on moisture sensitivity resistance of hot mix asphalt ,Firat University, Elazig, Turkey
- [13] Mohammed H. Al-Sayed, (1992), PROPERTIES OF ASPHALTIC PAVING MIXES CONTAINING HYDRATED LIME WASTE, Department of Civil Engineering Waste Management & Research Bahrain.