



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

MASTER

Géologie appliquée

Option : Géomatériaux et géotechniques

THEME :

**Contrôle qualité de la mise en œuvre du béton
bitumineux dans le cadre des travaux de bitumage
de la route Boundiali-Madinani**

ANNEE ACADEMIQUE :

2017-2018

N° D'ORDRE 0113/2018

CANDIDAT

NOM : KOUASSI

PRENOMS : Zia Jaurès

JURY

Président : M. DIBI Brou, Maître de Conférences, Université Jean LOROUGNON GUEDE

Directeur : M. KOUAKOU Conand Honoré, Maître de Conférences, Université Félix HOUPHOUET-BOIGNY

Encadreur : M. N'DRI Brou Etienne, Maître-Assistant, Université Jean LOROUGNON GUEDE

Examineur : M. ADJIRI Oi Adjiri, Maître-assistant, Université Jean LOROUGNON GUEDE

Soutenu publiquement

le 15 janvier 2019

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	i
REMERCIEMENTS	iv
LISTES DES SIGLES ET ACRONYMES.....	v
LISTES DES TABLEAUX.....	vi
LISTES DES FIGURES.....	vii
LISTE DES ANNEXES	viii
INTRODUCTION	
PREMIERE PARTIE : GENERALITES	
1.1.Contexte géographique et géologique du cadre d'étude	- 3 -
1.1.1.Présentation de la structure d'accueil.....	- 3 -
1.1.2. Contexte géographique.....	- 3 -
1.1.3. Contexte géologique et pédologique	- 6 -
1.2. Généralités sur les bétons bitumineux et le contrôle qualité	- 8 -
1.2.1.Constituants de la route	- 8 -
1.2.1.1. Structure d'une route	- 8 -
1.2.1.2.Matériaux rencontrés	- 10 -
1.2.2. Béton bitumineux	- 10 -
1.2.2.1. Définition	- 10 -
1.2.2.2. Compositions	- 10 -
1.2.3. Mise en œuvre des enrobés	- 12 -
1.2.3.1. La couche d'imprégnation	- 12 -
1.2.3.2. La couche d'accrochage	- 12 -
1.2.3.3. Mise en place proprement dite	- 12 -
1.2.4. Contrôle qualité des enrobés bitumineux	- 13 -
1.2.4.1. Qualité	- 13 -

1.2.4.2. Contrôle	- 14 -
1.2.4.3. Contrôle qualité	- 14 -
1.2.4.4. Référentiels	- 15 -
1.2.4.5. Stratégies de contrôle de la mise en œuvre des enrobés	- 16 -
1.3. Maitrise statistique des procédés	- 16 -
1.3.1. Définition	- 16 -
1.3.2. Les cartes de contrôles	- 16 -
1.3.3. Les cartes aux mesures individuelles	- 17 -
1.3.4. Indice de capabilité procédé	- 17 -
DEUXIEME PARTIE: MATERIEL ET METHODES	
2.1. Matériel	- 18 -
2.1.1. Appareillage	- 18 -
2.2. Méthodes	- 20 -
2.2.1. Collecte des données	- 21 -
2.2.1.1. Prélèvement et codification des échantillons	- 21 -
2.2.1.2. Préparation des échantillons au laboratoire	- 21 -
2.2.2. Caractérisation mécanique du béton bitumineux	- 22 -
2.2.3. Contrôles de la composition du béton bitumineux	- 23 -
2.2.3.1. Détermination de la teneur en liant	- 23 -
2.2.3.2. Détermination de la granulométrie du mélange bitumineux	- 24 -
2.2.4. Contrôle de la température	- 25 -
2.2.5. Contrôles techniques à posteriori	- 25 -
2.2.5.1. Travaux réalisés sur le terrain : réalisation de carottage	- 25 -
2.2.3.2. Travaux de laboratoire	- 26 -
2.2.5. Traitement des données	- 27 -
Conclusion partielle	- 27 -

TROISIEME PARTIE: RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Résultats	- 28 -
3.1.1. Composition du béton bitumineux mis en œuvre	- 28 -
3.1.1.1. Granulométrie du béton bitumineux	- 28 -
3.1.1.2. Teneur en bitume.....	- 29 -
3.1.2. Résultats des essais Marshall	- 31 -
3.1.3. Prise de température	- 32 -
3.1.4. Contrôles de la densité in-situ de la couche de roulement en béton bitumineux	- 33 -
3.1.4.1. Conformité de l'épaisseur des éprouvettes.....	- 33 -
3.1.4.2. Conformité du pourcentage des vides des éprouvettes	- 35 -
3.1.4.3. Conformité des résultats du taux de compactage par éprouvette	- 36 -
3.1.4.4. Conformité de l'indice de compactage individuel d'une carotte	- 37 -
3.1.5. Analyse des régressions	- 38 -
3.1.5.1. Analyse de la corrélation	- 38 -
3.1.5.2. Analyse de la régression linéaire des caractéristiques de qualité.....	- 39 -
3.1.6. Contrôle de la conformité des résultats des essais de compacité in-situ par les cartes de contrôle aux mesures individuelles	- 40 -
3.1.6.1. Test de Normalité	- 40 -
3.1.6.2. Carte de contrôle des épaisseurs des éprouvettes.....	- 42 -
3.1.6.3. Cartes de contrôle des pourcentages de vides	- 43 -
3.1.6.4. Cartes de contrôle de la compacité des carottes	- 44 -
3.1.6.5. Carte de contrôle de l'indice de compactage.....	- 46 -
Conclusion partielle.....	- 46 -
3.2. Discussion	- 47 -

CONCLUSION

REFERENCES

RESUME

REMERCIEMENTS

Au terme de notre travail nous tenons à exprimer notre reconnaissance à L'Eternel, notre créateur de nous avoir donné la force, la volonté et le courage dans le succès de ce mémoire. Je tiens à témoigner de ma profonde gratitude particulièrement à l'endroit de l'administration de l'Université Jean Lorougnon Guédé avec à sa tête le Professeur TIDOU Abiba Sanogo, pour avoir accepté notre inscription au sein de son institution.

Je remercie également Docteur KOUASSI Kouakou Lazare, Directeur de l'UFR Environnement pour son soutien et

Mes Remerciements vont au Docteur N'DRI Brou Etienne, mon encadreur pédagogique, pour sa disponibilité, ses conseils et orientations lors de la rédaction de ce mémoire.

Mes remerciements aux membres du jury dont les commentaires et les analyses pertinentes contribueront à l'amélioration des résultats de ce travail.

Un merci spécial à tous mes enseignants du Département Sciences de la Terre et de l'Environnement, en particulier Docteur NIANGORAN Kouadio Charles, Directeur du département Sciences de la Terre et de l'Environnement, Docteur SOMBO Abé Parfait, responsable de parcours Master de Géologie Appliquée et Docteur BIE Goha René pour leur disponibilité, leur soutien et leur dynamisme pour le travail.

J'adresse mes sincères remerciements à l'administration du Laboratoire d'Essais de Contrôle d'Analyse et d'Assistance Technique (LECAT) avec à sa tête Monsieur SORO Souleymane, pour m'avoir accueilli et permis d'effectuer mon stage dans de bonnes conditions.

C'est bien volontiers que je remercie Monsieur FLEAN Christian Maxime, Responsable Géotechnique, Route et Hydraulique de LECAT, mon maître de stage.

Un grand merci pour tout le personnel de LECAT à Boundiali, tant en entreprise que sur le chantier pour m'avoir bien intégré et offert un cadre de travail agréable.

J'adresse ma profonde gratitude à tous ceux qui de loin ou de près ont contribué d'une quelconque manière à la réalisation de ce projet.

Je remercie toute ma famille, tous mes amis en particulier ceux qui m'entourent en dehors du cadre académique, mes cousins, ne pouvant les nommer tous je cite Zia Levergor, trouvant à travers ces mots, le témoignage de ma reconnaissance pour leurs encouragements permanents.

Enfin, je souhaite adresser ma gratitude à mes parents Koffi Kouassi et Brou Affoué, mes sœurs et mes frères spécialement Zia Mireille et Zia Christelle, Zia Hubert et Zia Alexis pour leur soutien, leur patience, leur amour infini, et leurs différentes contributions pour ma formation.

LISTES DES SIGLES ET ACRONYMES

Sigles	Définitions
AGEROUTE	Agence de G estion des R outes
BB	B éton B itumineux
BBDR	B éton B itumineux D rainant
BBM	B éton B itumineux M ince
BBME	B éton B itumineux à M odule E levé
BBSG	B éton B itumineux S emi-grenu
BBTM	B éton B itumineux T rès m inces
BBUM	B éton B itumineux u ltra m inces
DA	D ensité A pparente
ES	E quivalent de S able
GB	G rave B itume
GNT	G raies N on T raitées
GRH	G raies R econstituées H umidifiées
HMA	H ot M ix A sphalt
IC	I ndice de C ompactage
ISO	I nternational S tandardisation O rganisation
LA	L imites D ' A tterberg
LCI	L imite de C ontrôle I nférieure
LCPC	L aboratoire C entral des P onts et C haussées
LCS	L imite de C ontrôle S upérieure
LECAT	L aboratoire d' E ssai, de C ontrôle, d' A nalyses et d' A ssistance T echnique
MDE	M icro- D eval
MSP	M aitrise S tatistique des P rocédés
ONU	O rganisation des N ations U nies
PS	P oids S pécifique
SORUBAT	S ociété de R outes et de B âtiments
TL	T eneur en l iant

LISTES DES TABLEAUX

Tableau I. Appareillage pour l'extraction du liant bitumineux.....	- 18 -
Tableau II. Appareillage général pour essai Marshall.....	- 19 -
Tableau III. Résultats de l'analyse granulométrique	- 28 -
Tableau IV. Résultats de la teneur en bitume.....	- 30 -
Tableau V. Résultats de l'essai Marshall.....	- 31 -
Tableau VI. Résultats des prises de températures	- 32 -
Tableau VII. Résultats des essais de densité in-situ de la couche de roulement.....	- 33 -
Tableau VIII. Synthèse des résultats de mesures des épaisseurs des carottes.....	- 33 -
Tableau IX. Statistiques descriptives des données sur les épaisseurs des carottes	- 34 -
Tableau X. Récapitulatif des résultats de pourcentages de vides sur carottes	- 35 -
Tableau XI. Synthèse des résultats de la compacité.....	- 36 -
Tableau XII:Résultats de l'indice de compactage	- 37 -
Tableau XIII. Corrélation entre les différents critères de qualité de l'enrobé	- 38 -
Tableau XIV. Analyse de régression sur les carottes étudiées.....	- 39 -
Tableau XV. Résumé des résultats du Test de Normalité.....	- 41 -

LISTES DES FIGURES

Figure 1. Localisation de la zone d'étude	- 4 -
Figure 2. Carte géologique du Nord-Ouest ivoirien.....	- 7 -
Figure 3. Constitution d'une structure routière.....	- 9 -
Figure 4. Matériel pour l'extraction du bitume.....	- 18 -
Figure 5. Dispositif pour la pesée hydrostatique et tamis pour l'analyse granulométrique. -	20 -
Figure 6. Opération de quartage d'un échantillon d'enrobés bitumineux	- 22 -
Figure 7: Essai de carottage et éprouvettes du BB compacté.....	- 25 -
Figure 8. Courbes granulométriques du béton bitumineux mis en œuvre	- 29 -
Figure 9. Teneur en liant des différents échantillons d'enrobés.....	- 30 -
Figure 10. Stabilité et fluage Marshall des enrobés entre la planche 1 et la planche 5.....	- 32 -
Figure 11: Distribution de la température de mise en œuvre des enrobés	- 32 -
Figure 12. Diagramme de Pareto des épaisseurs des carottes	- 35 -
Figure 13. Distribution des différentes valeurs du pourcentage de vides	- 36 -
Figure 14. Distribution de la compacité	- 37 -
Figure 15: Droites de régression linéaire du pourcentage des vides et des épaisseurs en fonction de la compacité.....	- 40 -
Figure 16: Droite de régression de l'indice de compactage en fonction de la compacité-	40 -
Figure 17: Diagramme de probabilité des épaisseurs et de la teneur en vides.....	- 41 -
Figure 18: Diagramme de probabilité de la compacité et de l'IC des éprouvettes	- 42 -
Figure 19. Carte I-EM des épaisseurs de carottes	- 43 -
Figure 20. Carte I-EM du pourcentage des vides.....	- 44 -
Figure 21. Carte I-EM de la compacité	- 44 -
Figure 22: Carte I-EM de l'indice de compactage.....	- 45 -

LISTE DES ANNEXES

Annexe I : les types de béton bitumineux et leurs caractéristiques	I
Annexe II: Classes de bitumes purs	I
Annexe III: tableau récapitulatif des essais mois de mai-juin 2018 BB 0/14 mm	III
Annexe IV: fiche technique des résultats des essais de carottages	IV
Annexe V: Procès-verbaux des essais de température	IX
Annexe VI: essai Marshall selon la norme française P98-251-2	XIV
Annexe VII : NF EN 12697-1 Août 2012, Teneur en liant soluble	XX

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Les enrobés bitumineux sont majoritaires dans les structures de chaussées dans le monde. Chaque jour plusieurs kilomètres de rues, de routes, d'autoroutes, de pistes d'aéroports sont construits pour donner un dynamisme aux régions, participer et contribuer efficacement au processus de création des richesses dans un pays et lutter contre l'exclusion (Barco, 2007 ; Halil & Khoudja, 2017). Ne dit-on pas souvent que " la route précède le développement ". En d'autres termes, le réseau routier joue un rôle important dans le sentier du développement en établissant d'une part les liaisons entre les régions productrices et celles qui ne le sont pas, et d'autre part, entre le pouvoir central, les pouvoirs provinciaux et les entités décentralisées (Ntomba, 2010).

La qualité des infrastructures routières tant lors de la conception de chaussées neuves que de la maintenance de chaussées anciennes est au cœur des ambitions de développement et d'amélioration du cadre de vie en Côte d'Ivoire. Le besoin d'assurer la durabilité des routes est un souci majeur des gestionnaires et acteurs du réseau routier national. En effet, vu le manque de coordination dans l'attribution et l'exécution des travaux, la mauvaise exécution ou tout compromis sur la qualité de la mise en œuvre des matériaux par les entreprises réalisatrices de nos routes, son comportement est significativement dérégulé. On assiste de ce fait à l'apparition de dégradations précoces et continues de nos chaussées au niveau des couches de roulement réalisées en enrobés bitumineux. Ainsi, la route doit faire l'objet d'une attention particulière car sa mise en œuvre demande souvent des investissements très élevés à tel point que nos états empruntent des fonds la plupart du temps aux institutions financières pour pouvoir la réaliser (Tapsoba, 2012).

Sur la base de ces constatations, s'astreindre à une obligation matériaux routiers de qualité est désormais une impérieuse nécessité afin de pouvoir répondre de façon efficiente aux exigences de durabilité structurelle ou de qualité d'usage des chaussées, spécifiées par les maîtres d'ouvrage. De ce fait, afin d'avoir un retour sur investissement les entreprises et les clients, tant au niveau de la fabrication qu'au niveau de l'application, effectuent un contrôle qualité des enrobés bitumineux. Satisfaire les besoins, exprimés ou implicites, c'est, par définition, élaborer et mettre en œuvre une démarche qualité, en vue d'offrir une route de bonne qualité et pérenne (Kara Slimane, 2013).

A cet égard, le groupement d'entreprise SORUBAT/MK chargé des travaux a sollicité les services du Laboratoire d'Essais de Contrôle d'Analyse et d'Assistance Technique (LECAT) pour assurer le contrôle qualité des matériaux et leurs mises en œuvre pendant le bitumage de la route Boundiali-Madinani. C'est dans ce cadre que s'inscrit notre étude qui porte sur le « contrôle qualité de la mise en œuvre du béton bitumineux dans le cadre des travaux de bitumage

INTRODUCTION

de la route Boundiali-Madinani ». L'objectif de cette étude est de s'assurer que les exigences et les performances contractuelles que doit satisfaire l'enrobé bitumineux fourni et mis en place sont bien respectées. De manière spécifique, le propos de ce document est de déterminer, à travers une gamme d'essais, la composition et les performances mécaniques des enrobés à mettre en œuvre et de réaliser des essais de densité in situ sur la chaussée une fois l'application d'une couche d'enrobés effectuée d'une part. D'autre part, nous tenterons d'évaluer de façon satisfaisante la conformité des résultats obtenus avec les références normatives du projet.

Ce document débute par une introduction et se structure ensuite autour de trois (03) parties :

- la première partie de ce mémoire portera sur une revue bibliographique des travaux antérieurs en rapport avec le sujet d'étude. Elle présentera essentiellement les caractéristiques principales de la zone d'influence du projet et une généralité sur le béton bitumineux et le contrôle qualité ;
- la seconde partie présentera le matériel et les méthodes qui ont permis de rendre l'étude effective ;
- la dernière partie présentera les résultats et une discussion de ces résultats. Le document s'achèvera par une conclusion, qui ouvre des perspectives de recherche sur le thème étudié, et par une référence bibliographique.

PREMIERE PARTIE :
GENERALITES

GENERALITES

1.1. Contexte géographique et géologique du cadre d'étude

1.1.1. Présentation de la structure d'accueil

Le Laboratoire d'Essais, de Contrôle, d'Analyses et d'Assistance Technique (LECAT) a été créé en janvier 2014. Son siège social est à Abidjan, précisément à la Riviera Faya, sur la nouvelle route d'Abatta à 500 m du carrefour nouveau goudron en face de la cité BAD.

La société LECAT a pour missions :

- la réalisation d'études, de contrôles des travaux routiers, des bâtiments, des ouvrages de génie civil et d'expertises en appui au secteur de production du bâtiment et des travaux publics ;
- de rendre effectifs des études d'impact environnemental et social et des plans de gestion environnementale sociale ;
- la recherche dans les domaines de l'hydraulique et de l'assainissement.

A ce titre elle assure les prestations ci-dessous :

- les études et sondages géotechniques ;
- les études et contrôle qualité des matériaux ;
- les études d'impact Environnementale et Social et des plans de Gestion Environnementale social ;
- les études des sols de fondations et l'assistance technique.

1.1.2. Contexte géographique

1.1.2.1. Localisation et situation

L'axe Boundiali – Madinani est une route reliant la ville de Boundiali à celle de Madinani. Cet axe médian longitudinal à la ville de Boundiali relie les régions de la Bagoé et du Kabadougou. La zone d'implantation du projet est à cheval sur deux (02) départements situés au Nord de la Côte d'Ivoire : Boundiali et Madinani précisément entre les longitudes 6°56'44,4"O à 6°29'00,4"O et les latitudes 9°31'11,6"N à 9°36'42,6"N (**Figure 1**). Ces départements appartiennent respectivement aux régions administratives de la Bagoé avec Boundiali, comme chef-lieu de région et de Kabadougou avec Madinani comme chef-lieu de région. Le Département de Boundiali, situé dans la partie septentrionale du pays, couvre une superficie de 8 644 km². Le Département de Boundiali, outre la Sous-préfecture de Boundiali, comprend six (06) Sous-préfectures que sont : Ganaoni, Gbon, Kolia, Kasséré ; Sianhala et Siempurgo. Le département abrite 163 425 habitants (Traoré, 2010). Le département de Madinani avec une

GENERALITES

population de 39704 habitants couvre une superficie de 3445 km² et comprend trois (03) sous-préfectures Fengolo, N'goloblasso et Madinani (RGPH, 2014).

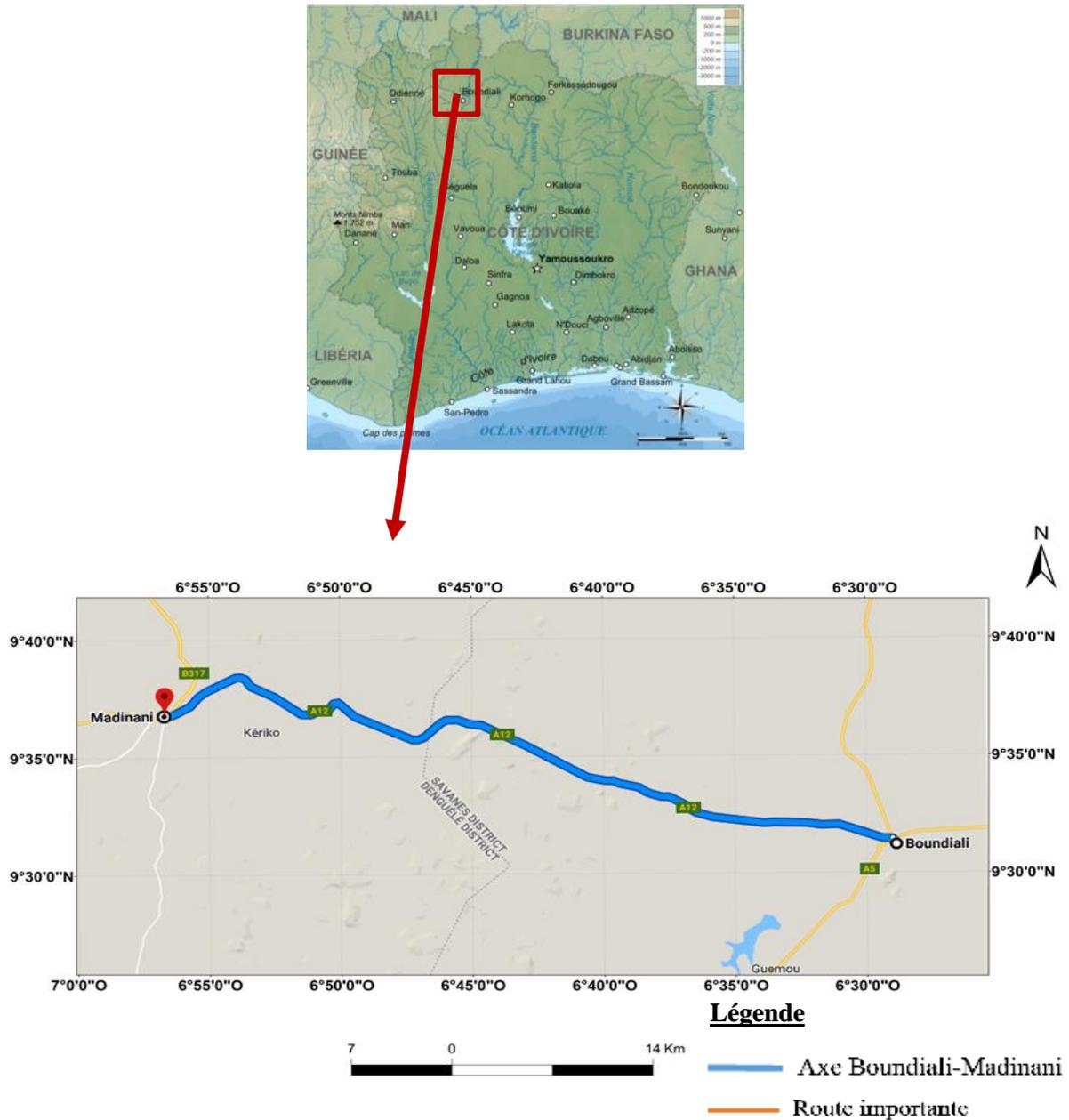


Figure 1. Localisation de la zone d'étude

1.1.2.2. Géomorphologie

1.1.2.2.1. Orographie

Le relief de la zone d'étude est monotone, avec des altitudes variant, en moyenne, entre 300 et 400 m. Mais, des inselbergs granitiques culminant parfois à plus de 500 m d'altitude existent dans le paysage. Le trait principal qui se dégage est l'étalement des plateaux d'où émergent

GENERALITES

certain reliefs tels que les collines coiffées de cuirasses ferrugineuses (latéritiques), témoins d'ancienne (s) pénéplaine(s). Ces plateaux sont affectés d'une pente très faible et régulière (N'guessan, *et al.*, 2015). En direction d'Odienné, près de Madinani, à une trentaine de kilomètres de Boundiali, s'élève un massif montagneux dont le point culminant atteint 894 mètres et qui fait partie du « Massif du Denguélé » (Anonyme, 2018).

1.1.2.2. Hydrographie

Le drainage régional est assuré par les affluents du fleuve Niger (au nord), du Sassandra et du Bandama (au sud) (Adja *et al.*, 2009 ; Beadou et Sayol, 1980). Le réseau hydrographique de la zone d'étude est dominé par la rivière Bagoé. Elle prend sa source à l'ouest du département de Boundiali, vers Madinani, près des villages de Kébi et Niempurgué. Elle est longue de 230 km avant de quitter le territoire de la Côte d'Ivoire et son bassin versant couvre une superficie d'environ 4740 km² au niveau de la sous-préfecture de Kouto (Girard *et al.*, 1971).

Dans cette région, toutes les rivières importantes montrent de nombreux méandres pratiquement sur tous leurs cours. Les plaines alluviales inondables sont abondantes tout le long de ces rivières aux cours sinueux. Leur importance croît de l'ouest vers l'est. Inversement la densité du réseau hydrographique décroît de l'ouest vers l'est (Beadou et Sayol, 1980).

1.1.2.3. Climat

Dans le domaine routier, le facteur climatique joue un rôle important aux stades des études, de la construction et de la vie de l'ouvrage sous les aspects suivants : drainage, teneur en eau des sols et matériaux, érosion, choix des matériaux et des liants, etc. (ALBTP et CTGA, 2018). Le climat de la zone d'étude est de type tropical sec de savane classé As selon la classification de Koppen. C'est un climat de régime tropical de transition atténué appelé localement « Climat soudanais » qui règne dans la partie Nord et Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire (Filleron, 1995 ; Traoré, 2010). D'après Girard (1961) et Assouman *et al.* (2016), ce climat chaud est caractérisé par deux saisons distinctes et par un harmattan où il fait relativement frais le matin et la nuit :

- une longue saison sèche d'octobre à mai, pendant laquelle les précipitations sont strictement nulles ou insignifiantes ;
- une saison des pluies marquée par deux maxima pluviométriques, l'un en juin et l'autre en septembre.

On compte en moyenne 77 jours de pluies par an dans le département de Boundiali, le total des précipitations annuelles se situent autour des 1 300 à 1 500 mm. Le nombre de jours de pluie dans l'année varie entre 64 et 86, et la température varie de 23 °C à 26 °C en période de fraîcheur

GENERALITES

et de 30 °C à 35 °C en période de chaleur. Le mois le moins chaud est janvier et les mois les plus chauds sont mars et avril (ONU-Habitat, 2012).

1.1.2.2.4. Végétation

La zone d'étude est le domaine des forêts claires sèches et des savanes qui en dérivent. La forêt est formée de deux strates de végétation, l'une arborescente à petites cimes plus ou moins jointives et aux feuilles relativement petites et dures, l'autre herbacée comportant de hautes graminées. Les savanes sont soit drainées, soit marécageuses. Sur les sols drainés, la savane, suivant l'importance ou l'absence du peuplement forestier, prend le nom de savane boisée, savane arborée, savane arbustive, savane herbeuse (Le Roy et Robinet, 1973 ; Adja *et al.*, 2009).

1.1.3. Contexte géologique et pédologique

1.1.3.1. Présentation géologique de la zone d'étude

La structure géologique de la zone d'étude s'est entièrement formée au précambrien. C'est un complexe volcano-sédimentaire qui a été formé par remplissage d'une fosse géosynclinale, d'une part par sédimentation au précambrien moyen, d'autre part par coulée volcanique sous-marin entre des arêtes de gneiss granitique formées antérieurement (Le Roy et Robinet, 1973). Toutes les formations géologiques de la zone d'étude sont d'âge protérozoïque et toutes les roches appartiennent au complexe éburnéen (2500 – 1500 millions d'années). Cette région se caractérise par une succession de bandes schisteuses, de migmatites et de roches plutoniques d'orientation NNE – SSW (**figure 2**). Selon Beaudou et Sayol (1980), et Filleron (1995) les formations géologiques rencontrées sont essentiellement :

- des granites indifférenciés avec quelques zones de granites à biotite, de granites à faciès migmatitiques marqués et de granite porphyroïde. Ces granites sont dans des formations antérieures à la série de la Bagoé ;
- une zone de schistes indifférenciés et des schistes sériciteux. Ces roches font partie de la série de Bagoué. Ces schistes sont associés à de rares endroits aux roches basiques. L'orientation de ces bandes schisteuses est NNE-SSW ;
- des granites indifférenciés et des granites à deux micas ;
- une bande de granite à biotite bordée au sud-est de granodiorite et de granite calco-alcalin à amphibole et biotite.

1.1.3.2. Pédologie

La couverture pédologique de la zone d'étude est composée de plusieurs types de sols dont les lithosols qui constituent environ 39 % des sols du département de Boundiali. Ces lithosols présentent de faible capacité de rétention en eau et une insuffisante réserve minérale. L'on distingue également les vertisols, qui couvrent 4% des sols et sont présents exclusivement dans des plaines alluviales et des bas-fonds. À ceux-ci s'ajoutent les sols ferrugineux couvrant environ 57 % des sols (Akanvou, 1995). De très nombreux affleurements et inselbergs de granite existant dans la zone d'étude donnent des sols moins développés qui présentent des phénomènes d'induration faibles et irréguliers (Avenard, 1971). Ces formations granitiques donnent lieu à des arènes granitiques de portance acceptable lorsque la proportion de mica n'est pas très importante. Cependant, les roches altérées posent un problème grave à l'ingénieur routier, car leurs caractéristiques géotechniques sont mauvaises et elles sont très sensibles à l'érosion (ALBTP et CTGA 2018). Dans la région d'étude, les sols remaniés-modaux issus de schistes sont très gravillonnaires, mais ont une teneur élevée en argile (Sosson, 2004). Le produit d'altération de ces formations schisteuses constitue un matériau extrêmement médiocre, très argileux et à fort indice de plasticité, au-dessus duquel une épaisseur relativement forte de chaussée est souvent nécessaire. Dans l'ensemble, la zone d'étude est dominée par un sol de type ferrallitique moyennement et faiblement désaturé (BAD, 2015).

Ces formations latéritiques représentent les plus abondantes ressources de matériaux routiers « économiques » disponibles dans la zone d'étude et aussi les plus utilisées grâce à leurs caractéristiques géotechniques particulières (ALBTP et CTGA, 2018).

1.2. Généralités sur les bétons bitumineux et le contrôle qualité

1.2.1. Constituants de la route

1.2.1.1. Structure d'une route

Une chaussée est constituée d'une superposition de couches de matériaux différents sur un espace linéaire aménagé pour faciliter la circulation sécuritaire des véhicules et des personnes. Les interfaces peuvent être collés, glissant (décollés) ou semi-collés (Diakhaté, 2007). L'ensemble de ces couches est appelé superstructure et reposant sur une infrastructure (le terrassement nécessaire à la constitution de l'assise de la superstructure). Dans l'infrastructure, nous avons la plate-forme et la couche de forme en cas de remblai. Pour la superstructure, nous avons la couche de base, la couche de fondation et la couche de surface ou le revêtement (Thiaw, 2006 ; Mahamat, 2012) (**Figure 3**).

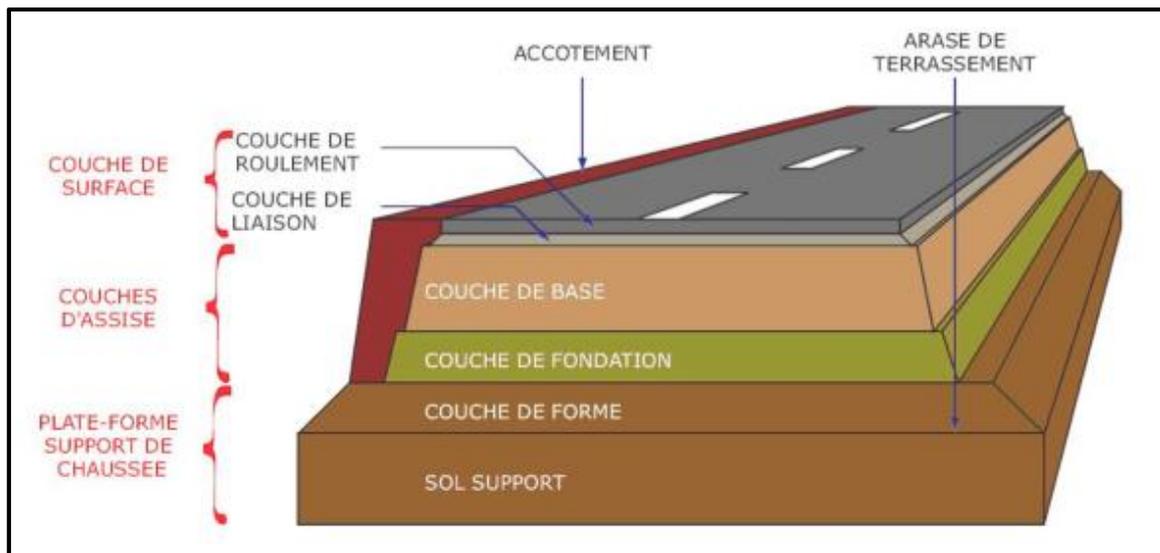


Figure 3. Constitution d'une structure routière (Pouteau, 2004)

1.2.1.1.1. Couche de surface

Elle se compose de deux couches : la couche de liaison et la couche de roulement. La couche de liaison assure une protection mécanique (transfert de charge), thermique (atténuation des variations de température) et hydrique (imperméabilisation) à la couche d'assise et permet d'adhérer fortement la couche de roulement avec la couche de base en (Navaro, 2011). La couche de roulement a une fonction de service. Elle est en contact direct avec les pneumatiques, assure la sécurité et garantit le confort des utilisateurs.

1.2.1.1.2. Corps de chaussée ou couche d'assise

Il est constitué d'une couche de base et éventuellement d'une couche de fondation. Son rôle consiste à réduire les contraintes transmises au sol en assurant une diffusion et une résistance mécanique de la structure aux sollicitations et contraintes engendrées par le trafic (Tapsoba, 2012). La couche de base qui supporte des efforts plus importants que la couche de fondation, nécessite un traitement plus élaboré.

1.2.1.1.3. Plateforme support

La plateforme support de la chaussée est composée du sol support (ensemble constitué par le terrain naturel et les remblais), partie non travaillée, et de la couche de forme qui répartit la charge des couches supérieures sur le sol support et participe à l'isolation thermique de ces dernières. La couche de forme sert à remplacer le fond de forme existant dans les zones de déblais lorsque le sol en place est de mauvaise qualité (Navaro, 2011). La couche de forme est exécutée sous la couche de fondation et permet d'améliorer la portance du fond de forme

lorsque celle-ci est insuffisante. Elle s'oppose également aux remontées d'eau du sol (anti-contaminante) et facilite aussi l'écoulement de l'eau d'infiltration vers les fossés (fonction drainante) (Konan, 2016).

1.2.1.2. Matériaux rencontrés

Différents types de matériaux se retrouvant sur les chaussées (Weber, 2012):

- les matériaux bitumineux : ce qu'on appelle les enrobés avec des compositions variées pour créer des matériaux tels que le BB, BBM, BBTM, BBSG, GB... ;
- les matériaux de structure traités aux liants hydrauliques tels que les sols traités, les bétons compactés ;
- les matériaux dits « blancs » : ce sont les matériaux granulaires non traités tels que les graves (GRH, GNT, ...) ;
- les matériaux naturels : les sols argileux ou limoneux, les graveleux latéritiques.

Les matériaux bitumineux sont les plus utilisés pour les chaussées et pour tout trafic car ils ont pour avantages d'assurer un bon compromis entre des performances moyennes comparés à celle des matériaux traités au liant hydraulique et une capacité de déformation sans fissures du support qui permet ainsi de supporter des déflexions très élevées (Navaro, 2011).

1.2.2. Béton bitumineux

1.2.2.1. Définition

Le béton bitumineux est un mélange, de haute qualité et parfaitement contrôlé réalisé à chaud et doit être bien compacté en une masse uniforme et dense (Thiaw, 2006). Il est constitué de granulats de bonne qualité et bien calibré provenant exclusivement de roches massives et de bitume pur (5 à 7% en masse) y compris des fillers pour réduire l'indice des vides (Bendimerad & Zadjou, 2015). Il fait appel à des propriétés bien spécifiques en particulier, un pouvoir d'adhésion aux granulats et une consistance variable avec la température. On distingue plusieurs types de béton bitumineux en fonction de l'utilisation que l'on souhaite en faire (Halil & Khoudja, 2017) (**Annexe I**).

1.2.2.2. Compositions

Un enrobé bitumineux est principalement constitué de deux éléments qui sont : le squelette granulaire et le bitume.

1.2.2.2.1. Granulats

Le squelette granulaire de l'enrobé est constitué de la matière minérale. Ils représentent environ 95 % en poids de l'enrobé soit 85-87% en volume. Cette importance quantitative affecte directement les caractéristiques mécaniques et les performances du mélange bitumineux en fonction du type d'enrobé. La qualité du granulats est liée soit à la nature de la roche d'origine (résistance aux chocs, à l'usure et au polissage) soit à la fabrication (granularité, propreté, forme et angularité). Les granulats proviennent généralement du concassage de roches massives ou du concassage de gravillons roulés d'origine sédimentaire. Après extraction et transformation par criblage, concassage il sera associé à une classe granulaire spécifique. Le mélange de plusieurs classes granulaires homogènes constitue le squelette granulaire d'un mélange bitumineux. Une classe granulaire (d/D) est répertoriée par la taille en millimètre du plus petit grain d et du plus gros grain D qui la composent. On peut distinguer les classes granulaires suivantes, exprimées en mm less fillers < 0,063 (0,08 mm selon le marché) ; les sables 0/2 ou 0/4 et gravillons 2/4, 2/6, 4/6, 6/10, 10/14, 10/20, 14/20 (Di Benedetto et Corté, 2005 ; Des Essarts, 2016).

1.2.2.2.2. Bitumes

Dérivé du mot latin *bitumen*, le bitume est un produit de composition chimique complexe composé de différents hydrocarbures de poids moléculaire élevé dans leur grande majorité appartenant aux groupes aliphatique et naphthénique (Pfeiffer, 1950 et Tachon, 2008). Connu depuis l'antiquité sous sa forme naturelle, aujourd'hui il est presque exclusivement produit par distillation des pétroles bruts c'est-à-dire provenant directement d'un puits de pétrole. De par ses propriétés d'adhérence, de plasticité, d'élasticité, d'insolubilité dans l'eau, de résistance à de nombreux agents chimiques, d'étanchéité, de durabilité, il est devenu un matériau phare dans la construction routière utilisé notamment comme liant dans l'élaboration des enrobés bitumineux (Larcher, 2014). Selon Tachon, (2008) ne pouvant pas être caractérisé chimiquement, le bitume est caractérisé par deux essais physiques normalisés :

- la pénétrabilité à l'aiguille est une méthode de détermination de la consistance des bitumes et des liants bitumineux à 25°C. La pénétrabilité d'un liant bitumineux est « la consistance exprimée comme l'enfoncement, en dixièmes de millimètre, correspondant à la pénétration verticale d'une aiguille de référence dans un échantillon d'essai du matériau, dans des conditions prescrites de température, de charge et de durée d'application de la charge » ;

- la température de ramollissement bille-anneau représente « la température à laquelle le matériau atteint une certaine consistance ».

1.2.3. Mise en œuvre des enrobés

1.2.3.1. La couche d'imprégnation

L'imprégnation d'une couche de base consiste à répandre à la surface de celle-ci, un bitume fluidifié ou fluxé (cut-back 0/1) qui pénétrera dans la partie supérieure de la couche de base sur une épaisseur d'environ 1 à 2 cm. L'imprégnation est réalisée sur la couche de base qu'après réception de cette dernière et à condition qu'elle n'est subie aucune dégradation. Avant toute exécution de l'imprégnation, un balayage mécanique énergique et un nettoyage de la surface de la couche de base sont préalablement réalisés. L'opération suivante consiste à faire un arrosage soutenu, suivi d'une période de séchage, afin de décongestionner les canaux capillaires favorisant la pénétration uniforme. L'épandage du liant se fait au moyen d'une épandeuse.

1.2.3.2. La couche d'accrochage

Cette opération est réalisée sur la couche de base, préalablement à la mise en place de l'enrobé par pulvérisation d'une émulsion cationique sur-stabilisée à un certain pourcentage de bitume résiduel, pour favoriser l'adhérence entre celle-ci et la couche de roulement. La couche de base imprégnée est préalablement et énergiquement balayée de manière à éliminer tout matériau roulant et toute poussière résiduelle. Le liant est pulvérisé de manière uniforme par une épandeuse à rampe, sous pression suffisante.

1.2.3.3. Mise en place proprement dite

Après la production des enrobés en centrale d'enrobage ceux-ci sont transportés au chantier de mise en œuvre au moyen de véhicules à bennes métalliques bâchés ou pas. La mise en place d'un revêtement bitumineux s'effectue à l'aide d'un finisseur et se déroule en trois étapes fondamentales : l'application, la finition et le compactage.

L'application des enrobés se fait mécaniquement par le biais d'un finisseur et manuellement sur des espaces de faibles surfaces, peu accessibles et non ou faiblement circulés (déversement à la brouette et étalement manuel) en fonction de la configuration du terrain. L'utilisation du finisseur permet d'avoir une répartition sans ségrégation des granulats, un alignement, des profils avec les différentes pentes, une épaisseur fixée et une température correcte.

La finition se fait toujours manuellement. Elle intervient par exemple au niveau d'un raccordement entre deux voies après le passage du finisseur, pour éviter des bourrelets visibles,

ou bien au niveau de la limite entre la voie qui vient d'être mise en œuvre et le trottoir, pour rendre celle-ci la plus nette possible (Des Essarts, 2016).

Le compactage constitue l'étape finale de la mise en œuvre des enrobés bitumineux. La qualité de la réalisation du compactage sera déterminante, d'un côté pour la durabilité de par la compacité qui pourra être obtenue, d'un autre côté pour les caractéristiques de surface de la couche de roulement (uni et texture). L'obtention de la qualité escomptée implique un choix approprié de matériels et des modalités de compactage en tenant compte des conditions climatiques et de l'environnement du chantier (LCPC, 2003). Le mode d'exécution du compactage couramment utilisé est celui dit « compacteur à pneumatiques en tête » défini par la planche d'essai avec un système composé de compacteurs à pneus et à rouleaux lisses à jantes métalliques. Les compacteurs à pneu et à rouleaux lisses effectuent à ce niveau au minimum six (06) passes chacun par bande mise en œuvre avec une vitesse d'environ dix (10) km/h.

1.2.3.4. La confection des joints

Les joints de construction sont inévitables et peuvent être à l'origine de certaines dégradations de la chaussée. L'épandage des enrobés au finisseur étant réalisé par demi-chaussée de part et d'autre de l'axe de la chaussée, il est réalisé des joints longitudinaux de préférence la même journée de mise en place afin de bénéficier de l'inertie de chute de température (Tapsoba, 2012). L'épandage de la couche nouvelle est conduit de façon à épouser parfaitement le bord de la couche ancienne, après découpage soigné de celui-ci, sauf lorsque l'enrobé de la couche ancienne n'est pas encore compacté ni complètement durci et refroidi. En outre, des joints transversaux sont réalisés à chaque reprise de la mise en œuvre. Pour se faire, l'extrémité de la bande ancienne est découpée sur toute son épaisseur à la scie de manière à exposer une surface fraîche, contre laquelle sont placés les enrobés de la couche nouvelle. Ensuite, la surface fraîche est badigeonnée juste avant la mise en œuvre de la couche nouvelle. Celle-ci est mise en place en considérant pour le joint transversal, une surépaisseur déduite du contre-foisonnement dans la vis du finisseur. A ce niveau le réglage se fait au moyen d'un technicien et le compactage se fait avec un cylindre lisse (Tapsoba, 2012).

1.2.4. Contrôle qualité des enrobés bitumineux

1.2.4.1. Qualité

Chacun peut comprendre intuitivement ce qu'est la qualité mais reste toutefois incapable d'en donner une définition précise. La qualité peut être plusieurs choses à la fois ; elle comporte des aspects objectifs et subjectifs mais aussi matériels et immatériels.

Selon le dictionnaire le petit Larousse (2010), le terme qualité a deux définitions. Premièrement la qualité correspond à la « manière d'être, bonne ou mauvaise de quelque-chose, état caractéristique ». Par exemple la qualité d'une étoffe, d'une terre. Dans ce cas-ci, elle est définie par signe distinctif et est affectée par un adjectif mélioratif ou péjoratif. Le second sens est « supériorité, excellence en quelque-chose ». Dans ce contexte la qualité fait référence à du haut de gamme, de l'esthétique.

Selon la norme ISO 9000 (2015), le mot « qualité » peut être défini comme : « l'ensemble des propriétés et caractéristiques d'un produit ou service qui lui confèrent l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés ou implicites ». La caractéristique est un trait distinctif (intrinsèque ou attribuée, qualitative ou quantitative, ...). La qualité n'est donc pas la performance maximale, le luxe, le haut de gamme, mais c'est la réponse ajustée et économique à une (des) exigence(s), c'est-à-dire un besoin donné, qu'il soit exprimé ou implicite. Si nous ramenons le concept de qualité à une entreprise, la qualité réside à satisfaire les besoins du client et de limiter les coûts de non qualité. La qualité d'un produit se définit comme un ensemble de composantes :

- objectives : partie technique (sécurité, fiabilité, durabilité, ...) : besoins implicites ;
- subjectives : partie perçue (conforme à l'attente, meilleur prix, ...) : besoins exprimés.

D'après la norme NF P98-150-1 (2010), lorsqu'on parle de la « qualité des enrobés », il s'agit de la qualité à réaliser pour être en conformité avec les spécifications ou à satisfaire les fonctions du cahier de charges dont ils sont issus. En d'autres termes, il s'agit la qualité décrite dans le dossier de demande du maître d'ouvrage.

1.2.4.2. Contrôle

Selon Mersellab et Angou (2015), le mot contrôle peut être utilisé dans le sens de vérification ou dans celui de maîtrise. Il en résulte que le contrôle peut être défini comme étant une confrontation entre les prévisions établies en matière des coûts d'une part, le chiffre d'affaire et les résultats effectifs obtenus d'une part. Le contrôle permettra donc d'établir des mesures correctives en cas d'écarts entre les prévisions et les réalisations et cela dans le but d'une bonne gestion de l'entreprise (Aizzi et Oubihti, 2008).

1.2.4.3. Contrôle qualité

1.2.4.3.1. Définition et but

Le contrôle de la qualité est un processus par lequel les entités examinent la qualité de tous les facteurs impliqués dans la production. La norme ISO 9000 (2015), définit le contrôle de la

qualité comme « une partie de la gestion de la qualité axée sur la satisfaction des exigences de qualité ». Son objectif principal est d'évaluer les résultats, de rejeter les produits qui ne sont pas conformes aux normes et d'éliminer les coûts de non-qualité (Sidibé, 2011). Il comprend un ensemble de techniques et d'activités qui permettent d'évaluer l'efficacité de la qualité des systèmes de production et de service, de déterminer en temps réel l'état de la qualité des systèmes, d'assurer la conformité des produits et services aux exigences des consommateurs et aider à l'amélioration continue de la qualité (Bassem, 2011 ; Montgomery, 2009).

Le contrôle qualité des enrobés hydrocarbonés est donc un outil qui, associé à un référentiel apporte des éléments de vérification de certains critères de la qualité de l'enrobé bitumineux.

1.2.4.3.2. Différents types de contrôles qualité des enrobés hydrocarbonés

Il existe deux (02) types de contrôles réalisés pendant les travaux de construction routière :

1.2.4.3.2.1. Contrôle extérieur

Selon le Fascicule 27, (1996) du CCTG relatif à la fabrication et mise en œuvre des enrobés hydrocarbonés, le contrôle extérieur est réalisé pour le compte du maître de l'ouvrage et indépendamment de l'entrepreneur. Le maître d'ouvrage décide des modalités d'exécution du contrôle extérieur et les communique à l'entrepreneur avant le début de son intervention.

1.2.4.3.2.2. Contrôle intérieur

Il s'agit du contrôle effectué à la charge de chaque intervenant pour s'assurer de la qualité de sa production ou de sa prestation. Les opérations de contrôle intérieur peuvent prendre l'une ou l'autre, ou les deux modalités suivantes, selon le contexte de l'opération :

- le contrôle interne comprend l'ensemble des opérations de surveillance, de vérification et d'essais exercés sous l'autorité du (ou des) responsable (s) de la fabrication ou de l'exécution, dans les conditions définies par le plan qualité ;
- le contrôle externe est composé de l'ensemble des opérations de surveillance, de vérification et d'essais exercées à la demande d'un responsable indépendant de la chaîne de production ou du chantier d'exécution, mandaté par le titulaire.

1.2.4.4. Référentiels

Le référentiel pour le contrôle qualité de la mise en œuvre des enrobés est le Cahier des Clauses Techniques et Particulières qui comprend les normes techniques, les méthodes d'exécution et de mise en œuvre et mode de rémunération propres aux travaux d'aménagement et de bitumage

de la route Boundiali- Madinani sur une longueur de 57,92 kilomètres. Il est complété par le Cahier des Clauses Techniques Générales (CCTG) applicable aux marchés publics, de travaux de Génie Civil en France, dont les dispositions devront être suivies et des fascicules du CCTG se rapportant aux différentes catégories de travaux ou, à défaut, les Fascicules du Cahier des Prescriptions Communes applicables aux mêmes catégories de travaux notamment le Fascicule 27. De plus, les essais en laboratoire et en place sont conduits conformément aux modes opératoires de l'AFNOR (France) ou du LCPC (France).

1.2.4.5. Stratégies de contrôle de la mise en œuvre des enrobés

Selon la norme NFP 98-150 concernant l'exécution des corps de chaussées, ce contrôle comprend les étapes suivantes :

- les travaux préparatoires et vérification du support ;
- la vérification des matériels et l'exécution et vérification des réglages des matériels ;
- le contrôle du respect des consignes adoptées et du bon fonctionnement des matériels ;
- le contrôle de conformité de l'ouvrage réalisé.

1.3. Maitrise statistique des procédés

1.3.1. Définition

La Maitrise statistique des procédés ou MSP est un outil de contrôle de la qualité qui permet, par une méthode statistique, de surveiller un procédé de fabrication ou une méthode d'analyse. Quant au procédé il est défini comme étant un système qui combine plusieurs éléments agissant en même temps pour l'obtention d'une production de biens ou de services en particulier les 5 M définis par Ishikawa (Main d'Œuvre, Matière, Milieu, Méthodes et Machines). La MSP est une méthode préventive. Les outils statistiques de la MSP sont les cartes de contrôles, le contrôle de réception et l'étude de capabilité (Anonyme, 2008).

1.3.2. Les cartes de contrôles

Ce sont des méthodes statistiques de contrôles qui font appel à la théorie d'échantillonnage et qui permettent d'enregistrer chronologiquement des données caractéristiques d'un procédé sous forme de graphique (Anonyme, 2008). Selon Rose (2005), ces cartes permettent entre autres de visualiser la variabilité du procédé et distinguer les causes spéciales de variations des causes communes d'un côté et affirmer que le procédé n'est pas sous contrôle et prévoir la performance du procédé lorsqu'il est sous contrôle et établir les indices d'amélioration du procédé par le calcul de sa capabilité de l'autre. Les différents types de cartes de contrôle les courants sont les

cartes de contrôle aux attributs et les cartes de contrôles aux mesures. Dans cette étude nous nous limiterons aux cartes de contrôles aux mesures individuelles.

1.3.3. Les cartes aux mesures individuelles

Les cartes de contrôle aux mesures individuelles comprennent essentiellement les cartes des étendues mobiles et les cartes de contrôle pour individus. Ces cartes sont utilisées quand les mesures effectuées ne sont pas assez nombreuses (valable pour une vingtaine de mesures). Les limites de contrôle sont déterminées à partir des étendues mobiles, qui s'obtiennent en calculant de proche en proche la valeur absolue de la différence entre deux mesures successives. La carte de contrôle par individu est définie comme le graphique des observations individuelles. Cependant, comme les cartes des étendues mobiles assurent les tracés des données qui sont en corrélation les unes par rapport aux autres, donc l'observation des tendances n'est pas utile (Akkinapally & Attoh-Okine, 2006). Pour les mêmes raisons les cartes des étendues mobiles ne peuvent pas fournir des données sur la variabilité d'un processus. Cependant, elles ont la possibilité de montrer les changements entre les observations dans un processus. Les formules des limites de contrôle par individu sont les suivantes :

$$LCI = \bar{X} - 2.66\bar{R} \quad (1)$$

$$LCS = \bar{X} + 2.66\bar{R} \quad (2)$$

$$LC = \bar{X} \quad (3)$$

Avec \bar{X} et \bar{R} qui représentent respectivement la moyenne et l'étendue mobile des observations.

1.3.4. Indice de capacité procédé

La capacité désigne le rapport entre la performance demandée et la performance réelle d'un processus. La capacité d'un processus a pour objectif de déterminer son aptitude à produire selon les spécifications demandées par le client. Il consiste à calculer certains indices de performances appelés indices de capacité. L'indice Cp est l'indice de capacité le plus utilisé. Il a pour but de mesurer si la dispersion de la caractéristique X étudiée est plus ou moins grande par rapport à l'intervalle de tolérance (Rose, 2005). Il est défini par :

$$C_p = \frac{T_s - T_i}{6\sigma} \quad (4)$$

Avec T_s , T_i et σ qui sont respectivement les tolérances supérieures et inférieures et les écarts types.

DEUXIEME PARTIE :
MATERIEL ET METHODES

MATERIEL ET METHODES

La confection d'un matériau nécessite de la matière première et une méthodologie d'élaboration bien définie. La qualité du matériau est fonction de sa méthode de réalisation et des propriétés intrinsèques de la matière première qui le compose. La détermination de cette qualité repose sur une série de tests indépendants et qui permettront d'attester de la valeur du matériau. L'optimisation des propriétés du matériau passe nécessairement par une bonne caractérisation. C'est ainsi que différents essais ont été effectués sur les matériaux qui ont servi au bitumage de la route Boundiali-Madinani. Cela se fait grâce à un matériel et des méthodes appropriées.

2.1. Matériel

2.1.1. Appareillage

- ❖ Equipements pour l'extraction du liant bitumineux ;

Le tableau I expose l'appareillage pour l'extraction du liant bitumineux.

Tableau I. Appareillage pour l'extraction du liant bitumineux

Désignations	Rôles
un appareil KUMAGAWA	permet de séparer la matière solide de la solution bitumineuse à l'aide du trichloroéthylène
une balance électronique	pour les pesées
une cartouche	pour retenir les fillers

La figure ci-dessous présente le matériel utilisé pour le désenrobage des enrobés bitumineux.



Cartouches



appareil Kumagawa

Figure 4. Matériel pour l'extraction du bitume

- ❖ Dispositifs pour essai Marshall

MATERIEL ET METHODES

Le tableau II présente le matériel ayant servi à réaliser l'essai Marshall.

Tableau II. Appareillage général pour essai Marshall

Désignations	Rôles
Un fluagemètre	détermine la déformation avec une exactitude de 0,1 mm
Un éditeur graphique	permet la lecture de la déformation obtenue sur un écran
Bain thermostatique	maintient constante la température de 60°C pendant la durée de l'essai
Thermomètre	mesure la température
Etuve	permet de chauffer l'enrobé prélevé à la température de prélèvement
Moule Marshall	réceptacle dans lequel est mis l'enrobé chauffé
Presse Marshall	assure la compression des éprouvettes
Dame Marshall	permet le compactage de l'enrobé chauffé contenu dans le moule

❖ Matériel de carottage

Il comprend essentiellement une carotteuse à moteur pour réaliser les carottes sur la chaussée en enrobés compactés, une barrique d'eau, de marqueurs pour les marquages des numéros sur les carottes et de ruban adhésif pour l'étiquetage des échantillons de carottes.

❖ Matériel pour l'analyse granulométrique et la pesée hydrostatique

Pour l'analyse granulométrique des granulats, nous avons :

- une étuve dont la température est maintenue à 105°C ;
- des tares ;
- une série de 8 tamis de maille suivante en (mm) : 0,08 ; 0,315 ; 0,63 ; 2 ; 4 ; 6,3 ; 10 ; 12,5 ;
- une balance de précision ;
- un fond de tamis interchangeable et une brosse métallique.

La figure 5 présente un appareil pour les pesées hydrostatique et une colonne de tamis utilisés pour l'analyse granulométrique

MATERIEL ET METHODES



Figure 5. Dispositif pour la pesée hydrostatique et tamis pour l'analyse granulométrique.

2.2. Méthodes

Avant d'entreprendre une construction avec des mélanges hydrocarbonés produits en centrale d'enrobage, il est important de bien connaître leurs propriétés. Il faut donc entreprendre une caractérisation initiale de ces matériaux à travers une gamme d'essais pour en évaluer leur qualité. Les essais ont été effectués au Laboratoire de MK Construction sur 5 (cinq) lots de béton bitumineux avec l'aide des techniciens sur place. Ces essais ont porté essentiellement sur l'extraction du liant soluble ou désenrobage, l'analyse granulométrique et le fluage et la stabilité dits Marshall. La mise en œuvre de ces matériaux au chantier doit respecter plusieurs critères définis dans les résultats de la formulation et dans les spécifications du cahier de charges. Pour se faire, des essais de température ont été entrepris pendant la mise en place du béton bitumineux. Par la suite, des contrôles de réception du revêtement terminé sont réalisés, systématiquement après la fin de la phase de chantier, afin de vérifier si les propriétés du béton bitumineux compacté satisfont les différents critères de qualité définis dans le cahier de charges. De ce fait, il est procédé aux essais de carottages afin de prélever des carottes bitumineuses pour déterminer les paramètres physiques notamment la compacité en place ; la compacité relative, l'épaisseur et le pourcentage des vides du revêtement terminé. Enfin, dans l'optique de réaliser une étude critique du processus de contrôle de réception du revêtement terminé, une surveillance de ces paramètres physiques par cartes de contrôles s'impose afin de juger si le procédé de mise en œuvre des enrobés utilisés est sous contrôle ou pas et respecte les spécifications citées précédemment. L'acquisition de ces données passe par une collecte des échantillons *in situ*.

MATERIEL ET METHODES

2.2.1. Collecte des données

2.2.1.1. Prélèvement et codification des échantillons

L'échantillonnage des enrobés bitumineux est une étape des plus critique. Les échantillons doivent être prélevés de façon à ce qu'ils soient le plus représentatifs possible.

Les analyses géotechniques ont été effectuées sur les échantillons prélevés à l'arrière du finisseur ou épandeuse. Il s'agit de l'espace situé entre les chenilles de l'épandeuse. Nous avons effectué à l'aide d'une pelle manuelle, au moins deux prises élémentaires de matériau, d'environ 7 kg chacune entre le premier et le quatrième quart du chargement d'un même camion benne. Ces prises élémentaires sont uniquement prélevées lorsque les vis sont chargées sur toute la longueur. Une prise élémentaire est prélevée en poussant complètement la pelle dans la charge de matériau, devant la vis, et en la retirant quand elle est pleine. Cette méthode ne peut s'appliquer que lorsque le matériau est accessible des deux côtés du finisseur. Ces prises élémentaires sont ensuite déposées, puis homogénéisées à l'aide de la pelle sur une plaque d'environ 1 m de côté. La dernière étape consiste à prélever la quantité nécessaire pour former l'échantillon de laboratoire. L'échantillon de laboratoire est par la suite conditionné dans des sacs en papier de façon à ce que le matériau échantillonné ne subisse aucune contamination ni aucun endommagement.

Les échantillons sont identifiés à partir des inscriptions notées sur papier et placé à l'intérieur du sac de prélèvement. Sur chaque échantillon est marqué le nom du chantier, l'emplacement des prélèvements, la date et l'heure d'échantillonnage, la température de l'enrobé, l'immatriculation du camion et la nature du matériau.

2.2.1.2. Préparation des échantillons au laboratoire

Cette étape a pour but de préparer les échantillons de mélanges hydrocarbonés prélevés au chantier pour la réalisation des essais requis. Dès réception, un contrôle de l'échantillon de laboratoire est réalisé en relevant son état et sa masse. Après ce contrôle préliminaire, un prétraitement de l'échantillon est effectué dans le souci de noter les migrations de liant et granulats non enrobés contenu dans le mélange hydrocarboné. Si une migration du liant s'est produite, un recueillement et une pesée du plus de matériau égoutté si possible sont effectués. Après quadripartition, une fraction pondérée, proportionnelle, représentative du matériau égoutté est ajoutée à la prise d'essai. Si le matériau drainé ne peut être recueilli, cela est noté. Pour les échantillons de laboratoire ne pouvant pas être mélangés à nouveau à température ambiante, un traitement thermique avant réduction de l'échantillon est réalisé. L'enrobé

MATERIEL ET METHODES

bitumineux à extraire et à compacter doit être exempt de toute souillure et doit se présenter sous une forme émiettée. Pour cela, le matériau doit être chauffé dans une enceinte thermorégulée comme une étuve à une température n'excédant pas la température de mise en œuvre prescrite par le cahier de charges et pour un temps le plus court possible. L'enrobé bitumineux est homogénéisé et divisé par appréciation visuelle en au moins 4 parts égales (**Figure 6**). Cette opération est répétée jusqu'à ce que la masse restante soit à peu près égale à celle de l'échantillon requis pour l'essai.



Figure 6. Opération de quartage d'un échantillon d'enrobés bitumineux

2.2.2. Caractérisation mécanique du béton bitumineux

Elle a été faite grâce à l'essai Marshall. Selon la norme **NF EN 12697-34**, l'essai Marshall consiste à déterminer, pour une température et une énergie de compactage données la stabilité et le fluage dits Marshall d'un mélange hydrocarboné à chaud. La température de préparation des éprouvettes de mélanges à base de bitume pur 35/50 est au moins égale à la température de prélèvement. Le compactage est réalisé en appliquant 50 coups en 55-60 secondes (s) sur la surface de l'éprouvette à l'aide de la dame. La dame Marshall doit être maintenue perpendiculairement à la surface du moule. Ensuite, le moule et son contenu sont immédiatement retournés. Si nécessaire, la hausse est fixée à l'autre extrémité du moule. Ce dernier est placé à nouveau sur l'enclume et la seconde face de l'éprouvette est compactée de la même manière en appliquant 50 coups de dame. Une fois compactés, les échantillons sont soumis à un essai de stabilité et fluage. Les éprouvettes et les mâchoires d'écrasement sont immergées dans l'eau à $60^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$ pendant $30 \text{ min} \pm 1 \text{ min}$. compte tenu de la durée de l'essai il est nécessaire d'échelonner les mises en immersion des éprouvettes, toutes les 5 min. L'éprouvette et les mâchoires sont retirées du bain thermostatique. Après retrait, les éprouvettes sont placées dans les mâchoires d'écrasement. L'ensemble est ensuite porté entre les plateaux

MATERIEL ET METHODES

de la presse pour être soumis à l'essai de compression. L'éprouvette est écrasée à une vitesse de déformation constante de $(0,85 \pm 0,02)$ mm/s. La stabilité est la force maximale que peut supporter l'échantillon. Le fluage Marshall est la valeur de l'affaissement de l'éprouvette, selon leur diamètre vertical, au moment de la rupture (ou à l'instant où on atteint le maximum de la charge). La Stabilité et le Fluage Marshall, moyenne des résultats d'au moins trois éprouvettes, sont données par les formules ci-dessous :

❖ Stabilité Marshall (SM)

$$SM = \frac{\sum SM_i}{3} \times 100 \quad SM \geq 1000 \text{ Kg se référant au CCTP} \quad (5)$$

❖ Fluage Marshall (F)

$$F = \frac{\sum F_i}{3} \times 100 \quad F < 4 \text{ mm en se référant au CCTP} \quad (6)$$

Avec :

- SM_i : Stabilité Marshall d'une éprouvette et F_i , Fluage Marshall d'une éprouvette ;
- i = le numéro d'ordre des éprouvettes confectionnées, sa valeur allant de 1 à 3.

2.2.3. Contrôles de la composition du béton bitumineux

Le contrôle de la composition du béton bitumineux a pour but de déterminer la teneur en liant, la granulométrie et le pourcentage de filler d'un enrobé en les extrayant à chaud à l'aide d'un solvant (trichloroéthylène) qui forme avec l'eau un mélange azéotropique.

2.2.3.1. Détermination de la teneur en liant

Conformément à la norme **NF EN 12 697-1 d'août 2012**, l'enrobé préalablement séché à l'étuve, est placé dans une cartouche en cellulose, de masse m_1 , séchée à l'étuve. L'enrobé est pesé dans la cartouche en cellulose, on obtient la masse totale m_2 . Cette cartouche remplie d'enrobés quartés est ensuite placée dans un montage Kumagawa de capacité 2 L. Le solvant d'extraction est le trichloroéthylène car le bitume est soluble dans le trichloroéthylène. Le système est chauffé à ébullition jusqu'à ce que le trichloroéthylène soit entièrement transparent. La cartouche contenant uniquement la matière minérale est séchée à l'étuve à 115°C de manière à évaporer le solvant restant sur les granulats ou agrégats. Après séchage à l'étuve, la cartouche contenant la matière minérale est pesée, on obtient la masse m_3 comprenant la masse de la cartouche et celle des agrégats secs retenus par la cartouche. Le liant extrait est filtré sous vide, sur un papier filtre en cellulose, de masse m_4 , préalablement séché à l'étuve et pesé. Sur ce

MATERIEL ET METHODES

filtre, sont récupérées les fines qui n'ont pas été retenues par la cartouche en cellulose. Ce filtre est alors séché à l'étuve de manière à évaporer le trichloroéthylène restant. Après séchage, le filtre contenant les fines est pesé, on obtient la masse m_5 comprenant la masse du filtre et des fines.

On obtient facilement la masse minérale M_{min} présente dans l'enrobé selon la relation :

$$M_{min}=(m_3-m_1)+(m_5-m_4) \text{ en grammes (g)} \quad (7)$$

On en déduit alors la quantité de bitume présente dans l'enrobé comme suit :

- Teneur en liant interne de bitume dans l'enrobé

$$\% \text{ tl} = \frac{\text{poids de liant}}{\text{poids de granulats secs} + \text{poids de liant}} \times 100 = 100 \times \frac{(m_2 - m_1 - M_{min})}{m_2 - m_1} \quad (8)$$

- Teneur en liant externe de bitume dans l'enrobé

$$\% \text{ TL} = \frac{\text{poids de liant}}{\text{poids de granulats secs}} \times 100 = 100 \times \frac{(m_2 - m_1 - M_{min})}{M_{min}} \quad (9)$$

Remarque : dans la suite, on exprimera les teneurs en liant en pour-cent extérieur TL_{ext} .

2.2.3.2. Détermination de la granulométrie du mélange bitumineux

Les matériaux concassés des mélanges bitumineux ne respectent pas toujours les exigences granulométriques du Cahier des charges. On se doit donc d'effectuer une analyse granulométrique sur chacun des lots étudiés. L'analyse granulométrique a été effectuée sur cinq lots d'enrobés, et ce afin de les comparer au fuseau granulométrique des enrobés. Selon la norme **NF EN 12697-2 d'août 2015**, l'essai permet de déterminer la granularité d'un mélange granulaire issu d'un enrobé bitumineux. La granularité du mélange est la distribution d'une prise d'essai de granulats exprimée en pourcentage de masses cumulées de passants au travers d'un ensemble spécifié de tamis. Le squelette granulaire du béton bitumineux 0/14 utilisé est le mélange de plusieurs fractions granulaires (sable 0/4, concassé 4/10 et concassé 10/14). Après récupération du bitume ou désenrobage des agrégats, ceux-ci sont passés sur une série de tamis à ouvertures décroissantes. La colonne de tamis contient les tamis de passants : **0,08 mm ; 0,315 mm ; 0,63 mm ; 2 mm, 4 mm ; 6,3 mm ; 10 mm et 12,5 mm**. Dans un premier temps les granulats sont séchés. Une fois secs, ils sont pesés. La masse granulaire est alors lavée de manière à ôter le maximum de fines. Après séchage de cette fraction minérale défillérisée, le mélange est pesé et tamisé de manière à obtenir la répartition granulaire du squelette. On obtient d'une part la masse de fines et d'autre part la répartition granulaire de la fraction minérale. Cet

MATERIEL ET METHODES

essai permet de construire la courbe granulométrique qui représente la répartition massique de la taille des granulats du squelette granulaire d'un enrobé.

2.2.4. Contrôle de la température

La mesure de la température de l'enrobé permet de vérifier si la température est suffisamment élevée pour faciliter le compactage. Une faible température des enrobés entraîne leur durcissement précoce. La température de l'enrobé est mesurée au niveau de la vis de répartition du finisseur sur des enrobés en mouvement et dans le camion d'approvisionnement en utilisant des thermomètres à sondes.

2.2.5. Contrôles techniques à posteriori

2.2.5.1. Travaux réalisés sur le terrain : réalisation de carottage

Ce contrôle consiste à faire des prélèvements sur la chaussée en béton bitumineux afin de déterminer les caractéristiques fonctionnelles telles la compacité en place, la compacité relative, l'épaisseur et la nature de la couche de la chaussée traitée au liant bitumineux. Le carottage est fait au minimum par 50 mètres d'intervalle et est exécuté dans l'axe, à gauche et à droite de la voie sauf spécification contraire justifiée par l'objectif de l'essai. La cadence des essais peut changer en fonction de l'avancement des travaux de mise en place de l'enrobé. Conformément à la méthode d'essai LPC portant sur l'exécution et l'exploitation des carottages de chaussées, cet essai comprend 4 phases. D'abord, la carotteuse est mise en place au niveau de la zone d'implantation du point. L'étape suivante consiste à l'exécution du carottage proprement dit (**Figure 7**). La figure 7 présente la réalisation d'un essai de carottage et des carottes d'enrobé.



Figure 7: Essai de carottage et éprouvettes du BB compacté

MATERIEL ET METHODES

Après cette étape, la carotte est extraite du trou sondage. La dernière phase comprend d'une part l'observation visuelle de la carotte pour déceler les éventuelles irrégularités sur sa surface et de la cavité de carottage, et le rebouchage de la cavité d'autre part. Ces différentes carottes prélevées sur le terrain sont acheminées au laboratoire pour subir un certain nombre de tests.

2.2.3.2. Travaux de laboratoire

Ces travaux se résument à la détermination des caractéristiques physiques de la couche de roulement notamment la compacité en place, l'indice de compactage ou compacité relative et le pourcentage des vides au moyen d'éprouvettes prélevées par carottages. Selon la norme **NF EN 12697-6 d'août 2003**, la masse volumique apparente des carottes de béton bitumineux compacté et leur volume sont déterminés par pesée hydrostatique. Au cours de l'essai l'échantillon passe par les étapes suivantes. Tout d'abord, la masse de la carotte ou éprouvette sèche par pesée (m_1) et la masse volumique de l'eau à la température d'essai au $0,1\text{kg/m}^3$ (ρ_w) le plus proche sont déterminées. Ensuite, l'étanchéité de l'éprouvette avec de la paraffine est réalisée sans que les vides de l'éprouvette ne puissent être remplis et sans qu'aucun vide supplémentaire ne soit introduit entre le dispositif d'étanchéité et l'éprouvette. Après, l'éprouvette « paraffinée » sèche est pesée, on obtient une masse (m_2). La masse de l'éprouvette « paraffinée » dans l'eau (m_3) est alors évaluée en prenant soin de veiller à ce qu'aucune bulle d'air n'adhère au dispositif d'étanchéité durant la pesée hydrostatique après l'avoir plongé dans un bain d'eau maintenu à une température d'essai continue. Pour finir, on effectue une pesée hydrostatique de la carotte paraffinée pour déterminer la masse volumique de la carotte du béton bitumineux compacté.

La masse volumique apparente d'une carotte « paraffinée » (MVA) au 1 kg/m^3 le plus proche par pesée hydrostatique est donnée par la formule suivante :

$$MVA = \frac{m_1}{m_2 - \frac{m_3}{\rho_w} - \left(\frac{m_2 - m_1}{\rho_{sm}} \right)} \quad (10)$$

Avec m_1 étant la masse de la carotte (g) ; m_2 , masse de la carotte paraffinée (g), m_3 , masse de la carotte paraffinée immergée dans l'eau (g) et " ρ_{sm} " la masse volumique du produit d'étanchéité à la température d'essai, en kilogrammes par mètre cube (kg/m^3) au 10 kg/m^3 le plus proche.

La masse volumique réelle MVR d'une carotte sèche correspond à la masse volumique qu'aurait l'enrobé sans vides peut être déterminée par la pesée hydrostatique ou à partir des masses volumiques des composants, par la formule suivante d'après la norme NF EN 12697 - 5 :

MATERIEL ET METHODES

$$MVR = \frac{100 + TL_{ext}}{\frac{\%G_1}{MVR_{g1}} + \frac{\%G_2}{MVR_{g2}} + \dots + \frac{\%G_n}{MVR_{gn}} + \frac{TL_{ext}}{\rho_b}} \quad (11)$$

Où : TL_{ext} est la teneur en liant externe de l'enrobé bitumineux, MVR_{gi} représente masse volumique réelle du granulat et $\%G_i$, les pourcentages de la fraction granulaire et ρ_b : la masse volumique du liant.

Il convient de noter que dans le cas TL_{ext} , on a : $\% G_1 + \% G_2 + \dots + \% G_n = 100$.

Le pourcentage de compacité est déterminé par le rapport la masse volumique apparente MVA de l'éprouvette par pesée hydrostatique de la carotte divisée par la masse volumique réelle MVR du mélange hydrocarboné obtenue lors de l'analyse des échantillons au laboratoire. La formule la compacité de l'éprouvette exprimée en pourcentage est la suivante :

$$\text{Compacité} = MVA / MVR \times 100\% \quad (12)$$

La formule de l'indice de compactage des enrobés mis en œuvre est la suivante :

$$\text{Indice de compactage} = ds/dM \quad (13)$$

Avec ds , la densité in-situ ou apparente de la carotte prélevée au chantier et dM , la densité apparente de l'éprouvette Marshall obtenue en laboratoire par pesée hydrostatique.

L'expression du pourcentage des vides, le complément à 100 de la compacité, est :

$$v \% = 100 (1 - MVA / MVR) \quad (14)$$

2.2.5. Traitement des données

L'analyse statistique suivante a été réalisée à l'aide du logiciel MINITAB 18. Avant d'utiliser les cartes de contrôles, nous avons vérifié au préalable si les données suivent une distribution Gaussienne et si elles sont en corrélation les unes par rapport aux autres. Les différentes dépendances entre les paramètres sont identifiées avec les tests de corrélation de Spearman. Pour l'analyse de régression linéaire, notre modèle de régression est prédictif pour une probabilité critique [p-value < 0,05]. La normalité d'une distribution statistique est vérifiée selon le " Test d'Anderson-Darling ". Pour l'analyse des distributions Non – Gaussiennes, on procédera par une transformation Box – Cox racine carré, avec ($\lambda = 0,5$).

Conclusion partielle

Dans ce chapitre nous avons présenté le matériel utilisé et les principales étapes expérimentales adoptées pour déterminer les propriétés physico-mécaniques de l'enrobé soumis à notre étude.

TROISIEME PARTIE :
RESULTATS ET DISCUSSION

RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Résultats

3.1.1. Composition du béton bitumineux mis en œuvre

3.1.1.1. Granulométrie du béton bitumineux

Dans le tableau III ci-dessous sont présentées les valeurs de l'analyse granulométrique du béton bitumineux 0/14 après désenrobage de la matière minérale. Ces valeurs ont été calculées pour cinq (05) échantillons prélevés sur la chaussée entre les profils PK2+000 au PK4+725.

Tableau III. Résultats de l'analyse granulométrique

Date d'application	PK/PK	COTE	EXTRACTION							
			Granulométrie (mm) % passants à							
			14	10	6,3	4	2	0,63	0,315	0,08
SPECIFICATIONS			94-100	72-84	50-66	40-54	28-40	17-28	13-21	7-10
19-May-18	2+000/2+200	G+D	98	88	67	53	37	23	16	6,13
31-May-18	2+200/2+800	G+D	97	83	65	53	39	27	19	6,51
7-Jun-18	2+800/3+150	G+D	98	81	62	49	34	20	14	6,44
8-Jun-18	3+150/3+925	G+D	96	78	64	45	36	21	17	6,46
9-Jun-18	3+925/4+725	G+D	96	77	61	42	32	21	18	6,89
Moyenne			97,00	81,40	63,80	48,40	35,60	22,40	16,80	6,49
Minimum			96	77	61	42	35,32	20	14	6,13
Maximum			98	88	67	53	39	27	19	6,89
Ecart type			1	4,39	2,39	4,88	2,70	2,79	1,92	0,27

D'après le tableau III, les valeurs moyennes des fractions 0/4 mm (sables de concassage), 4/10 mm (gravillons intermédiaires) et 10/14 mm (gravillons grossiers) sont respectivement 41,94% ; 33% et 15,60%. On note que les granulats utilisés pour la confection des bétons bitumineux du tronçon étudié sont riches en sables et petits gravillons. Les écarts-types calculés à partir de toutes les mesures effectuées sont relativement faibles et valident par conséquent nos mesures.

Par ailleurs, nous constatons que la moyenne des passants au tamis 2 mm est de 35,60 % (supérieure à 35%) et donc la courbe granulométrique du mélange bitumineux obtenue est haute (**Figure 8**). Ainsi, le mortier (mélange de sable 0/2 ou 0/4 combiné au bitume) est en excès dans le squelette granulaire. Il joue donc un rôle très important dans les caractéristiques du mélange voire dans la stabilité du béton bitumineux mis en œuvre. Les résultats de l'analyse granulométrique après désenrobage du béton bitumineux 0/14 nous permettent de tracer les courbes granulométriques (**Figure 8**).

RESULTATS ET DISCUSSION

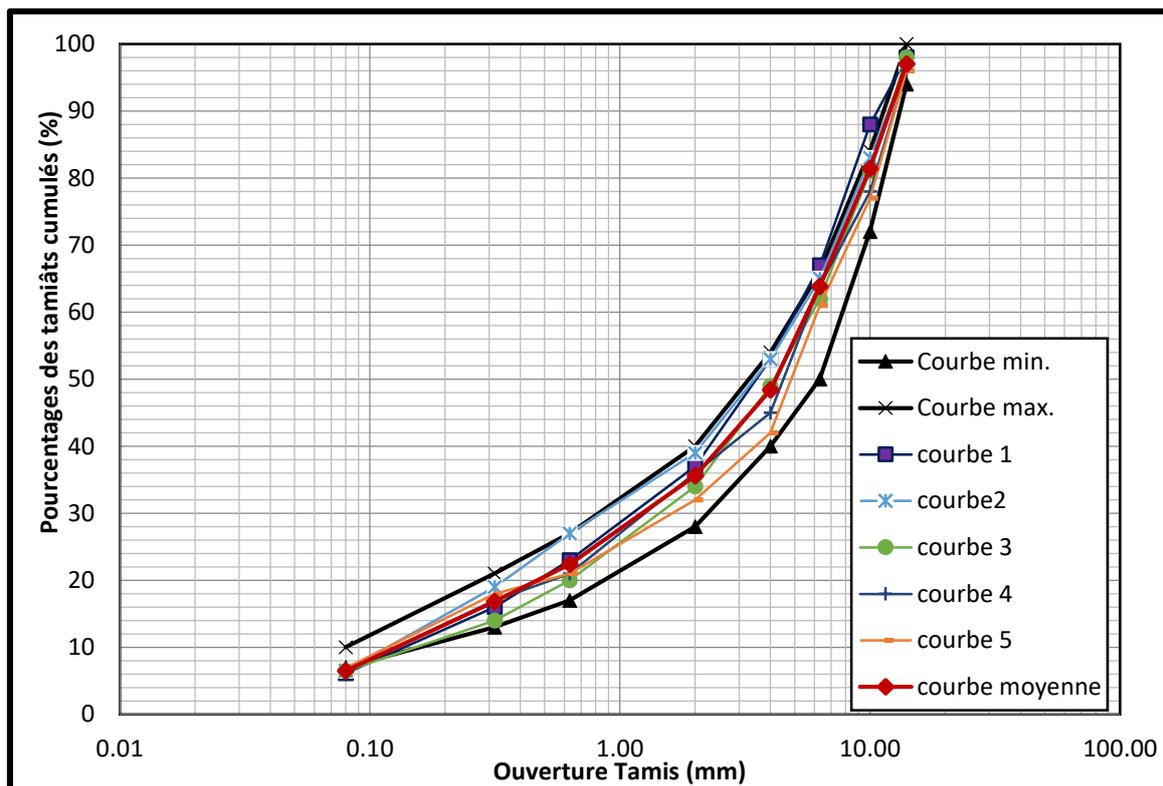


Figure 8. Courbes granulométriques du béton bitumineux mis en œuvre

A l'observation du graphique de la figure 8, on remarque que les courbes granulométriques tracées s'inscrivent dans un fuseau plus étroit pour les éléments grossiers et fins et évasés pour les éléments intermédiaires. Les pourcentages de tamisât des granulats provenant du mélange bitumineux sont inclus dans les limites de tolérances (ou fuseau de contrôle de régularité) spécifiées dans le cahier de charges (**Tableau III**).

En plus, on note que la courbe moyenne des granulats se tient dans la partie médiane du fuseau prescrit et en respecte l'allure. Elle est continue et a l'allure d'une courbe « semi-grenue », courbe intermédiaire riche en gravillons 4/10 mm et sables 0/4 mm. Ce qui nous permet de dire que les bétons bitumineux produits et mis en œuvre sont de texture semi-grenue.

Les passants au tapis 80 microns des agrégats s'approchent de la limite minimale du fuseau granulométrique de référence, les mélanges hydrocarbonés produits ont une texture comparativement rugueuse.

3.1.1.2. Teneur en bitume

A la suite du processus de désenrobage, les résultats obtenus sont consignés dans le **tableau IV**. D'après le tableau IV, la valeur moyenne du bitume contenu dans le mélange bitumineux est de 6,08 %, ce qui est proche de 6 % comme le recommande le cahier de charges.

RESULTATS ET DISCUSSION

Tableau IV. Résultats de la teneur en bitume

PK/PK	COTE	Teneur en liant (%)
SPECIFICATIONS		6
2+000/2+200	G+D	6,15
2+200/2+800	G+D	6,01
2+800/3+150	G+D	6,05
3+150/3+925	G+D	6,08
3+925/4+725	G+D	6,09
Moyenne		6,08
Minimum		6,01
Maximum		6,15
Ecart type		0,05
CV (%)		0,82

Les valeurs du coefficient de variation et de l'écart type estimés respectivement à 0,82 % et 0,05 % sont faibles. Ces valeurs ont pour conséquence une petite disparité des observations et une variabilité de part et d'autre de la tendance centrale 6,08 %. La différence moyenne par rapport à la valeur vraie ou valeur nominale exigée est 0,04 % et est supérieure à la valeur de fidélité minimale recommandée par les spécifications pour cet essai estimée à 0,03 %. A la lumière des résultats concernant la teneur en liant, nous pouvons affirmer que les échantillons de béton bitumineux étudiés ne sont pas totalement homogènes.

La quantité de liant bitumineux contenue dans les échantillons de béton bitumineux prélevés dans la benne du finisseur est observée au niveau de la figure 9. Sur cette figure, les résultats des essais de récupération du liant bitumineux, représentés en diagramme groupé, dépassent légèrement la teneur en bitume nominale exigée par les spécifications (6 %).

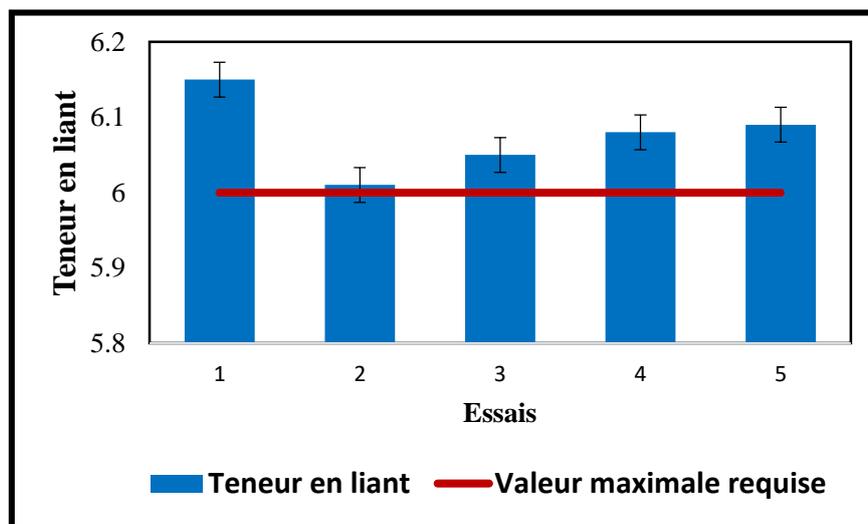


Figure 9. Teneur en liant des différents échantillons d'enrobés

RESULTATS ET DISCUSSION

3.1.2. Résultats des essais Marshall

Les résultats des essais Marshall des différentes planches sont récapitulés dans le tableau V.

Tableau V. Résultats de l'essai Marshall

Date d'application	PK/PK	Linéaire (m)	COTE	Marshall pour BB 0/14 mm		
				Fluage (mm)	Stabilité (Kg)	Quotient Marshall (Kg/mm)
SPECIFICATIONS				<4	>1000	-
19-May-18	2+000/2+200	200	G+D	3,33	1766	530,33
31-May-18	2+200/2+800	600	G+D	3,80	1372	361,05
7-Jun-18	2+800/3+150	350	G+D	3,40	1399	411,47
8-Jun-18	3+150/3+925	775	G+D	3,10	1304	420,65
9-Jun-18	3+925/4+725	800	G+D	3,30	1369	414,85
Moyenne		908		3,39	1442	425,37
Qualité				Conforme	Conforme	-

Les résultats du fluage Marshall des enrobés bitumineux prélevés pendant les mises en œuvre varient entre 3,10 mm et 3,80 mm. Les valeurs du fluage obtenues sont inférieures à la valeur maximale requise (4 mm) pour l'affaissement maximal d'un enrobé compacté (**Figure 10**), ce qui signifie que les résultats obtenus sont conformes aux spécifications du fluage.

L'étude sur la force maximale que peut supporter l'enrobé mis en œuvre, montre qu'elle oscille entre 1304 Kg et 1766 Kg. Les différentes valeurs de la résistance maximale que peut supporter le béton bitumineux sont supérieures à la valeur nominale exigée (1000 Kg). Les résultats obtenus confirment que les valeurs des caractéristiques mécaniques des bétons bitumineux prélevés pendant les mises en œuvre, à savoir la stabilité Marshall sont conformes aux valeurs requises par les spécifications. La conformité des paramètres empiriques « Fluage et Stabilité » dits Marshall par rapport au cahier des charges permet de conclure que les performances mécaniques opérationnelles visées sont atteintes. Ce qui indique qu'une bonne mise en œuvre du matériau pourrait améliorer sa résistance au cisaillement.

Les mélanges hydrocarbonés des sections ayant les plus grandes valeurs du quotient Marshall sont plus résistants aux déformations permanentes (fluage) et aux contraintes de cisaillement.

La figure 10 illustre la variation des paramètres mécaniques du béton bitumineux mis en œuvre.

RESULTATS ET DISCUSSION

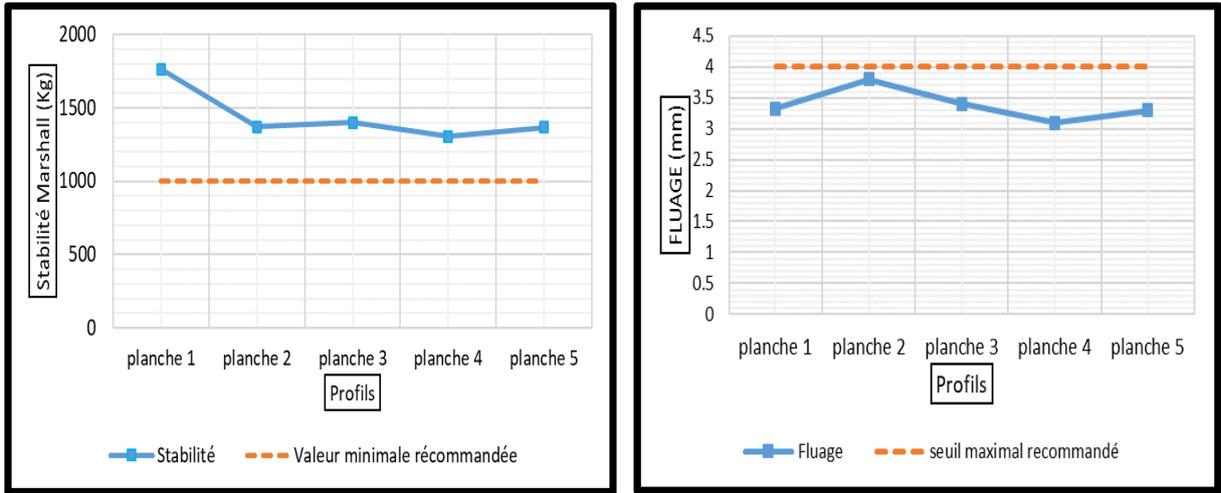


Figure 10. Stabilité et fluage Marshall des enrobés entre la planche 1 et la planche 5

3.1.3. Prise de température

Les températures de mise en œuvre du BB entre les profils PK2+000 à PK2+ 950 et PK3+275 à PK5+000 varient entre 130°C et 154°C (Tableau VI). Ces températures de répandage sont toutes comprises entre 130°C et 160°C conformément au cahier de charges (**Figure 11**). Le respect de ces limites de températures fixées permet de garantir une maniabilité satisfaisante pour une mise œuvre correcte et un bon comportement au compactage des enrobés au chantier.

Tableau VI. Résultats des prises de températures

Essai	Nombre de valeurs	Minimum	Moyenne	Maximum	Qualité
Température	67	130	144,72	154	Conforme

La figure 11 représente la distribution de la température de mise en œuvre des enrobés.

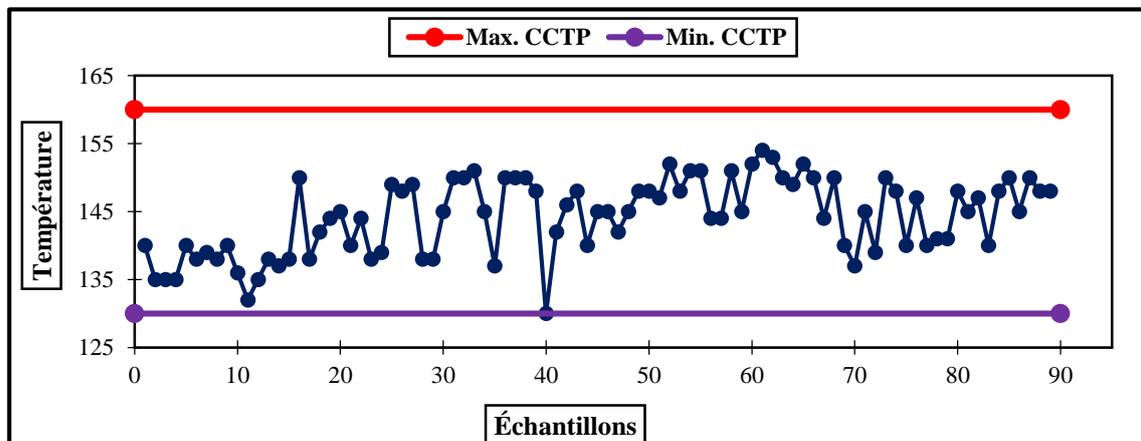


Figure 11: Distribution de la température de mise en œuvre des enrobés

RESULTATS ET DISCUSSION

3.1.4. Contrôles de la densité in-situ de la couche de roulement en béton bitumineux

Les résultats des analyses des caractéristiques du béton bitumineux mis en place sont consignés dans le tableau VII. Les critères de qualité requis pour enrobés compactés concernent l'épaisseur, la teneur en vides interstitiels, l'indice de compactage et la compacité du revêtement bitumineux. L'analyse du tableau ci-dessous, nous indique que la moyenne des valeurs moyennes de la compacité en place de la couche de roulement est conforme aux exigences opérationnelles visées soient 94-97 %. Ensuite, les moyennes des valeurs moyennes des vides interstitiels et des épaisseurs du revêtement sont respectivement 4,4 % et 5,26 cm.

Tableau VII. Résultats des essais de densité in-situ de la couche de roulement

PK/PK	Linéaire (m)	Nombre de carottes	Indice de compactage %	Valeurs Moyennes de		
				Compacité %	% vides	Epaisseur (cm)
SPECIFICATIONS			≥98	94-97	3-6	≥5,0
2+000/2+200	200	4	99	95	4,7	4,80
2+200/2+600	400	8	99	95	4,9	5,4
2+750/3+100	350	8	100	96	3,9	5,5
3+200/3+500	300	7	98	96	4,2	5,6
3+700/4+700	1000	8	99	96	4,4	5,0
TOTAL		35				
Moyenne			99	96	4,4	5,26
Qualité			Conforme			

Ces deux paramètres sont conformes aux spécifications qui sont de 3-6 % pour les vides, $\geq 5,0$ cm et ≥ 98 % respectivement pour les épaisseurs et pour l'indice de compactage.

D'après ce qui précède, les résultats des caractéristiques de qualité des enrobés compactés entre les profils PK 2+000 et PK 4+700 sont de qualité satisfaisante.

3.1.4.1. Conformité de l'épaisseur des éprouvettes

Le tableau VIII ci-dessous est une synthèse des différentes mesures des épaisseurs des 35 carottes de béton bitumineux échantillonnées après les mises en œuvre entre les profils PK 2+000 et PK 4+700.

Tableau VIII. Synthèse des résultats de mesures des épaisseurs des carottes

Paramètre	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart Type	CV(%)	Valeur requise
Epaisseur (cm)	4,5	5,29	6,7	0,61	11,48	$\geq 5,0$

RESULTATS ET DISCUSSION

Dans le tableau précédent, on remarque que les valeurs des épaisseurs de la série de carottes échantillonnées varient dans un intervalle de 4,5 cm à 6,7 cm. La valeur moyenne des épaisseurs des carottes de ce lot de production estimée à 5,29 cm est conforme à la valeur nominale recommandée. La valeur du coefficient de variation 11,48 % montre que la dispersion autour de la valeur moyenne est peu élevée.

Le tableau IX présente les statistiques descriptives des données relatives aux épaisseurs des carottes provenant du revêtement en bétons bitumineux. Les données sur les épaisseurs des carottes bitumineuses sont regroupées en 5 classes d'amplitude 0,5 cm.

Tableau IX. Statistiques descriptives des données sur les épaisseurs des carottes

Echantillon	données	Mode	Effectif (Mode)	Modalités	Effectif par modalité	Fréquence par modalité (%)	Fréquence cumulée (%)
Epaisseurs	35	[4,5 ;5]	11	[6,5 ;7]	1,000	2,86	2,857
				[6 ;6,5]	5,000	14,29	17,143
				[5,5 ;6]	7,000	20,000	37,143
				[4,5 ; 5]	11,000	31,43	68,571
				[5 ; 5,5]	11,000	31.43	100

L'analyse du tableau IX montre que le taux de conformité des épaisseurs des éprouvettes du BB analysées de classe granulaire 0/14 est 61,57 % avec l'existence des épaisseurs dérivant du seuil exigé mais qui ne sont pas critiques.

Le diagramme de Pareto ci-dessous (**Figure 12**) montre la distribution des épaisseurs des éprouvettes bitumineuses dans l'ordre croissant de la fréquence sous forme de diagramme en bâtonnet, avec une ligne cumulée sur un axe secondaire sous forme de pourcentage du total.

La variation des épaisseurs moyennes de la couche compactée déterminée par carottages peut s'expliquer par le tassement final apporté par le compactage qui varie de 10 à 20% de l'épaisseur de bétons bitumineux répandue selon les conditions de mise en œuvre.

Elle est aussi favorisée par le comblement des creux ou flaches de la couche sous-jacente (couche de base) au moyen de matériaux bitumineux.

RESULTATS ET DISCUSSION

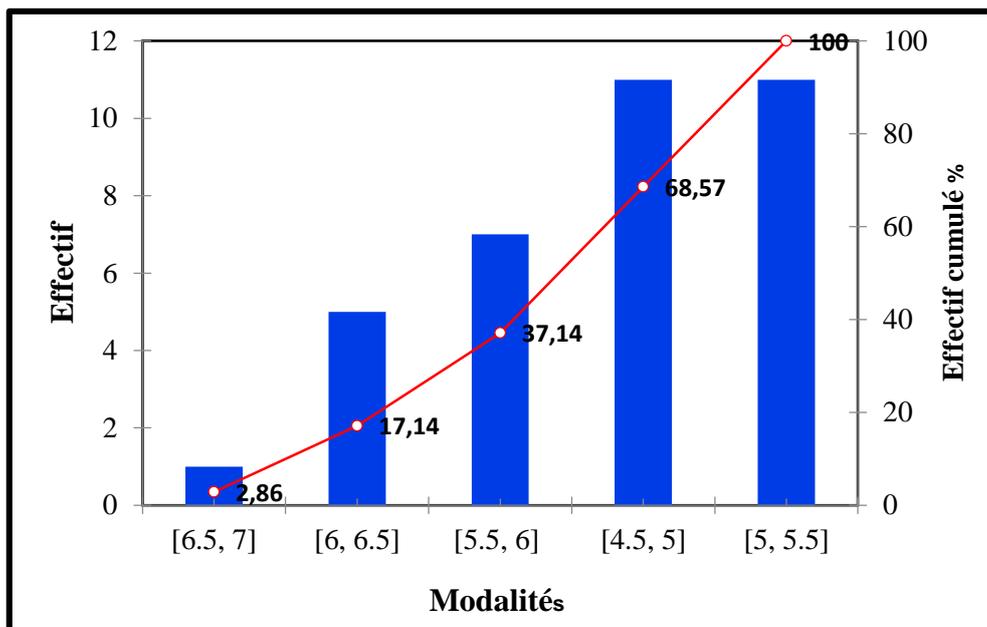


Figure 12. Diagramme de Pareto des épaisseurs des carottes

3.1.4.2. Conformité du pourcentage des vides des éprouvettes

Les pourcentages de vides des carottes du BB 0/14 sont consignés dans le tableau X.

Tableau X. Récapitulatif des résultats de pourcentages de vides sur carottes

Paramètre	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart type	CV(%)	Référence
Teneur en vides (%)	2,40	4,40	6,5	1,04	31,82	3-6

D'après le tableau X, on remarque que la teneur en vides des carottes du revêtement est comprise entre 2,40 % et 6 %, son coefficient de variation est 31,82 %. On en déduit que la dispersion des valeurs du taux de vides obtenues autour de la moyenne (4,40 %) est élevée.

Le graphique de la figure 13, est réalisé conformément à la disposition réelle des planches pour le sens de circulation sur le chantier. Au niveau du graphique de répartition du pourcentage de vides, les mesures de pourcentages de vides effectuées montrent un respect des spécifications pour l'ensemble des enrobés mis en œuvre (seulement 2 points se trouvent avec un pourcentage des vides supérieur à 6% et 4 points ayant une teneur en vides inférieure à 3%).

Le pourcentage de conformité concernant le paramètre teneur en vides des éprouvettes est de 82,68%. Ce squelette intergranulaire doit permettre la stabilité du mélange bitumineux contre le fluage et la poste compaction.

RESULTATS ET DISCUSSION

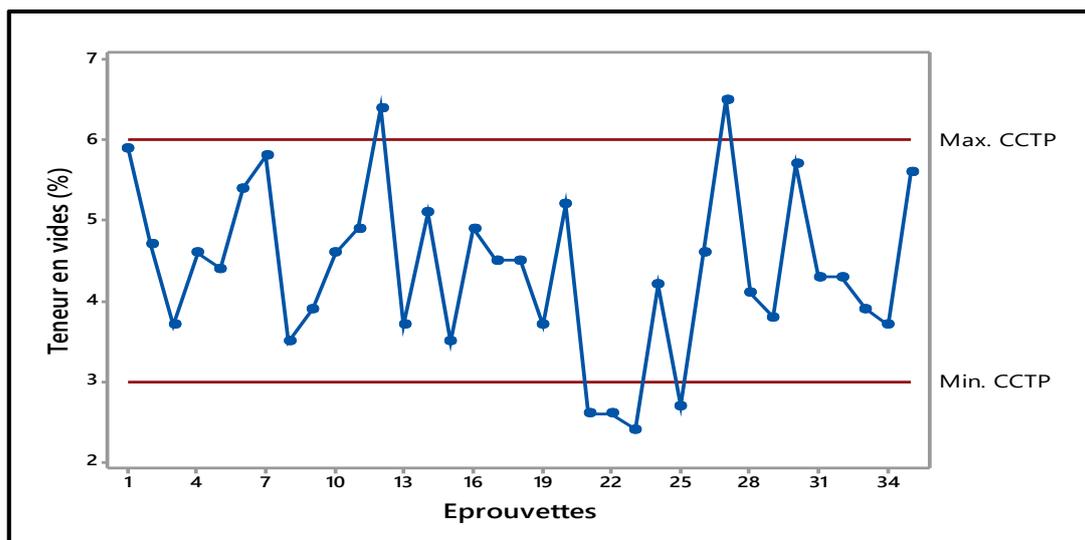


Figure 13. Distribution des différentes valeurs du pourcentage de vides

3.1.4.3. Conformité des résultats du taux de compactage par éprouvette

Les résultats de la compacité de l'enrobé compacté sont rapportés dans le tableau XI.

Tableau XI. Synthèse des résultats de la compacité

Paramètre	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart Type	CV(%)	Référence
Compacité (%)	94	96	98	1,01	10	94-97

Après analyse du tableau XI, nous constatons que la compacité du béton bitumineux mis en œuvre oscille entre 94 % et 98 %, et la dispersion des valeurs de compacité relativement à la moyenne arithmétique est faible. Le taux de conformité de la compacité des éprouvettes est estimé à 97,14 %. Ce taux est causé par l'emploi des compacteurs statiques (compacteurs vibrants utilisés sans vibration) et vibrants (à cylindre lisses) qui permettent d'avoir un plus grand effort de compactage parce qu'il permet d'orienter les gros granulats pour un meilleur blocage. La figure 14 ci-dessous représente la distribution de la compacité des différentes carottes soumises à notre étude. En analysant la figure 14, les valeurs de la compacité s'insèrent dans la plage de variation des valeurs requises d'une part., et qu'un unique point ne se conforme pas aux exigences du cahier de charges d'autres part.

De plus, la valeur moyenne de la compacité en place de l'enrobé appartient à l'intervalle de confiance défini par les spécifications (Tableau XI). On peut conclure que ce lot de production est acceptable du point de vue de la compacité en place du revêtement.

RESULTATS ET DISCUSSION

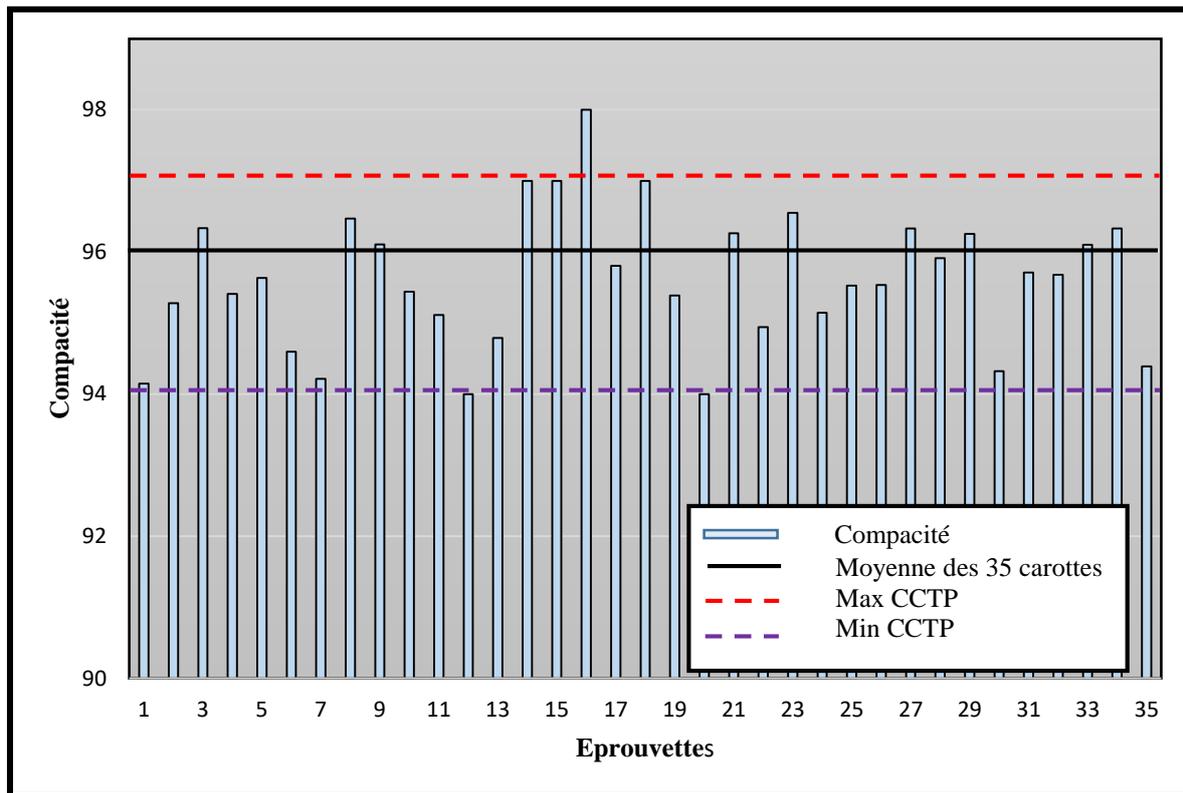


Figure 14. Distribution de la compacité

Cette bonne compacité du béton bitumineux scelle la surface de roulement, protège le mélange bitumineux contre les intempéries, de l'oxydation excessive tout en offrant une surface de roulement adéquate et augmente la densité de l'enrobé mis en œuvre.

3.1.4.4. Conformité de l'indice de compactage individuel d'une carotte

Le tableau ci-dessous présente les résultats sur l'indice de compactage des différentes carottes.

Tableau XII: Résultats de l'indice de compactage

Paramètre	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart Type	CV(%)	CCTL
IC _i (%)	97	99	101	1,14	1,15	≥98

En observant le tableau XII, nous remarquons que les valeurs de l'indice de compactage obtenu varient entre un minimum de 97 % et un maximum de 101%. La valeur moyenne de l'indice de compactage individuel IC_i d'une carotte est de 99 % et leur dispersion de part et d'autres de cette valeur est faible (1,15 %). Cela implique que les sections réceptionnées sont conformes aux prescriptions du cahier de charges relatives à l'indice de compactage. Elles sont donc acceptables du point de vu de ce dernier, défini comme le rapport de la densité apparente de la carotte sur le terrain à la densité apparente de l'éprouvette confectionnée au laboratoire.

RESULTATS ET DISCUSSION

3.1.5. Analyse des régressions

3.1.5.1. Analyse de la corrélation

L'analyse de la corrélation faite sur les caractéristiques de la qualité suivantes : la compacité, l'indice de compactage, les épaisseurs et le pourcentage de vides du revêtement est représentée dans le tableau XIII.

Tableau XIII. Corrélation entre les différents critères de qualité de l'enrobé

Variabes	Epaisseurs	% vides	IC	Compacité
Epaisseurs	1	-0,163	0,3	0,18
% vides	-0,163	1	-0,89	-0,95
IC	0,3	-0,89	1	0,81
Compacité	0,18	-0,95	0,81	1

Les valeurs en gras du tableau XIII sont différentes de zéro (0) à un niveau de signification $\alpha=0,05$.

- Corrélation entre la compacité et le pourcentage des vides

Le sens du rapport entre les différentes variables est lié aux signes du coefficient de variation (+ ou -). Comme mentionné dans le tableau ci-dessus, la compacité du béton bitumineux 0/14 mis en œuvre a une corrélation négative avec le pourcentage des vides. Ainsi, l'augmentation de la valeur de la compacité occasionne la baisse du pourcentage de vides, et vis-versa. Le coefficient de corrélation qui est de -0,95 indique qu'il y a une relation parfaite entre les deux variables. Cependant, cette relation parfaite se fait dans le sens opposé.

- Corrélation entre la compacité et l'épaisseur des carottes

Les données fournies par le tableau XII, montrent une corrélation positive de la compacité avec les épaisseurs. L'augmentation d'une des deux variables a pour conséquence l'augmentation de l'autre, et lorsque l'une d'entre elles décroît, l'autre aussi décroît. Le coefficient de corrélation qui est de 0,18 montre une faible corrélation dans la même direction.

- Corrélation entre les épaisseurs et le pourcentage des vides carottes

La corrélation entre les épaisseurs des éprouvettes de béton bitumineux compacté et la teneur en vides est négative. La valeur du coefficient de corrélation est de -0,163.

RESULTATS ET DISCUSSION

- Corrélation entre l'indice de compactage et les épaisseurs

Les données consignées dans le tableau ci-dessus, montrent une corrélation positive entre l'indice de compactage et les épaisseurs des carottes bitumineuses. Le coefficient de corrélation qui est de 0,3 indique une faible corrélation dans la même direction.

- Corrélation entre l'indice de compactage, le pourcentage des vides et la compacité

L'indice de compactage a une corrélation négative avec l'indice des vides et une corrélation positive avec la compacité en place des différentes carottes échantillonnées. Le coefficient de corrélation qui est de -0,89 et 0,81 respectivement avec le pourcentage des vides et la compacité indique qu'il y a une relation parfaite entre les trois variables.

3.1.5.2. Analyse de la régression linéaire des caractéristiques de qualité

Pour l'analyse de la régression linéaire, il a été retenu comme prédicteur « la compacité en place » tandis que les paramètres « pourcentages des vides », « indice de compactage » et « épaisseurs » sont retenus comme critères ou réponses. Les différents tests réalisés entre les variables du béton bitumineux compacté ont donné trois significativités mentionnées dans le tableau XIV.

Tableau XIV. Analyse de régression sur les carottes étudiées

Paramètres	R ²	F	P-value
Pourcentage des vides	0,895	282,05	0,00
Indice de compactage	0,65	62,40	<0,0001
Epaisseurs	0,049	1,68	0,203

Les résultats du tableau XIV mettent en évidence une régression linéaire simple. La variance expliquée par le modèle de régression est bonne avec des coefficients de corrélation R² (0,895 et 0,65) élevés, des tests de signification F (282,05 ; 62,40) qui correspond à la variance expliquée relative au pourcentage de vides et à l'indice de compactage. La probabilité critique (P-value) est nettement en dessous du seuil de signification 5% ce qui montre que le modèle de régression utilisé est significativement meilleur et prédictif.

On note aussi une valeur aberrante avec un coefficient de corrélation R² qui est de 0,049 ayant un test de signification de 1,68 qui correspond à la variance expliquée par les épaisseurs des carottes. La relation entre les épaisseurs et la compacité n'est pas significative. La variable significative retenue, est l'épaisseur des carottes, qui semble être indépendante de la compacité

RESULTATS ET DISCUSSION

de l'enrobé. Les figures 15 et 16 montrent les droites de régression linéaire des caractéristiques de qualité du revêtement terminé.

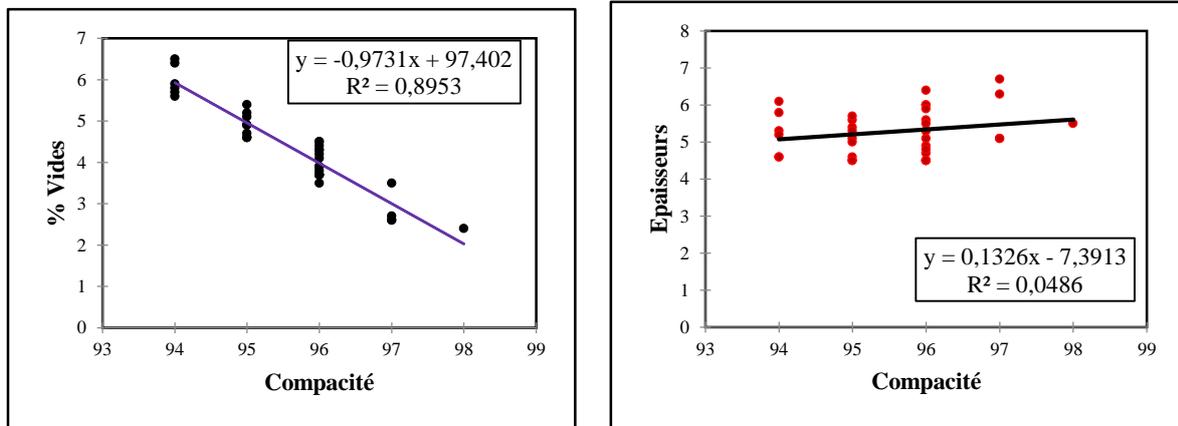


Figure 15: Droites de régression linéaire du pourcentage des vides et des épaisseurs en fonction de la compacité

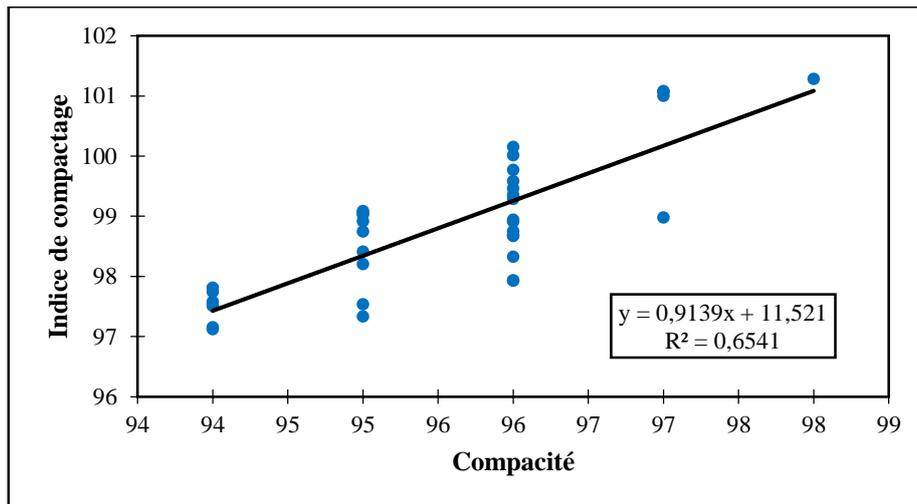


Figure 16: Droite de régression de l'indice de compactage en fonction de la compacité

3.1.6. Contrôle de la conformité des résultats des essais de compacité in-situ par les cartes de contrôle aux mesures individuelles

3.1.6.1. Test de Normalité

Pour mettre en œuvre le contrôle par mesure, il faut connaître tout d'abord la loi qui suit le caractère contrôlé qui est généralement la loi normale. Pour y parvenir, des tests de Normalité sur les paramètres physiques obtenus notamment les pourcentages de vides, la compacité, l'indice de compactage et les épaisseurs des carottes après exécution du béton bitumineux ont été réalisés. Les résultats de ces tests sont mentionnés dans le tableau XV présenté ci-dessous.

RESULTATS ET DISCUSSION

Tableau XV. Résumé des résultats du Test de Normalité

Paramètre	Test d'Anderson-Darling (A^2)	P-value
Pourcentage des vides	0,259	0,659 > 0,05
Compacité	1,661	0,005 < 0,05
Indice de compacité	0,499	0,197 > 0,05
Epaisseurs	0,475	0,225 > 0,05

D'après les résultats obtenus, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H_0 pour l'ensemble des paramètres testés étant donné que $[A^2 > p\text{-value}]$ et $[p\text{-value} > 0,05]$. Il ressort que ces paramètres suivent une distribution normale. Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 alors qu'elle vraie est de 65,9 % pour le pourcentage des vides, 19,7 % pour l'indice de compactage et 22,5 % pour les épaisseurs. Ce qui n'est pas le cas pour le paramètre « compacité » qui suit une distribution non-normale car $[A^2 > p\text{-value}]$ et $[p\text{-value} < 0,05]$. Donc on procèdera par une transformation Box-Cox pour le normaliser.

Les graphiques des figures 17 et 18 ci-dessous représentent successivement le diagramme de probabilité du pourcentage des vides, des épaisseurs, l'indice de compactage et de la compacité de carottes de chantiers. Ces graphiques comparent la fonction de répartition empirique des caractéristiques de qualité du béton bitumineux compacté à celle qu'aurait une loi normale théorique de même moyenne et même variance (en pourcentage). En se rapportant aux graphiques ci-dessous, on observe un alignement presque parfait avec la première bissectrice du plan avec des écarts moins prononcés surtout au niveau des épaisseurs des carottes.

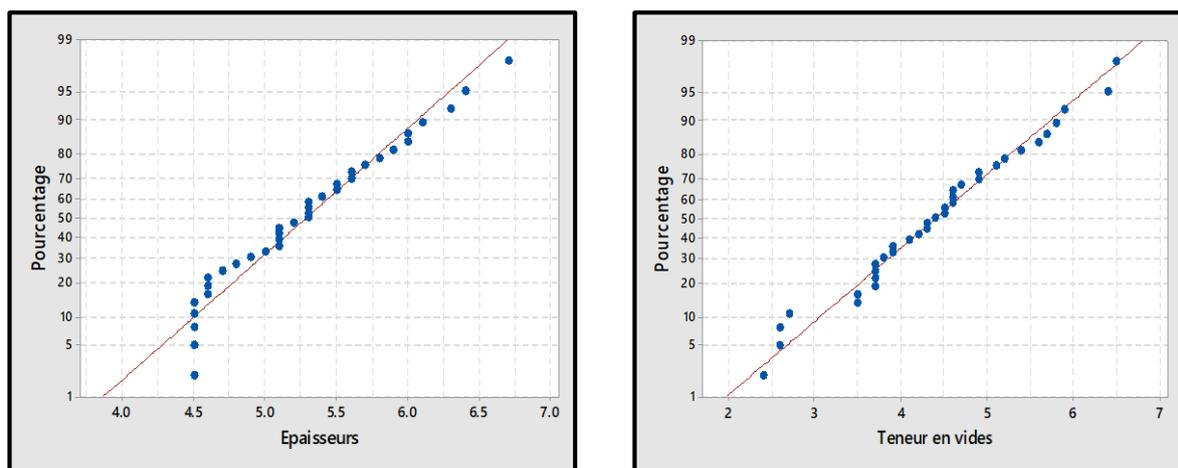


Figure 17: Diagramme de probabilité des épaisseurs et de la teneur en vides

RESULTATS ET DISCUSSION

Cette observation justifie l'hypothèse de distribution suivant une loi normale des variables « épaisseurs », « indice de compactage » et « teneur en vides ».

Contrairement à ce que nous avons observé pour les autres paramètres, on note sur le graphique de la compacité un fort écart à la normalité (figure 18). Les points ne sont pas confondus avec la première bissectrice. Cet écart est confirmé par le test ci-dessus qui permet d'affirmer sans hésitation que l'on doit rejeter l'hypothèse de normalité de la variable « compacité ».

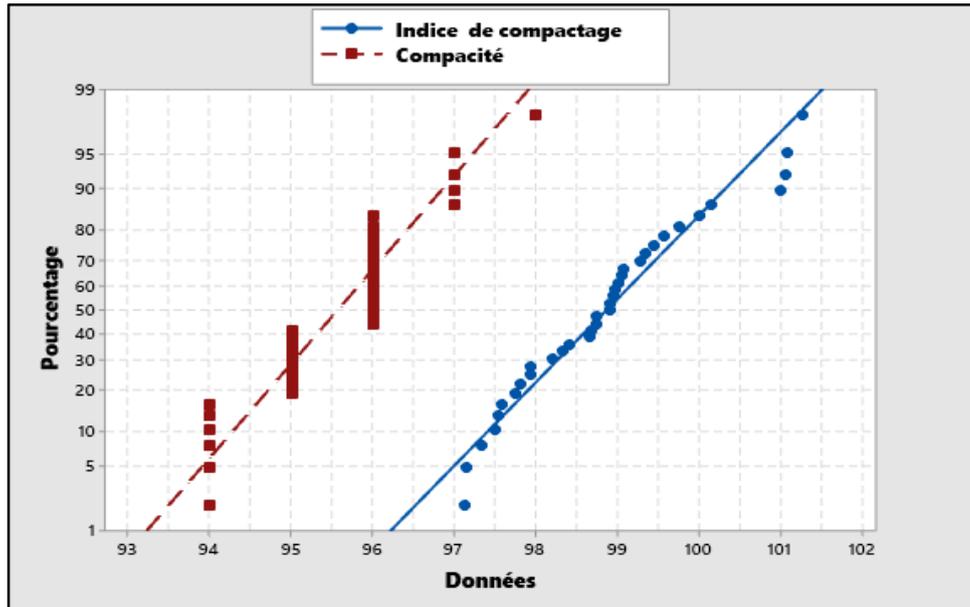


Figure 18: Diagramme de probabilité de la compacité et de l'IC des éprouvettes

3.1.6.2. Carte de contrôle des épaisseurs des éprouvettes

La figure 19, présente la carte de contrôle des épaisseurs des éprouvettes de la couche de roulement. Ces deux cartes sont construites sous l'hypothèse que les données suivent une distribution normale où la moyenne et l'écart type sont respectivement estimés à 5,29 cm et à 0,63 cm. Sur les 35 points montrés sur les deux graphiques, aucun point ne se trouve au-delà des limites de contrôle (3,252 -7,320 cm). La probabilité de voir un point en dehors des limites par hasard est nulle si les données proviennent de la distribution présumée. Nous pouvons affirmer que le processus soit sous contrôle au niveau de la limite de confiance qui est de 95%. La capacité du procédé est égale à 1,076 ; $0 < 1 < 1,076$.

En plus, vu que les points se situent dans les limites naturelles de la distribution présumée et il y a aucune suite de points qui a une forme particulière ou la présence d'une tolérance croissante ou décroissante autour de la moyenne. Ainsi, nous pouvons noter que le procédé ne présente pas d'anomalies critiques et cela nous permet de dire que le procédé est stable sans négliger les

RESULTATS ET DISCUSSION

points ayant une légère variation par rapport aux autres points. Il ressort de cette analyse que, le procédé est stable et a la capacité de maintenir le paramètre « épaisseurs » entre les limites de contrôle et à être accepté.

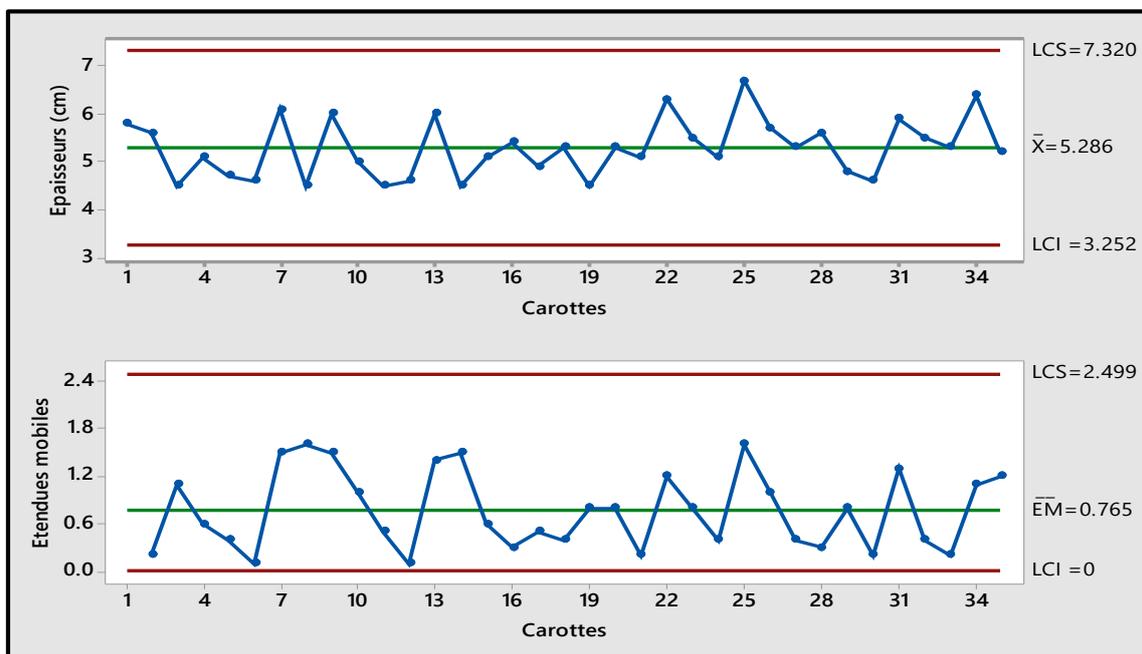


Figure 19. Carte I-EM des épaisseurs de carottes

3.1.6.3. Cartes de contrôle des pourcentages de vides

Ces deux cartes de mesures individuelles (carte des individus et des étendues mobiles) sont construites sous l'hypothèse que les données suivent une distribution normale où la moyenne et l'écart type sont respectivement estimés à 4,397 % et à 0,99 %. L'analyse de la carte de contrôle par individu de la figure 20, nous montre que les limites de contrôle supérieure et inférieure du procédé sont respectivement 7,377 % et 1,417 %. Sur les 35 points montrés sur les deux graphiques présentés à la figure ci-dessous, aucun point ne se trouve au-delà des limites de contrôle. A cela, on peut ajouter que la capabilité du procédé est égale à 1,0003.

Quand un processus est maîtrisé et sous contrôle, cela signifie que tous les points de la carte des individus se situent dans les limites de contrôle et aucune suite de points n'a de forme particulière à l'exception de quelques points mais ne reflète pas un état critique, ce qui est le cas pour le pourcentage des vides des enrobés compactés. On peut en déduire que le procédé est stable et à la capacité de maintenir le paramètre « pourcentage des vides » entre les limites de contrôle et d'acceptation fixées par les spécifications.

RESULTATS ET DISCUSSION

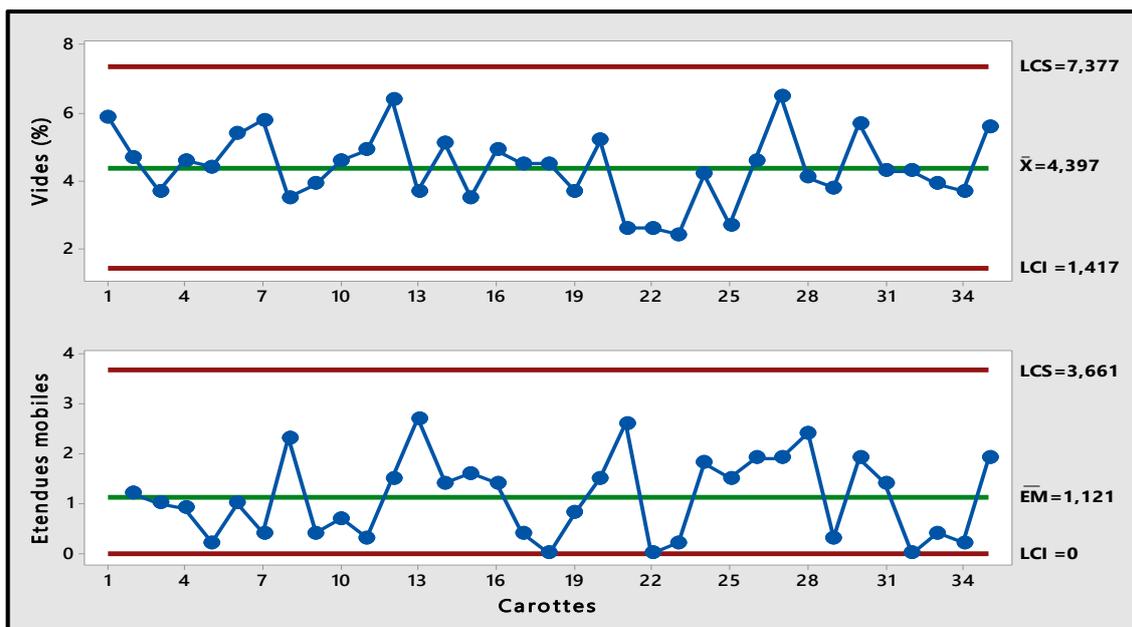


Figure 20. Carte I-EM du pourcentage des vides

3.1.6.4. Cartes de contrôle de la compacité des carottes

Les graphiques ci-dessous (**figure 21**) résument l'évolution de la moyenne et de la variabilité de la qualité des mesures de compacité.

La moyenne et l'écart type sont respectivement estimés à 95,612 % et à 0,998 %. Sur les 35 points montrés sur les deux cartes, aucun point n'est hors contrôle. Nous pouvons en déduire que le test de normalité n'est pas nécessaire. Par conséquent la transformation Box-Cox pour normaliser les résultats de la compacité précitée n'est pas aussi appropriée.

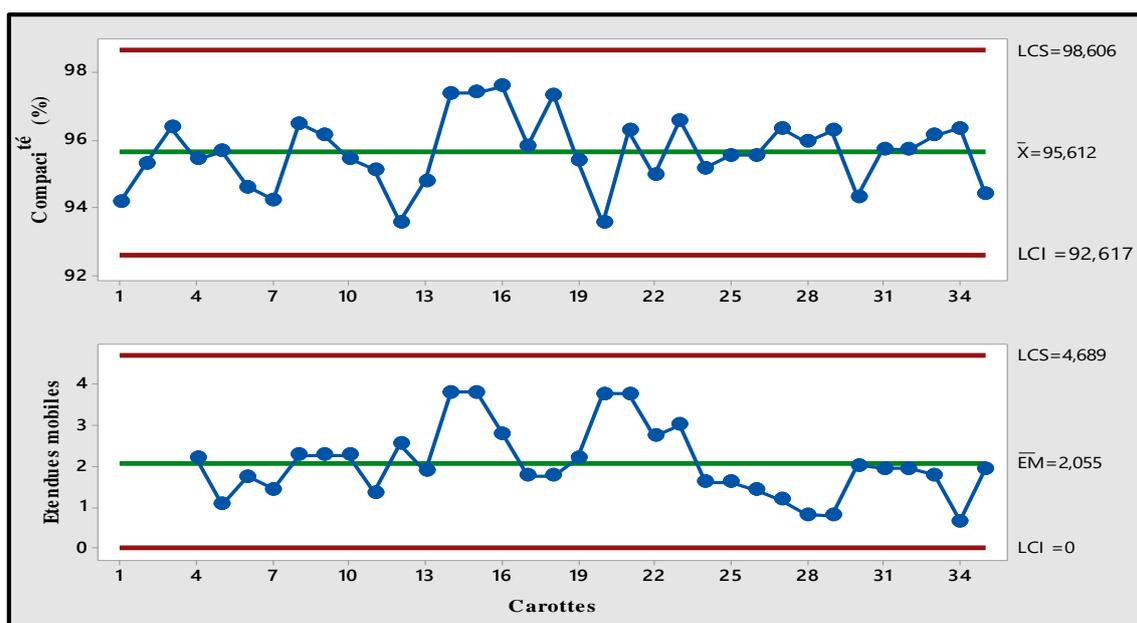


Figure 21. Carte I-EM de la compacité

RESULTATS ET DISCUSSION

Sur la carte de contrôle tracée de la compacité du revêtement, nous constatons que le procédé est stable vu que les points oscillent de chaque côté de la moyenne et ne présentent aucune forme particulière (suites positives ou négatives ou rapprochements de la moyenne ou des limites de contrôles) à l'exception de quelques points ou suite de points mais ne reflète pas un état critique. La capacité du procédé obtenu est égale à 1,0002.

Ce qui nous amène à conclure que le procédé est stable par rapport à la compacité et a la capacité de maintenir ce paramètre entre les limites d'acceptation prévues par les spécifications.

3.1.6.5. Carte de contrôle de l'indice de compactage

La figure 22 ci-après présente la carte de contrôle de l'indice de compactage de la série de carottes échantillonnées.

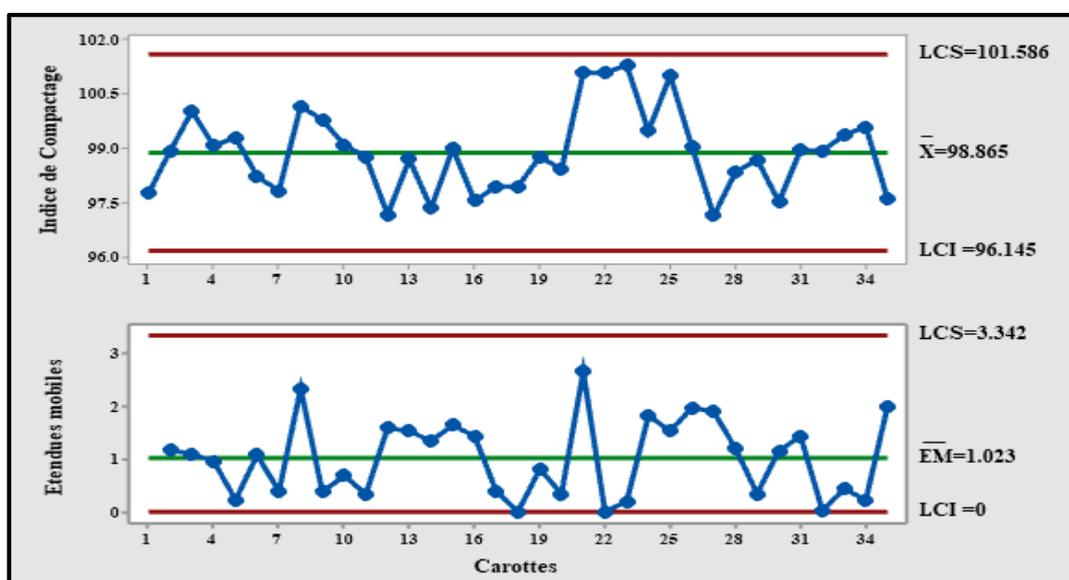


Figure 22: Carte I-EM de l'indice de compactage

D'après la carte de contrôle de l'indice de compactage, la variation et la moyenne du procédé sont stables. Aucun point n'est hors contrôle sur les différentes cartes. Les valeurs du degré de compaction se trouvent dans les limites de contrôle et ne présentent pas une suite de points, une tendance croissante ou décroissante ou des formes particulières à l'exception de quelques valeurs qui se rapprochent de la tendance centrale mais ne reflète pas à un état critique. La moyenne et l'écart type du procédé sont respectivement estimés à 98,865 % et à 0,907 %.

Le procédé est stable avec un indice de capacité qui est de 1 et a la capacité de maintenir le paramètre « indice de compactage » de l'enrobé mis en place entre les limites de contrôle et d'acceptation.

RESULTATS ET DISCUSSION

Conclusion partielle

Cette étude nous a permis de mettre en valeur la qualité des enrobés bitumineux mis en œuvre dans la réalisation des ouvrages routiers entre les villes de Boundiali et Madinani précisément entre le PK 2+000 et le PK 4+ 750. La caractérisation mécanique des enrobés utilisés par la méthode Marshall nous a permis de découvrir que le pourcentage moyen de bitume est de 6,08% qui donne une stabilité moyenne de 1442 kg et un fluage maximal de 3,80 mm.

De plus, l'analyse de la qualité des enrobés compactés nous a révélé que le taux de conformité est de 67,57 % pour les épaisseurs, 82,68% pour le pourcentage des vides et 97,14% pour la compacité des carottes du béton bitumineux 0/14. A cela on peut ajouter que l'indice compactage individuel moyen des carottes étudiées est de 99 % et est en accord avec la valeur nominale exigée par les spécifications.

Pour ce qui est de l'analyse des résultats de stabilité, l'analyse de corrélation met à nu une corrélation entre la compacité, l'indice de compactage et la teneur en vides du revêtement. Les cartes de contrôle par individus stipulent que le procédé de contrôle de la mise en œuvre du BB 0/14 est sous contrôle en se référant essentiellement aux critères de qualité précités et aucune action n'est à entreprendre.

Somme toute, concernant la mise en œuvre du béton bitumineux sur le chantier, le compactage est assuré conformément aux essais réalisés sur la planche d'essai. Ces résultats ont permis d'atteindre les performances contractuelles visées.

RESULTATS ET DISCUSSION

3.2. Discussion

L'ensemble des résultats des essais géotechniques réalisés sur les échantillons d'enrobés prélevés pendant et après les mises en œuvre sont conformes aux spécifications.

Le bitume contribue à la cohésion et à la durabilité des enrobés bitumineux. Couplé aux fines, il lubrifie le squelette granulaire et permet le compactage des enrobés. Dans notre expérience, nous avons obtenu une teneur moyenne de bitume de 6,08 % sensiblement égale à la valeur optimale prescrite par le CCTP 6 %. Une étude antérieure sur la formulation et l'optimisation des enrobés bitumineux en Suisse, menée par Junod (2004), a montré que les teneurs en liant acceptables pour une meilleure durabilité des bétons bitumineux « moyens » de granularités 0/14 étaient comprises entre 5,69 % et 6,07 %. Il a été rapporté que la teneur en liant optimale doit être comprise entre un minimum de 5 % et un maximum de 8 % pour des bétons bitumineux « fins » de granularités 0/8 et 0/10 et « moyens » pour des granularités 0/12 et 0/14 dans les pays africains de la zone intertropicale (ALBTP et le CTGA, 2018). La littérature a aussi démontré qu'une teneur en liant, comprise entre 5,50 % et 6,50 %, permet au béton bitumineux semi-grenu 0/14 d'assurer un certain seuil de stabilité, de compacité, de résistance à l'eau et au fluage (Bendimerad et Zadjou, 2015). Ces résultats corroborent notre étude.

Le volume de vides dans une chaussée en enrobés bitumineux à chaud est d'une grande importance car il a un effet considérable sur la performance à long terme de la chaussée. Les résultats des pourcentages de vides, mesurés sur carottes varient de 2,40 à 6,50 %. Ces résultats sont semblables à ceux obtenus par Roberts *et al.* (1996) et (Brown,1990). Selon ces auteurs, pour qu'un enrobé bitumineux à chaud assure sa fonction de service, il doit être compacté à un taux de vides qui varie de 3 à 8 %. Cela correspond à une compacité de 92 % à 97 %. En réalité, ces auteurs ont montré que les enrobés bitumineux à chaud ne devraient pas excéder 8 %, ni tomber en dessous de 3 % de teneur en vides pendant leur durée de vie. Une teneur en vides interstitiels élevée (supérieure à 8 %) ou faible (en deçà de 3 %) peut causer des déformations de la chaussée telles que l'orniérage, le déplacement et le ressuage. Une règle de base pour le compactage initial est que pour chaque augmentation de 1 % des vides d'air (supérieure à 7 %), environ 10 % de la vie de la chaussée peut être perdue. Les 3 % restants de la compacité admissible (97 %) sont laissés en supposant qu'un compactage supplémentaire se produit sous l'effet des contraintes ultérieures apportées par le trafic (Brown,1990).

La compacité relative de la quasi-totalité des carottes analysées répond aux exigences contractuelles (≥ 98 %) et varie entre 97 % et 101 %. Ce compactage correct permet de prévenir

RESULTATS ET DISCUSSION

certain types de déformations. En effet, les chaussées en enrobés bitumineux correctement compactées contiennent suffisamment de vides d'air pour éviter l'orniérage dû au fluage, mais aussi une teneur en vides suffisamment bas pour empêcher la perméabilité à l'air ou à l'eau. Ce qui produit une augmentation du poids unitaire ou de la densité de l'enrobé compacté qui influe directement sur la durabilité des chaussées, entraîne une réduction des coûts d'entretien et une amélioration de la qualité de la chaussée (Scherocman, 1984 ; Scherocman et Martenson, 1984 ; Padlo *et al.*, 2005 ; Pavement Interactive, 2018).

Les composantes météorologiques telles que la température ambiante, la couverture nuageuse, l'humidité et les précipitations et la vitesse du vent affectent le refroidissement des enrobés, qui est directement proportionnel au compactage. Les données obtenues dans cette étude montrent que l'enrobé produit est normalement assez chaud pour que l'équipement de compactage puisse réorienter les particules d'agrégats dans leur configuration la plus dense (Padlo *et al.*, 2005).

Par ailleurs, les résultats de la caractérisation mécanique des enrobés obtenus sont du point de vue des spécifications du cahier de charges et des références normatives satisfaisants. Toutefois des réserves sont à émettre. En envisageant par un examen attentif et critique les nouvelles configurations des poids lourds sollicitant quotidiennement nos différentes chaussées, certains essais ne sont plus adaptés pour définir la qualité structurelle des matériaux utilisés couramment en couche de roulement sous nos tropiques. Assurément, il a été rapporté que les valeurs des indicateurs basés sur les performances empiriques de l'essai Marshall ne sont plus prédictives du comportement de l'enrobé mis en place (Tapsoba, 2012). Il ne donne pas d'indications sur la résistance aux déformations d'un revêtement mais sert de contrôle de la régularité d'une production de revêtement bitumineux. Ce même constat est repris par Guissi (2016) qui montre que certains bémols sont apportés sur la méthode de compaction qui s'effectue par impacts et dont la charge de compaction est appliquée perpendiculairement à l'axe de compaction, laquelle ne permet pas de reproduire efficacement la densité pendant la mise en œuvre.

Enfin, les cartes de contrôle pour chacun des critères de qualité fournissent la preuve que les résultats des contrôles effectués présentent une variabilité qui est contrôlée. La littérature a déjà démontré que les cartes de contrôles permettent d'assurer un meilleur contrôle et de diminuer les coûts économiques liés à la non-conformité des enrobés à chaud en adoptant ou remplaçant la variabilité par la consistance et la stabilité (Akkinepally et Attoh-Okine, 2006). Ainsi, il est important d'utiliser les cartes de contrôle qualité en vue d'identifier les raisons derrière la variabilité qui peut conduire un enrobé bitumineux déjà produit et mis en œuvre à être au-delà des limites de tolérances prescrites par les spécifications.

CONCLUSION

CONCLUSION

Le sujet de ce mémoire a été motivé par une volonté de s'inscrire dans une démarche de qualité dans l'optique de s'assurer que les matériaux utilisés en construction routière sont conformes aux références normatives et de limiter les coûts économiques de non-qualité en optimisant les procédés de production.

Le présent travail rentre parfaitement à cette stratégie visant à contrôler la conformité du béton bitumineux de classe granulaire 0/14 mis en œuvre dans le cadre des travaux de bitumage de la route Boundiali-Madinani aux spécifications de la qualité. Différentes analyses et essais géotechniques ont été réalisés au chantier et au niveau du laboratoire pour mettre en évidence les caractéristiques de qualité des enrobés. Les propriétés du béton bitumineux étudié ont concerné le pourcentage des vides, le degré de compactage, la proportion des agrégats, la teneur en bitume ainsi que ses propriétés mécaniques. Les méthodes d'analyses utilisées ont permis d'apprécier, d'évaluer les résultats pour s'assurer de leur adéquation aux spécifications et pour en dégager les tendances d'une part. D'autre part elles ont donné les moyens pour mettre à nu la variabilité dans le processus d'application du béton bitumineux et rendre visible la distribution statistique des tests effectués et de garantir la robustesse et la fiabilité des analyses. De plus, le programme d'essai réalisé a permis de vérifier que le béton bitumineux mis en œuvre respecte les exigences contractuelles prévues dans le cahier des charges des travaux de bitumage de la route Boundiali-Madinani. Toutefois, nous n'avons nullement l'intention de prétendre que les études effectuées lors de ce travail sont complètes par rapport aux différents contrôles effectués. Néanmoins, nous pouvons affirmer que ce travail nous a donné la possibilité d'acquérir une expérience et de consolider nos connaissances théoriques.

Pour assurer la pérennité de la route, nous recommandons aux acteurs du domaine routier d'entrer dans une recherche permanente de la qualité totale qui ne peut être que dynamique et évolutive. Cependant, elle ne sera efficace que dans une démarche de qualité totale impulsée par l'entreprise et s'appuyant sur un système d'assurance qualité performant. Au point de vue géotechnique, nous recommandons l'adoption de la méthode PCG pour optimiser nos formules d'enrobés aux dépens de la méthode Marshall qui s'avère être de moins en moins efficace. Finalement, nous pouvons dire que les cartes de contrôle qualité contribuent à améliorer la qualité des produits en décelant les instabilités. Comme perspective, une étude approfondie sur l'utilisation de cette procédure de contrôle avant et pendant la production des enrobés pourraient optimiser leur connaissance, leur qualité et rendement et la réduction des coûts liés à la non qualité en réduisant les rebuts.

REFERENCES

REFERENCES

- Adja, M. G., Jourda, J.-P., Ta, M. Y., Kouame, K., Kouame, K. J., Kouame, K. F., et Biemi, J. (2009). Diagnostic à la mi- saison sèche del'état hydrique du bassin versant de la Bagoé (Milieu oudano-sahélien de Côte d'Ivoire) à l'aide d'image ETM+ de Landsat. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 20 (3) : 253–261.
- Aizzi, M., & OUBIHTI, F. (2008). Diagnostic des pratiques du contrôle F&B le management des équipes : une locomotive d'optimisation du rendement du département restauration « Cas du SOFITEL PALAIS JAMAÏ », ISITT, (Tanger, Royaume du Maroc), 115p.
- Akanvou, R. K. (1995). Les systèmes de culture du maïs dans le nord de la Côte-d'Ivoire, 3p.
- Akkinepally, R., & Attoh-Okine, N. (2006). Quality control and quality assurance of hot mix asphalt construction in DELAWARE, (Delaware, USA), 136p.
- ALBTP, et CTGA, (2018). Règles techniques pour la construction routière dans les pays africains de la zone intertropicale (Études, conception, construction, entretien), Version incorporant l'ensemble du guide de 1980 Complétée par le manuel BCEOM de 1972/1984 (Chap. 6 et 7 du tome 1, tome 2 et tome 3), 643p.
- Anonyme. (2008). Maîtrise Statistique Des Procédés, 3p.
- Assouman, S. F., Koné, M., & Koli, B. Z. (2016). Morphologie du paysage, variabilité pluviométrique et aménagement de la plaine alluviale de la bagoé: l'exemple de guinguerini au nord de la cote d'ivoire, *EDUCI : Revue de Géographie Tropicale et d'Environnement*, n°1, 2016, 1 : 5-17.
- Avenard, J.M. (1971). Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Rapport No 50, ORSTOM, (Paris, France), 401 p.
- Barco, C. (2007). Influence de la température de compactage des plaques d'enrobés sur la résistance à l'orniérage, Mémoire de Master en génie de la constuction, École de Technologie Supérieure Université du Québec, (Québec, Canada), 193p.
- BAD. (2015). Rapport EIES de l'aménagement routier et de facilitation du transport sur le corridor BAMAKO-ZANTIEBOUGOU-BOUNDIALI-SAN PEDRO, 26p.
- Bassem, B. (2011). Contrôle de la production et de la qualité des systèmes manufacturiers non-fiables, 187p.
- Beaudou, A. G., & Sayol, R. (1980). Étude pédologique de la région de Boundiali-Korhogo, Cartographie et typologie sommaire des sols Feuille Boundiali-Korhogo, (Paris,Fance), 58p.

REFERENCES

- Bendimerad, K. F., & Zadjou, A. (2015). Contrôle des travaux de revêtement en béton bitumineux à module élevé: Cas de l'Ouest Algérien, 33èmes Rencontres de l'AUGC, ISABTP/UPPA, Anglet, 27 au 29 mai 2015, 33 : 1-8.
- Brown, R. (1990). Density of Asphalt Concrete- How Much is Needed? Transportation Research Board, Washington DC, 14p.
- Des Essarts, A. F. (2016). Etude du comportement des enrobés bitumineux aux températures de mise en oeuvre. Thèse de Doctorat, Science de l'ingénieur, Université Paris – Est, Institut de Recherche en constructibilité (ESTP-IRC), (Paris, France), 204p.
- Diakhaté, M. (2007). Fatigue et comportement des couches d'accrochage dans les structures de chaussée, Thèse de Doctorat, Université de Limoges, (Limoges, France), 251p.
- Fascicule 27. (1996). Fabrication et mise en œuvre des enrobés hydrocarbonés. Version 1.0. Décembre 2017, 25p.
- Filleron, J. C. (1995). Essai de géographie systématique : les paysages du Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire, Doctoral dissertation, Université Toulouse le Mirail-Toulouse II, (Toulouse, France), 1877p.
- Girard, G. (1961). Etude du bassin versant de la Haute Bagoé: résultats de la campagne 1960, ORSTOM, 82p.
- Guissi, G. (2016). Cours TCH025: travaux de génie civil, Module 03: introduction aux enrobés bitumineux. 120p.
- Girard, G., Sircoulon, J., & Touchebeuf de Lussigny, P. (1971). Aperçu sur les régimes hydrologiques, 151p.
- Helil, H., & Khoudja, N. (2017). Etude d'un béton bitumineux à base de sables de dunes. mémoire de Master en génie civil, Université Kasdi Merbah, (Ouargla, Algérie), 98p.
- ISO 9000 (fr). (2015). Systèmes de management de la qualité — Principes essentiels et vocabulaire.
- Junod A., Dumont A.G. (2004). Formulation et optimisation des formules d'enrobés. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Laboratoire des Voies de Circulation (Lausanne, Suisse), 89 p.

REFERENCES

- Kara Slimane, K. (2013). Indicateurs qualité et procédures pour le management de la qualité dans un projet routier, mémoire de Master en génie civil, Université Aboubekr Belkaid, (Tlemcen, Algérie), 2p
- Konan, E. (2016). Cours sur les techniques de construction routière, 34p.
- Larcher, N. (2014). Contribution à la caractérisation des matériaux au comportement viscoélastique par méthode ultrasonore : Application aux matériaux bitumineux, Thèse de Doctorat, Université de Limoges, (Limoges, France), 8p.
- LCPC. (2007). Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés Groupe de travail RST « Formulation des enrobés », 199p.
- LCPC. (2003). Guide Technique - compactage des enrobés hydrocarbonés à chaud, 82 p.
- Le petit Larousse (2010). Qualité.
- Le Roy, X., & Robinet, H. (1973). Tounvre Village Senoufo, Ecole Supérieure d'Agriculture, (Angers, France), 153p.
- Mahamat, N. (2012). Amélioration des graveleux latéritiques au ciment en couches de chaussée au Burkina-Faso : « cas des travaux de renforcement de la RN1 entre BOROMO ET BOBO - DIOULASSO », Mémoire de Master en ingénierie de l'eau et de l'environnement, 2iE, (Ouagadougou, Burkina-Faso), 77p.
- Mersellab, S., & Angou, H. (2015). contrôle physico-chimique, et microbiologique, toxicologique et toxicologique d'une solution injectable clofenal 75 mg/3 ml. 3 p. Mémoire de Master en Analyses Biologiques et Biochimiques, Faculté des sciences de la nature et de la vie et sciences de la terre, Département de biologie, Université de Djilali Bounama, (Khemis Miliana, Algérie), 81p.
- Montgomery, D. (2009). Introduction to statistical quality control, 6th edition, 754p .
- Navaro, J. (2011). Cinétique de mélange des enrobés recyclés et influence sur les performances mécaniques, Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Science des Métiers de l'Ingénieur , Arts et Métiers ParisTech, (Bordeaux, France), 313p.
- NF EN 12697-1, (2012), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 1 : teneur en liant
- NF EN 12697-2, (2015), Mélanges bitumineux - Méthode d'essai - Partie 2 : granulométrie.
- NF EN 12697-6, (2003), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour enrobés à chaud –

REFERENCES

- Partie 6 : Détermination de la masse volumique apparente des éprouvettes bitumineuses.
- NF EN 12697-34, (2015). Essai Marshall
- NF P98-150-1, (2010). enrobés hydrocarbonés - Exécution des assises de chaussées, couches de liaison et couches de roulement - Partie 1 : enrobés hydrocarbonés à chaud - Constituants, formulation, fabrication, transport, mise en oeuvre et contrôle sur chantier.
- N'guessan, K., Diarrassouba, N., Alui, K., Nangha, K. Y., Fofana, I., & Yao-Kouame, A. (2015). Indicateurs de dégradation physique des sols dans le Nord de la Côte d'Ivoire :cas de Boundiali et Ferkessédougou, *Afrique science* 11(3) (2015) 115 - 128.
- Ntomba, H. (2010). Le rôle du réseau routier dans l'intégration et la croissance économique:impact de ring et routes des dessertes agricoles dans la création de richesse en RDC, Université de Kinshasa, (Kinshasa, RDC), 17p.
- ONU-HABITAT. (2012). Côte d'Ivoire : Profil urbain de Boundiali, 30p.
- Pavement Interactive. (2018). Compaction. (Publiée en décembre 2017) Consulté le Septembre 3, 2018, sur <https://www.pavementinteractive.org/reference-desk/construction/compaction/>
- Pfeiffer, J. P. (1950). The properties of asphaltic bitumen. Amsterdam: Elsevier, 285p.
- Padlo, P. T., Mahoney, J., Aultman-Hall, L., & Zinke, S. (2005). Correlation of nuclear density readings with cores cut from compacted roadways, Connecticut DOT Report CT-2242-F-05-5,17p.
- Pouteau, B. (2004). Durabilité mécanique du collage blanc sur noir dans les chaussées. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Nantes. (Nantes, France), 306p.
- RGPH. (2014). Résultats globaux, 22p.
- Roberts, F., Kandhal, P., Brown, E., Lee, D., & Kennedy, T. (1996). Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction. National Asphalt Paving Association Education Foundation. Lanham, MD, 380p.
- Rose, A. (2005). Appliquer la maîtrise des procédés à la fabrication de comprimés pellicules, Thèse de Doctorat en pharmacie, Faculté de Pharmacie, Université de Nantes, (Nantes, France), 97p.
- Scherocman, J. (1984). Guidelines for Compacting Asphalt Concrete Pavement. *Better Roads*, Vol. 54, No. 3. pp12-17 .

REFERENCES

- Scherocman, J., & Martenson, E. (1984). Placement of Asphalt Concrete Mixtures. Placement and Compaction of Asphalt Mixtures. F.T. Wagner, Ed. ASTM Special Technical Publication 829. American Society for Testing and Materials. (Philadelphia,USA), 27 p
- Sidibé, O. I. (2011). Contrôle de qualité des médicaments antipaludiques dans sept (07) régions administratives du Mali et le district de Bamako : opérationnalisation des kits minilabs, thèse de Doctorat d'Etat en Pharmacie, Faculté de Médecine, de Pharmacie et d'Odontostomatologie, Université de Bamako, (Bamako, Mali), 121p.
- Simonis Ph., Petitjean Ph., Brichant P.-P., (2015). Compacité relative et pourcentage de vides : Essai à réaliser, 35p.
- Sosson, C. L. (2004). Caractérisation semi détaillée des bassins versants dans la zone agro-climatique de Boundiali : contraintes socio-économiques à l'adoption des technologies rizicoles, 70p.
- Tachon, N. (2008). Nouveaux types de liants routiers à hautes performances, à teneur en bitume réduite par addition de produits organiques issus des agroressources, Thèse de doctorat. École Doctorale Sciences de la Matière, (Toulouse, France), 285p.
- Tapsoba, J. H. (2012). Etude de formulation et de mise en œuvre des enrobés : Cas des travaux de renforcement de la route Ouaga-Sakoinsé. Mémoire Master en ingénierie de l'eau et de l'environnement option Génie-Civil, 2iE, (Ouagadougou, Burkina-Faso), 87p.
- Thiaw, S. (2006). « Dimensionnement mécanistique-empirique des structures de chaussée: Application au tronçon Séo-Diourbel. ». Projet de fin d'études d'Ingénieur Conception. Dakar, Université Cheikh Anta Diop, (Dakar, Sénégal), 104p
- Traoré, B., (2010). Processus de décentralisation en Côte d'Ivoire: quelles stratégies de planification des activités des Conseils Généraux pour un développement local participatif réussi? Cas du Conseil Général Boundiali en Côte d'Ivoire, Mémoire de Master analyse économique et développement international spécialité maîtrise d'ouvrage publique et privé, Centre d'études financières économiques et bancaires Agence française de développement, Université d'Auvergne, (Marseille, France), 70p.
- Weber, A. (2012). Analyse du cycle de vie de la route : Les enjeux de la déconstruction. Mémoire de Projet de Fin d'études, Spécialité Génie Civil, INSA de Strasbourg. (Strasbourg, France), 75 p.

ANNEXES

Annexe I : les types de béton bitumineux et leurs caractéristiques

Appellations abrégées de bétons bitumineux	Caractéristiques	Normes concernées
BBSG	Couches allant de 5 à 10 cm. Empêche les problèmes d'ornièrre. Résistance élevée face aux efforts.	NF P98-130
BBME		NF P98-141
BBS		NF P98-136
BBM	Excellente adhérence. Imperméabilise la chaussée	NF P98-132
BBDR	Excellente adhérence. Baisse significative du bruit de roulement. Excellente adhérence par temps de pluie	NF P98-134
BBTM	Couche de 2 à 3 cm	XP P98-137
BBUM	Couche de 1 à 1,5 cm	-

Annexe II: Classes de bitumes purs

Classes de bitumes purs	Pénétrabilité à 25°C comprise entre (en 1/10 de mm)	Point de ramollissement (bille et anneau) compris entre (en °C)	Température de pompage(en °C)	Température d'enrobage (en °C)	Point d'éclair supérieur à (en °C)	Densité moyenne à 25°C
180/220	180 et 220	34 et 43	105	145	230	1,03
80/100	80 et 100	41 et 51	115	155	230	1,03
60/70	60 et 70	43 et 56	120	165	230	1,05
50/70	50 et 70	46 et 54	120	165	230	1,05
40/50	40 et 50	47 et 60	125	170	250	1,05
20/30	20 et 30	52 et 65	135	180	250	1,05

Annexe III: tableau récapitulatif des essais mois de mai-juin 2018 BB 0/14 mm

Date d'application	PK/PK	Linéaire (m)	COTE	EXTRACTION									Marshall pour BB 0/14 mm							
				Granulométrie (mm) % passants à									TI	fluage	compacité	vide	stabilité	K	MVA	MVR
				14	10	6.3	4	2	0.63	0.32	0.08	%	mm	%	%	Kg		t/m3	t/m3	
SPECIFICATIONS				94-100	72-84	50-66	40-54	28-40	17-28	13-21	7-10	6.0	<4	94-97	3-6	>1000	3,4-3,8			
19-May-18	2+000/2+200	200	G+D	98	88	67	53	37	23	16	6.13	6.15	3.33	96	4	1766	3.85	2.35	2.44	
31-May-18	2+200/2+800	600	G+D	97	83	65	53	39	27	19	6.51	6.01	3.80	96	3.6	1372	3.73	2.36	2.45	
7-Jun-18	2+800/3+150	350	G+D	98	81	62	49	34	20	14	6.44	6.05	3.40	96	3.7	1399	3.79	2.35	2.45	
8-Jun-18	3+150/3+925	775	G+D	96	78	64	45	36	21	17	6.46	6.08	3.10	97	2.6	1304	3.79	2.38	2.45	
9-Jun-18	3+925/4+725	800	G+D	96	77	61	42	32	21	18	6.89	6.09	3.30	97	3.1	1369	3.76	2.37	2.45	
total		2,725																		
moyenne		908		97	81	64	48	36	22.4	16.8	6.49	6.49	3.39	96.4	3.4	1442	3.78	2.36	2.45	

Annexe IV: fiche technique des résultats des essais de carottages

Travaux d'aménagement et de bitumage de la route Boundiali - Odiénné Section 1 : Boundiali - Madinani (58 km)							
Mesure de la compacité IN-SITU de la couche de roulement en béton bitumineux							
Essai sur carottes							
date d'application :	5/19/2018						
date des essais :	5/26/2018						
		Résultats essai Marshall				Exigences CCTP	
		M. V. R. (t/m3)		2.45			
		Compacité Marshall (CM)		96%		94% ≤ CM ≤ 96%	
Section: Du PK :		2+000					
Au PK :		2+200					
B : 0/14mm							
Carotte n°		1	2	3	4	Moy.	
Emplacement	PK	2+025	2+075	2+125	2+175		
	Posi.	D	G	D	G		
Epaisseur (cm)		5.1	4.6	4.5	5.1	4.8	<u>Conforme</u>
Masse de la carotte (g)		831.60	767.60	710.30	875.00		
m_1							
Masse de la carotte paraffinée (g)		844.90	779.90	721.60	886.50		
m_2							
Masse de la carotte paraffinée immergée dans l'eau (g)		469.6	437.4	408.10	499.40		
m_3							
Densité Marshall d_M		2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	
Densité in-situ d_s							
m_1							
$d_s = \frac{m_2 - m_3 - (\frac{m_2 - m_1}{0.9})}{V}$		2.31	2.33	2.36	2.34	2.33	<u>Conforme</u>
Indice de compactage							
$IC (\%) = d_s / d_M$		98	99	100	99	99	<u>Conforme</u>
Compacité (%)							
$\frac{MVA}{MVR} \times 100$		94	95	96	95	95	<u>Conforme</u>
% des vides		5.9	4.7	3.7	4.6	4.7	<u>Conforme</u>
/ Entreprise		P/ Contrôle Qualité				P/ Mission de Contrôle	

Travaux d'aménagement et de bitumage de la route Boundiali - Odiénné
Section 1 : Boundiali - Madinani (58 km)

Mesure de la compacité IN-SITU de la couche de roulement en béton bitumineux
Essai sur carottes

Date d'application : 5/31/2018

Date des essais : 6/8/2018

Résultats essai Marshall

Exigences CCTP

M. V. R. (t/m3)

2.45

Compacité Marshall (CM)

96%

$94\% \leq CM \leq 96\%$

Section: Du PK: 2+200

Au PK : 2+575

BB : 0/14mm

Carotte n°	1	2	3	4	5	6	7	8	Moy.		
Emplacement	PK	2+225	2+275	2+325	2+350	2+400	2+450	2+500	2+550		
	Posi.	D	A	G	D	A	D	G	D		
Epaisseur (cm)	5.6	6.7	5.1	5.7	4.5	5.5	4.5	5.6	5.4	<u>Conforme</u>	
Masse de la carotte (g)	959.90	1150.00	857.20	977.60	737.60	941.80	793.40	918.80			
m_1											
Masse de la carotte paraffinée (g)	981.70	1169.70	872.90	992.70	750.50	956.50	806.20	936.30			
m_2											
Masse de la carotte paraffinée immergée dans l'eau (g)	547.8	651.6	484.10	562.3	422.9	537.40	451.50	516.10			
m_3											
Densité Marshall dM	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36			
Densité in-situ ds											
$\frac{m_1}{m_2 - m_3 - (\frac{m_2 - m_1}{0.9})}$	2.34	2.32	2.31	2.36	2.35	2.34	2.33	2.29	2.33	<u>Conforme</u>	
Indice de compactage											
$I_c (\%) = ds/dM$	99	98	98	100	100	99	99	97	99	<u>Conforme</u>	
Compacité (%)											
$\frac{MVA}{MVR} \times 100$	96	95	94	96	96	95	95	94	95	<u>Conforme</u>	
% des vides	4.4	5.4	5.8	3.5	3.9	4.6	4.9	6.4	4.9	<u>Conforme</u>	

P/ Entreprise

P/ Contrôle Qualité

P/ Mission de Contrôle

Travaux d'aménagement et de bitumage de la route Boundiali - Odiénné
Section 1 : Boundiali - Madinani (58 km)

Mesure de la capacité IN-SITU de la couche de roulement en béton bitumineux
Essai sur carottes

Date d'application : 6/7/2018

Date des essais : 6/16/2018

Résultats essai Marshall		Exigences CCTP
M. V. R. (t/m3)	2.45	
Compacité Marshall (CM)	96%	94% ≤ CM ≤ 96%

Section: Du PK: 2+750

Au PK : 3+150

BB : 0/14mm

Carotte n°	1	2	3	4	5	6	7	8	Moy.	
Emplacement	PK	2+750	2+800	2+850	2+900	2+950	3+000	3+100	3+150	
	Posi.	A	D	G	D	A	G	D	A	
Epaisseur (cm)	6.3	6.0	4.7	5.3	4.9	6.0	5.3	5.2	5.5	Conforme
Masse de la carotte (g)	1066.30	1067.20	854.30	945.60	760.50	1038.80	911.80	885.00		
<i>m1</i>										
Masse de la carotte paraffinée (g)	1072.20	1074.20	860.30	952.70	768.60	1052.10	922.00	899.10		
<i>m2</i>										
Masse de la carotte paraffinée immergée dans l'eau (g)	606.5	619.0	495.50	549.2	435.6	601.50	520.50	497.30		
<i>m3</i>										
Densité Marshall <i>dM</i>	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36		
Densité in-situ <i>ds</i> $\frac{m1}{m2 - m3 - \frac{m2 - m1}{0.9}}$	2.32	2.39	2.39	2.39	2.35	2.38	2.34	2.29	2.36	Conforme
Indice de compactage <i>Ic (%) = ds/dM</i>	98	101	101	101	99	101	99	97	100	Conforme
Compacité (%) $\frac{MVA}{MVR} \times 100$	95	97	97	98	96	97	95	94	96	Conforme
% des vides	5.2	2.6	2.6	2.4	4.2	2.7	4.6	6.5	3.9	Conforme

P/ Entreprise

P/ Contrôle Qualité

P/ Mission de Contrôle

Travaux d'aménagement et de bitumage de la route Boundiali - Odiénné
Section 1 : Boundiali - Madinani (58 km)

Mesure de la compacité IN-SITU de la couche de roulement en béton bitumineux
Essai sur carottes

Date d'application : 6/8/2018

Date des essais : 6/16/2018

Résultats essai Marshall		Exigences CCTP
M. V. R. (t/m3)	2.45	
Compacité Marshall (CM)	97%	94% ≤ CM ≤ 96%

Section: Du PK: 3+200

Au PK : 3+500

BB : 0/14mm

Carotte n°	1	2	3	4	5	6	7	Moy.	
Emplacement	PK	3+200	3+250	3+300	3+350	3+400	3+450	3+500	
	Posi.	G	D	A	G	D	A	G	
Epaisseur (cm)	6.1	5.3	5.5	5.3	5.1	5.8	5.9	5.6	<u>Conforme</u>
Masse de la carotte (g)	1060.00	923.50	960.80	911.00	864.80	1008.50	977.40		
<i>m1</i>									
Masse de la carotte paraffinée (g)	1077.50	945.90	979.00	929.80	880.00	1027.60	991.50		
<i>m2</i>									
Masse de la carotte paraffinée immergée dans l'eau (g)	608.6	524.0	552.60	518.1	493.6	575.50	561.70		
<i>m3</i>									
Densité Marshall <i>dM</i>	2.39	2.39	2.39	2.39	2.39	2.39	2.39		
Densité in-situ <i>ds</i> $\frac{m1}{m2 - m3 - \frac{m2 - m1}{0.9}}$	2.36	2.33	2.37	2.33	2.34	2.34	2.36	2.35	<u>Conforme</u>
Indice de compactage <i>Ic (%) = ds/dM</i>	99	97	99	98	98	98	99	98	<u>Conforme</u>
Compacité (%) $\frac{MVA}{MVR} \times 100$	96	95	97	95	96	96	96	96	<u>Conforme</u>
% des vides	3.7	5.1	3.5	4.9	4.5	4.5	3.7	4.2	<u>Conforme</u>

P/ Entreprise

P/ Contrôle Qualité

P/ Mission de Contrôle

Travaux d'aménagement et de bitumage de la route Boundiali - Odiénné
Section 1 : Boundiali - Madinani (58 km)

Mesure de la capacité IN-SITU de la couche de roulement en béton bitumineux

Essai sur carottes

Date d'application : 6/9/2018

Date des essais : 6/16/2018

Résultats essai Marshall		Exigences CCTP
M. V. R. (t/m3)	2.45	
Compacité Marshall (CM)	97%	94% ≤ CM ≤ 96%

Section: Du PK: 3+700

Au PK : 4+700

BB : 0/14mm

Carotte n°	1	2	3	4	5	6	7	8	Moy.	
Emplacement	PK	3+700	3+800	3+900	4+000	4+100	4+175	4+275	4+350	
	Posi.	D	G	A	D	G	A	D	G	
Epaisseur (cm)	5.0	4.6	4.8	6.4	4.5	4.6	5.4	4.5	5.0	<u>Conforme</u>
Masse de la carotte (g)	871.60	813.70	821.90	1120.00	768.80	801.60	945.30	762.50		
<i>m1</i>										
Masse de la carotte paraffinée (g)	877.80	819.50	834.80	1129.60	780.80	814.60	956.60	781.20		
<i>m2</i>										
Masse de la carotte paraffinée immergée dans l'eau (g)	500.0	468.0	464.80	641.3	439.5	459.70	543.50	430.70		
<i>m3</i>										
Densité Marshall <i>dM</i>	2.39	2.39	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37		
Densité in-situ $ds = \frac{m1}{m2 - m3 - (\frac{m2 - m1}{0.9})}$	2.35	2.36	2.31	2.34	2.34	2.35	2.36	2.31	2.34	<u>Conforme</u>
Indice de compactage $Ic (\%) = ds / dM$	98	99	98	99	99	99	100	98	99	<u>Conforme</u>
Compacité (%) $\frac{MVA}{MVR} \times 100$	96	96	94	96	96	96	96	94	96	<u>Conforme</u>
% des vides	4.1	3.7	5.7	4.3	4.3	3.9	3.7	5.6	4.4	<u>Conforme</u>

P/ Entreprise

P/ Contrôle Qualité

P/ Mission de Contrôle

Annexe V: Procès-verbaux des essais de température

Mission de Contrôle						
ACE/ALPHA-CONSULT						
Projet : AMENAGEMENT DE LA ROUTE BOUNDIALI-ODIENNE						
TABLEAU DE PRISE DE EMPERATURES MOIS DE MAI 2018						Tableau 1
Section 1 : BOUNDIALI-MADINANI						
Du PK2+000 au PK 2+500						
ACCOTEMENTS/VOIE PRINCIPALE						
BB 0/10-BB 0/14 mm						
Date	PK/PK	Linéaire(ml)	N°	N° Camion	T (°C)	Derrière le Finisseur
5/31/2018	2+000-2+500	500	1	20	145	132
			2	26	155	130
			3	31	145	130
			4	20	143	133
			5	31	155	142
			6	26	155	143
			7	18	150	142
			8	30	153	143
			9	31	154	135
			10	26	153	135
			11	27	153	146
			12	18		145
			13	20		140
			14			
			15			
			16			
			17			
			18			
			19			
			20			
			21			
			22			
valeur minimale					143	130
valeur moyenne					151	138
valeur maximale					155	146
Nombre de camions			13			
TONNAGE D'ENROBES						

Mission de Contrôle						
ACE/ALPHA-CONSULT						
Projet : AMENAGEMENT DE LA ROUTE BOUNDIALI-ODIENNE						
TABLEAU DE PRISE DE EMPERATURES MOIS DE MAI 2018						Tableau 1
Section 1 : BOUNDIALI-MADINANI						
Du PK2+200 au PK 2+500						
ACCOTEMENTS/VOIE PRINCIPALE						
BB 0/10-BB 0/14 mm						
Date	PT/PT	Linéaire(ml)	N°	N° Camion	T (°C)	Derrière le Finisseur
6/4/2018	PK2+800/PK2+950		1	31	150	145
			2	20	152	150
			3	26	155	150
			4	31	153	151
			5	20	150	145
			6	26	145	137
			7	19	151	150
			8	31	148	150
			9	20	152	150
			10	26	150	148
			11			
			12			
			13			
			14			
			15			
			16			
			17			
			18			
			19			
			20			
			21			
			22			
valeur minimale					145	137
valeur moyenne					151	148
valeur maximale					155	151
Nombre de camions			7			
TONNAGE D'ENROBES						

Mission de Contrôle						
ACE/ALPHA-CONSULT						
Projet : AMENAGEMENT DE LA ROUTE BOUNDIALI-ODIENNE						
TABLEAU DE PRISE DE EMPERATURES MOIS DE MAI 2018						Tableau 1
Section 1 : BOUNDIALI-MADINANI						
DU PK3+275-PK3+900						
ACCOTEMENTS/VOIE PRINCIPALE						
BB 0/10-BB 0/14 mm						
Date	PT/PT	Linéaire(ml)	N°	N° Camion	T (°C)	Derrière le Finisseur
6/8/2018	PK3+275/PK3+900		1	20	150	152
			2	19	148	148
			3	31	150	151
			4	26	150	151
			5	27	141	144
			6	20	142	144
			7	19	149	151
			8	26	146	145
			9	31	150	152
			10	20	150	154
			11	26	151	153
			12	27	150	150
			13	19	142	149
			14	31	150	152
			15	20	150	150
			16			
			17			
			18			
			19			
			20			
			21			
			22			
valeur minimale					141	144
valeur moyenne					148	150
valeur maximale					151	154
Nombre de camions			7			
TONNAGE D'ENROBES						

Mission de Contrôle						
ACE/ALPHA-CONSULT						
Projet : AMENAGEMENT DE LA ROUTE BOUNDIALI-ODIENNE						
TABLEAU DE PRISE DE EMPERATURES MOIS DE MAI 2018						Tableau 1
Section 1 : BOUNDIALI-MADINANI						
DU PK3+275-PK3+900						
ACCOTEMENTS/VOIE PRINCIPALE						
BB 0/10-BB 0/14 mm						
Date	PT/PT	Linéaire(ml)	N°	N° Camion	T (°C)	Derrière le Finisseur
6/9/2018	P162-P190		1	9	150	
			2	8	152	144
			3	31	139	150
			4	28	150	140
			5	20	143	137
			6	28	138	145
			7	26	143	139
			8	27	145	150
			9	19	142	148
			10	8	138	140
			11	20	145	147
			12	31	135	140
			13	21	132	141
			14	27	135	141
			15			
			16			
			17			
			18			
			19			
			20			
			21			
			22			
valeur minimale					132	137
valeur moyenne					142	144
valeur maximale					152	150
Nombre de camions			7			
TONNAGE D'ENROBES						

Mission de Contrôle						
ACE/ALPHA-CONSULT						
Projet : AMENAGEMENT DE LA ROUTE BOUNDIALI-ODIENNE						
TABLEAU DE PRISE DE EMPERATURES MOIS DE MAI 2018						Tableau 1
Section 1 : BOUNDIALI-MADINANI						
DU PK3+275-PK3+900						
ACCOTEMENTS/VOIE PRINCIPALE						
BB 0/10-BB 0/14 mm						
Date	PT/PT	Linéaire(ml)	N°	N° Camion	T (°C)	Derrière le Finisseur
6/18/2018	p190-p211		1	32	135	142
			2	31	142	148
			3	26	140	145
			4	28	144	146
			5	20	144	148
			6	19	143	147
			7	27	148	151
			8	32	135	150
			9	31	131	153
			10	28	140	137
			11	26	137	140
			12	20	139	143
			13	19	137	140
			14	27		145
			15	32		142
			16			
			17			
			18			
			19			
			20			
			21			
			22			
valeur minimale					131	137
valeur moyenne					140	145
valeur maximale					148	153
Nombre de camions			7			
TONNAGE D'ENROBES						

norme française

NF P 98-251-2

Avril 1992

Essais relatifs aux chaussées

Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés

Partie 2 : Essai Marshall

- E : Tests relating to pavements — Static tests on bituminous mixtures —
Part 2 : Marshall test
D : Straßenbauprüfungen — Prüfung der Festigkeit bei bitumengebundenen
Mischungen — Teil 2 : Marshallprüfung
-

Norme française homologuée par décision du Directeur Général de l'afnor
le 5 mars 1992 pour prendre effet le 5 avril 1992.

correspondance À la date de publication de la présente norme, il n'existe pas de norme ou de
projet de norme européenne ou internationale sur le sujet.

analyse La présente norme spécifie les essais à chargement statique sur mélanges
hydrocarbonés. La partie 2 décrit une méthode d'essai ayant pour but de déter-
miner le pourcentage de vides d'éprouvettes compactées selon un processus
fixé, leur résistance mécanique et leur affaissement au cours d'un essai de
compression diamétrale dans des conditions spécifiques.

descripteurs **Thésaurus International Technique** : route, chaussée, produit hydrocarboné,
produit bitumineux, mélange, essai statique, essai de stabilité, essai de fluage.

modifications

corrections

3 Références normatives

- P 18-101 Granulats — Vocabulaire, définitions et classifications.
- NF P 98-250-1 Essais relatifs aux chaussées — Préparation des mélanges hydrocarbonés — Partie 1 : Fabrication d'un enrobé en laboratoire.
- NF P 98-250-6 Essais relatifs aux chaussées — Préparation des mélanges hydrocarbonés — Partie 6 : Mesure de la masse volumique apparente d'une éprouvette par pesée hydrostatique.

4 Définitions — Abréviations

- MVa est la masse volumique apparente de l'éprouvette par mesures géométriques, en grammes par centimètre cube.
- MVA est la masse volumique apparente de l'éprouvette par pesée hydrostatique, en grammes par centimètre cube.
- pr est la masse volumique réelle des granulats, en grammes par centimètre cube.
- MVR est la masse volumique réelle du mélange hydrocarboné, en grammes par centimètre cube.
- v est le pourcentage des vides.
- t est la température de l'essai, en degrés Celsius.
- m est la masse de l'éprouvette témoin pour une hauteur théorique de 63,5 mm, en grammes.
- mi est la masse d'une éprouvette, en grammes.
- Stabilité Marshall est la charge maximale en décanewtons obtenue par un essai de compression suivant une génératrice d'une éprouvette semi-frettée dans des conditions déterminées.
- Fluage Marshall est la valeur, exprimée en dixièmes de millimètre, de l'affaissement de l'éprouvette au moment de la rupture.

5 Principe de l'essai

L'essai consiste à compacter des éprouvettes par damage selon un processus déterminé, puis à les soumettre à un essai de compression suivant une génératrice dans des conditions définies (figure 1).

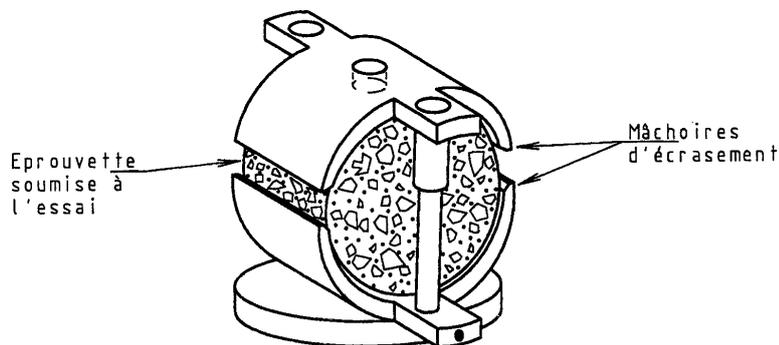


Figure 1 : principe de l'essai de compression

6 Appareillage

6.1 Appareillage spécifique

Au moins trois moules de compactage comportant chacun une base, un corps de moule, une hausse : la base et la hausse s'adaptent aux deux extrémités du corps de moule. Le diamètre intérieur du moule doit être de $101,6 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ (figure 2).

Deux pistons extracteurs de diamètre légèrement inférieur au diamètre intérieur du moule (figure 3).

Dimensions en millimètres

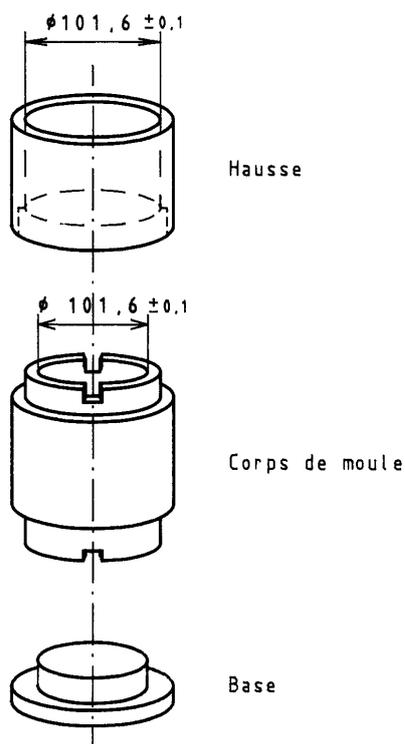


Figure 2 : corps de moule, hausse, base

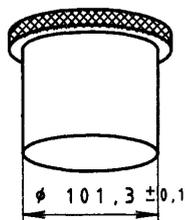


Figure 3 : exemple de piston extracteur

Une dame de compactage comportant un marteau pesant $4\,536\text{ g} \pm 5\text{ g}$. Ce marteau coulisse librement sur une tige de guidage et tombe en chute libre de $457\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$ sur la base de la dame (figure 4).

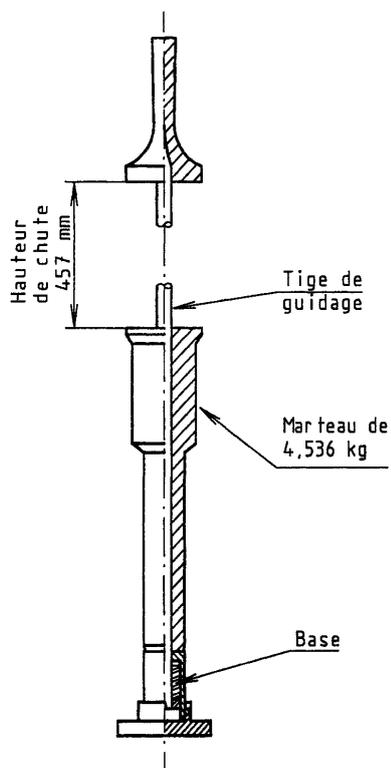


Figure 4 : exemple de dame de compactage

Un bloc support de moule en chêne de dimensions suivantes : largeur 300 mm, longueur 300 mm, hauteur 450 mm. Ce bloc est muni de deux boulons servant pour le calage du moule.

Au moins trois mâchoires d'écrasement, chacune étant composée de deux demi-mâchoires ayant un rayon de courbure intérieur compris entre 50,9 mm et 51 mm (figure 5).

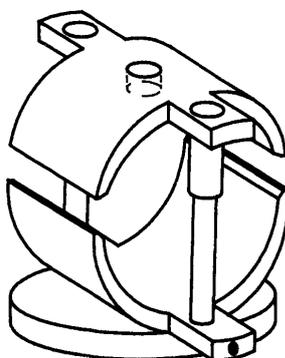


Figure 5 : mâchoires d'écrasement

Un dispositif de mesure du fluage à 0,1 mm près.

6.2 Appareillage non spécifique

Une presse à avancement moyen à vide réglée à la valeur de 0,85 mm/s \pm 0,1 mm/s, équipée d'un dispositif permettant de mesurer l'effort au cours d'essai. L'erreur de justesse de ce dispositif doit être de \pm 1 % de la valeur lue, et la répétabilité de \pm 0,5 % de la valeur lue.

Un bain thermostatique pouvant contenir au moins trois éprouvettes et trois mâchoires d'écrasement.

7 Préparation des éprouvettes

Le mode de préparation du mélange hydrocarboné doit être indiqué sur la feuille d'essai.

Dans le cas d'une préparation en laboratoire le mélange hydrocarboné est fabriqué conformément à la norme NF P 98-250-1.

Les températures de référence de préparation des éprouvettes de mélanges à base de bitume pur sont définies comme suit :

- bitume 80/100 : 140 °C \pm 5 °C
- bitume 60/70 : 150 °C \pm 5 °C
- bitume 40/50 : 160 °C \pm 5 °C
- bitume 20/30 : 180 °C \pm 5 °C

Pour les autres liants hydrocarbonés, les températures de fabrication des mélanges sont celles définies par le fournisseur. Les moules sont portés à la température de référence de préparation des éprouvettes (2 h au minimum).

7.1 Détermination préalable de la masse des éprouvettes

La masse des éprouvettes est déterminée par confection d'une éprouvette témoin, d'une masse indicative de 1 200 g, compactée dans les mêmes conditions que les éprouvettes d'essai (7.2).

À partir de six mesures de la hauteur réparties sur le pourtour de l'éprouvette témoin, la masse m correspondant à une éprouvette de hauteur théorique de 63,5 mm est calculée.

7.2 Remplissage des moules et compactage

Peser la quantité m de mélange hydrocarboné à 0,1 % près en valeur relative. Après avoir placé un disque de papier en fond de moule et mis en place la hausse, introduire le mélange en une seule fois dans le moule légèrement enduit d'oléate de soude glycérolé. Un disque de papier est mis en place à la surface du mélange hydrocarboné.

Les moules sont remplis successivement.

Un des moules contenant le mélange hydrocarboné est fixé sur le socle en bois.

L'éprouvette n° 1 est immédiatement compactée, les autres moules étant placés dans une étuve à la température de référence.

La dame étant maintenue perpendiculairement au moule, le mélange est compacté en appliquant 50 coups de marteau de la dame en 55 s \pm 5 s. Pour des besoins particuliers, on peut appliquer un nombre de coups différent et l'indiquer au procès-verbal.

Le moule est retourné après avoir retiré la hausse afin de présenter la face inférieure de l'éprouvette au compactage.

L'opération précédente est renouvelée.

La durée de compactage ne doit pas excéder 3 min. L'éprouvette n° 2 est compactée 5 min ± 1 min après l'éprouvette n° 1 et ainsi de suite.

Le moule est placé, pendant au moins 15 min, sous un jet circulaire d'eau froide maintenu de telle façon qu'il ne mouille pas l'éprouvette. Le moule est conservé 1 h au moins à température ambiante (15 à 25 °C) avant démoulage. Le démoulage est effectué en faisant passer l'éprouvette du moule dans la hausse à l'aide d'un piston extracteur.

8 Mode opératoire

8.1 Vérification des éprouvettes

Après démoulage, les éprouvettes numérotées sont pesées à 1 g près, soit mi. Les dimensions de l'éprouvette sont mesurées à 0,1 mm près, en six zones différentes pour la hauteur et trois pour le diamètre.

La masse volumique apparente MVA est calculée à partir des mesures géométriques.

Si la MVA d'une éprouvette s'éloigne de la masse volumique apparente moyenne des éprouvettes de ± 2 %, la série est rejetée. Pour chaque éprouvette la moyenne des six mesures de hauteur doit être comprise entre 62,5 et 65 mm, avec une tolérance pour chaque mesure de ± 1,5 mm par rapport à la moyenne, sinon la série est rejetée.

8.2 Mesure de la masse volumique apparente par pesée hydrostatique

La mesure est réalisée suivant la norme NF P 98-250-6 sans paraffinage.

8.3 Conservation des éprouvettes

Les éprouvettes sont conservées 5 h au moins à température ambiante après leur compactage.

8.4 Essai de stabilité et de fluage Marshall

Les éprouvettes et les mâchoires d'écrasement sont immergées dans l'eau à 60 °C ± 1 °C pendant 30 min ± 1 min. Compte tenu de la durée de l'essai il est nécessaire d'échelonner les mises en immersion des éprouvettes, toutes les 5 min.

Les éprouvettes sont placées dans les mâchoires d'écrasement. L'ensemble est porté entre les plateaux de la presse pour être soumis à l'essai de compression. La vitesse du plateau de la presse est réglée à 0,85 mm/s ± 0,1 mm/s. Ces opérations doivent être réalisées en moins d'une minute.

La stabilité Marshall est la valeur de la charge maximale à la rupture de l'éprouvette.

Le fluage Marshall est la valeur de l'affaissement de l'éprouvette, selon son diamètre vertical, au moment de la rupture (ou à l'instant où on atteint le maximum de la charge).

9 Expression des résultats

La stabilité Marshall est exprimée en décanewtons et représente la moyenne des résultats d'au moins trois éprouvettes.

Le fluage Marshall, exprimé en dixièmes de millimètre, représente la moyenne des affaissements d'au moins trois éprouvettes.

Le pourcentage de vides, soit v en pourcentage, est donné par :

$$v \% = 100 \left(1 - \frac{MVA}{MVR} \right)$$

FA174545

ISSN 0335-3931

norme européenne

NF EN 12697-1

Août 2012

norme française

Indice de classement : **P 98-818-1**

ICS : 93.080.20

Mélanges bitumineux

**Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné
à chaud**

Partie 1 : Teneur en liant soluble

E : Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt —
Part 1: Soluble binder content

D : Asphalt — Prüfverfahren für Heiasphalt — Teil 1: Lslicher Bindemittelgehalt

Norme française homologuée

par décision du Directeur Général d'AFNOR le 11 juillet 2012 pour prendre effet le 11 août 2012.

Remplace la norme homologuée NF EN 12697-1, d'avril 2006.

Correspondance

La Norme européenne EN 12697-1:2012 a le statut d'une norme française.

Analyse

Le présent document décrit des méthodes d'essai pour déterminer la teneur en liant soluble d'échantillons de matériaux enrobés.

Les méthodes d'essai décrites sont applicables pour la maîtrise de la qualité de production en usine et pour les vérifications de conformité aux spécifications des produits.

Pour l'analyse des mélanges contenant des liants modifiés, il convient de suivre les lignes directrices données en Annexe D.

Descripteurs

Thésaurus International Technique : produit bitumineux, mélange, route, essai, dosage, bitume, liant, mode opératoire, polymère, extraction.

Modifications

Par rapport au document remplacé, révision de la norme.

Corrections

Éditée et diffusée par l'Association Française de Normalisation (AFNOR) — 11, rue Francis de Pressensé — 93571 La Plaine Saint-Denis Cedex
Tel. : + 33 (0)1 41 62 80 00 — Fax : + 33 (0)1 49 17 90 00 — www.afnor.org

© AFNOR 2012

AFNOR 2012

1^{er} tirage 2012-08-F



EN 12697-1:2012 (F)**3.10****résultat d'essai unique**

valeur obtenue en appliquant totalement la méthode d'essai normalisée, une seule fois, à un échantillon unique

NOTE 1 introductive Le résultat unique d'essai peut être la moyenne de deux observations ou plus ou le résultat d'un calcul à partir d'une série d'observations comme spécifié par la méthode d'essai normalisée

4 Préparation des échantillons de laboratoire de mélanges bitumineux

Préparer des échantillons en laboratoire conformément à l'EN 12697-28 pour obtenir des prises d'essai appropriées.

5 Détermination de la teneur en liant**5.1 Principes généraux de l'essai**

La méthode d'essai pour déterminer la teneur en liant d'une prise d'essai de matériaux enrobés, préparée selon l'Article 4, comprend normalement les opérations de base suivantes :

- a) extraction du liant par dissolution dans un solvant froid ou chaud ;
- b) séparation de la matière minérale et de la solution de liant ;
- c) détermination de la quantité de liant par différence ou par récupération du liant ;
- d) calcul de la teneur en liant soluble.

NOTE 1 La séquence des opérations et le choix des modes opératoires d'essai à suivre sont illustrés à la Figure A.1.

NOTE 2 En cas de présence d'eau dans l'échantillon de laboratoire, il convient soit de sécher l'échantillon à masse constante (voir Article 6), soit de déterminer la teneur en eau par la méthode décrite dans l'EN 12697-14 ou de traiter l'échantillon comme spécifié dans l'EN 12697-28.

NOTE 3 Tous les modes opératoires d'essai et l'équipement associé se rapportant à chaque opération de base décrite à la Figure A.1 sont également acceptables. Il est également possible d'utiliser d'autres équipements et d'autres modes opératoires, y compris des méthodes autres sans extraction. Des données détaillées montrent que la méthode et l'équipement fourniront des résultats d'une exactitude et d'une fidélité pratiquement égales à celles obtenues avec l'un des modes opératoires explicitement décrits à la Figure A.1.

5.2 Extraction du liant**5.2.1 Solvant**

Les essais décrits dans la présente Norme européenne nécessitent l'utilisation de solvants capables de dissoudre du bitume et impliquent dans certains cas de distiller la solution pour récupérer tout ou partie du bitume.

NOTE 1 Tous les solvants hydrocarbonés sont actuellement considérés comme «dangereux» et «hostiles à l'environnement» à des degrés divers.

NOTE 2 En attendant que l'utilisation des solvants hydrocarbonés fasse l'objet d'une politique définie par le CEN, il convient que chaque État membre spécifie le solvant qu'il privilégie en tenant compte du Protocole de Montréal et des avis de ses propres organismes de réglementation (voir également l'«avertissement» de l'avant-propos).

NOTE 3 Il convient d'entreposer le trichloréthylène dans des boîtes ou des bouteilles fermées, protégées des radiations UV.

NOTE 4 Lorsque le trichloréthylène est récupéré après distillation en vue d'un emploi ultérieur, il convient de s'assurer que le solvant reste conforme aux exigences correspondantes. En particulier, de l'acidité peut se développer, une précaution utile consiste à stocker le solvant sur de l'oxyde de calcium dans des récipients de verre coloré ou des récipients métalliques appropriés.

RESUME

Le présent document traite du contrôle qualité du béton bitumineux utilisé dans le cadre des travaux de bitumage de la route Boundiali-Madinani. Pour atteindre la qualité requise, nous avons conduit des essais géotechniques in situ (essai de carottages) et au laboratoire (extraction de liant soluble, essai Marshall et analyse granulométrique) en vue de caractériser les performances mécaniques, puis déterminer la composition physique des enrobés bitumineux produits. Les résultats obtenus montrent que les courbes granulométriques des agrégats des enrobés s'inscrivent dans un fuseau plus étroit pour les éléments grossiers et fins et évasés pour les éléments intermédiaires. Ensuite, l'extraction du bitume et la caractérisation mécanique des enrobés utilisés par la méthode Marshall nous ont permis de découvrir que le pourcentage moyen de bitume est de 6,08% qui donne une stabilité moyenne de 1442 kg et un fluage maximal de 3,80 mm. De plus, les valeurs des épaisseurs de la série de carottes échantillonnées varient dans un intervalle de 4,5 cm à 6,7 cm. Par ailleurs, la teneur en vides des carottes prélevées est comprise entre 2,40 % et 6%. Enfin, la compacité du béton bitumineux mis en œuvre oscille entre 94 % et 98 %. En se référant principalement aux spécifications contenues dans le CCTP, les essais ont montré que le béton bitumineux utilisé répond aux exigences minimales de qualité requises. Les cartes de contrôle utilisées n'ont décelé aucune dérive vis-à-vis des limites de contrôle supérieures et inférieures.

MOTS-CLES : Béton bitumineux, contrôle qualité, conformité, cartes de contrôle, mise en œuvre.

ABSTRACT

The present document aims to review quality control process during the production and the placement of bituminous concrete on the Boundiali-Madinani road. To ensure that geotechnical aspects of asphalt production and placement are adequate by the standards of the project, we have driven some laboratory tests (binder extraction, determination of particle size distribution by sieving method and Marshall tests) in order to investigate some important properties of bituminous mixtures that'll be placed. Further, coring tests were done after the placement of HMA. Results showed that the grain distribution curves fit into a narrower spindle for the coarse and fine aggregates and flared for the intermediate aggregates. Binder extraction and Marshall test have shown that the average percentage of bitumen 6,08% gives an average Marshall stability of 1442 kg and a maximum Marshall flow of 3,80 mm. This study shows that the thickness of the HMA cores sampled are between 4,5 cm and 6,7 cm. In addition, the voids content of the cores sampled is between 2,40% and 6%. Finally, the compaction index of the bituminous concrete placed oscillates between 94% and 98%. The results of the experiments are consistent to the local specifications. The control charts did not detect any drift towards the upper and lower limits of control.

KEYWORDS: Hot mix Asphalt concrete, Quality control, conformity, control charts, placement.