

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Voies et Ouvrages d'Art

Présenté par : DIALLO ADA & TOURE ADIZATOU

**Thème : ADHERENCE DES CHAUSSEES ROUTIERES
DE GUELMA : UTILISATION DU PENDULE S.R.T**

Sous la direction de : Dr. BOUTELDJA FATHE

Juin 2014

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

RESUME

Ce présent travail vise à mieux cerner l'adhérence des revêtements de chaussées routières. Cette adhérence évolue avec le temps en fonction de plusieurs paramètres liés à la fois à la texture du revêtement (microtexture, macrotexture) et au pneumatique. L'objet de ce travail est d'essayer dans un premier temps de faire une synthèse bibliographique sur le phénomène d'adhérence ainsi que ses différentes méthodes de mesure. Ensuite, les résultats de l'étude expérimentale réalisée sur terrain sont présentés. Cette étude porte sur la mesure du coefficient de frottement longitudinal à l'aide du pendule S.R.T (Skid Resistance Tester) sur différents tronçons routiers de la wilaya de Guelma sujets à des accidents. Ces résultats permettront d'analyser l'état d'adhérence des chaussées concernées.

Mots clés : Adhérence, revêtements routiers, pendule S.R.T, accidents.

ABSTRACT

The present work aims to better understand the adhesion of coatings to road pavements. This adherence changes over time depending on several parameters related to both the surface texture (microtexture, macrotexture) and tire. The purpose of this work is to try at first to make a literature review on the adhesion and its different measurement methods phenomenon. Then, the results of the experimental study are shown on ground. This study focuses on the measurement of the longitudinal coefficient of friction using the Skid Resistance Tester on different road sections prone to accidents. These results allow us to analyze the state of pavement skid concerned.

Keywords: Adherence, road surfaces, S.R.T, accidents.

ملخص

يهدف هذا العمل إلى فهم أفضل لخاصية احتكاك إطارات السيارات مع سطح إسفلت الطريق ، هذا الاحتكاك يتغير بمرور الزمن و هذا راجع لعدة عوامل خصوصا المتعلقة بخصونة و ملوسة النسيج السطحي للإسفلت.

إن الغرض من هذا العمل هو أ ولا القيام بدراسة ببيوغرافية تتمحور حول هذه الخاصية و أساليب القياس الخاصة بها، ثم عرض نتائج الدراسة التجريبية الميدانية التي قمنا بها على مختلف طرق و لاية قامة .
و تركزت هذه التجارب على قياس معامل الاحتكاك الطولي لسطح الطريق باستخدام الجهاز الخاص بذلك (S.R.T) و هذا على عدة مقاطع من الطريق التي تشهد ارتفاعا في حوادث المرور .النتائج المتحصل عليها مكنتنا من معرفة حالة سطح الإسفلت بهذه الطرق

الكلمات الرئيسية:معامل الاحتكاك، سطح الطريق، جهاز S.R.T ، حوادث المرور.

SOMMAIRE

RESUME	I
ABSTRACT	I
ملخص	II
SOMMAIRE	III
ACRONYMES ET NOTATIONS	V
LISTES DES FIGURES	VIII
LISTES DES TABLEAUX	X
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : DIFFERENTS TYPES DE REVETEMENT DE CHAUSSEES	3
1. INTRODUCTION	3
2. CONSTITUANTS D'UNE CHAUSSEE ROUTIERE	3
3. REVETEMENTS DE NOUVELLE GENERATION	4
3.1. CHAUSSEES A LONGUE DUREE DE VIE	4
3.2. REVETEMENT MODULAIRE	7
4. ENDUITS SUPERFICIELS	10
5. ENROBES COULES A CHAUD	11
5.1. ENROBES EPAIS	12
5.2. ENROBES MINCES	13
5.3. ENROBES DRAINANTS	16
6. ENROBES COULES A FROID	17
6.1. BETONS BITUMINEUX A FROID.....	17
6.2. ENROBES A FROID STOCKABLES	18
Chapitre II : ADHERENCE DES REVETEMENTS DE CHAUSSEES	19
1. INTRODUCTION	19
2. DEFINITION	19
2.1. ADHERENCE LONGITUDINALE	19
2.2. ADHERENCE TRANSVERSALE.....	20
3. MECANISME A L'ORIGINE DE L'ADHERENCE	21
3.1. SUR SOL SEC	21
3.2. SUR SOL MOUILLE	23
4. FACTEURS INFLUENÇANT L'ADHERENCE	26
4.1. TEXTURE DES REVETEMENTS DE CHAUSSEES.....	26
4.2. CARACTERISTIQUES DE LA COUCHE DE ROULEMENT	28
4.3. INFLUENCE DU PNEUMATIQUE.....	28
4.4. PRESENCE DE POLLUANTS SUR LA CHAUSSEE	29
4.5. CONDITIONS CLIMATIQUES	30
5. MESURE DE L'ADHERENCE DES CHAUSSEES	31
5.1. MESURES DIRECTES DE LA MACROTEXTURE	31

5.2. MESURES INDIRECTES DE LA MACROTEXTURE ET DE LA MICROTEXTURE	34
6. EVOLUTION DE L'ADHERENCE AU COURS DU TEMPS.....	40
6.1. DECAPAGE DU LIANT.....	41
6.2. POLISSAGE PAR LE TRAFIC.....	41
6.3. EFFETS DES VARIATIONS SAISONNIERES	43
6.4. EFFETS DU VIEILLISSEMENT	44
Chapitre III : AUTRES CARACTERISTIQUES DES REVETEMENTS DE CHAUSSEES ...	46
1. INTRODUCTION	46
2. ACOUSTIQUE DES REVETEMENTS ROUTIERS	46
2.1. SOURCES DU BRUIT ROUTIER	46
2.2. FACTEURS INFLUANT SUR LE BRUIT DU TRAFIC ROUTIER.....	48
2.3. MECANISME A L'ORIGINE DU BRUIT.....	48
2.4. LES METHODES DE MESURE DU NIVEAU DE BRUIT	51
2.5. LES CARACTERISTIQUES D'UN REVETEMENT ROUTIER SILENCIEUX	53
3. PHOTOMETRIE DES REVETEMENTS ROUTIERS	55
3.1. CARACTERISATION PHOTOMETRIQUE DES REVETEMENTS.....	56
3.2. CLASSEMENT PHOTOMETRIQUE DES REVETEMENTS.....	56
3.3. CARACTERISATION DE LA CLARTE D'UNE CHAUSSEE	57
3.4. MESURE PHOTOMETRIQUE POUR REVETEMENTS ROUTIERS.....	58
SYNTHESE DE LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE	60
Chapitre IV : TRAVAIL EXPERIMENTAL REALISÉ SUR TERRAIN.....	61
1. INTRODUCTION	61
2. RESEAU ROUTIER	61
2.1. HIERARCHISATION DU RESEAU ROUTIER NATIONAL	61
2.2. CHOIX DE LA COUCHE DE ROULEMENT	62
2.3. CONSISTANCE DU PATRIMOINE ROUTIER	62
2.4. RESEAU ROUTIER DE LA WILAYA DE GUELMA.....	63
3. DEMARCHE DE TRAVAIL ET ESSAIS EFFECTUES	65
3.1. STATISTIQUES DES ACCIDENTS.....	65
3.2. MATERIELS DE MESURES (PENDULE S.R.T)	66
3.3. CAMPAGNES DE MESURES	68
4. RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	71
4.1. CAMPAGNE D'ESSAI N°1	71
4.2. CAMPAGNE D'ESSAI N°2	74
4.3. CAMPAGNE D'ESSAI N°3	76
4.4. CAMPAGNE D'ESSAI N°4	78
4.5. CAMPAGNE D'ESSAI N°5	80
CONCLUSION GENERALE.....	82
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	84
ANNEXES : POINTS NOIRS SUR LE RESEAU ROUTIER DE LA WILAYA DE GUELMA	87

ACRONYMES ET NOTATIONS

Acronymes

CETU	Centre d'Etudes des Tunnels
CFTR	Comité Français pour les Techniques Routières
CIE	Commission internationale de l'éclairage
DLC	Direction du Laboratoire des chaussées du Québec
ISO	International Standardization Organization
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France
LRPC	Laboratoire Régional des Pontes et Chaussées, France
MICHELIN	Société française de pneumatique, France
SETRA	Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, France
STBA	Service Technique des Basses Aériennes, France
TRL	Transportation Road Laboratory, Grande Bretagne

Abréviations

BBDr	Béton Bitumineux Drainant
BBM	Bétons Bitumineux Mince
BBME	Bétons Bitumineux à Module Elevé
BBS	Bétons Bitumineux Souples
BBSG	Béton Bitumineux Semi-Grenu
BBTM	Bétons Bitumineux Très Mince
BBUM	Bétons bitumineux ultra-minces
BIC	Bicouche
CFL	Coefficient de Frottement Longitudinal
CFT	Coefficient de Frottement Transversal
CPA	Coefficient de Polissage Accéléré
CTMeter	Circular Texture Meter

ECF	Enrobés Coulés à Froid
EHFG	Enduit Hydraulique Fibré Gravillonné
EVA	Ethylène Vinyle Acétate
GB	Grave Bitme
GL	Grave Laitier
GMP	Groupe Moto-Propulseur
GN	Grip Number
GNT	Grave Non Traité
HSc	Hauteur au Sable calculée
HSv	Hauteurs au Sable vraie
HSTM	High-Speed Texture Meter
MDG	Monocouche Double Gravillonnage
MPG	Monocouche Prégravillonnée
MSG	Monocouche Simple Gravillonnage
MTM	Mini Texture Meter
NF	Norme Française
P/C	Pneumatique-Chaussée
PMP	Profondeur Moyenne de Profil
PMT	Profondeur Moyenne de Texture
PSV	Polishing Stone Value
SBS	Styrène Butadiène Styrene
SMTD	Sensor Measured Texture Depth
SRT	Skid Resistance Tester

Symboles

D	Calibre c'est à dire diamètre maximal des grains, en mm
F	Force d'adhérence longitudinale, en daN
F _h	Force horizontale, en daN
F _v	Force verticale, en daN

G	Taux de glissement
M	Masse du véhicule
N	Réaction transversale, <i>i.e.</i> la force de frottement transversal, en daN
Q_0	Coefficient de luminance moyenne
R	Rayon de roulement
R	Réaction verticale
r	Rayon de roulement des roues, en cm
Ra	Moyenne arithmétique des aspérités, en mm
Ri	Revêtement standard
Rq	Moyenne quadratique des aspérités, en mm
S	Surface moyenne de la tâche, en mm ²
S1	Coefficient de spécularité
V	Vitesse du véhicule, en Km/h
V	Volume de billes verre (ou sable), en mm ³
θ	Angle de pincement, ou dérive, ou envirage
δ	Dérive
ω	Vitesse angulaire des roues, en degrés/seconde

LISTES DES FIGURES

FIGURE 1 : STRUCTURE DES DIFFERENTES COUCHES QUI CONSTITUENT UNE CHAUSSEE.....	3
FIGURE 2 : EPANDAGE DE LA RESINE EPOXY.....	6
FIGURE 3 : PRINCIPE DE LA SOLUTION DE L'EHFG [1].....	6
FIGURE 4 : DALLES HEXAGONALES CONNECTEES PAR "CLES" BETON, CHANTIER EXPERIMENTAL NANTES.....	7
FIGURE 5 : COUPE DE LA CHAUSSEE DALLES BETON + ENROBE BITUMINEUX DRAINANTS	8
FIGURE 6 : MAQUETTE DE L'INSTALLATION D'UNE ROUTE ENROULABLE	9
FIGURE 7 : MAQUETTE DE L'INSTALLATION D'UNE ROUTE ADHESIVE	9
FIGURE 8 : COUPE D'UN ELEMENT DE CHAUSSEE SILENCIEUX.....	10
FIGURE 9 : PHOTO D'UN ENDUIT SUPERFICIEL.....	10
FIGURE 10 : REVETEMENT EN BBSG	12
FIGURE 11 : REVETEMENT EN BBME.....	13
FIGURE 12 : PHOTO D'UN BBTM.....	14
FIGURE 13 : REVETEMENT EN BBUM.....	16
FIGURE 14 : PHOTO D'UN BBDR.....	17
FIGURE 15 : MISE EN ŒUVRE D'UNE COUCHE D'ENROBE A FROID	17
FIGURE 16 : ILLUSTRATION DE LA FORCE CENTRIFETE.....	20
FIGURE 17 : MISE EN DERIVE D'UNE ROUE	21
FIGURE 18 : PHENOMENE D'INDENTATION.....	22
FIGURE 19 : MECANISMES D'INDENTATION ET D'ADHESION	23
FIGURE 20 : PHENOMENE D'ADHESION EN FONCTION DE DIFFERENTS TYPES DE REVETEMENTS.....	23
FIGURE 21 : DESCRIPTION DE L'AIRE DE CONTACT PNEUMATIQUE/ CHAUSSEE	24
FIGURE 22 : EFFETS DE LA MICRORUGOSITE ET DE LA MACRORUGOSITE SUR REVETEMENT MOUILLE	25
FIGURE 23 : EVACUATION DE L'EAU PAR LES LAMELLES EN ZONE DE VISCOPLANAGE	25
FIGURE 24 : LE BOURRELET D'EAU A L'ORIGINE DE L'HYDROPLANAGE	26
FIGURE 25 : MICROTEXTURE ET MACROTEXTURE DES REVETEMENTS DE CHAUSSEE, TAILLES CARACTERISTIQUES.....	27
FIGURE 26 : INFLUENCE DE LA LARGEUR DE L'AIRE DE CONTACT SUR LE DEBIT D'EAU A EVACUER.....	29
FIGURE 27 : SCULPTURES ORIENTEES POUR DRAINER L'EAU VERS LES COTES.....	29
FIGURE 28 : MESURE DE LA MACROTEXTURE PMT	32
FIGURE 29 : PRINCIPE DU RUGOLASER	32
FIGURE 30 : METHODE PROFILOMETRIQUE (RUGOLASER)	33
FIGURE 31 : PLAGES DE TEXTURE DES DIFFERENTS APPAREILS DE MESURE.....	35
FIGURE 32 : PRINCIPE DE CALCUL DU COEFFICIENT DE FROTTEMENT LONGITUDINAL.....	35
FIGURE 33 : L'APPAREIL ADHERA	36
FIGURE 34 : LE PENDULE S.R.T	37
FIGURE 35 : LE GRIPTESTER.....	37

FIGURE 36 : IMAG DU STBA.....	38
FIGURE 37 : PRINCIPE DE CALCUL DU COEFFICIENT DE FROTTEMENT TRANSVERSAL.....	39
FIGURE 38 : L'APPAREIL SCRIM	39
FIGURE 39 : EVOLUTION DE L'ETAT DE SURFACE D'UN REVETEMENT DE CHAUSSEE SOUS L'EFFET DU TRAFIC	41
FIGURE 40 : SIMULATION DE L'EVOLUTION DE L'ADHERENCE AVEC LA MACHINE DE WEHNER ET SCHULZE [24]	42
FIGURE 41 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES VARIATIONS DE LA MACROTEXTURE SOUS L'EFFET DE LA TEMPERATURE D'UNE CHAUSSEE NEUVE.....	43
FIGURE 42 : SCHEMA DE L'EVOLUTION DE L'ADHERENCE POUR UN ENROBE NEUF [11].....	45
FIGURE 43 : REPARTITION DU BRUIT ROUTIER SELON LE TYPE DE BRUIT ET LA VITESSE PRATIQUEE	47
FIGURE 44 : CONTRIBUTION DU BRUIT DU MOTEUR ET DU BRUIT DE ROULEMENT (VL ET PL) [26]	47
FIGURE 45 : BRUIT DU AUX VIBRATIONS DU PNEUMATIQUE.....	49
FIGURE 46 : RAYONNEMENT SONORE PAR EFFET DIEDRE	49
FIGURE 47 : SPECTRE DU BRUIT DE ROULEMENT SUR BBDR BICOUCHE [27].....	50
FIGURE 48 : COURBE DU COEFFICIENT D'ABSORPTION D'UN REVETEMENT BBDR [27].....	50
FIGURE 49 : BRUIT DU AU PHENOMENE D'AIR PUMPING	51
FIGURE 50 : PRINCIPE DE METHODE AU PASSAGE.....	51
FIGURE 51 : NIVEAU DE BRUIT EN FONCTION DU TEMPS	52
FIGURE 52 : NIVEAUX SONORES A 90 KM/H POUR DIFFERENTS TYPES DE REVETEMENTS ROUTIERS	52
FIGURE 53 : DISPOSITIF DE MESURE EN CONTINU.....	53
FIGURE 54 : NIVEAU SONORE SELON LA PROCEDURE LCPC ET COEFFICIENT DE FROTTEMENT LONGITUDINAL A 80KM/H POUR DIFFERENTS REVETEMENTS DE CHAUSSEES [5].....	55
FIGURE 55 : LES TROIS MODELES DE REFLEXION DE LA LUMIERE	55
FIGURE 56 : LE GONIOPHOTOMETRE ET SON PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.....	58
FIGURE 57 : RESEAU ROUTIER DE LA WILAYA DE GUELMA.....	64
FIGURE 58 : VISUALISATION DU CONTACT ENTRE UN PATIN DE GOMME ET UNE SURFACE DE CHAUSSEE	67
FIGURE 59 : ELEMENTS CONSTITUANTS LE PENDULE S.R.T.....	67
FIGURE 60 : PHOTO PRISE AU COURS D'UNE MESURE DU CFL SUR LA RN20	69
FIGURE 61 : POSITIONS DES MESURES EFFECTUEES DURANT LES 5 CAMPAGNES D'ESSAIS	70
FIGURE 62 : POSITIONS DES ESSAIS SUR LA RN20 (1 ^{ERE} CAMPAGNE D'ESSAI).....	73
FIGURE 63 : POSITIONS DES ESSAIS SUR LA RN20 (2 ^{EME} CAMPAGNE D'ESSAI).....	75
FIGURE 64 : POSITIONS DES ESSAIS SUR LA RN 20 (3 ^{EME} CAMPAGNE D'ESSAI).....	77
FIGURE 65 : POSITIONS DES ESSAIS SUR LA RN 21 (4 ^{EME} CAMPAGNE D'ESSAI).....	79
FIGURE 66 : POSITIONS DES ESSAIS SUR LA RN 80 (5 ^{EME} CAMPAGNE D'ESSAI).....	81

LISTES DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : SYNTHÈSE DES MÉTHODES DE MESURE INDIRECTES [11].....	40
TABLEAU 2 : MÉTHODES DE PRÉDICTIONS DES VARIATIONS SAISONNIÈRES [11].....	44
TABLEAU 3 : INFLUENCE DE L'EAU SUR L'ACOUSTIQUE DU REVÈTEMENT ROUTIER	48
TABLEAU 4 : MOYENS DE RÉDUCTION DU BRUIT D'UN VÉHICULE MOTORISÉ.....	54
TABLEAU 5 : LES 4 CLASSES DE REVÈTEMENTS DÉFINIES PAR LA C.I.E EN FONCTION DE S ₁	56
TABLEAU 6 : VALEURS DE Q ₀ ET S ₁ POUR LES 4 REVÈTEMENTS STANDARD	57
TABLEAU 7 : QUELQUES RÉSULTATS DES COEFFICIENTS Q ₀ ET S ₁ [25]	59
TABLEAU 8 : ÉLÉMENTS INDICATIFS POUR LE CHOIX DU REVÈTEMENT ROUTIER [29].....	60
TABLEAU 9 : STATISTIQUES DES ACCIDENTS DE LA ROUTE DURANT LES 3 ANNÉES 2011, 2012 ET 2013	65
TABLEAU 10 : RECENSEMENT DES ACCIDENTS SUIVANT LES CAUSES GÉNÉRALES DE LA ZONE	66
TABLEAU 11 : CORRECTION DE LA TEMPÉRATURE	68
TABLEAU 12 : VALEURS DES COEFFICIENTS CFL SELON LA NORME B40.....	68
TABLEAU 13 : TMJA DES DIFFÉRENTES ROUTES CONCERNÉES PAR LES CAMPAGNES D'ESSAI	69
TABLEAU 14 : RÉSULTATS DE LA 1 ^{ÈRE} CAMPAGNE D'ESSAI	71
TABLEAU 15 : RÉSULTATS DE LA 2 ^{ÈME} CAMPAGNE D'ESSAI.....	74
TABLEAU 16 : RÉSULTATS DE LA 3 ^{ÈME} CAMPAGNE D'ESSAI.....	76
TABLEAU 17 : RÉSULTATS DE LA 4 ^{ÈME} CAMPAGNE D'ESSAI.....	78
TABLEAU 18 : RÉSULTATS DE LA 5 ^{ÈME} CAMPAGNE D'ESSAI.....	80
TABLEAU 19 : POINTS NOIRS SUR LE RÉSEAU ROUTIER DE GUELMA	87



INTRODUCTION GENERALE



INTRODUCTION GENERALE

Dans la plupart des pays, le réseau routier constitue l'un des patrimoines communs les plus importants. Cependant, il nécessite une attention particulière pour sa mise en œuvre, son exploitation, son entretien et sa réhabilitation afin de le préserver.

L'une des préoccupations majeures des ingénieurs routiers réside dans la diminution des risques d'accidents et l'amélioration du niveau de confort des usagers de la route. En effet, ceux-ci demeurent un défi perpétuel compte tenu de l'évolution permanente des propriétés du revêtement et du pneumatique des véhicules. Pour satisfaire ces exigences les revêtements de chaussées doivent présenter des caractéristiques bien particulières portant sur de nombreux paramètres tout aussi importants les uns par rapport aux autres tels que : l'adhérence, la photométrie, le bruit, le confort par temps de pluie, l'obtention d'un uni en adéquation avec le niveau de service de la route.

L'adhérence est nécessaire au maintien d'un véhicule sur sa trajectoire, même lorsqu'elle est rectiligne et que la vitesse est stable. Il faut en effet résister aux forces naturelles qui tendent en permanence à faire dévier ou à ralentir le véhicule : le vent, le dévers de la route, la pente, les irrégularités du sol, la résistance au roulement etc. L'adhérence offerte par la couche de roulement dépend, en partie, de sa texture de surface. On distingue généralement deux échelles de textures en fonction de leur mode de contribution à l'adhérence en présence d'eau : la macrotecture et la microtexture.

La macrotecture, conditionnée par la formulation de l'enrobé, permet l'évacuation de la lame d'eau présente sur la surface du revêtement routier tandis que la microtexture, conditionnée par la structure même des granulats permet de rétablir le contact avec le pneumatique en perçant le film d'eau et contribue ainsi au frottement par hystérésis. C'est donc la microtexture qui est en contact direct avec le pneumatique, elle est de ce fait, la principale échelle concernée par l'adhérence. La dégradation de l'adhérence, en présence d'eau, est liée partiellement à la destruction de la microtexture par polissage sous trafic augmentant ainsi le risque d'accidents.

Pour pallier à ce problème des mesures tout au long de la durée de vie du revêtement sont nécessaires pour évaluer son niveau d'adhérence. C'est dans ce contexte que ce travail s'inscrit, il a pour objectif le suivi de l'adhérence des chaussées routières de la Wilaya de Guelma.

La première partie de ce travail est consacrée à une revue bibliographique résumant les généralités sur les revêtements, quelques avancées dans le domaine de l'adhérence des revêtements de chaussée et rappelant quelques notions physiques liées à cette dernière. Nous développerons les notions de mécanisme de contact pneumatique/chaussées tout en énonçant les frottements longitudinal et transversal.

Les différents mécanismes seront présentés sous différentes conditions. Puis, nous préciserons les facteurs influençant l'adhérence ainsi que son évolution au cours du temps. Ensuite, nous nous orienterons vers les différentes techniques de mesure de l'adhérence et de la texture des chaussées. Enfin, nous exposerons deux notions essentielles : l'acoustique et la photométrie. Ces notions viendront compléter l'adhérence compte tenu de leur concours à la sécurité et au confort des usagers.

Dans la seconde partie, nous exposerons notre travail expérimental réalisé sur terrain sur la mesure de l'adhérence sur différents tronçons du réseau routier de Guelma, via l'utilisation de l'appareil de mesure du coefficient de frottement longitudinal (pendule S.R.T ou Skid Resistance Tester). Cet appareil est utilisé pour la première fois à Guelma pour ce type d'application.

Les résultats des différentes campagnes d'essai nous permettront d'évaluer l'adhérence des différents points accidentogènes répertoriés par les services de sécurité routière et les gestionnaires du réseau routier. De plus, nous tenterons de voir l'influence d'un certain nombre de paramètres tels que le type de revêtement, la répartition du trafic sur le potentiel d'adhérence des chaussées



CHAPITRE I

DIFFERENTS TYPES DE REVETEMENT DE CHAUSSEES



CHAPITRE I : DIFFERENTS TYPES DE REVETEMENT DE CHAUSSEES

1. Introduction

L'adhérence de la surface des chaussées est une qualité indispensable pour assurer aux véhicules des possibilités de freinage convenables et une bonne stabilité transversale, raison pour laquelle ce premier chapitre présente dans un premier temps les nouvelles générations de chaussées, puis un aperçu général sur les différents types de revêtements de chaussées existants.

2. Constituants d'une chaussée routière

La chaussée est l'ensemble des couches de matériaux disposées pour supporter la circulation des véhicules dans de bonnes conditions de confort et de sécurité. Sur une coupe de chaussée, on distingue généralement les couches suivantes : la couche de forme, les couches d'assise, et la couche de surface.

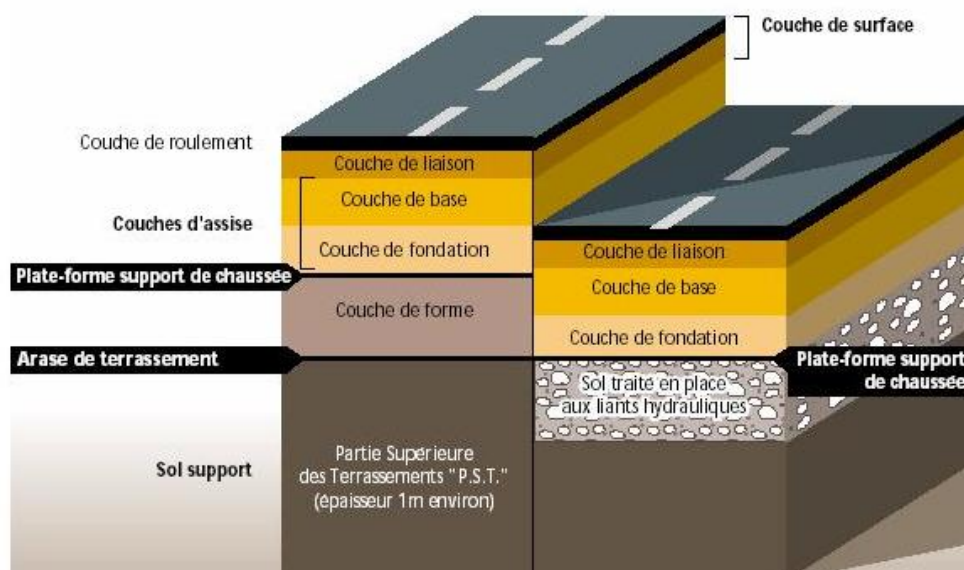


Figure 1 : Structure des différentes couches qui constituent une chaussée

La couche de roulement représente le but ultime de la technique routière, les autres couches assurent une fonction principalement mécanique permettant de supporter dans le temps le trafic, de transmettre et distribuer les charges sur le sol support et assurer ainsi pour la couche de roulement un support stable et sûr.

Une couche de roulement est conçue avec un enrobé bitumineux. Ce matériau est un mélange hydrocarboné constitué de granulats et de liant dont les proportions sont déterminées de manière à satisfaire certains critères de mise en œuvre : bonne maniabilité, aptitude au compactage ainsi que des critères de durabilité et d'usage en particulier la résistance aux déformations permanentes.

La couche de roulement est la partie de la chaussée en contact direct avec les véhicules, de ce fait elle doit posséder de bonnes propriétés d'adhérence et une limitation des nuisances sonores surtout en zone urbaine. La surface de la couche doit présenter une bonne résistance à l'usure. Lors de fortes pluies le revêtement doit avoir une bonne drainabilité.

Il existe divers types de revêtements de chaussées, chacune d'elle a ses points forts et ses points faibles et le choix est guidé par les propriétés recherchées.

3. Revêtements de nouvelle génération

Les infrastructures routières sont confrontées à d'immenses défis : une augmentation des besoins d'entretien, une hausse rapide du trafic notamment de marchandises et l'exigence de réduire les émissions polluantes causées par ce trafic. En outre elles doivent faire face à des événements climatiques plus nombreux et à une raréfaction prochaine des matériaux de construction peu coûteux d'origine fossile.

Des outils économiques modernes peuvent aider à planifier, construire, exploiter et entretenir les routes du futur :

- une utilisation croissante de matériaux de construction alternatifs et de procédés de recyclage plus efficaces, peuvent réduire la dépendance vis à vis du pétrole et des ressources naturelles.
- l'usage des véhicules électriques et/ou hybrides est l'un des facteurs déterminants pour réduire l'impact environnemental de la circulation routière.
- la mise au point de systèmes de recharge rapides, efficaces et simples pour l'utilisateur est de fait considéré comme un facteur de succès du véhicule électrique.
- l'auto-diagnostic et la détection du gel en formation à la surface du revêtement et grâce à un système de stockage d'énergie, de diffuser cette dernière afin d'empêcher le gel de se former.

Toutes ces nouvelles perspectives du point de vue énergétique donnent lieu à des revêtements de plus en plus perfectionnés tels que les chaussées à longue durée de vie et les revêtements modulaires.

3.1. Chaussées à longue durée de vie

Les couches de surface supportent difficilement l'augmentation des charges et de la densité de trafic. Dans ces circonstances, les chaussées à longue durée de vie, revêtues de matériaux avancés, ont beaucoup à offrir, notamment si elles peuvent offrir des performances optimales sans exiger de réparations majeures pendant plus de 30 ans. Sur les routes à forte circulation, les recherches ont montré que, dans ce contexte, les avantages apportés par l'absence de réparations et de remises en état importantes peuvent être suffisamment grands pour justifier les coûts initiaux élevés de ces revêtements de chaussées avancés.

Il a été identifié deux types de matériaux candidats susceptibles de pouvoir répondre aux exigences économiques et techniques des couches de roulement à longue durée de vie :

- le bitume époxy,
- l'enduit hydraulique fibré gravillonné.

3.1.1. Le bitume époxy

L'emploi du bitume époxy pour les chaussées n'est pas nouveau. Ce matériau possède à son actif de nombreux exemples de développement et d'utilisation pour le revêtement d'importants ponts routiers depuis de nombreuses années.

La première application a été réalisée en 1967 sur le pont San Mateo-Hayward à San Francisco, où le bitume-époxy assure un niveau de service satisfaisant depuis plus de 40ans. Le matériau a depuis été utilisé sur d'autres ponts de longue portée, dans de nombreux pays, où ses excellentes propriétés ont été reconnues.

Effectivement au cours de la réaction du bitume-époxy, le liant se réticule, ce qui entraîne une augmentation des propriétés de rigidité, de cohésion et d'adhésivité. Bien que la résistance maximale ne puisse pas être atteinte dès le jeune âge, l'intégrité du matériau devrait être suffisante pour supporter le trafic, à l'instar d'un matériau bitumineux traditionnel qui devient plus résistant en refroidissant.

Le bitume-époxy peut assurer la durabilité et la longévité du revêtement puisque sa résistance pourrait lui permettre de supporter toutes les formes habituelles de dégradation même dans les situations routières les plus denses.

En matière d'adhérence les revêtements en bitume-époxy ne sont pas si différents des revêtements à bitume traditionnel, elle pourrait tout aussi diminuer avec le temps et nécessiter des travaux de rénovation pendant sa durée de vie.

Pour effectuer la comparaison le bitume-époxy remplacerait simplement le bitume dans le matériau de référence ; tous les autres éléments du mélange seraient identiques ainsi les teneurs en liants et en vides resteraient inchangées. Il est donc probable que le bitume-époxy, avec ses propriétés thermodurcissables, offre une bonne résistance aux températures élevées, par rapport aux matériaux bitumineux traditionnels.

Les estimations suggèrent qu'un revêtement avancé pourrait être deux à trois fois plus cher qu'une réfection classique ce qui limitera considérablement l'utilisation du bitume-époxy pour les revêtements de chaussées routières ordinaires.

Cependant, il n'est pas recommandé pour les chaussées autorisées aux véhicules équipés de pneus cloutés. [1]



Figure 2 : épandage de la résine EPOXY

3.1.2. Enduit hydraulique fibré gravillonné

L'enduit hydraulique fibré gravillonné (EHFG) est un produit innovant. Cette chaussée est constituée d'un liant hydraulique, d'une mince couche de mortier fin fibré à ultra haute performance, dans laquelle sont enchâssées des particules dures de granulats, résistant au polissage. Les tailles de granulats varient de 3 à 7mm, une taille de granulats d'environ 6mm semble optimale lorsque l'association d'une adhérence appropriée et d'une émission acoustique limitée est nécessaire. L'ensemble forme une couche composite de 10mm d'épaisseur.

La fonction du liant est d'assurer l'adhésion des gravillons de bauxite calcinée avec la chaussée. La bauxite, de coût unitaire trente à quarante fois plus élevé que celui des granulats ordinaires, entraîne la réalisation d'enduit composé d'une seule couche de particules de granulats. La solution de matériau de surface de granulats en bauxite calcinée à adhérence élevée pourrait servir à construire des couches de roulement aux performances améliorées pour résister aux sollicitations climatiques et aux charges de trafic.

L'épaisseur de cette couche de mortier fibrée doit être minimale, pour des raisons de coût, mais elle doit être suffisante pour éviter que les gravillons n'entrent en contact direct avec la couche de base bitumineuse, afin de permettre une bonne pénétration des gravillons dans le mortier frais. Compte tenu de toutes ces exigences l'épaisseur est fixée à 8mm.

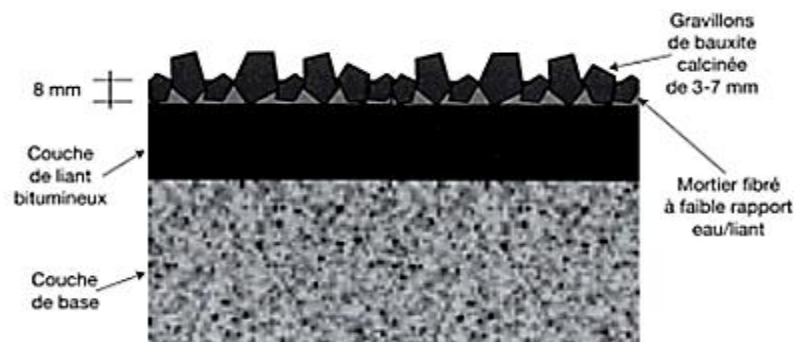


Figure 3 : Principe de la solution de l'EHFG [1]

L'EHFG a montré ses capacités de longévité grâce à des propriétés telles que la liaison avec le support, l'adhésion durable du granulat avec la matrice, la résistance à la fatigue, la durabilité sous l'effet de l'environnement et les caractéristiques de surface, notamment l'adhérence. Ce revêtement devrait être caractérisé par une sécurité, un confort et une durabilité élevée, ainsi qu'un bruit limité. [1]

3.2. Revêtement modulaire

Le revêtement modulaire est un revêtement constitué de plusieurs couches. Chaque couche présente une caractéristique ou une fonction spécifique telle que la résistance à l'usure, l'absorption du bruit ou la perméabilité à l'eau, le stockage d'énergie ou la détection. Du fait que chaque revêtement ne doit pas nécessairement être composé des mêmes couches, le revêtement peut être ainsi adapté à la fonctionnalité souhaitée, et seules les couches nécessaires sont appliquées. Un revêtement modulaire est donc entièrement construit sur mesure et peut être facilement adapté en fonction des circonstances locales et des désirs du maître d'ouvrage.

Une production préfabriquée est mieux adaptée du fait que les exigences liées à un revêtement modulaire sont très élevées, dans ce cas il est possible d'exercer un meilleur contrôle sur la qualité du produit, réduisant ainsi le temps de pose. [2]



Figure 4 : Dalles hexagonales connectées par "clés" béton, Chantier expérimental Nantes

3.2.1. Dalles béton + enrobé bitumineux drainants

Cette technique est constituée de plaques préfabriquées ayant une largeur de 12 mètres correspondant à une largeur de chaussée (2 voies + accotements) pour une longueur de 3.5 mètres. Elles sont mises en place par des moyens de levage traditionnels de type camion-grue. Les dalles sont constituées de haut en bas :

- d'une couche d'enrobé drainant de 15mm d'épaisseur,
- d'une couche d'enrobé drainant de plus forte granulométrie, de 35 ou de 55mm d'épaisseur,
- d'une couche de béton armé contenant un système hydraulique type plancher chauffant.

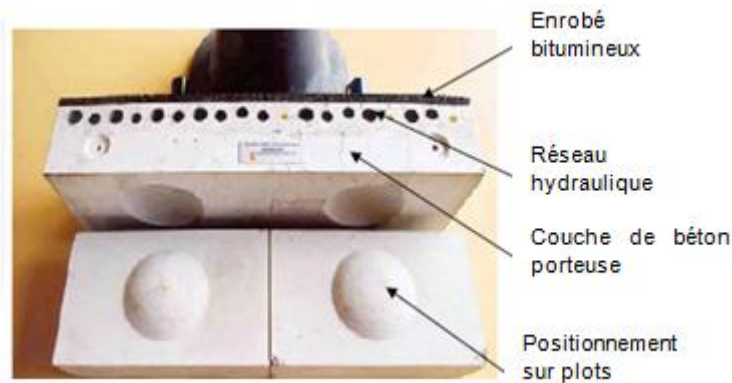


Figure 5 : Coupe de la chaussée dalles béton + enrobé bitumineux drainants

L'épaisseur de la deuxième couche d'enrobé varie en fonction du type de trafic supporté. Une épaisseur de 35mm permet d'obtenir un pic d'absorption du bruit à 1000Hz (voitures particulières) tandis qu'une couche de 55mm donne un pic à 600Hz (poids- lourds).

La couche de béton armé est équipée d'un système de tuyaux relié à des nappes aquifères par l'intermédiaire d'échangeurs thermiques qui permettent de chauffer l'enrobé en hiver pour l'empêcher de geler et de le refroidir en été pour prévenir les risques d'orniérage. L'ensemble de ce système doit être placé sur une plate-forme solide telle qu'une longrine reposant sur des pieux, l'avantage de cette méthode est de fixer les dalles et ainsi éviter les déplacements horizontaux. [2]

3.2.2. La route enroulable

Ce système est particulièrement applicable à l'amélioration des routes existantes. Il comporte trois couches :

- les deux couches supérieures (30 mm au total) sont préfabriquées en un seul élément enroulable sur un support de rayon égal à 1 mètre, la couche supérieure a les mêmes fonctions qu'une couche traditionnelle. Les matériaux utilisés sont des granulats 3/6 ayant des propriétés antidérapantes. Les irrégularités sont évitées et la forte porosité est contrôlée grâce à la préfabrication. La porosité du matériau permet le transport de l'eau à l'extérieur de la route.
- la couche inférieure, ou couche résistante, est constituée de dalle en béton contenant des cavités cylindriques agissant comme des résonateurs de Helmholtz. Ce principe est utilisé dans tous les projets de réduction de bruit.

Les dalles en béton et les couches supérieures sont collées par un film bitumineux. La mise en place peut s'effectuer à partir d'appareils automatisés sur de grandes sections. L'ensemble constitue une route confortable et durable permettant une réduction de bruit de 10 dB(A) environ, par rapport à une chaussée traditionnelle. [2]



Figure 6 : Maquette de l'installation d'une route enroulable

3.2.3. La route adhésive

Ce type de revêtement rejoint la route enroulable ; Il s'agit d'un tapis d'enrobé bitumineux préfabriqué qui peut être mis en place et retiré grâce à un système enrouleur. La particularité est le maintien en position de ce tapis. Les dimensions sont modifiables mais la taille standard est de 30 mm d'épaisseur, 50 m de longueur et 3,6 m de largeur. La préfabrication garantit un produit de bonne qualité. Les formes géométriques les plus variées peuvent être réalisées. Un additif est ajouté au bitume pour permettre un bon enroulement. En utilisant des matériels spécifiques, le tapis est mis en place sur la couche de fondation et la liaison est assurée par ramollissement du matériau, sous l'effet de micro-ondes émises par la machine de pose. Il est ensuite compacté par des appareils traditionnels. En utilisant le même équipement que précédemment, la liaison peut être inversée et permet le démontage puis le recyclage du tapis.

Ce concept a été développé initialement pour une utilisation sur autoroute, mais il peut également être employé pour des zones urbaines, des ponts ou des parkings. Ce type de revêtement pourrait constituer une solution intéressante pour des chaussées urbaines démontables dans lesquelles on souhaiterait éviter la présence de joints visibles entre dalles. [2]



Figure 7 : Maquette de l'installation d'une route adhésive

3.2.4. Eléments de chaussées silencieux

Ce système permet de combiner plusieurs fonctions de la chaussée sur des éléments séparés. Cette spécificité garantit le remplacement rapide et sélectif de ces éléments. Des plaques de forme allongée sont disposées transversalement à la route. Ces panneaux peuvent être en béton, mais un matériau composite à base de carbone est actuellement développé. Les différentes couches de béton et de bitume sont placées séparément, en quinconce, et peuvent être facilement démontées pour être remplacées. La surface de roulement est constituée d'une faible épaisseur d'enrobé bitumineux drainant. Ce matériau a de très bonnes propriétés de résistance et de réduction du bruit. Associé à des résonateurs de type Helmholtz, des expériences et des simulations ont montré que des réductions de 13 ± 4 dB(A), par rapport à une chaussée traditionnelle, étaient réalisables.

Des systèmes de contrôle du trafic ou de l'état des éléments de la route peuvent être intégrés à ce type de chaussée. [2]

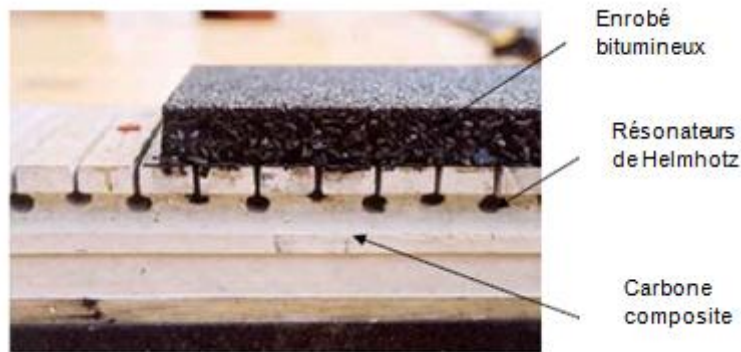


Figure 8 : Coupe d'un élément de chaussée silencieux

4. Enduits superficiels

L'enduit superficiel est l'une des techniques la plus couramment utilisée en couche de surface [3]. Aujourd'hui, elle connaît un léger recul au profit des bétons bitumineux très mince et des enrobés coulés à froid, mais elle reste toujours la technique de référence pour les réseaux à faible et moyen trafic.



Figure 9 : Photo d'un enduit superficiel

L'enduit superficiel est composé d'une ou plusieurs couches de liant, chacune étant suivie d'un gravillonnage. Cette technique peut s'employer sur un corps de chaussées, ou sur une couche de surface usée, pour la renouveler. Suivant le

nombre de couche de liant et de gravillons, on distingue des enduits monocouches, bicouches ou multicouches [4] :

- la structure monocouche simple gravillonnage (MSG), composée d'une couche de liant suivie d'une couche de gravillons, est la plus couramment utilisée sur les réseaux de faible et moyen trafic.
- la structure monocouche double gravillonnage (MDG), composée d'une couche de liant suivie de deux couches de gravillons, est utilisée sur tous types de réseaux.
- la structure monocouche prégravillonnée (MPG), composée d'une couche de gravillon (gros) suivie par une couche de liant puis d'une couche de gravillons (plus petits), est utilisée sur les supports hétérogènes et ressuaux.
- la structure bicouche (BIC), composée d'une couche de liant puis d'une couche de gravillons (gros) suivie par une couche de liant puis une couche de gravillons (petits), est utilisée sur les supports hétérogènes peu étanches.

Les granularités utilisées habituellement sont : 2/4, 4/6, 6/10, 10/14. Les petites granularités seront plus favorables à la diminution du bruit de roulement et à une meilleure adhérence à faible vitesse. Les grosses granularités apporteront une meilleure drainabilité.

Trois types de liants sont actuellement utilisables pour les enduits superficiels, dont les domaines d'emploi sont les suivants :

- les liants non modifiés, pour des trafics faibles à moyens, quand il n'y a pas de contraintes climatiques (variation importante de température entre l'hiver et l'été) et de circulation (efforts tangentiels),
- les liants modifiés de cohésion $\geq 0,8 \text{ j/cm}^2$, pour les trafics faibles à moyens, quand il y a des contraintes climatiques et de circulation,
- les liants modifiés de cohésion $\geq 1 \text{ j/cm}^2$, voire $1,2 \text{ j/cm}^2$, pour les trafics importants.

Ces liants modifiés sont aujourd'hui en plein développement sur les réseaux à moyen et fort trafic. Ils offrent en effet une moindre susceptibilité thermique et ils permettent d'utiliser des gravillons de faible granularité qui sont intéressants pour diminuer le bruit de roulement et pour améliorer l'adhérence.

Les enduits superficiels d'usure sont une technique éprouvée, maîtrisée, fiable mais pointue qui nécessite, pour une bonne réalisation, un savoir-faire indiscutable et une longue expérience de la part des équipes de mise en œuvre qui les exécutent. [3]

5. Enrobés coulés à chaud

Les enrobés bitumineux à chaud sont fabriqués par mélange à chaud de gravillons, de sable avec ou sans fines, de filler, de liant bitumineux et d'éventuels dopes et / ou additifs. Ils sont fabriqués à chaud (entre 150 et 180°C) dans une centrale d'enrobage classique et sont posés à l'aide d'un finisseur. Ensuite ils sont compactés

lorsqu'ils sont encore chaud (supérieure à 90°C). Ces enrobés permettent de réaliser en couche de roulement des couches d'épaisseur variable selon le type d'enrobé.

5.1. Enrobés épais

Ils ont une épaisseur moyenne de mise en œuvre comprise entre 5 et 10 cm. Nous pouvons les classer en trois catégories [5] :

- les bétons bitumineux semi-grenus (BBSG),
- les bétons bitumineux à module élevé (BBME),
- les bétons bitumineux souples (BBS).

5.1.1. Bétons bitumineux semi-grenus

Sa mise au point a été pour la première fois en 1969, pour mettre fin aux phénomènes généralisés de fluage observés au cours de l'été 1965. Ils recouvrent tous types de routes, sont peu sujets à l'orniérage et destinés à la réduction de la fatigue des couches inférieures. Selon l'épaisseur de mise en œuvre, de 5 à 7 cm ou de 6 à 9 cm, ils sont de granularité 0/10 ou 0/14. Les 0/10 présentent un léger avantage du point de vue de la ségrégation. A l'inverse, les 0/14 offrent un niveau de macrostructure un peu plus élevé, contribuant à une adhérence supérieure à celle des enrobés 0/10. Ils présentent une très bonne imperméabilité et apporte une amélioration importante de l'uni. Ils sont moyennement bruyants mais leur coût est élevé.



Figure 10 : Revêtement en BBSG

5.1.2. Bétons bitumineux à module élevé

Les BBME constituent une évolution des enrobés épais permettant de mieux répondre aux attentes en matière de résistance à l'orniérage et de comportement mécanique face à l'accroissement des sollicitations lourdes, l'augmentation des performances étant obtenue par l'emploi de bitume de grade plus dur (souvent 20/30 au lieu de 35/50 pour les BBSG), d'ajouts de polymères, d'additifs spéciaux, tels que la poudre d'asphalte ou des fibres.

Les principales différences entre BBSG et BBME concernent les performances en matière de résistance à la fatigue et de module de rigidité, supérieurs pour les BBME à 9 000 MPa (et même 12 000 pour la classe supérieure), contre 6 000 à 8 000 MPa pour les BBSG.

Bien que définis dans une norme, les BBME sont généralement des produits d'entreprise, soumis à des avis techniques, il ne faut pas écarter les risques de fissuration d'origine thermique. [5]



Figure 11 : Revêtement en BBME

5.1.3. Bétons bitumineux souples

Ils ne conviennent qu'aux chaussées souples à faible trafic, à faible niveau d'exigence en matière d'adhérence.

Il y a 4 catégories de BBS, mais seules les catégories BBS1 (0/10 en 4 à 5 cm d'épaisseur) et BBS2 (0/10 en 4 à 6 cm d'épaisseur) sont utilisés. Les deux autres catégories, 0/14 en 8 à 12 cm d'épaisseur, ont été abandonnées pour des raisons économiques.

Constitués le plus souvent pour la partie minérale à partir de sable roulé et de granulats alluvionnaires semi-concassés, et pour le liant d'un bitume 70/100, ou plus rarement 50/70, au dosage élevé, ils sont déformables et adaptables au support, mais en contrepartie peu résistants à l'orniérage. Ils sont compatibles avec toutes les techniques d'entretien, offrent une bonne imperméabilité. Par contre ils sont très sensibles aux déformations permanentes. [5]

5.2. Enrobés minces

Apparus dans le milieu des années 1970, les enrobés « minces » sont aujourd'hui largement utilisés pour la réalisation de couches de roulement sur chaussée neuve ou en entretien de chaussées.

Ils n'ont pas d'effet structurel, leur rôle étant essentiellement d'apporter, ou de restaurer, les caractéristiques de surface de la chaussée. C'est la raison pour laquelle les normes relatives aux enrobés minces ne comportent pas de spécifications relatives au module et à la résistance à la fatigue. Compte tenu de leur faible épaisseur, les formulations ont dû être adaptées pour obtenir une maniabilité suffisante lors de la mise en œuvre, essentiellement par l'introduction d'une discontinuité dans la courbe granulométrique. Ainsi les 0/10, formulation la plus utilisée, présentent une discontinuité de type 2/6, et les 0/6 une discontinuité de type 2/4. Ces formulations discontinues conduisent à des enrobés à texture ouverte nécessitant la réalisation d'une couche d'accrochage légèrement surdosée pour assurer l'imperméabilisation de la couche de roulement.

La famille des enrobés minces se décline en trois catégories [5] :

- Bétons bitumineux minces (BBM),
- Bétons bitumineux très minces (BBTM),
- Bétons bitumineux ultra-minces (BBUM).

5.2.1. Bétons bitumineux minces

Les enrobés bitumineux minces sont des matériaux compactés imperméables. Ils sont appliqués en couche très mince de l'ordre de 4 cm. Ces couches de roulement font appel en général à des courbes granulométriques discontinues. On distingue :

- Les BBM faiblement discontinus : exemple un BB 0/10 avec discontinuité 2/4 ou 4/6,3
- Les BBM fortement discontinus : exemple un BB 0/14 avec discontinuité 0/10 (autrement dit le mélange est constitué avec du sable 0/2 et des gravillons 10/14).

Le bitume utilisé est souvent un liant modifié obtenu à partir de bitume pur et de polymère type SBS (Styrène Butadiène Styrene) ou EVA (Ethylène Vinyle Acétate). Ces enrobés coûtent 20 à 50 fois plus chers que des enrobés classiques à base de bitume pur. Ils recouvrent tout type de routes, mais peuvent être sujets à l'orniérage en cas de passage de charges lourdes. Le support doit être en bon état et la déflexion faible. Ils constituent un compromis entre le BB très mince et BB semi-grenu. Ils présentent une bonne adhérence, une imperméabilité moyenne (compacité de 7 à 9%), et ils apportent une amélioration sensible de l'uni. Ils sont compatibles avec toutes sortes d'entretien, et leur coût demeure acceptable.

Néanmoins ce type de formulation est inadapté en couche de roulement de giratoire de chaussées à trafic T1 et plus. [5]

5.2.2. Bétons bitumineux très minces

Mises au point pour résoudre les problèmes de surface au moindre coût et en limitant la surélévation du niveau des chaussées, les applications d'enrobés à chaud en très faible épaisseur exigent un support bien structuré et non déformé ainsi que des conditions optimales de fabrication et mise en œuvre. [6]



Figure 12 : Photo d'un BBTM

Leurs épaisseurs moyennes varient de 3 à 4 cm pour les 0/10 et de 3,5 à 5 cm pour les 0/14, les épaisseurs minimales en tout point correspondantes étant de 2,5 ou 3cm. Les liants utilisés sont essentiellement des bitumes purs dosés de 5,4 à 5,8%, mais aussi, pour les chaussées à fort trafic, des liants spéciaux ou modifiés avec ajout de fibres.

La technique BBTM, aujourd'hui normalisée et bien maîtrisée, possède une durabilité équivalente aux enrobés traditionnels BBSG ou BBM et conduit à d'excellentes caractéristiques de surface. [6] L'expérience montre que les performances des BBTM en matière de conservation de la structure, et surtout du profil, sont excellentes, et que leur niveau d'adhérence se situe parmi les plus élevées parmi toutes les couches de roulement en enrobés. Ils recouvrent essentiellement les routes sur lesquelles la vitesse pratiquée est élevée, notamment les autoroutes. Ils sont peu bruyants et présentent une forte drainabilité. Ils sont par ailleurs peu sensibles à l'orniérage, et leur coût demeure modeste.

5.2.3. Bétons bitumineux ultra-minces

Les BBUM ne sont pas encore codifiés et relèvent donc de la procédure des avis techniques. Ce sont les derniers-nés de la famille des enrobés à chaud ; ils dérivent à la fois de la technique des BBTM pour la composition de l'enrobé et des enduits superficiels par la faible épaisseur de mise en œuvre (inférieure à 2 cm), leur épaisseur minimale est de 1,5 cm.

Le support doit être en bon état (pas de déformation supérieure au centimètre) et la déflexion faible. Les fonctions de collage et d'imperméabilisation sont assurées simultanément par le répandage d'une couche de liant au dosage élevé de 500 g/m², ajusté suivant l'état du support, ce qui a conduit à la mise au point de matériels spécifiques pour l'application simultanée de la couche d'accrochage et de la couche de BBUM.

Les domaines d'emploi privilégiés sont pour les BBUM 0/6 celui des revêtements urbains, et pour les BBUM 0/10 l'entretien des routes secondaires [5]. Ce type de revêtement présente une excellente adhérence, une bonne durabilité (6 à 10 ans), une drainabilité forte, et ils apportent une très légère amélioration de l'uni et de l'imperméabilité. Comme pour toutes les techniques en couche très mince, la fissuration, en particulier lorsqu'elle est active (par exemple, fissures transversales de retrait), réapparaît très rapidement, parfois même dès la première année avec les BBUM [7].



Figure 13 : Revêtement en BBUM

5.3. Enrobés drainants

Inventés au Royaume-Uni, les enrobés drainants se caractérisent par un pourcentage élevé de vides communicants, obtenu par une granularité adaptée du squelette minéral, la teneur en sable 0/2 étant réduite à 10 ou 14%, et la teneur en fines à 3 ou 4 %. Ils sont généralement appliqués sur chaussée neuve et recouvrent les routes à circulation rapide et supportant un trafic poids lourds important (autoroutes, boulevards urbains sans stationnement,...).

Du fait du pourcentage élevé de vides, un revêtement en BBDr présente la particularité d'être perméable à l'eau. Cette dernière traverse le revêtement et s'écoule à la base de la couche pour ressortir sur le côté de la chaussée. Cette perméabilité :

- lui confère des qualités exceptionnelles d'adhérence à grande vitesse,
- réduit considérablement les projections d'eau (la chaussée paraît sèche),
- réduit de façon sensible le bruit de roulement [8].

On distingue 2 types de BBDr en fonction de leur granularité, le BBDr 0/6 et le BBDr 0/10, et 2 classes de performances suivant le pourcentage de vide obtenu par compactage :

- classe 1 : de 20 à 25 % de vides,
- classe 2 : de 25 à 30 % de vides.

Le liant est un bitume fortement modifié par des polymères, à raison de 4,4 à 4,8 % de liant, voire 5,2%. Les épaisseurs habituelles sont de 3 à 4 cm pour les BBDr 0/6 et de 4 à 5 cm pour les BBDr 0/10. Le support doit être en bon état (pas d'ornièrre supérieure au centimètre). Au jeune âge, le BBDr offre une adhérence plutôt basse du fait de la présence d'une pellicule épaisse de liant et d'une mise à plat des gravillons. Cette pellicule de liant disparaît sous l'effet du trafic (3 à 6 mois pour le bitume pur, 6 à 18 mois pour les liants modifiés, selon l'importance du trafic). Ils ne sont pas sujets à l'orniérage, et empêchent les mécanismes d'aquaplanage ou d'éblouissement (d'où une bonne visibilité même par temps de grosse pluie).

En contrepartie de leurs avantages, les enrobés drainants ont un coût élevé et nécessitent des précautions particulières en matière de viabilité hivernale [9]. Les fondants chimiques utilisés pour le déverglaçage de la chaussée ont en effet

tendance à pénétrer à l'intérieur du revêtement et à ne plus être disponibles pour éliminer la glace et la neige interposée entre le revêtement et le pneumatique.



Figure 14 : Photo d'un BBDr

6. Enrobés coulés à froid

L'intérêt pour les techniques d'enrobés à froid s'est accru dans les années 1990 pour des raisons d'économie d'énergie et de protection de l'environnement. Elles sont actuellement en pleine expansion et font partie des techniques couramment utilisées dans le cadre de l'entretien des chaussées (renouvellement des caractéristiques de surface, étanchéité,...).



Figure 15 : Mise en œuvre d'une couche d'enrobé à froid

6.1. Bétons bitumineux à froid

Les bétons bitumineux à froid suscitent maintenant de plus en plus d'intérêt pour des raisons de protection de l'environnement, et aux progrès importants réalisés dans leur formulation. Les courbes granulaires sont des 0/6 ou 0/10, plus rarement des 0/14, le plus souvent continues.

Selon les techniques développées par les entreprises, le liant résiduel peut être soit du bitume pur (50/70 ou 70/100) apporté par une seule émulsion, soit un mélange de deux bitumes purs apportés par 2 émulsions différentes.

Les épaisseurs de mise en œuvre vont généralement de 2 à 5 cm, plus rarement davantage. Une couche d'accrochage de 300 à 400 g/m² précède l'application de l'enrobé. La mise en circulation est possible dès la fin du compactage.

Le domaine d'emploi est plutôt celui du réseau secondaire, pour assurer le renouvellement de la couche de roulement tout en assurant un léger reprofilage.

6.2. Enrobés à froid stockables

Les enrobés stockables sont des enrobés hydrocarbonés à froid, pouvant être stockés pendant plusieurs semaines ou plusieurs mois. Ils sont destinés à l'entretien courant des chaussées (réparations localisées, déflachage,...). Les enrobés stockables traditionnels sont des matériaux monogranulaires 2/4, 4/6 ou 6/10 enrobés à l'émulsion d'un bitume fluxé ou fluidifié.

Les enrobés denses, obtenus par enrobage d'un squelette minéral 0/6 ou 0/10 à granularité continue, sont une nouvelle génération d'enrobés stockables apparue plus récemment. Leur domaine d'emploi privilégié est le reprofilage de chaussées bombées ou déformées avant application d'un enduit ou autre revêtement de surface. Ceux-ci constituent des produits d'entreprise, livrés froid en vrac, en sacs ou en seaux [3].



CHAPITRE II

ADHERENCE DES REVETEMENTS DE CHAUSSEES



CHAPITRE II : ADHERENCE DES REVETEMENTS DE CHAUSSEES

1. Introduction

Ce présent chapitre porte sur la notion d'adhérence ainsi que les différents paramètres rentrant en jeu dans l'établissement des mécanismes d'adhérence, en exposant les différents facteurs influençant cette dernière.

Nous abordons également les définitions des frottements longitudinal et transversal mais aussi l'évolution des facteurs d'adhérence. Enfin, nous terminons ce chapitre par la présentation des différentes techniques de mesure de l'adhérence et de la texture des revêtements.

2. Définition

L'adhérence d'un revêtement correspond à sa capacité à mobiliser des forces de frottement entre le pneumatique d'un véhicule et la surface du revêtement sous l'effet des sollicitations engendrées par la conduite : accélérations, freinages, changements de direction. Elle permet de :

- conserver à tout moment la trajectoire désirée notamment en virage,
- réduire les distances de freinage,
- faciliter les manœuvres d'évitement ou de récupération de trajectoire.

On distingue deux composantes de l'adhérence : l'adhérence longitudinale représentée par le coefficient de frottement longitudinal, et l'adhérence transversale, représentée par le coefficient de frottement transversal [10].

2.1. Adhérence longitudinale

Considérons un véhicule qui roule en ligne droite à une certaine vitesse. Pour freiner, le conducteur impose, par l'intermédiaire du circuit de freinage, un couple de freinage aux quatre roues du véhicule. A ce moment-là, la vitesse angulaire des roues diminue et la vitesse de roulement du pneu devient inférieure à la vitesse de défilement du sol : pour compenser cette différence, les pneus commencent à glisser selon un taux de glissement « G ». Par les mécanismes d'adhésion et d'indentation, le glissement induit une force de frottement, qui s'oppose au glissement : le véhicule ralentit. On définit le taux de glissement « G » comme le rapport entre la vitesse de glissement pneu/sol et la vitesse du véhicule [11].

$$G = \frac{\omega \cdot R - V}{V}$$

ω : la vitesse angulaire des roues.

R : le rayon de roulement.

V : la vitesse du véhicule.

A partir de cette expression nous pouvons avoir les valeurs suivantes :

- $G < 0$: glissement freineur,
- $G > 0$: glissement moteur,
- $G = 0$: roue libre,
- $G = -1$ ou -100% : roue bloquée,
- $G = +\infty$: patinage sur place.

Les deux cas extrêmes “patinage sur place” et “roue bloquée”, que nous avons tous vécus sur des sols enneigés ou verglacés, peuvent permettre de mieux comprendre cette notion de glissement :

- lorsqu'on essaye de démarrer son véhicule en côte sur sol verglacé ou enneigé, bien souvent, les roues patinent : elles tournent sur place, mais le véhicule n'avance pas. La vitesse de rotation des roues ($\omega \cdot R$) peut être grande, alors que la vitesse du véhicule (V) reste nulle : le glissement est infini.
- inversement, lorsqu'on freine trop brutalement sur un sol verglacé, les roues du véhicule se bloquent (elles ne tournent plus), mais le véhicule continue d'avancer en dérapant. La vitesse de rotation des roues ($\omega \cdot R$) est nulle alors que le véhicule continue d'avancer sur sa lancée : le glissement représente 100 % de la distance parcourue [12].

2.2. Adhérence transversale

Pour négocier un virage, le conducteur d'un véhicule agit sur son volant. Mais c'est par l'aire de contact, ultime organe de transmission entre le volant et le sol, que passent tous les efforts.

2.2.1. La force centrifuge

Tout véhicule lancé dans un virage est soumis à une force centrifuge « F_c » qui tend à le chasser hors de sa courbe. Pour maintenir le véhicule sur sa trajectoire, l'interface pneu/sol doit fournir une force centripète « Y », de valeur égale à la force centrifuge.

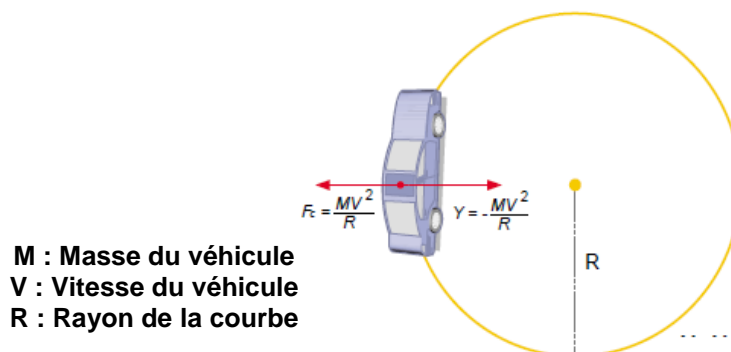


Figure 16 : Illustration de la force centripète

2.2.2. La dérive

En virage, le conducteur impose, par l'intermédiaire de la direction, un angle de braquage aux deux roues avant du véhicule. En fait, il dirige les roues non pas sur la trajectoire, mais vers l'intérieur du virage, introduisant un décalage entre le plan de rotation des roues et la trajectoire du centre de la roue. Ce décalage, appelé dérive « δ » induit un frottement entre les pneumatiques et la chaussée, qui génère une force transversale centripète « Y ».

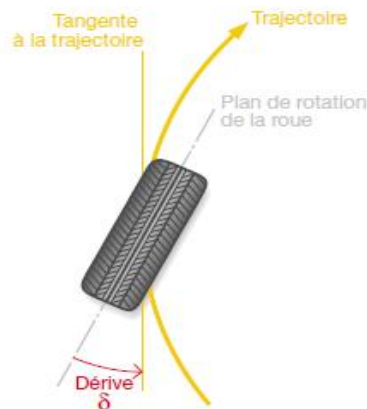


Figure 17 : Mise en dérive d'une roue

En général, le frottement transversal augmente avec la dérive jusqu'à une valeur maximale, que l'on atteint à environ entre 4° et 7° de dérive pour une voiture, et entre 6° et 10° pour un poids lourd en fonction de l'architecture du pneumatique, de la nature de la gomme et du sol, et de la pression de gonflage [12].

3. Mécanisme à l'origine de l'adhérence

Il est important de noter que pour que l'adhérence existe, il faut un contact entre deux matériaux. Dans le cas de la route, c'est le contact pneu-chaussée qui est en jeu. Il est important de séparer deux cas liés à l'état de la chaussée :

- contact sec : entre pneu et chaussée sèche,
- contact humide : entre pneu et chaussée mouillée.

Sur chaussée sèche et propre, le niveau d'adhérence est en général satisfaisant pour des conditions normales de conduite. Mais, sur chaussée mouillée ou humide, le niveau d'adhérence est inférieur à celui rencontré sur chaussée sèche du fait de la présence de l'eau qui s'interpose entre le pneumatique et la surface de la chaussée [13].

3.1. Sur sol sec

Sur sol sec, deux mécanismes de sollicitation interviennent sous l'effet d'un glissement relatif entre l'élastomère et le sol :

- le premier est l'excitation fréquentielle du matériau par indentation : il s'agit d'une déformation de la gomme par glissement sur les aspérités du sol dont la

taille varie du centimètre (domaine de la macrorugosité) au micron (domaine de la microrugosité),

- le deuxième est l'adhésion, phénomène de liaison moléculaire qui intervient à une échelle de l'ordre du centième de micron et qui se trouve amplifié par le glissement.

3.1.1. Mécanisme d'indentation

La souplesse de la gomme lui permet d'épouser la forme des aspérités du sol. Lorsqu'un bloc de gomme glisse sur le sol, sa déformation (matériau visqueux), se produit comme un écoulement : le bloc vient buter contre l'aspérité, se déforme, mais, par un effet d'hystérèse, ne redescend pas immédiatement à sa hauteur initiale de l'autre côté de l'aspérité. L'enveloppement dissymétrique de l'aspérité par le matériau viscoélastique génère des forces de réaction qui s'opposent au glissement [12].

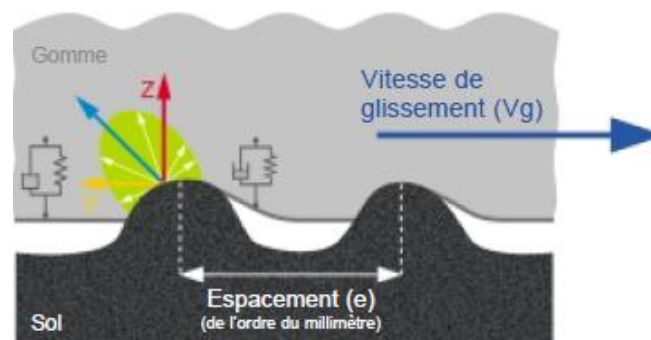


Figure 18 : Phénomène d'indentation

3.1.2. Mécanisme d'adhésion

L'adhésion résulte d'interactions moléculaires se produisant au niveau de l'interface gomme/sol (liaisons de Van der Waals). Ces liaisons se forment, s'étirent puis se rompent pour se reformer plus loin. Les chaînes moléculaires de la gomme suivent donc un cycle d'étirement-rupture qui génère un travail viscoélastique. Ce travail multiplie les énergies de liaison par un facteur pouvant varier entre 100 et 1000 en fonction de la température et de la vitesse de glissement de la gomme sur le sol.

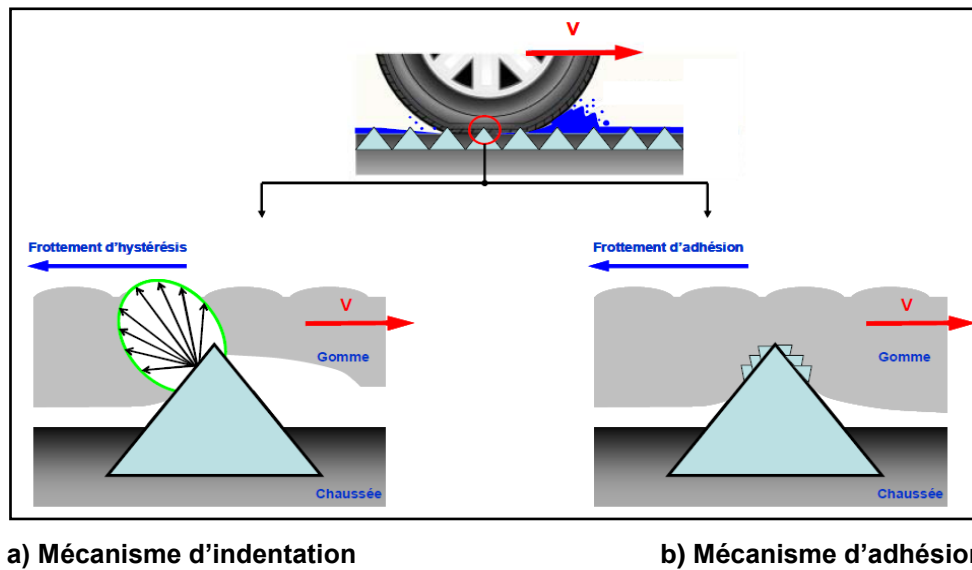


Figure 19 : Mécanismes d'indentation et d'adhésion

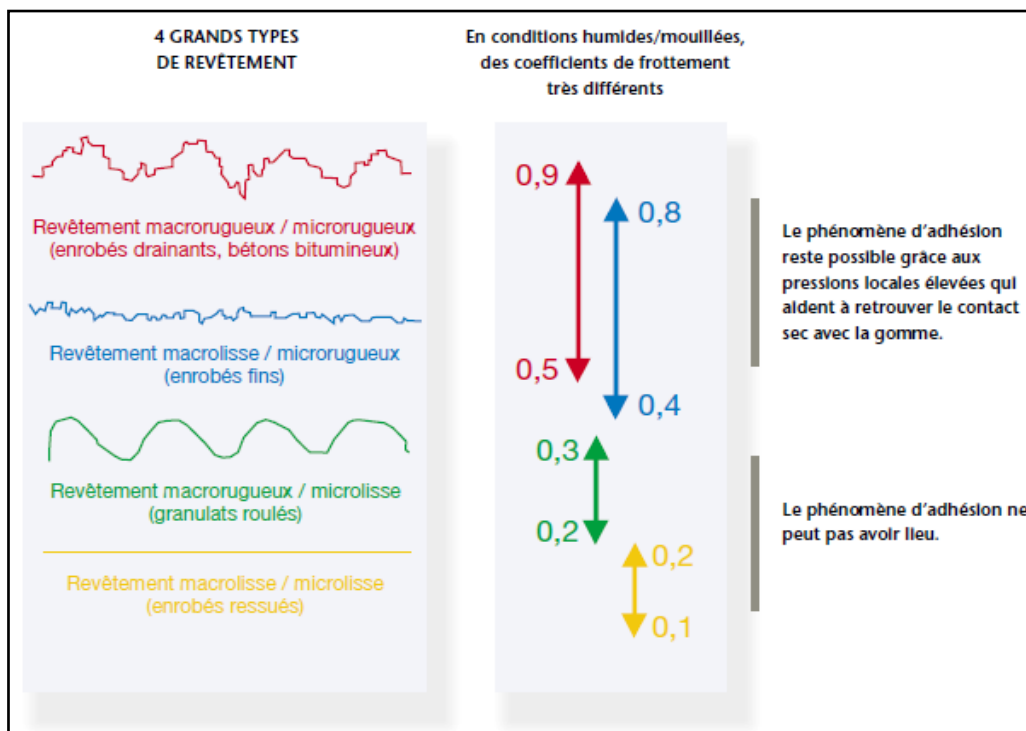


Figure 20 : Phénomène d'adhésion en fonction de différents types de revêtements

3.2. Sur sol mouillé

La présence d'eau perturbe les mécanismes de l'adhérence. Le mécanisme d'adhésion ne peut s'opérer si le contact entre la gomme et le sol n'est pas parfaitement propre et sec. Le mécanisme d'indentation est perturbé dès que la hauteur d'eau est suffisante pour couvrir les rugosités du revêtement routier. Par temps de pluie, maintenir l'adhérence nécessite donc d'évacuer l'eau pour restaurer un contact sec entre la bande de roulement et le sol. La route y contribue par son inclinaison, sa structure (enrobés drainants, par exemple) et sa rugosité. Mais cela ne suffit pas. Lorsque la chaussée est mouillée, de l'eau peut s'infiltrer sous l'aire de

contact, d'autant plus fortement que la hauteur d'eau sur la route est importante et la vitesse du véhicule élevée. Cette présence d'eau dégrade le niveau d'adhérence potentiel. Pour des épaisseurs d'eau faible (inférieures à 100 μm), trois zones de contact entre le pneumatique et la chaussée sont constatées. Ces trois zones de l'aire de contact s'appellent : zone de pénétration, zone de transition, zone de contact [11] :

- **zone 1 de pénétration** : l'eau est évacuée progressivement par les sculptures du pneu et par les aspérités du revêtement. Le frottement y est presque nul,
- **zone 2 de transition** : une partie de l'eau a été évacuée et le pneumatique commence à prendre contact avec des aspérités du revêtement. La gomme du pneumatique commence un léger enveloppement des aspérités de la surface, de l'ordre de 200 à 400 μm ,
- **zone 3 de contact** : le pneumatique est en contact sec avec le revêtement. L'adhérence est presque entièrement réalisée dans cette zone de contact.



Figure 21 : Description de l'aire de contact pneumatique/ chaussée

Ces zones correspondent à trois phénomènes physiques qui apparaissent progressivement de l'avant vers l'arrière de l'aire de contact : il s'agit de phénomènes dits hydroplanage (hauteur d'eau supérieure à 0,5 mm), viscoplanage (hauteur d'eau comprise entre quelques microns et 0,5 mm) et humides (présence d'un film d'eau résiduel discontinu) [12].

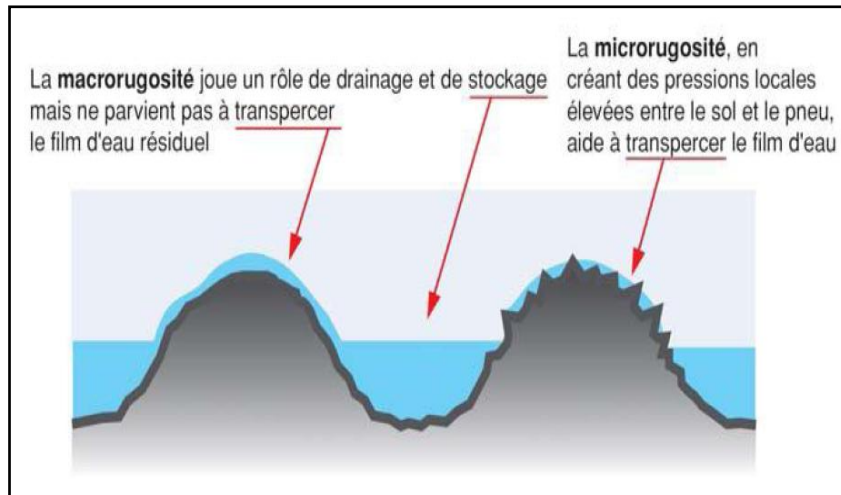


Figure 22 : Effets de la microrugosité et de la macrorugosité sur revêtement mouillé

3.2.1. Viscoplantage

Le viscoplantage est une perte d'adhérence du pneumatique, due à un film d'eau de faible épaisseur entre la gomme et les granulats. Ce phénomène d'adhérence se produit souvent dans la zone de transition. La hauteur d'eau est comprise entre quelques microns et 0,5 mm [12]. Ce film d'eau mince s'interpose entre le pneu et la chaussée, et les liaisons moléculaires sont totalement interrompues. Le viscoplantage est provoqué par l'infiltration d'eau à l'avant de l'aire de contact lorsque la vitesse du véhicule dépasse une valeur critique [11].

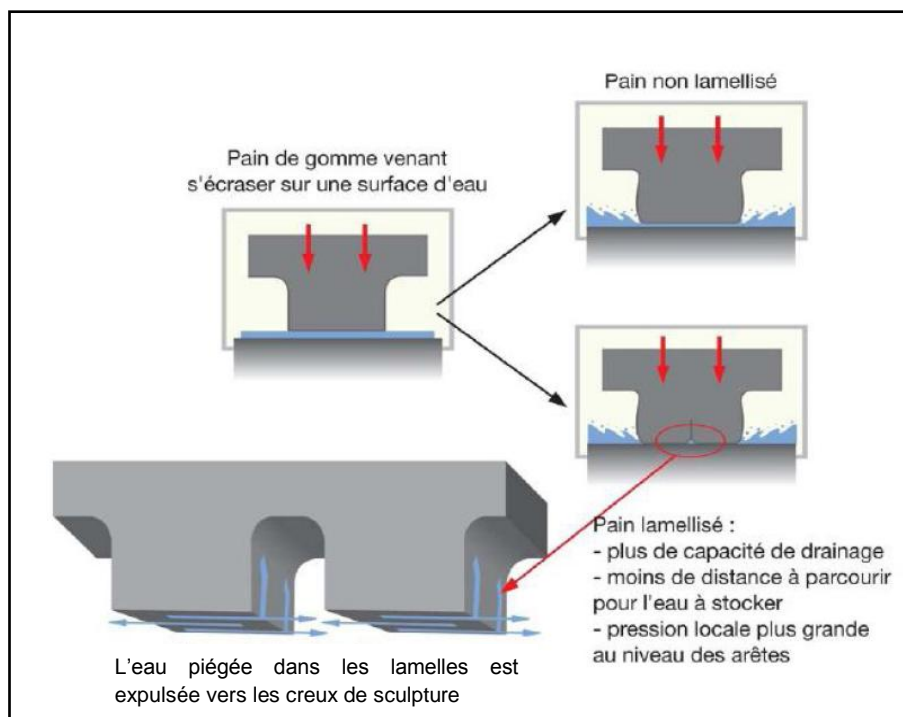


Figure 23 : Evacuation de l'eau par les lamelles en zone de viscoplantage

3.2.2. Mécanisme d'hydroplanage

L'hydroplanage est une perte d'adhérence due à une couche d'eau entre le pneu et la chaussée (hauteur d'eau supérieure à 0,5 mm [12]) du fait de la vitesse du véhicule. Quand la zone de pénétration recouvre toute la surface de contact, il n'y a plus de contact direct du pneumatique avec la chaussée. Sous l'effet de la vitesse de déplacement du pneu, la pression dans l'eau augmente et soulève progressivement le pneu. Le coin d'eau progresse sous le pneu et finit par le décoller totalement de la chaussée.



Figure 24 : Le bourrelet d'eau à l'origine de l'hydroplanage

4. Facteurs influençant l'adhérence

L'adhérence des chaussées dépend non seulement des caractéristiques du revêtement de la chaussée mais également des facteurs liés au véhicule (suspension, vitesse, etc.), aux pneumatiques (pression de gonflage, profondeur de sculptures, etc.), aux conditions climatiques (température, gel etc.) et à l'état de la surface de la chaussée (déformations, épaisseur d'eau, pollution, etc.). Les facteurs liés aux surfaces de chaussée, et en particulier ceux relatifs à la texture, sont ceux sur lesquels les ingénieurs routiers peuvent agir [10].

4.1. Texture des revêtements de chaussées

La texture des surfaces de chaussées permet l'évacuation de l'eau sous le pneumatique (c'est le rôle de la macrotecture) et de rétablir des conditions de contact aussi proches que possible de celles rencontrées sur chaussées sèches (c'est le rôle de la microtexture). Les aspérités composant la texture des surfaces de chaussées se classent selon deux échelles, en fonction de leur dimension horizontale et verticale :

- l'échelle de la microtexture,
- l'échelle de la macrotecture.

Une évaluation de ces deux échelles de texture permet de caractériser l'adhérence d'une surface de chaussée [10].

4.1.1. La microtexture

La microtexture est à l'origine des phénomènes d'indentation. Elle est liée aux aspérités de surface des granulats et aux sables entrant dans la composition du

revêtement [12]. Elle correspond aux plus fines aspérités inférieures à 0,5 mm horizontalement et à des dénivellations verticales de moins de 0,2 mm [14].

La microtexture est influencée par la minéralogie et la texture cristalline des granulats. Elle influence grandement les distances de freinage sur chaussée humide et le maintien de la trajectoire dans les courbes [15]. Le rôle de la microtexture est de pénétrer la gomme du pneumatique, en produisant une pression locale de contact très élevée, assurant la rupture du film d'eau qui subsistait sous le pneumatique et permettant ainsi le contact sec de la gomme sur le revêtement. La microtexture est une qualité intrinsèque de la surface de la chaussée, qui est difficilement compensée par le pneumatique. Une valeur suffisante de la microtexture est donc indispensable [14]. Elle est la principale propriété caractéristique du revêtement importante pour l'adhérence.

4.1.2. La macrotexture

La macrotexture correspond à des dénivellations de 0,5 à 50 mm horizontalement et de 0,2 à 10 mm verticalement. Cette macrotexture est liée à la formulation et aux conditions de mise en œuvre du revêtement de chaussée. Elle est influencée par la forme, l'angularité et la dimension des granulats constituant l'enrobé. Une forte macrotexture a un effet bénéfique sur l'évacuation superficielle des eaux de ruissellement et sur la réduction des projections d'eau ainsi que sur les propriétés optiques d'un revêtement humide mais elle peut conduire à augmenter le bruit de contact pneumatique-chaussée et la résistance au roulement.

Une faible macrotexture est susceptible d'entraîner, par temps de forte pluie et à vitesse élevée, une perte d'adhérence qui résulte de la persistance d'une lame d'eau entre le pneumatique et le revêtement engendrant ainsi le phénomène d'aquaplanage, lequel se traduit par une perte de maîtrise de la conduite. La recherche de l'obtention et de la durabilité de la macrotexture doit être l'une des idées directrices de la formulation.

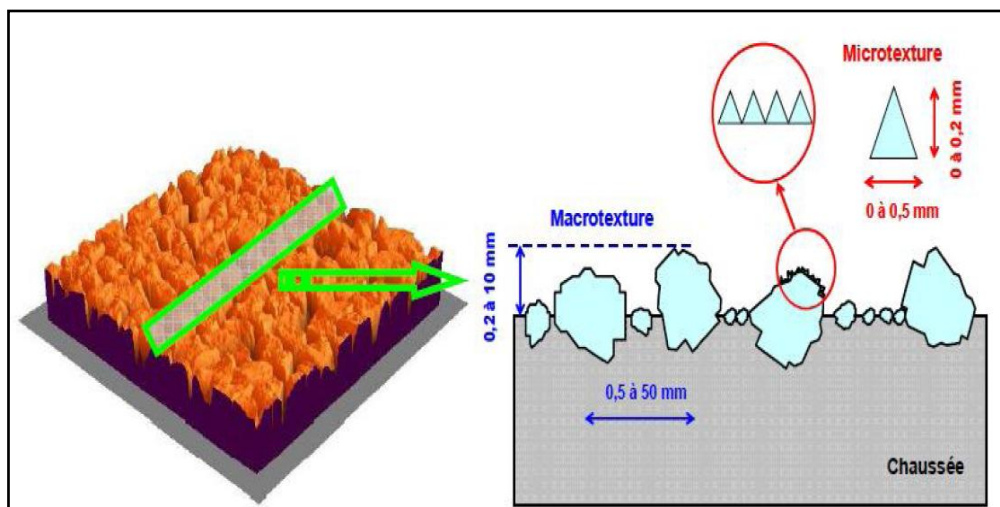


Figure 25 : Microtexture et macrotexture des revêtements de chaussée, tailles caractéristiques

4.2. Caractéristiques de la couche de roulement

Pour adhérer, le pneu doit avoir un partenaire, le revêtement routier qui, par sa rugosité va exciter les mécanismes générateurs de l'adhérence : l'indentation et l'adhésion. Pour cela, deux conditions doivent être remplies :

- le mécanisme d'indentation requiert que le revêtement présente des indenteurs, c'est-à-dire de petites aspérités qui vont s'enfoncer superficiellement dans la gomme.
- l'adhésion nécessite un contact direct entre la gomme et le sol. Il faut pour cela que la surface de contact entre le pneu et la route ne soit plus mouillée. Pour évacuer l'eau, le revêtement offre deux solutions : drainer l'eau vers les côtés (par le dévers) ou en profondeur (par porosité) ; stocker l'eau dans les creux de revêtement pour dégager le sommet des aspérités [12].

Pour assurer une bonne adhérence sur les chaussées en enrobé il est nécessaire d'utiliser des granulats résistants au polissage. Les calcaires sont généralement exclus puisque leur composition est monominérale et leurs grains de dureté semblable ; ils s'usent donc de façon uniforme. Par contre, les granulats polyminéraux comme le granite performant bien au polissage et conservent une bonne microtexture de par la différence de dureté entre les phases cristallines. On peut également assurer une bonne adhérence en modifiant la formulation des enrobés utilisés en couche de surface de manière à obtenir une forte macrotexture [11]. Les revêtements tels les BBTM, les BBUM et les BBDr présentent une adhérence croissante avec une diminution du calibre « D » pour autant que la résistance au polissage des granulats soit similaire. Le pourcentage moyen de sable rencontré dans un BBSG, BBM, BBTM, BBUM et BBDr étant respectivement de 33, 30, 25, 20 et 12%. L'augmentation de la fraction sableuse jusqu'à 30% amène une diminution régulière de l'adhérence, puis une diminution brutale [5].

4.3. Influence du pneumatique

L'adhérence est assurée par le pneumatique, organe ultime de contact entre le véhicule et la route. La gomme du pneu qui, par ses extraordinaires propriétés viscoélastiques, est à l'origine des mécanismes d'adhérence : il se produit dans l'aire de contact un fourmillement de phénomènes qui vont tous concourir à lutter contre un glissement intempestif du véhicule.

Un pneu à carcasse radiale offre une adhérence longitudinale légèrement supérieure à celle d'un pneu à carcasse diagonale (de l'ordre de 15 à 20%). Le pneu lutte contre l'hydroplanage en drainant l'eau qui passe sous l'aire de contact. Si le débit de drainage est plus important que le débit d'eau passant dans l'aire de contact, le pneu ne décolle pas du sol. A hauteur d'eau égale, le débit d'eau défilant sous un pneu est d'autant moins grand que le pneu est étroit. En première approche, une aire de contact étroite permet donc de réduire le volume d'eau à drainer dans les sculptures du pneu. Inversement, les pneus larges, confrontés à un débit d'eau très supérieur, doivent disposer d'un système de drainage beaucoup plus élaboré.

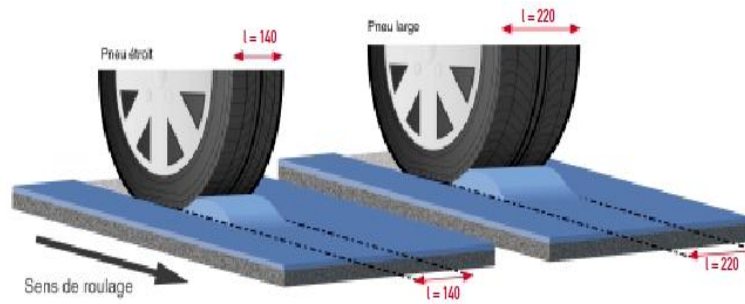


Figure 26 : Influence de la largeur de l'aire de contact sur le débit d'eau à évacuer

Les pneumatiques sont munis de sculptures dont le rôle est de drainer le plus possible vers les côtés de l'aire de contact l'eau qui n'a pas été repoussée à l'avant de l'aire de contact, au moyen de ses rainures transversales ou obliques. Les creux de sculptures peuvent être complétés par un réseau de lamelles débouchant sur les creux de sculptures. L'adhérence croît lorsque la profondeur des sculptures du pneumatique augmente. Cette adhérence n'augmente pas sensiblement entre 0 et 3 mm de profondeur de sculpture. L'adhérence pneu sculpté est supérieure à l'adhérence pneu lisse [12].

Les lamelles participent au drainage de l'eau vers les creux de sculpture et créent des surpressions locales au niveau de leurs arêtes. Là encore, ce réseau doit être conçu pour concilier drainage et rigidité de la bande de roulement [12].

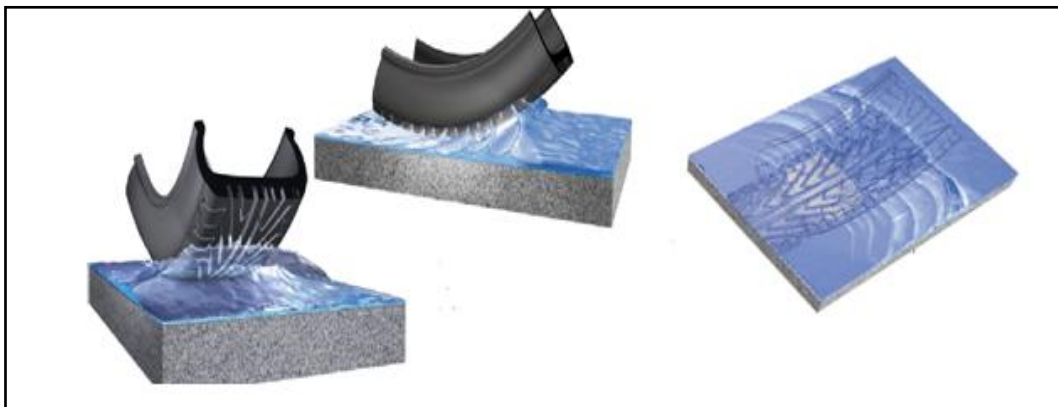


Figure 27 : Sculptures orientées pour drainer l'eau vers les côtés

4.4. Présence de polluants sur la chaussée

Lorsque certains produits comme de l'huile, de la glaise, du sable ou des feuilles mortes sont déposés sur la chaussée, l'adhérence diminue. Aux sorties de carrières, l'adhérence est plus faible, en raison des fines de concassage perdues par les camions, qui se déposent sur la chaussée et qui jouent un rôle d'abrasif. L'adhérence pneumatique/chaussée, déjà dégradée par la présence d'eau, l'est encore bien davantage en période hivernale par l'existence de neige ou de glace à la surface des chaussées [11]. La neige tassée, le verglas ou la glace produisent une adhérence très basse.

La résistance à l'action des produits chimiques : le carburant qui fuit peut dissoudre le liant du mélange bitumineux et certains produits peuvent attaquer les granulats (par exemple de l'acide sur du calcaire ou un matériau contenant du calcaire). Plus le produit chimique peut s'introduire aisément dans le revêtement, plus les dégradations seront importantes. Tout cela dépend de la rugosité, des vides, de la pente, etc.) [16].

4.5. Conditions climatiques

L'adhérence est influencée directement ou indirectement par les conditions climatiques. Le comportement des revêtements bitumineux, est très sensible aux facteurs climatiques (et aux éléments naturels qui les accompagnent) tels que la température, l'eau, le gel et ses conséquences (agents de déverglage), l'air et les rayons ultra-violet.

La température affecte les caractéristiques mécaniques des matériaux bitumineux (module élastique et tenue en fatigue). Les températures élevées sont souvent source de dégradations pour un revêtement bitumineux. Il est en effet bien connu que l'augmentation de température favorise l'orniérage et le poinçonnement. Une augmentation de température a le même effet qu'une diminution de la vitesse de sollicitation de l'enrobé. Les effets sur le comportement du revêtement sont d'autant plus sévères que ces deux actions (température et vitesse) se combinent. La température génère aussi des cycles d'ouverture/fermeture des fissures de retrait des matériaux traités aux liants hydrauliques.

Outre qu'elles provoquent le gel, les températures froides et la vitesse élevée de la variation de ces températures sont de leur côté susceptibles de provoquer la fissuration (thermique) des revêtements. Au niveau des enrobés, le gel aggrave la situation des enrobés dans lesquels l'eau se trouve piégée, dans la mesure où, par le gonflement de cette eau, le gel décohésionne le mortier du mélange asphaltique engendrant ainsi des microfissures. L'effet des sels de déneigement est double : d'une part, des microfissures peuvent naître du choc thermique provoqué lors de la fusion de la neige ou de la glace, d'autre part, les saumures accélèrent le processus de rupture de l'adhésivité entre le liant et les granulats.

L'eau ruisselant ou stagnant à la surface du revêtement rend celui-ci glissant. Le film d'eau qui se forme entre le pneu et le revêtement peut en effet, en fonction de son épaisseur et de la vitesse de l'usager, provoquer de l'aquaplanage et des projections d'eau, ce qui est bien sûr néfaste pour la sécurité des usagers. L'eau stagnant dans un enrobé, ou pénétrant dans celui-ci (fissures) s'insinue lentement entre liant et granulats (microfissures du liant) et provoque petit à petit le désenrobage des granulats. Ceci ouvre la porte à la désagrégation de l'enrobé et à la formation de nids de poules. Ce processus est d'autant plus rapide que l'enrobé est vieux. Ce processus est normalement limité à la surface du revêtement dans le cas des enrobés fermés. Il n'en va pas de même pour les enrobés drainants et autres

enrobés semi-fermés ou semi-ouverts où le processus de vieillissement affecte toute l'épaisseur de la couche [16].

5. Mesure de l'adhérence des chaussées

L'adhérence est directement liée à la texture du revêtement routier considéré dans le domaine compris entre 1 µm et 10 cm (dimensions de l'empreinte du pneumatique). La mesure des caractéristiques de la texture est donc indispensable pour connaître le niveau initial d'adhérence du revêtement et pour évaluer sa capacité à se maintenir à un bon niveau dans le temps.

L'adhérence d'une chaussée peut être appréciée :

- soit par des mesures directes de la seule macrotecture, car il n'existe pas aujourd'hui de méthode satisfaisante pour la mesure à grand rendement de la microtexture,
- soit par des mesures indirectes de la macrotecture et de la microtexture par le biais de mesures de frottement.

5.1. Mesures directes de la macrotecture

La macrotecture des revêtements peut être appréciée :

- par la méthode volumétrique : mesure de la Profondeur Moyenne de Texture (PMT) selon la norme NF EN 13036-1.
- par la méthode profilométrique : l'appareil détermine en semi-continu un indicateur géométrique PMP (Profondeur Moyenne de Profil). Cette dernière (PMP) est transformée en Profondeur de Texture Equivalente (PTE), calculée selon la formule $PTE = (0,8 \times PMP) + 0,2$ de la norme NF EN 13473-1.

5.1.1. Méthode volumétrique (Essai à la tâche)

Cette méthode donne une profondeur moyenne des aspérités de surface (norme NF EN 13036-1 [17]). Elle est réalisée de manière ponctuelle et rapide. La gamme des résultats ponctuels observés est de 0,3 à 3 mm, selon les techniques routières et l'état de la couche de roulement. Les mesures de profondeur moyenne de texture (PMT) sont testées nécessairement avec une surface de chaussée sèche et propre. Dans le cas d'un revêtement drainant, la hauteur au sable ne traduit pas correctement la macrotecture superficielle, car les grains s'écoulent dans la porosité ouverte du matériau. La PMT nécessite un grand nombre de mesures pour donner une appréciation significative de la macrotecture d'un revêtement.



Figure 28 : Mesure de la macrotexture PMT

Le principe de la méthode consiste à :

- Verser 25 cm³ (V) de billes de verre calibrées
- Etaler les billes à l'aide du disque spécial en une plage circulaire
- Mesurer au moins 4 diamètres (D),
- Calculer $PMT = V/(D^2/4)$ mm

5.1.2. Méthode profilométrique (Rugolaser)

Il s'agit d'une méthode dynamique (mesure effectuée pour une vitesse de 30 à 100km/h). Sur route, le Rugolaser permet d'obtenir la Profondeur Moyenne du Profil (PMP) selon la norme NF EN ISO 13473-1 [18]. L'appareil mesure l'indenteur géométrique qui correspond à la moyenne arithmétique « Ra » ou la moyenne quadratique « Rq ». L'appareil se compose, en particulier, d'un émetteur à rayon laser et d'un potentiomètre optique. Le rayon émis touche la surface du sol et se réfléchit sur le potentiomètre optique (cf. Figure ci-dessous). En fonction de la position du point illuminé sur ce potentiomètre, on en déduit la hauteur du point de réflexion au sol.

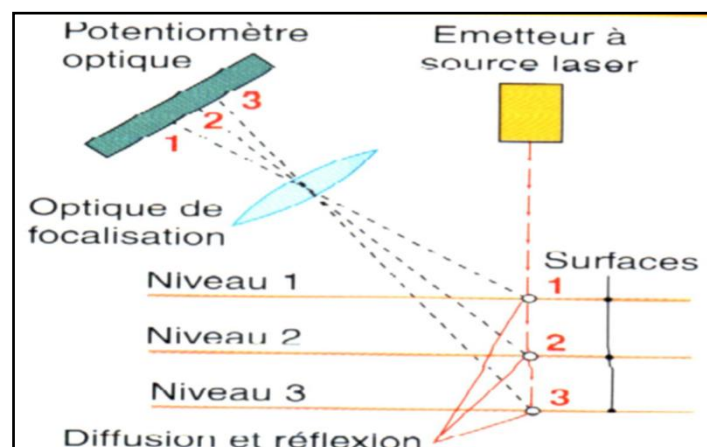


Figure 29 : Principe du Rugolaser

En général, les mesures sur couches de roulement drainantes ne sont pas utiles. Les résultats de mesures sont exprimés en valeurs de HSc (Hauteur au Sable calculée, en mm), au pas de 10 à 20 m, en fonction des abscisses de la roue. L'appareil

calcule la valeur « Ra » moyenne, la valeur « Rq » moyenne, et une valeur « HSc » déduite de « Ra » par une loi empirique de la forme :

$$HSc = (a \times Ra) + b$$

HSc est la Hauteur au Sable calculée, en mm

Ra est la moyenne arithmétique des aspérités, en mm

a, b sont des coefficients à déterminer.



Figure 30 : Méthode profilométrique (Rugolaser)

5.1.3. Autres moyens de mesures directes de la macrotexture

a) Mini Texture Meter (MTM)

C'est un appareil sur roulettes poussé par un opérateur entre 4 et 5 km/h. Il est équipé d'un capteur sans contact à rayon laser. Il se présente sous la forme d'un bâti soutenu par deux roues, et muni d'un manche démontable au bout duquel se trouve une poignée ; cette poignée contient une petite imprimante qui affiche les résultats, soit une valeur tous les 10m. C'est la valeur SMTD-10 (Sensor Measured Texture Depth). Chaque 50 m, l'appareil imprime la moyenne des cinq valeurs SMTD-10 précédentes ; c'est la valeur SMTD-50 analogue au critère « Rq ». Il relève la macrotexture à partir d'un profil de la surface échantillonnée au pas de 3 mm environ. L'appareil est surtout utilisé en contrôle de chantier, sur chaussée sèche.

b) Drainoroute

L'appareil comporte un patin métallique avec un orifice pour l'écoulement, un réservoir d'eau à niveau constant et un débitmètre à impulsions, le tout porté par un véhicule léger [11]. Il quantifie l'aptitude au drainage instantané de l'eau superficielle sous le pneumatique, en relevant en continu le débit d'eau qui s'échappe par les vides de la texture superficielle de la chaussée. Le pneumatique est simulé par un patin métallique qui glisse sur la chaussée, et qui est percé d'un trou par lequel se fait l'alimentation en eau, à pression constante. La mesure est réalisée sur une chaussée sèche à vitesse constante d'environ 30 km/h. Les résultats sont imprimés : soit la valeur moyenne par zones de 10 m, soit la moyenne et écart-type par section, soit encore un graphique d'enregistrement en continu du débit. La valeur fournie, dite Coefficient Drainoroute, est le rapport du débit mesuré par le débit maximal. Cet appareil est particulièrement adapté aux revêtements à faible macrotexture [11].

c) Appareil Protex (ou TM2)

C'est un profilomètre laser portable [11]. Il permet de faire des mesures ponctuelles, mais n'est pas adapté pour des mesures en continu. Le résultat obtenu est le même indicateur de macrotecture (PMP) que le Rugolaser, selon la norme NF EN ISO 13473-1 [18].

d) TRIDIM

C'est un appareil qui mesure des profils de chaussées [11]. Il comporte un système équipé d'un capteur laser à triangulation. Il permet la numérisation des surfaces routières sur une matrice de 256 x 256 points, à partir de carottes ou de moulages. Le pas d'acquisition choisi est 0,25 mm. La numérisation est donc faite sur un carré de 64 mm. La mesure porte sur la macrotecture, avec toutes les possibilités d'analyses bi- et tridimensionnelles. Il permet aussi l'étude géométrique de la microtexture. L'acquisition et le traitement des données utilisent un micro-ordinateur.

e) Circular Texture Meter (CTMeter)

Ce nouvel appareil a été développé depuis 1998 pour la mesure de PMP. L'essai est normalisé selon la norme ASTM E 2157. Il peut être mise en œuvre en laboratoire et sur route. Il mesure un profil de diamètre de 284 mm avec un capteur laser. Le profil de mesure est divisé en 8 segments de 111,5 mm sur une longueur de la circonférence de 892 mm. Chaque mesure dure environ 45 secondes. La valeur moyenne de 8 mesures, la valeur moyenne de chaque arc qui est perpendiculaire à la direction de roulement et la valeur moyenne de deux segments dans la direction de roulement sont enregistrées. Notons, enfin, qu'il existe d'autres moyens de mesure de la macrotecture [11] : la stéréophotographie, le macroprofilographe [19], le numérisateur de répliques, le High-Speed Texture Meter (HSTM) [11], etc.

5.2. Mesures indirectes de la macrotecture et de la microtexture

Il est possible d'apprécier la microtexture et la macrotecture des revêtements par la réalisation de mesures de coefficient de frottement pneu/revêtement. Selon les appareils, ces mesures peuvent être réalisées à différentes vitesses de glissement, à ne pas confondre systématiquement avec la vitesse d'avancement de ces appareils. La vitesse de glissement est égale à la vitesse d'avancement multipliée par le pourcentage de glissement de l'élément de mesure (patin ou pneu). Une basse vitesse de glissement permet d'obtenir un indicateur représentatif de la microtexture, une vitesse plus élevée de glissement est plus sensible à la macrotecture. Les plages de texture évaluées par les différents appareils sont données par la figure ci-après [13].

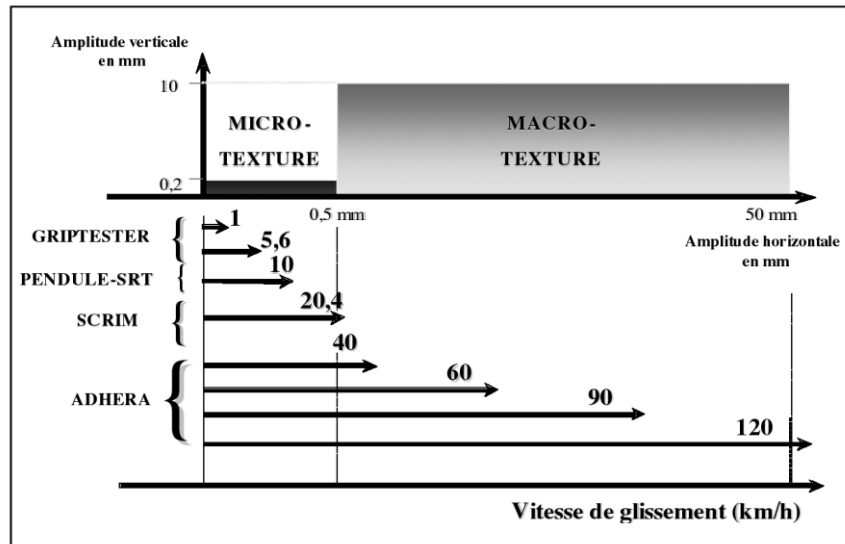


Figure 31 : Plages de texture des différents appareils de mesure

5.2.1. Mesure du coefficient de frottement longitudinal

Soit une roue animée d'une vitesse angulaire constante « ω » est tractée à une vitesse de translation constante « V ». On mesure la force « F » qui se développe dans l'aire de contact pneu-chaussée et qui tend à ré-entraîner la roue à une vitesse angulaire correspondant à « V/r » (r est le rayon de la roue). Le coefficient de frottement longitudinal (CFL) est le rapport entre la force « F » et la réaction « R » normale au sol dû à la charge sur la roue :

$$CFL = F/R$$

Les mesures de CFL peuvent être effectuées roue bloquée ou roue glissée. L'adhérence d'un pneumatique n'est pas la même selon le pourcentage de glissement de la roue [10].

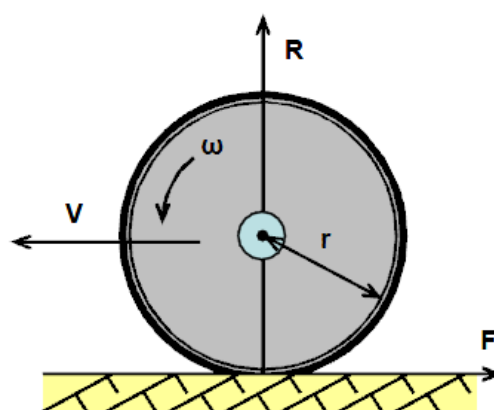


Figure 32 : Principe de calcul du coefficient de frottement longitudinal

Pour apprécier les paramètres principaux caractérisant l'adhérence d'une surface de chaussée, il existe de nombreuses méthodes d'évaluation utilisant des appareils spéciaux décrits dans ce qui suit. Elles sont fondées sur la mesure d'un coefficient de

frottement à diverses vitesses de glissement ou sur la combinaison de mesures de frottement et de macrotexture.

a) L'ADHERA

C'est un appareil français de mesure in situ, développé depuis 1968. L'essai se fait avec roue bloquée (taux de glissement de 100 %). L'équipement se compose d'une remorque monoroue et d'un véhicule tracteur aménagé pouvant atteindre une vitesse de 120 km/h. La roue de la remorque équipée d'un pneumatique lisse aux caractéristiques de gomme fixées (pneu AIPCR lisse 165R15 [11]) est chargée à 250daN. Elle est tractée à vitesse constante par le véhicule assurant le mouillage du revêtement avec une hauteur d'eau estimée à 1 mm. Le résultat élémentaire d'un essai est représentatif du niveau moyen d'adhérence d'une bande de surface de chaussée de largeur égale à celle de l'empreinte du pneumatique sur la chaussée et de longueur égale à 20 m, quelle que soit la vitesse d'essai. On mesure le couple moyen des forces tendant à la ré-entraîner. La vitesse de mesure peut varier de 40km/h à 120km/h. Normalement, ces mesures sont réalisées pour trois vitesses d'essais (sur route à 40, 60 et 90 km/h ; sur autoroute à 60, 90 et 120 km/h).



Figure 33 : L'appareil ADHERA

b) Le pendule S.R.T

Le pendule S.R.T (Skid Resistance Tester) est un appareil statique d'origine anglaise. Il porte, à l'extrémité de son bras articulé, un patin de caoutchouc frottant pendant l'essai sur la surface à mesurer. Pendant le frottement, un ressort applique le patin sur cette surface avec une force connue. Un dispositif de réglage permet de maintenir la longueur de frottement dans les limites déterminées. La hauteur maximale de remontée du pendule est repérée par une aiguille placée devant un cadran gradué directement en coefficient de frottement mesuré par le pendule (NF EN 13036-4). Il est utilisé pour des expérimentations particulières, par exemple, pour évaluer la microtexture d'une surface limitée. Cet appareil est enfin utilisé, avec un patin spécifique, dans l'essai permettant d'évaluer le coefficient de polissage accéléré (CPA) des gravillons utilisés pour les couches de roulement [20].

Nous avons utilisé cet appareil pour mesurer le CFL des chaussées routières de la wilaya de Guelma. Nous présentons en détail l'exécution et l'expression des résultats dans le chapitre IV.



Figure 34 : Le pendule S.R.T

c) Le GRIPTESTER

Le GRIPTESTER d'origine écossaise mesure les forces de frottement longitudinal entre le revêtement et un petit pneumatique lisse avec un taux de glissement constant, de l'ordre de 15%. L'appareil se présente sous la forme d'une petite remorque autonome permettant le mouillage, la mesure et l'enregistrement. Il peut être poussé à la main ou tracté par une voiture à vitesse basse ou modérée. Le pneumatique de mesure est de taille conforme à la norme ASTM E 1844-96 [21] chargé à 19 daN. Un système d'arrosage calibré lui est adjoint. Le débit est de l'ordre de 0,6 L/min à une vitesse de 5 km/h et de 4 L/min à 30 km/h. La mesure peut être ainsi réalisée en continu. L'axe de la roue de mesure est équipé d'un système de jauges de déformation permettant la mesure de la réaction verticale « Fv » et de la force horizontale « Fh ». Il mesure un CFL, appelé Grip Number (GN), égal au rapport « Fh/Fv ». Ce CFL permet d'estimer le CFT du revêtement par corrélation du CFL (GRIPTESTER) avec CFT donné par l'appareil SCRIM. Le GRIPTESTER permet de caractériser la macrotecture du revêtement. Les mesures sont réalisées à des vitesses d'essai comprises entre 5 et 40 km/h. En effet, à vitesse plus élevée, un délestage de la roue de mesure peut se produire, du fait de la suspension sommaire de la petite remorque. Il peut être utilisé sur des petites surfaces pour l'évaluation de l'adhérence des marquages, des voies piétonnes et des dallages.



Figure 35 : Le GRIPTESTER

d) Instrument de Mesure Automatique de Glissance

Cet appareil (IMAG) a été développé en France par le Service Technique des Bases Aériennes. L'ensemble se compose d'un véhicule tracteur et d'une remorque de mesure. Le pneumatique d'essai est le même que celui de l'appareil ADHERA. La charge à la roue est de 150 daN. Cette roue permet de mesurer un CFL lorsqu'elle glisse à 15 %. Les mesures sont le plus souvent réalisées avec le mouillage naturel pour donner aux pilotes, le niveau d'adhérence de la piste sur laquelle ils vont atterrir. Le mouillage est de 1 mm d'eau et les essais peuvent être effectués jusqu'à 140 km/h. Cet appareil est utilisé uniquement sur les aéroports pour surveiller la glissance des pistes d'atterrissage et de décollage. L'utilisation envisageable sur chaussées routières ou autoroutières n'a pas pour l'instant fait l'objet de caractérisation [11].



Figure 36 : IMAG du STBA

5.2.2. Mesure du coefficient de frottement transversal

On donne au plan de rotation d'une roue tractée à une vitesse de translation constante un angle d'envirage avec la direction du déplacement. On mesure la réaction transversale « N », engendrée par l'adhérence pneumatique-chaussée, qui tend à ramener la roue dans la direction du déplacement. Le coefficient de frottement transversal (CFT) est égal au rapport entre cette réaction transversale « N » et la réaction « R » normale au sol due à la charge sur la roue ($CFT = N/R$). Le CFT est maximal pour un taux de glissement proche de 0% et très faible pour un taux de glissement de 100%. Comme le coefficient de frottement longitudinal, le CFT est sans dimension. Pour un revêtement donné, ce coefficient dépend du type de pneu (lisse ou sculpté), de la vitesse angulaire de la roue, de la hauteur d'eau sur le revêtement, de l'angle d'envirage et du poids appliqué sur la roue.

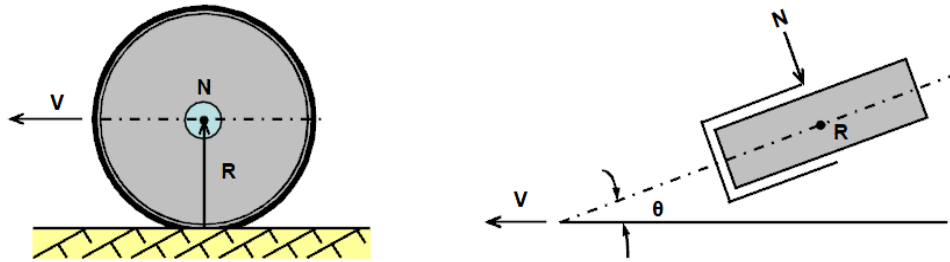


Figure 37 : Principe de calcul du coefficient de frottement transversal

L'appareil SCRIM mesure un CFT en continu (normes NF P 98-220-3 et NF P 98-220-4). Le SCRIM est un camion équipé d'une citerne de 6000 litres qui porte une roue de mesure sur le côté droit. Les mesures sont effectuées dans le flot de la circulation, sur la bande de roulement droite, partie de la chaussée la plus sollicitée par le trafic. La roue de mesure fait un angle de 20° avec la direction de la vitesse du véhicule. Le taux de glissement utilisé est de 34%. Le pneu d'essai est un pneu lisse de 76x508 mm avec une dureté et une résilience standardisées. Le camion est également équipé d'un Rugolaser qui permet d'obtenir par calcul la profondeur moyenne du profil (PMP). La corrélation entre le CFT et la PMP donnée par le SCRIM dans un même profil va nous permettre de juger l'état détaillé de l'adhérence de la chaussée (la microtexture par l'intermédiaire du CFT et la macrotexture par la PMP).



Figure 38 : L'appareil SCRIM

5.3.3. Synthèse des méthodes de mesure indirectes

Appareils Paramètres	ADHERA	SCRIM	GRIPTESTER	IMAG	SRT
Principe	continu	continu	continu	continu	ponctuel
Coefficient de frottement	CFL	CFT	CFL	CFL	CFL
Vitesse de mesure	40 à 120	60	5 à 30	40 à 120	15
Taux de glissement %	100	34	14.5	8 à 100	100
Domaine d'application	Route	Route	Route	Piste d'aéroport	Route/Labo
Charge (daN)	250	196	19	160	2.2 à 2.8
Sculpture	Lisse	Lisse	Lisse	Lisse	Lisse
Surface (cm ²)	125 neuf 145 usé	32 neuf 42 usé	27	125 neuf 145 usé	Surface frottée 96

Tableau 1 : Synthèse des méthodes de mesure indirectes [11]

6. Evolution de l'adhérence au cours du temps

L'évolution de l'adhérence d'un revêtement de chaussée bitumineuse est due à au moins à quatre mécanismes à savoir [22] :

- l'usure mécanique due au frottement entre le pneumatique et le revêtement, le polissage est une conséquence de cette usure,
- le décapage du bitume sous l'action de l'usure mécanique mais également du climat [11],
- les variations saisonnières, qui peuvent être constatées à partir d'une série de mesures de frottement réalisées sur un même revêtement à différentes époques. On constate que l'adhérence atteint généralement sa valeur la plus faible à la fin de l'été et la plus élevée pendant l'hiver [11],
- le vieillissement du matériau dû aux conditions climatiques (variations de température, action de l'oxygène de l'air, pluies acides, etc.), qui peut parfois améliorer l'adhérence au jeune âge.

A ces mécanismes on peut ajouter aussi le phénomène d'enfoncement des gravillons, ou inversement de ressuage du liant modifiant la macrotexture de la surface [23]. Connaître à l'avance cette évolution est primordial pour :

- un gestionnaire d'infrastructure routière afin de planifier l'entretien de son réseau,
- une entreprise routière afin de garantir les performances de son produit.

6.1. Décapage du liant

Lors de la fabrication des bétons bitumineux, les granulats sont enrobés d'une pellicule de Bitume. Au début de la période de service de la chaussée, le liant à la surface des granulats est décapé sous l'action du trafic et du soleil. La durée du décapage dépend du trafic, des conditions extérieures, des propriétés du liant. En général, elle varie de 6 mois à 2 ans après la mise en circulation de la chaussée. En général, avant décapage, la chaussée a une adhérence faible, qui a tendance à augmenter au fur et à mesure que la surface se débarrasse de son bitume [11].

La figure ci-dessous illustre l'évolution de l'état de surface d'un revêtement de chaussée sous l'effet du trafic [23].

L'image (a) illustre un état « non circulé », que l'on observe sur une chaussée neuve ou sur des parties non circulées d'une chaussée en service, lorsque les granulats sont recouverts de bitume. L'image (c) illustre un état « décapé » lorsque les granulats sont complètement mis à nu. L'image (b) montre un état intermédiaire.

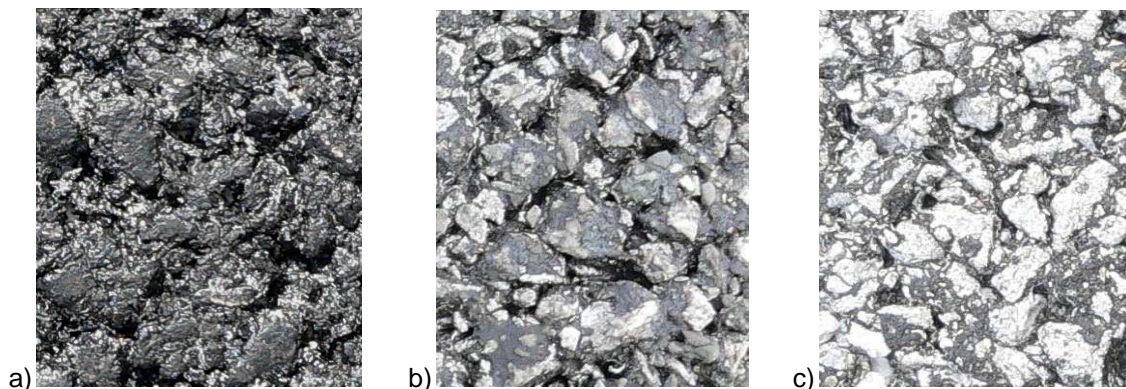


Figure 39 : Evolution de l'état de surface d'un revêtement de chaussée sous l'effet du trafic

6.2. Polissage par le trafic

Le phénomène de polissage des granulats se traduit par un émoussement des aspérités micrométriques se trouvant à la surface. Ce phénomène, qui concerne essentiellement la microtexture, dépend de la nature pétrographique et minéralogique des granulats, de l'agressivité du trafic, de la technique routière utilisée et des conditions de mise en œuvre. On ne dispose que des essais pour évaluer la résistance au polissage pour les granulats, qui ne représentent qu'une composante d'un béton bitumineux. Ces essais permettent de sélectionner des granulats assurant une bonne tenue de l'adhérence dans le temps. Cependant, ils limitent le choix des granulats, privilégiant ceux avec un coefficient de polissage accéléré ou Polished Stone Value (PSV) élevé [23].

Dans l'état actuel de la normalisation européenne, l'essai de polissage de référence est l'essai de polissage accéléré (PSV). Toutefois, cette méthode ne permet pas de tester un produit routier (enrobé, béton...). La machine Wehner et Schulze (Allemande) ouvre cette possibilité et permet de progresser vers la prédiction de l'adhérence d'un matériau de surface tel qu'il est fabriqué en laboratoire et sera réalisé sur chantier. L'essai est totalement automatique, il associe un poste de

polissage simulant l'action du trafic et un poste de mesure d'adhérence simulant un freinage roue bloquée en présence d'eau. Un exemple d'évolution de la microtexture suite au polissage est montré dans la figure ci-dessous.

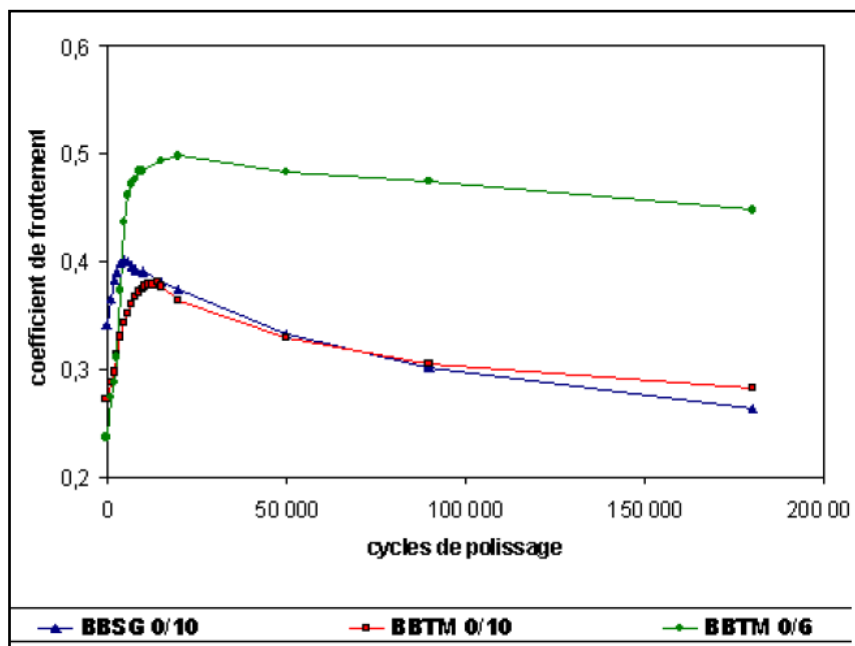


Figure 40 : Simulation de l'évolution de l'adhérence avec la machine de Wehner et Schulze [24]

Dans la première phase le frottement augmente avec le temps jusqu'à atteindre un maximum d'adhérence. La deuxième phase présente une diminution de l'adhérence liée au phénomène de polissage des aspérités micrométriques se trouvant à la surface. En dessous d'un certain seuil, la sécurité des usagers de la route n'est plus assurée.

Les études de Lédée [11] ont montré que l'évolution de la microrugosité de différentes familles de roches s'explique par des différences de vitesse de polissage des cristaux constituant les granulats. La présence d'arêtes vives des cristaux détermine en grande partie la valeur du frottement. L'évolution du coefficient de frottement au cours du processus de polissage se corrèle bien avec les variations constatées à l'échelle de la microtexture, et notamment avec l'angularité des arêtes des cristaux, donc des aspérités de 0,05 à 0,15 mm de large et 0,02 à 0,05 mm de profondeur, ainsi, dans une moindre mesure, par celles de 0,01 mm de large et 0,005 mm de profondeur.

Young [11] propose une relation linéaire entre le CFT, le PSV et le trafic. Quand le PSV du granulat augmente, le coefficient de frottement augmente aussi. En revanche, quand le trafic augmente, le coefficient de frottement diminue (après décapage). Parmi ces deux facteurs, l'influence du PSV sur le frottement est plus importante selon Roe et al. [11]. Il a proposé une relation logarithmique entre le coefficient de frottement et le trafic. Cependant, l'influence d'un seul facteur pour le frottement n'est pas toujours linéaire. Le coefficient de frottement diminue très rapidement avec le trafic au début de la circulation, puis plus lentement [11].

D'après Lees et al. [11], la densité du trafic influence significativement l'évolution du frottement. Lees a traité trois routes ayant le même revêtement, avec différents niveaux de trafic. Le coefficient de frottement diminue fortement pour une densité de trafic très importante. Cependant, l'influence du trafic sur l'évolution du frottement n'est pas toujours négative.

6.3. Effets des variations saisonnières

Il est constaté que l'adhérence des revêtements varie au cours de l'année. De ce fait cela ne peut être dû qu'aux variations saisonnières. Pour quantifier les variations saisonnières de l'adhérence, les facteurs liés à la météorologie, tels que la température ou l'état de propreté de la chaussée, seront considérés. Du point de vue météorologique, les années ne se ressemblent pas : elles diffèrent par la répartition des précipitations, l'évolution des températures, etc. [11]. Les facteurs principaux sont la variation de la température du pneu et du revêtement. L'augmentation de la résilience du caoutchouc est produite par les montées de la température et cause une réduction de la résistance au glissement. Le résultat est une réduction du coefficient de frottement entre le pneu et la route. La variation de température occasionne des modifications de la texture de la couche de roulement. Une hausse de température entraîne d'une part le ramollissement et la dilatation du bitume interstitiel, d'autre part la dilation du granulat contre le bitume interstitiel.

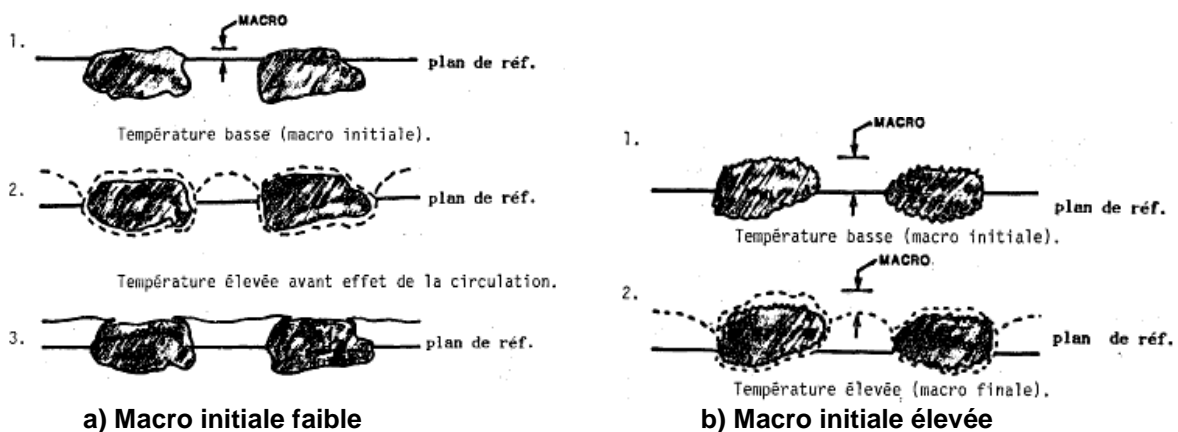


Figure 41 : Représentation schématique des variations de la macrotexture sous l'effet de la température d'une chaussée neuve

Des modèles de prévision de l'effet des variations saisonnières sur l'évolution de l'adhérence sont donnés dans le tableau ci-après.

Auteur	Loi d'évolution	Variables
Diringer	$SN_{40} = SN_{\text{terminal}} + B_1 \sin(B_2 JDAY + B_3)$	SN40: coefficient de frottement à 64 km/h (40 mph) ; JDAY: Julian Day, date sur le calendrier Julien, exprimé en jours ; SN terminal: coefficient de frottement moyen; B ₂ : paramètre constant, égal à 2π/365, synthétise un cycle saisonnier annuel de 360 degrés ; B ₁ , B ₃ : paramètres à déterminer par la régression, dans l'article, B ₁ =3 et B ₃ = 0.
Brillet et Gothié	$CFT = A + B \cos [2\pi (t - t_0)]$ $CFT = C + D\theta$	CFT : coefficient de frottement transversal au temps t (en années) ; t : temps, exprimé en années décimales ; t ₀ : paramètre d'ajustement; θ : température, exprimée en degrés ; A, B, C, D : paramètres à déterminer par la régression.
AIPCR	$CFT = CFT_0 - AT^B$	CFT : coefficient de frottement transversal ; CFT ₀ : coefficient de frottement transversal initial, en fonction du type d'enrobé (première installation, couche mince, granulats de basalte ou calcaires, recyclage, etc.) ; T : trafic cumulé de véhicules poids lourds équivalent ; A, B : paramètres dépendant du type d'enrobé et des conditions climatiques.

Tableau 2 : Méthodes de prédictions des variations saisonnières [11]

6.4. Effets du vieillissement

Parmi les détériorations des chaussées qui surviennent après plusieurs années de service, les phénomènes de fissuration et de désenrobage sont en partie liés aux effets du vieillissement de l'enrobé. Cette altération du liant hydrocarboné est due à l'évaporation de certaines huiles et à des actions physico-chimiques (rayonnement, oxydation,...). Tous ces facteurs auront une influence sur l'évolution de l'adhérence. Le vieillissement des bitumes sur route se traduit par des détériorations de la chaussée provoquées par des changements de comportement rhéologiques (durcissement et fragilité) et de composition du liant. Le bitume subit différents types de vieillissement, distincts par leurs mécanismes [11] :

- un vieillissement physique qui se traduit par une augmentation de la viscosité sans modification des constituants. Il est engendré par un déséquilibre des proportions respectives entre asphaltènes et éléments légers.
- un vieillissement chimique, le plus important et le plus complexe, qui correspond à des réactions d'oxydation, de cyclisation et d'aromatisation. Il conduit également à un durcissement du bitume, dont la cause majeure est l'oxydation par l'oxygène de l'air. L'oxygène vient de l'air, et l'oxydation est accélérée par le soleil et la chaleur. Il s'agit d'une modification chimique des composants du bitume se traduisant par une évolution structurale et rhéologique.

Il existe deux méthodes principales de simulation du vieillissement pour prévoir l'évolution du bitume pendant l'enrobage :

- Thin Film Oven Test (TFOT) 1940 (NF EN 12607-2)
- Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) 1963 (NF EN 12607-1)

En résumé, il y a trois catégories de facteurs d'influence de l'évolution de l'adhérence [11] :

- le trafic, caractérisé par le nombre total journalier de véhicules, la proportion de véhicules légers et de poids lourds, la pente de la chaussée (profil en long et en travers), les vitesses et les accélérations des véhicules.
- la couche de surface, caractérisée par la nature de la roche mère du granulat (polissabilité, teneur en calcaire, faculté d'accroissement de la rugosité), la granulométrie, la texture (ouverte/fermée), les caractéristiques du bitume et la présence de poussières (degré d'encrassement).
- le climat, caractérisé par l'alternance des périodes sèches et humides, la température moyenne, l'acidité de la pluie et le rayonnement solaire ultraviolet.

La figure ci-après montre la combinaison de tous les effets influant l'évolution de l'adhérence pour un enrobé neuf [11].

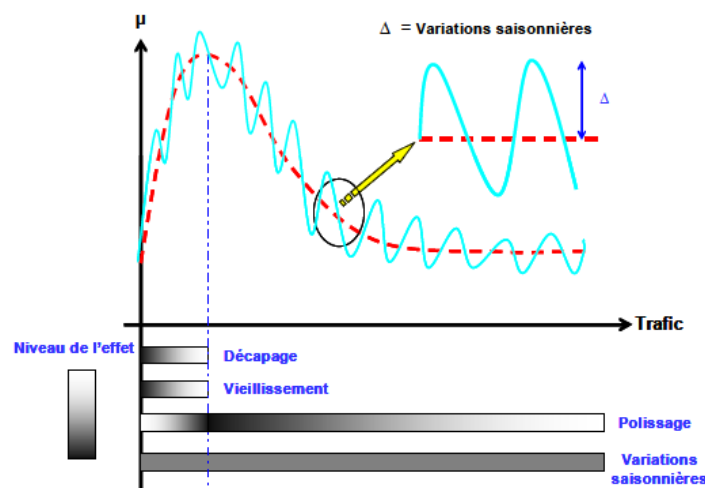


Figure 42 : Schéma de l'évolution de l'adhérence pour un enrobé neuf [11]



CHAPITRE III

AUTRES CARACTERISTIQUES DES REVETEMENTS DE CHAUSSEES



CHAPITRE III : AUTRES CARACTERISTIQUES DES REVETEMENTS DE CHAUSSEES

1. Introduction

La qualité de la couche de roulement n'est pas uniquement liée à l'adhérence, ses qualités en termes de photométrie (visibilité) et de bruit de roulement (nuisances sonores) sont des paramètres aussi importants que le potentiel de glissance de la chaussée.

La couche de roulement joue un rôle important dans la visibilité de la route .Elle occupe une grande part du champ visuel du conducteur et constitue le principal fond sur lequel se détache un éventuel obstacle. A la photométrie, s'ajoute l'aspect acoustique qui est un critère de plus en plus important pour le choix d'un revêtement lors de la conception ou de l'entretien de la route. Le bruit est l'une des premières nuisances évoquées par la population et parmi les critères de choix d'un logement. Face aux exigences légitimes des riverains, les solutions à la source sont privilégiées, comme les écrans anti-bruit. Malheureusement ceux-ci ne peuvent être installés partout, que ce soit pour des raisons d'espace ou des raisons économiques. Face à ces contraintes, les revêtements de chaussée peu bruyants permettent de diminuer de manière significative le bruit émis par la circulation routière.

Nous présentons dans ce chapitre quelques notions sur ces deux caractéristiques importantes dans le choix d'un revêtement de chaussée afin de sensibiliser les ingénieurs routiers Algériens qui sont peu soucieux des nuisances acoustique en zone urbaine et des dangers causés par une mauvaise visibilité de la chaussée surtout la nuit.

2. Acoustique des revêtements routiers

Le roulement des roues d'un véhicule sur une surface est à l'origine de ce que l'on appelle le bruit de roulement. Le revêtement routier joue un rôle essentiel en la matière. En ce qui concerne les voitures, le bruit de roulement est la source sonore dominante même si elles roulent à vitesse réduite. De nombreuses études ont été mises en œuvre au cours des décennies écoulées afin de connaître en détail les mécanismes responsables du bruit de roulement. Ces études ont également tenté de déterminer comment poser un revêtement routier générant un bruit de roulement minimal.

2.1. Sources du bruit routier

Le bruit engendré par les véhicules ressenti aux alentours d'une route est déterminé par différents facteurs, dont :

- les bruits d'origine mécanique GMP (moteur, transmission, échappement,...),

- les bruits aérodynamiques dus à la turbulence de l'air (aux vitesses usuellement pratiquées par les véhicules, les bruits aérodynamiques restent faibles).
- le bruit du contact pneumatique-chaussée P/C qui dépend :
 - du type de pneumatique (matière, structure, dessin, largeur, pression de gonflage...),
 - de la texture de la surface de la chaussée,
 - de la capacité d'absorption acoustique de la couche de roulement,
 - les vibrations et entrechoquements de divers éléments (caisse, etc.) dus aux irrégularités de la chaussée, en particulier pour les poids lourds [25].

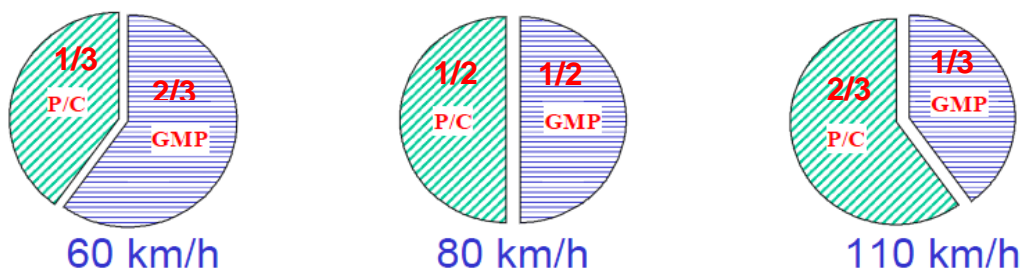


Figure 43 : Répartition du bruit routier selon le type de bruit et la vitesse pratiquée

Toutefois, sur les nouveaux véhicules, les constructeurs sont parvenus à diminuer considérablement le bruit émis par le groupe motopropulseur (GMP). De ce fait, le bruit de contact pneumatique/chaussée devient prédominant pour des vitesses dès 30 à 40 km/h pour un véhicule léger et dès 50 à 60 km/h pour un poids lourd. Le modèle prévisionnel simplifié mis en œuvre aux Pays-Bas [26] pour la prévision du bruit routier VL et PL illustre ce propos (cf. figure ci-dessous).

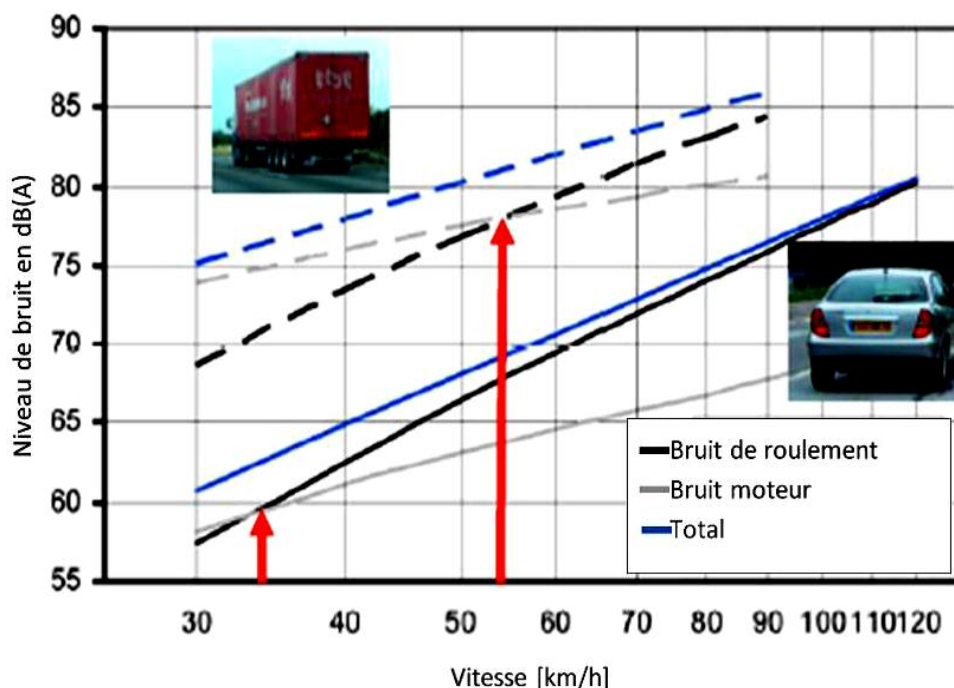


Figure 44 : Contribution du bruit du moteur et du bruit de roulement (VL et PL) [26]

2.2. Facteurs influant sur le bruit du trafic routier

Le bruit du trafic routier est fonction :

- de l'émission sonore qui dépend :
 - du type de revêtement de la chaussée (jusqu'à 10 dB d'influence sur le niveau sonore),
 - de l'état de surface du revêtement.
- des conditions de propagation liées :
 - au profil en travers de la route (remblais, déblais, tracé au niveau du terrain naturel),
 - la présence d'obstacles tels que le relief naturel, bâtiments, écrans, melons,
 - à la distance entre source et récepteur,
 - à l'absorption acoustique de la chaussée, des sols environnants et des obstacles,
 - aux conditions météorologiques [25].

Le tableau suivant illustre l'influence de l'eau sur l'acoustique du revêtement routier :

Quantité d'eau sur le revêtement	0 - 60 km/h	61 - 80 km/h	81 - 130 km/h
Sec	Référence	Référence	Référence
Humide (bruine)	+2 dB(A)	+1 dB(A)	+0 dB(A)
Mouillé (pluie modérée)	+4 dB(A)	+3 dB(A)	+2 dB(A)
Mouillé (forte pluie)	+6 dB(A)	+4 dB(A)	+3 dB(A)

Tableau 3 : Influence de l'eau sur l'acoustique du revêtement routier

2.3. Mécanisme à l'origine du bruit

Les bruits de roulement résultent de divers mécanismes, les principaux mécanismes sont développés dans ce qui suit.

2.3.1. Vibrations des pneus

Des études ont démontré que toutes les irrégularités du revêtement ne provoquent pas des vibrations des pneus. Ce sont surtout les inégalités de dimensions horizontales comprises entre 50 et 500 mm (mégatexture) qui provoquent les vibrations. Le choix du revêtement n'a pas d'influence sur la mégatexture. Lorsque le pneu roule sur une surface qui n'est pas parfaitement lisse, les irrégularités donnent en quelque sorte une série de coups sur la bande de roulement du pneu. C'est comme si l'on frappait le pneu à un rythme soutenu à l'aide d'un petit marteau. La bande de roulement et indirectement les côtés du pneu se mettent alors à vibrer. Ces éléments vibrants émettent du bruit, de façon comparable à la peau d'un tambour. Les vibrations des pneus sont généralement le principal mécanisme responsable du bruit de roulement [27].

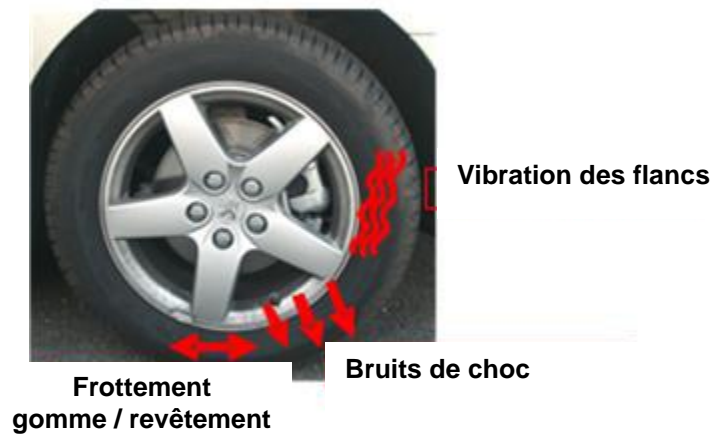


Figure 45 : Bruit dû aux vibrations du pneumatique

2.3.2 Effet dièdre ou de mégaphone

Il ne s'agit pas d'une source sonore en soi, mais d'un mécanisme qui renforce le bruit de roulement. Le son peut être réfléchi plusieurs fois dans le dièdre situé entre le pneu et le revêtement routier, ce qui a pour effet de l'amplifier, tout comme dans la partie conique d'un mégaphone [27].

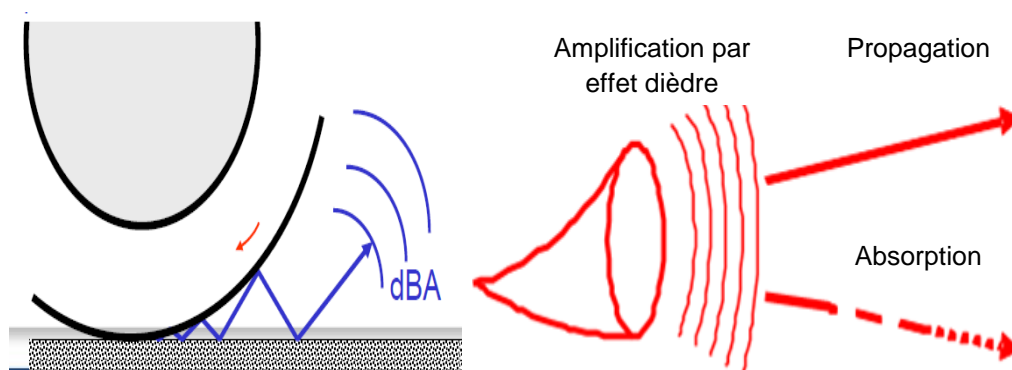


Figure 46 : Rayonnement sonore par effet dièdre

Un revêtement routier absorbant permet d'atténuer ce problème. L'absorption du son dépend généralement de la fréquence. Le revêtement doit donc être capable d'absorber la partie du spectre qui contient également le bruit de roulement, sinon aucun effet notable d'absorption ne se produit. La figure ci-après montre le spectre du bruit de roulement, mesuré sur un revêtement routier doté de bonnes qualités d'absorption.

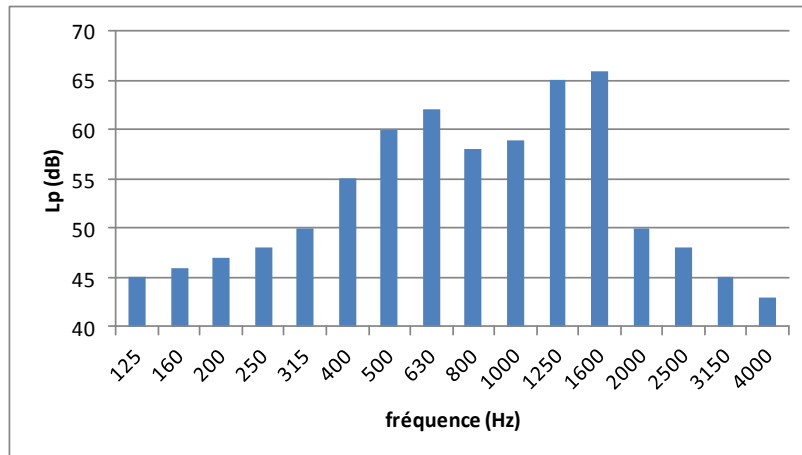


Figure 47 : Spectre du bruit de roulement sur BBDr bicouche [27]

Ce graphique indique le niveau de pression acoustique du bruit de roulement pour chaque bande de tiers d'octave. L'absorption assurée par le revêtement provoque une dépression locale dans le spectre, à l'endroit précis où ce spectre est maximal sans absorption.

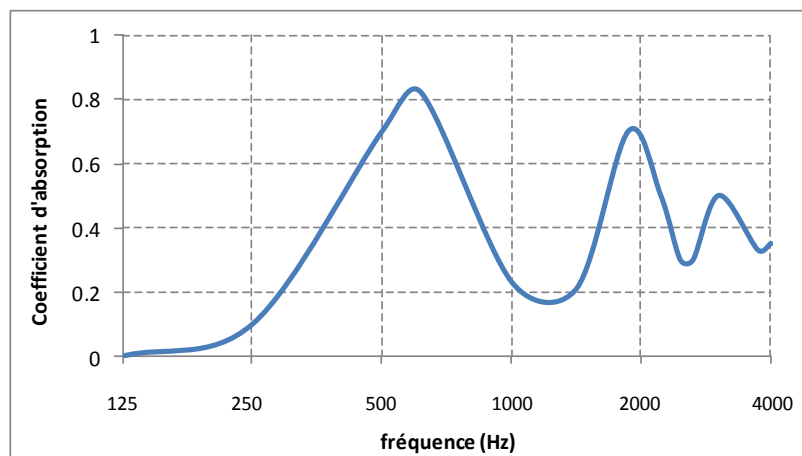


Figure 48 : Courbe du coefficient d'absorption d'un revêtement BBDr [27]

La figure ci-dessus fournit la courbe d'absorption relative à un revêtement en BBDr bicouche. Une courbe d'absorption indique le pourcentage d'énergie acoustique incidente absorbée aux différentes fréquences acoustiques. La courbe d'absorption représentée ici affiche une série de pics : à 700 Hz, 1900 Hz et 3500 Hz. A ces fréquences, le bruit est fortement absorbé par le revêtement routier. C'est surtout le pic enregistré à la fréquence la plus basse qui est intéressant dans le cas du trafic routier. Il est capital que la courbe d'absorption présente un pic dans le domaine du spectre où le spectre du bruit de roulement est maximal (500 à 1000 Hz si les vibrations des pneus sont la source sonore dominante, comme c'est le cas avec le BBDr). Si ce n'est pas le cas, l'absorption n'est guère utile.

2.3.3. Effet de ventouse (air pumping)

Il se produit surtout sur des revêtements très lisses. Un pneu qui roule sur une surface lisse (du béton non traité, par exemple) produit assez bien de bruit (figure ci-

dessous à gauche). La partie du pneu qui touche le revêtement (la zone de contact) joue un rôle important en la matière. L'air est comprimé à l'avant dans le relief du pneu et s'échappe en produisant du bruit. À l'arrière de la zone de contact, l'air est aspiré dans les creux du profil des pneus. Ce phénomène n'est pas observé ou est largement atténué sur une surface qui présente des irrégularités (saillies et creux) de 5mm de dimensions horizontales (BBDr, par exemple). Dans ce cas, l'air peut en effet s'échapper horizontalement entre les irrégularités avant d'être comprimé et il n'y a pas, pour cette même raison, d'effet d'aspiration bruyant à l'arrière de la zone de contact (figure ci-dessous au milieu). Une surface poreuse, c'est-à-dire munie de trous verticaux, offre une alternative en la matière. L'expulsion et l'aspiration de l'air se déroulent alors verticalement et de façon silencieuse, via les trous du revêtement (figure ci-dessous à droite) [27].

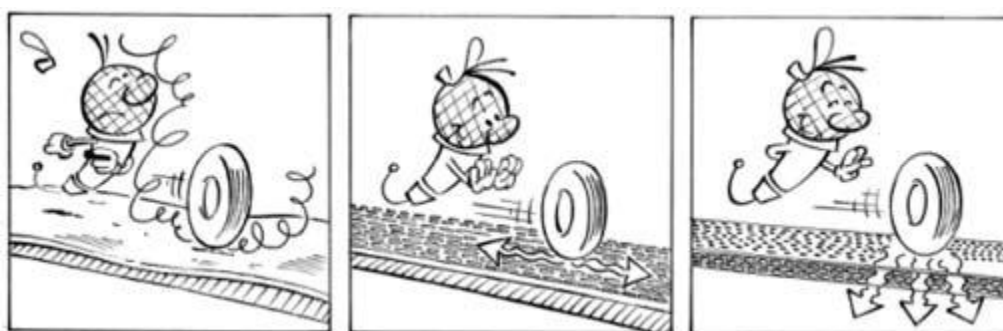


Figure 49 : Bruit dû au phénomène d'air pumping

2.4. Les méthodes de mesure du niveau de bruit

2.4.1. Procédure de mesure au passage

Ces procédures consistent à mesurer le niveau de bruit à proximité de la voie : 7,5 m de l'axe de la voie et 1,20 m de hauteur (figures ci-dessous) lors du passage d'un échantillon de véhicules du trafic : Véhicule Maîtrisé (VM) (NF S31 119-2) ou de véhicules d'essai pris isolément Véhicule Isolé (VI) (NF S31 119).

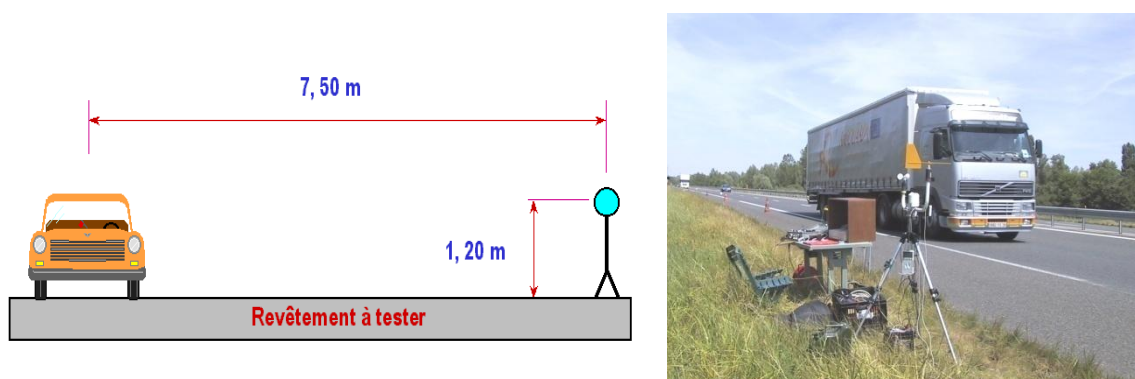


Figure 50 : Principe de méthode au passage

Le niveau de bruit en fonction du temps d'un véhicule est typiquement tel que le montre la figure suivante :

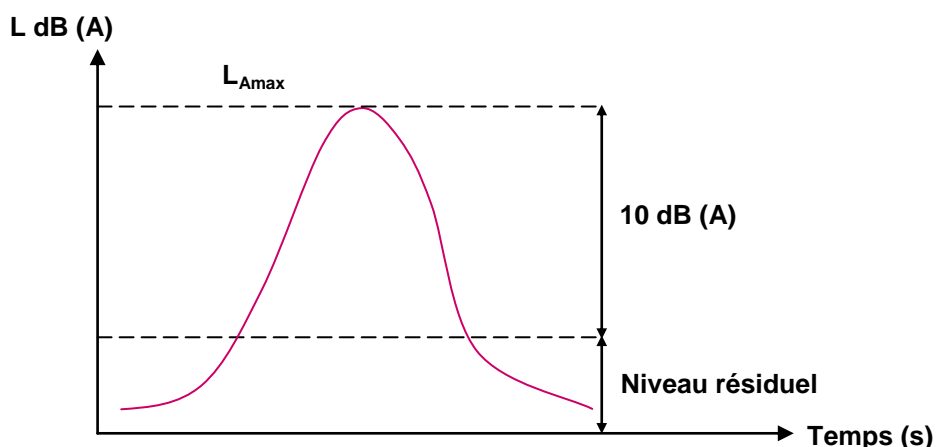


Figure 51 : Niveau de bruit en fonction du temps

Les revêtements routiers se présentent en trois classes selon le niveau sonore pour chaque classe :

- < 76 dB(A) : peu bruyants
- 76 < < 78 dB(A) : Intermédiaires
- >78 dB(A) : bruyants

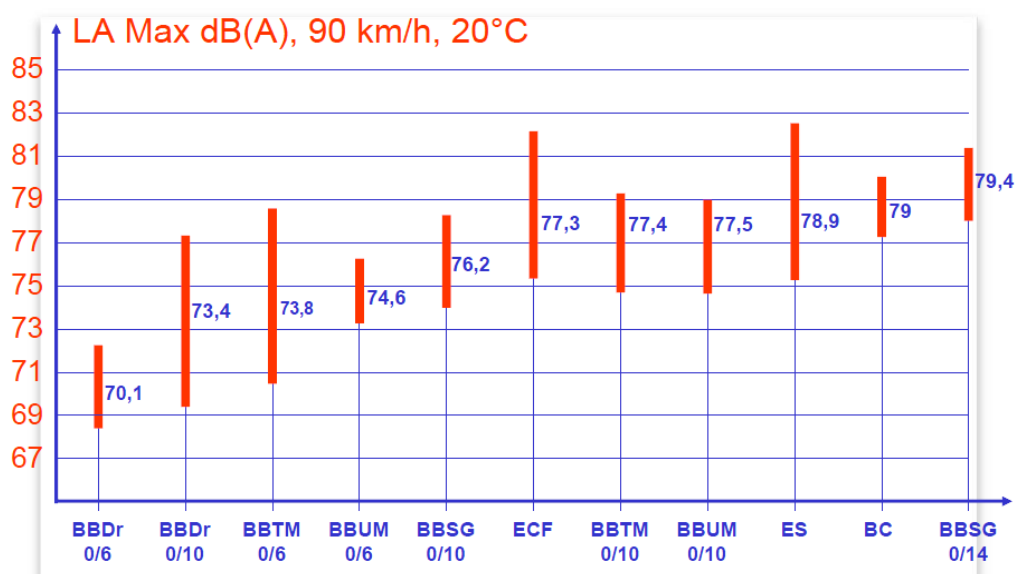


Figure 52 : Niveaux sonores à 90 km/h pour différents types de revêtements routiers

2.4.2. Procédure de mesure en continu

Cette mesure réalisée en champ proche permet d'évaluer les performances acoustiques d'un revêtement. Elle permet aussi de déterminer l'homogénéité d'un revêtement et de localiser des imperfections acoustiques.

La méthode mise en œuvre permet une mesure sous circulation sur réseau routier inter-urbain comme urbain. Elle distingue trois types d'application de la mesure en continu du bruit de contact pneumatique/chaussée :

- la caractérisation des performances acoustiques d'une formule de revêtement (module M1).
- la vérification de la conformité des performances acoustiques de la couche de roulement d'une chaussée (module M2)
- le diagnostic de la qualité acoustique des revêtements d'un réseau routier (module M3)

La mesure en continu est réalisée à l'aide de trois microphones placés à proximité du pneumatique d'essai d'un véhicule en circulation. Le détail de la localisation des microphones est présenté dans la figure suivante.

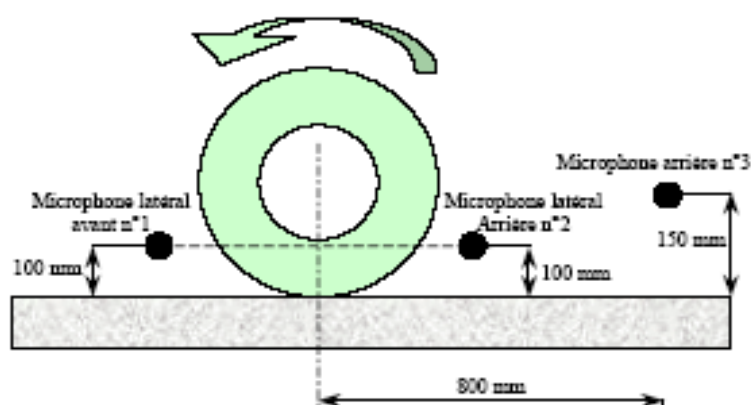


Figure 53 : Dispositif de mesure en continu

En fonction de l'objectif de la mesure, il est réalisé un ou plusieurs passages. Le déclenchement de la mesure est fait en début de planche de façon à ce que tous les passages soient synchronisés. Chaque passage se fait à vitesse constante. Les plages de vitesse balayées sont fonctions du type d'utilisation de la mesure et sont définies dans les modules spécifiques.

Les limites d'usage de cette méthode sont liées principalement aux conditions météorologiques (température, humidité de la chaussée,...), aux contraintes de site et de sécurité...etc.

Les méthodes au passage et en continu restent complémentaires tout particulièrement dans le cas de la caractérisation acoustique d'une formule de revêtement intégrée à un avis technique.

2.5. Les caractéristiques d'un revêtement routier silencieux

On peut dire que le revêtement idéal d'un point de vue acoustique présente les trois caractéristiques suivantes [27] :

a) Une macrotecture suffisante :

Profondeur de texture moyenne d'au moins 0,5 mm. Celle-ci s'obtient avec une structure homogène, non-périodique de granulats de calibre maximal 10mm ou avec une structure ouverte (poreuse) de la couche de roulement. Une structure ouverte de l'enrobé est obtenue lorsqu'il contient 20 à 25 % de vides reliés entre eux (typique du BBDr).

b) Le moins de mégatexture :

Pour éviter les vibrations des pneus. Dans le cas du béton bitumineux, la mégatexture se manifeste assez souvent en raison des deux causes suivantes :

- **L'usure** : Elle se manifeste par des trous, des fissures dans la couche de roulement, une surface irrégulière due à l'érosion, des bosses en raison de réparations peu soignées, qui provoquent des inégalités ayant des dimensions de mégatexture. Les revêtements routiers présentant une texture très ouverte comme le BBDr perdent progressivement leurs bonnes qualités acoustiques initiales, à cause de l'obstruction des creux d'une part, et du détachement d'agrégats de la couche supérieure d'autre part. L'évolution est très rapide dans certains cas et lente dans d'autres. Il faut s'attendre à une augmentation du niveau sonore de 3 dB(A) maximum pendant les quatre premières années. Il faut veiller tout particulièrement à éviter une mégatexture lorsque l'on pose un tel revêtement.
- **Une répartition hétérogène de granulats** : principalement les gros granulats, à la surface. Une alternance de groupes de granulats et de parties lisses forme des structures de dimensions typiques dans le domaine de la mégatexture.

c) Une bonne absorption sonore du revêtement :

Pour des bruits situés entre 500 et 1000 Hz. Les propriétés d'absorption acoustique procurent une diminution du bruit du moteur des voitures aux basses vitesses et de celui des véhicules plus lourds aux basses et moyennes vitesses.

Le recours à des revêtements de chaussées silencieux présente un intérêt majeur. A titre illustratif, le tableau ci-dessous présente brièvement les pistes de réduction du bruit des principales sources de bruit des véhicules légers [27].

Vitesse VL	Source(s) dominante du bruit du véhicule	Moyens d'actions
< 30 km/h	Bruit du groupe moto propulseur	Gestion des accélérations et régime « moteur » par le conducteur
		Moteur hybride
		Moteur électrique
> 30 km/h et < 50km/h	Bruit de contact pneumatique / chaussée et bruit du groupe moto propulseur	Pneumatique plus silencieux
		Revêtement de chaussée silencieux
		Comportement du conducteur
		Moteur hybride
> 50 km/h	Bruit de contact pneumatique / chaussée	Pneumatique plus silencieux
		Revêtement de chaussée silencieux (impact accru pour les véhicules électriques)

Tableau 4 : Moyens de réduction du bruit d'un véhicule motorisé

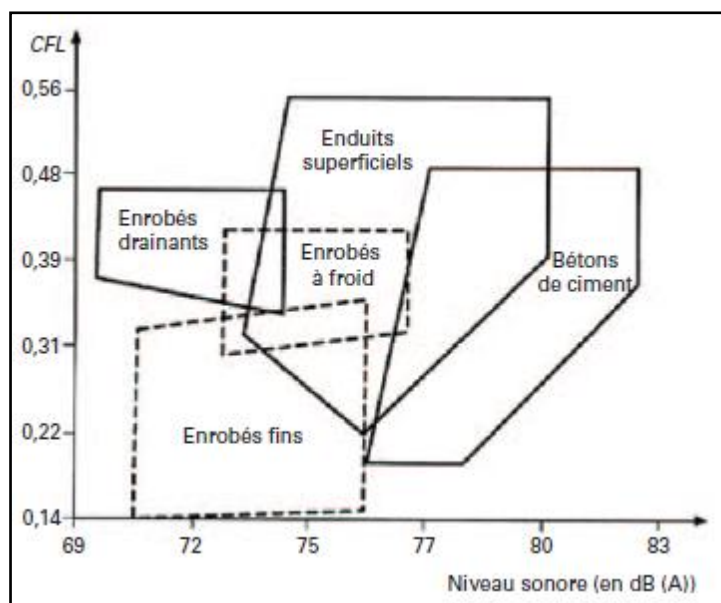


Figure 54 : Niveau sonore selon la procédure LCPC et coefficient de frottement longitudinal à 80km/h pour différents revêtements de chaussées [5]

3. Photométrie des revêtements routiers

Les caractéristiques photométriques d'une surface décrivent le modèle de réflexion de la lumière par la surface. Le revêtement réfléchit une partie de la lumière qu'il reçoit, la clarté caractérise ce phénomène. Plus la clarté est grande, plus la proportion de lumière renvoyé est grande par rapport à la lumière absorbée [25].

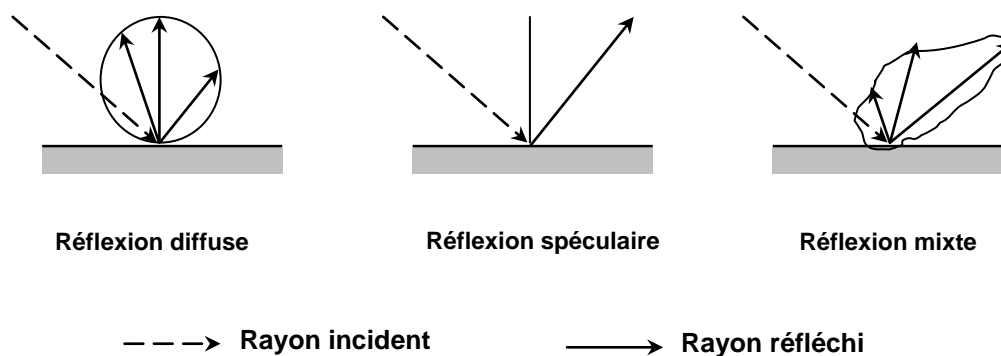


Figure 55 : Les trois modèles de réflexion de la lumière

En outre, un revêtement peut renvoyer la lumière de plusieurs façons :

- Elle peut être réfléchi de façon diffuse, c'est-à-dire dans toutes les directions de l'espace indépendamment de son incidence.
- La lumière peut être réfléchi de manière spéculaire, c'est-à-dire que le revêtement se comporte comme un miroir: il renvoie la lumière dans une direction symétrique de la direction d'incidence.

En réalité les revêtements de chaussée renvoient la lumière des deux façons à la fois : elle est réfléchi dans toutes les directions de l'espace, mais avec une direction privilégiée. C'est un mode de réflexion mixte.

Les caractéristiques photométriques des surfaces routières évoluent dans le temps, sous l'effet du trafic. Dans le cas des chaussées en béton bitumineux, il faut, en fonction de la nature du bitume employé, 6 à 18 mois pour atteindre un état stable sauf dans le cas où l'on procède, lors de la construction de la chaussée, à un décapage de la surface. Les caractéristiques photométriques sont évaluées pour des revêtements secs. La présence d'un film d'eau à la surface du matériau fait considérablement augmenter le phénomène de spécularité, et cela d'autant plus que l'épaisseur du film d'eau est grande, par rapport à la rugosité de la surface du revêtement. Les caractéristiques photométriques sont, aujourd'hui, essentiellement utilisées pour dimensionner les installations d'éclairage public [28].

3.1. Caractérisation photométrique des revêtements

La commission internationale de l'éclairage CIE a décrit le comportement photométrique des revêtements de chaussée. De façon simplifiée, celui-ci peut être caractérisé par deux paramètres [28] :

- le coefficient de luminance moyenne Q_0 , qui rend compte de la clarté de la surface. Il augmente proportionnellement par rapport au pourcentage de lumière reçue qui est réémise.
- le coefficient de spécularité S_1 , qui caractérise l'aptitude du revêtement à renvoyer la lumière dans une direction privilégiée (il augmente d'autant plus que le revêtement a tendance à se comporter comme un miroir).

Une augmentation de la clarté entraîne une augmentation de la luminance moyenne de la chaussée et conduit à une meilleure perception de la route. Une variation de la spécularité agit sur les uniformités en luminance, ce qui peut provoquer une dégradation de la perception de la chaussée.

3.2. Classement photométrique des revêtements

La CIE a défini quatre classes photométriques pour les revêtements, en fonction de la valeur du coefficient de spécularité S_1 . Le tableau suivant indique les valeurs de S_1 retenues pour les quatre classes [25] :

Classe	Condition sur S_1	Revêtement
1	$S_1 < 0,42$	Diffusant
2	$0,42 \leq S_1 < 0,85$	Diffusant
3	$0,85 \leq S_1 < 1,35$	Spéculaire ou très spéculaire
4	$1,35 \leq S_1$	Spéculaire ou très spéculaire

Tableau 5 : Les 4 classes de revêtements définies par la C.I.E en fonction de S_1

Pour chaque classe i un revêtement standard « R_i » est défini, caractérisé par un couple de valeurs $[S_1, Q_0]$ type :

Revêtements standards	Q ₀	S ₁
R ₁	0,10	0,247
R ₂	0,07	0,582
R ₃	0,07	1,109
R ₄	0,08	1,549

Tableau 6 : Valeurs de Q₀ et S₁ pour les 4 revêtements standard

Si on estime que la valeur du coefficient de luminance moyenne Q₀ du revêtement est différente de celle du revêtement standard, les luminances calculées devront être multipliées par un facteur égal à : Q₀ estimé / Q₀ standard.

Un enrobé neuf est habituellement spéculaire (classe R₄) car un film de bitume recouvre les granulats. Sous l'effet de la circulation ce film de bitume s'enlève au bout de quelques mois, et les propriétés photométriques du revêtement se stabilisent.

A noter que les valeurs Q₀ et S₁ sont des caractéristiques photométriques intrinsèques des chaussées, ce qui permet de les identifier du point de vue photométrique. Cependant d'autres paramètres de la chaussée interviennent dans les calculs d'éclairage routier. En effet l'effet perçu par l'automobiliste dépend aussi de son angle de vision et de la répartition spatiale de l'énergie lumineuse de chaque luminaire, appelé solide photométrique.

3.3. Caractérisation de la clarté d'une chaussée

On assimile souvent la chaussée à une surface parfaitement diffusante. En utilisant la loi de Lambert généralisée permettant de passer de la luminance moyenne de chaussée à l'éclairement moyen que doit fournir l'installation d'éclairage, on peut écrire :

$$E = \frac{\pi \cdot L}{c}$$

La clarté « c » réellement perçue par l'automobiliste sous son angle de vision s'exprime alors par le rapport :

$$c = \frac{\pi \cdot L}{E}$$

L : la luminance moyenne, intensité lumineuse émise par la surface de la chaussée vue par l'automobiliste,

E : l'éclairement moyen reçu par la surface de la chaussée.

Ce rapport simple, appelé coefficient de clarté « c », résume les interactions complexes entre les caractéristiques photométriques de la chaussée et celles des luminaires contribuant à l'éclairage de la chaussée.

En considérant que la chaussée est homogène dans sa longueur, tout comme l'est l'installation d'éclairage, il est admis que ce rapport « c » est constant pour une

chaussée et un type d'éclairage donné. Il peut donc prendre des valeurs différentes pour une même chaussée sous un autre type d'éclairage [28].

3.4. Mesure photométrique pour revêtements routiers

Le goniophotomètre est un dispositif conçu en 1983 par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand, et réalisé par le Centre d'Etudes et de Construction des Prototypes (CECP) d'Angers est unique en France. Il a été créé pour la mesure des propriétés réfléchissantes des surfaces routières dans les conditions normales d'observation d'un automobiliste.

L'appareillage permet d'accéder aux coefficients de luminance des revêtements étudiés en tenant compte des paramètres angulaires pouvant influencer cette mesure, c'est-à-dire de la géométrie d'émission de la lumière et de la géométrie d'observation. L'appareil comprend trois éléments distincts :

- l'ensemble mécanique de positionnement de la source lumineuse, de l'éprouvette et du luminancemètre,
- l'ensemble électronique de commande, de mesure et de mise en forme,
- le système de conduite du processus, d'acquisition et de traitement des données.

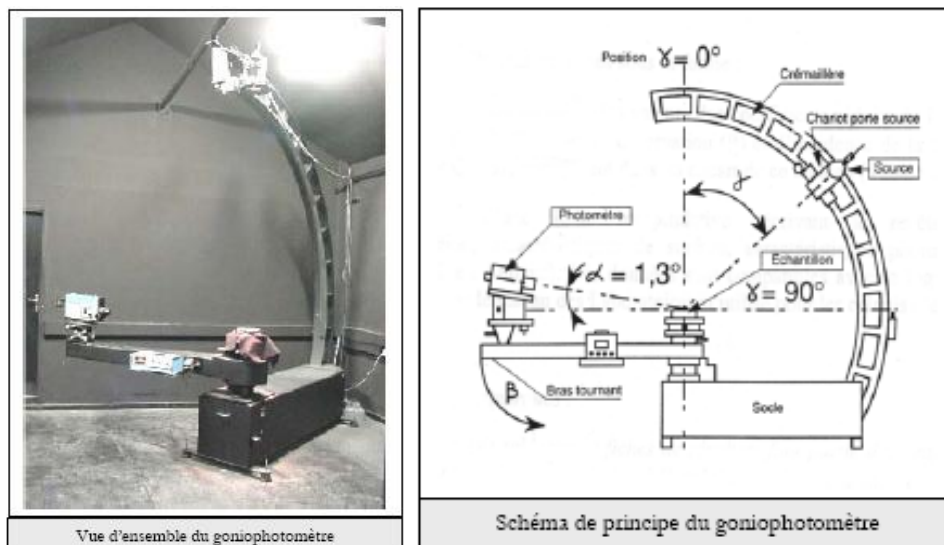


Figure 56 : Le goniophotomètre et son principe de fonctionnement

A titre d'exemple, le tableau suivant présente quelques résultats des coefficients de clarté et de spécularité (Q_0 , S_1) des revêtements de chaussée Français.

Type - formule	Couleur granulat	Nature	Âge	Q ₀	S ₁	Classification CIE
ES 4/6	Gris	Porphyre	0 mois	0,041	0,30	1
			8 mois	0,041	0,61	2
BBTM 0/6	Blanc	Quartzite	0 mois	0,083	4,87	4
			12 mois	0,065	0,72	2
BBTM 0/10	Noir	Grès quartzueux	0 mois	0,094	4,67	4
			12 mois	0,044	0,95	3
BBTM 0/10	Clair	Granulats clairs liant de synthèse	3 mois	0,132	1,32	3
			12 mois	0,124	0,78	2
BBDr 6/10	Gris	Porphyre	0 mois	0,07	3,04	4
			12 mois	0,062	0,86	3
BBDr 4/6	Gris	Porphyre	0 mois	0,055	1,45	4
			12 mois	0,054	0,58	2

Tableau 7 : Quelques résultats des coefficients Q₀ et S₁ [25]

D'après les résultats de tableau, il a été remarqué qu'il y a une évolution des caractéristiques photométriques en fonction de la durée de vie de la route : le trafic permet la stabilisation des valeurs après 6 mois à 1 an de la mise en service de la route. Il a été remarqué aussi que la spécularité des enduits superficiels augmente deux fois plus entre l'état stable et l'état neuf à cause du phénomène d'indentation (enfouissement de l'enduit superficiel dans le support) une fois que la route est circulée et donc la couche superficielle devient plus en plus lisse ce qui explique parfaitement l'accroissement de la spécularité. En revanche, sur les BBTM et BBDr il y a une diminution de la spécularité [25].

SYNTHESE DE LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

Le tableau suivant fourni des éléments indicatifs pour le choix de la couche de roulement d'un revêtement routier :

Critères de comparaison	ESU	ECF	BBUM	BBTM	BBM	BBD _r	BBSG	BBME	Béton de ciment
Adhérence initiale	++	0 à +	+	+	+	+	0	0	+
Adhérence après 5 ans	0 à +	0 à -	+	+	0	+	0 à -	0	0 à +
Drainabilité	+	-	0 à -	0	++	0	-	-	0 à +
Uni	-	--	-	0	+	+	+	+	+
Acoustique	- à --	0	0 à +	+	0 à +	++	0 à +	0 à +	- à 0
Photométrie	++	/	/	/	/	++	-	-	+
Orniérage	/	/	+	+	0	++	0	++	++
++ Très bon + bon 0 moyen - médiocre -- mauvais									

Tableau 8 : Eléments indicatifs pour le choix du revêtement routier [29]



Chapitre IV

TRAVAIL EXPERIMENTAL REALISE SUR TERRAIN



CHAPITRE IV : TRAVAIL EXPERIMENTAL REALISÉ SUR TERRAIN

1. Introduction

Les études faites sur le déroulement des accidents montrent que le défaut d'adhérence contribue à favoriser les accidents lorsque les sollicitations de freinage et d'accélération transversale sont élevées. Ce défaut d'utilisation d'adhérence provient soit des défaillances des caractéristiques du véhicule (freinage, suspension, état des pneus, etc.) soit de celles de l'infrastructure routière.

Pour les ingénieurs routiers, c'est bien évident que les principaux efforts vont être portés par l'infrastructure. Parmi les caractéristiques de l'infrastructure routière influençant sur l'adhérence, la nature de la couche de roulement est la plus importante.

Cette partie expérimentale présente les résultats d'un suivi réalisée sur la capacité d'adhérence de différents tronçons accidentogènes du réseau routier de la wilaya de Guelma notamment sur la RN 20, RN 21 et RN 80. En effet, l'adhérence est un des critères rentrant en ligne de compte lorsque les chargés d'études en sécurité routière doivent réaliser un diagnostic d'itinéraires. Or, il est rare que ce genre de diagnostic se fait sur le réseau Algérien, si cela n'est pas le cas, on manque généralement de données d'adhérence correspondant à la situation réellement rencontrée par l'usager lors d'un accident. Ce phénomène met en jeu un grand nombre de paramètres liés à la fois à l'infrastructure (microtexture et macrotexture du revêtement de chaussée notamment), au véhicule et au conducteur.

Ce travail se scinde en deux parties : la première partie se rapporte à une présentation du réseau routier Algérien plus précisément celui de Guelma avec la description des différents types de structures utilisées.

La deuxième conduite sur terrain traite l'incidence du manque d'adhérence sur le risque d'accident. Elle s'appuie sur le bilan des résultats d'essai sur divers tronçons des routes nationales.

2. Réseau routier

2.1. Hiérarchisation du réseau routier national

Le dimensionnement des structures de chaussée fait appel au choix de la politique de gestion du réseau routier. Cette politique est définie par le maître de l'ouvrage en fonction de la hiérarchisation de son réseau routier. Ceci se traduit par un classement en type de réseaux routiers regroupant des routes de même catégories du point de vue trafic et considérations socio-économiques [30].

2.1.1. Réseau principal noté RP

Il se compose des routes reliant les chefs-lieux de wilaya, les ports, aéroports et les postes frontaliers ainsi que les principales agglomérations et importantes zones industrielles. Ce réseau principal se décompose en deux niveaux :

a) Le réseau principal de niveau 1 (RP1)

Il s'agit essentiellement d'un réseau composé de routes nationales (RN), il est composé de :

- liaisons supportant un trafic supérieur à 1500 véhicules / jour,
- liaisons reliant deux chefs-lieux de wilaya,
- liaisons présentant un intérêt économique et/ou stratégique.

Les routes concernées sont celles de :

- catégorie 1 : TMJA > 4500v/j
- catégorie 2 : 3000v/j < TMJA < 4500v/j
- catégorie 3 : 1500 v/j < TMJA < 3000v/j

b) Le réseau principal de niveau 2 (RP2)

Il est constitué de liaisons supportant un trafic inférieur à 1500 véhicules/jours. Il est composé de routes nationales (RN), de chemins de wilaya (CW) et de liaisons reliant l'Algérie aux pays riverains.

2.1.2. Réseau secondaire noté RS

Il se compose du reste des routes qui ne sont pas classées en réseau principal.

2.2. Choix de la couche de roulement

Le choix de la couche de roulement est fait en fonction du niveau de réseau principale comme suit [30] :

- **RP1** : couche de roulement en béton bitumineux (BB), les épaisseurs sont modulées en fonction de la classe de trafic (TPLi) et du type de structure de l'assise de chaussée.
 - 6 à 8 cm de BB pour les structures traitées au bitume (GB/GB, GB/GNT...)
 - 6 à 10 cm de BB pour la structure GL/GL (GL : Grave laitier)
- **RP2** : couche de roulement en enduit superficiel (ES) ou enrobé coulé à froid (ECF) en fonction du matériau choisi en assise de chaussée et de la zone climatique correspondante.

2.3. Consistance du patrimoine routier

Le réseau routier qui irrigue l'Algérie comporte aujourd'hui, 112 696 km de routes dont 85 360 km sont revêtues soit 77 % du réseau et 4910 ouvrages d'art, ce réseau est formé de [31] :

- Autoroute Est-Ouest : 1 216 km ;

- Routes nationales : 29 280km dont 26 087 km revêtus ;
- Chemins de wilayas : 23 771 km dont 22 027 km revêtus ;
- Chemins communaux : 59 645 km dont 37 246 km revêtus.

En Algérie, la route reste l'infrastructure de transport utilisée par excellence (90% des échanges commerciaux et de voyageurs). Cette sollicitation intensive induit, toutefois, des conséquences plus ou moins lourdes sur l'état de la chaussée et accélère le processus de dégradation.

2.4. Réseau routier de la wilaya de Guelma

- Autoroute (Est-Ouest) : 1,9 km ;
- Routes nationales : 293,4 km ;
- Chemins de wilaya : 421,05 km ;
- Chemins communaux : 1550 km ;
- Ouvrages d'art : 127 unités.



Figure 57 : Réseau routier de la wilaya de Guelma

3. Démarche de travail et essais effectués

Nous avons effectué plusieurs campagnes d'essai sur les routes de la wilaya de Guelma en particulier les routes nationales. Ce choix a été guidé par le nombre important d'accidents sur différents tronçons de ces routes (points noirs). En effet à partir des statistiques établis par la gendarmerie nationale, nous avons choisie quelques points noirs sur lesquels nous avons effectué les mesures d'adhérence à l'aide du pendule S.R.T.

3.1. Statistiques des accidents

Un accident de la route est rarement imputable à un seul facteur. Les spécialistes de l'accidentologie soutiennent l'idée que le comportement de l'automobiliste est prépondérant alors que les ingénieurs routiers défendent le fait qu'une bonne adhérence sur chaussée humide est très importante.

Il est donc nécessaire que la couche de roulement d'une structure routière garantisse une adhérence suffisante sur une certaine période afin de contribuer par des mesures techniques à la sécurité routière.

Une visite des lieux et une confrontation des données d'accidents, des données d'infrastructure et de comportement sont nécessaires pour l'établissement d'un diagnostic et d'un programme de proposition d'aménagements. Ces derniers sont soit ponctuels pour le traitement d'un problème localisé, soit à caractère global pour les problèmes se posant de façon systématique sur tout ou une partie du tronçon routier. Le choix des actions de sécurité découle de l'identification des facteurs de mécanismes à l'origine des accidents [32].

Les statistiques des accidents de la wilaya de Guelma à partir des données de la gendarmerie nationale des années 2011, 2012 et 2013 sont fournies dans le tableau ci-dessous. A partir de ce tableau, on remarque une croissance continue du nombre d'accidents dans la wilaya et par conséquent un nombre de victimes plus important.

Année	Accidents corporels	Accidents mortels	Accidents matériels	Total des accidents	Victimes	Blessés	Morts
2011	387	33	37	457	819	781	38
2012	404	41	16	461	898	855	43
2013	469	37	25	531	1131	1077	54

Tableau 9 : Statistiques des accidents de la route durant les 3 années 2011, 2012 et 2013

D'après les enquêtes des services de sécurité routière, réalisées au moment de l'accident, les causes principales présumées sont résumées dans le tableau suivant :

Causes principales	Année		
	2011	2012	2013
Causes dues au conducteur	220	442	441
Cause dues aux passagers	50	46	35
Causes dues à la route et à l'environnement	29	57	34
Causes dues aux véhicules	35	31	21
Global	334	576	531

Tableau 10 : Recensement des accidents suivant les causes générales de la zone

Ce qui nous intéresse en particulier dans ce tableau c'est les causes dues à la route et à l'environnement qui représentent environ 8% du nombre global d'accidents. Ce pourcentage n'est pas complètement vrai car peu d'accidents font l'objet d'enquête approfondie où des tests de la chaussée sont réalisés (exemple : Uni, adhérence,...). Pour cela, nous avons essayé, à travers les tests réalisés sur les tronçons de routes qui ont fait l'objet d'accidents (points noirs), d'amener des éléments nouveaux à ces enquêtes pour les enrichir et prévenir les services concernés des dangers causés par un mauvais potentiel de glissance de la chaussée.

3.2. Matériels de mesures (Pendule S.R.T)

La microtexture d'un revêtement peut être évaluée à l'aide du CFL obtenu à partir du pendule S.R.T (Skid Resistance Tester) (NF P 18-578). Cet appareil est utilisé dans plusieurs pays pour mesurer le frottement sur des zones limitées (environ 0,5 dm²).

3.2.1. But de l'essai

L'essai permet d'apprécier un aspect de la rugosité d'une surface par frottement d'un patin de caoutchouc sur cette surface. Le but est donc de mesurer un coefficient de frottement qui est par définition, la moyenne divisée par cent d'un certain nombre de lectures effectuées sur le cadran du pendule.

Plus l'adhérence rencontrée par le patin est élevée et moins le bras du pendule remonte après frottement.

3.2.2. Principe de l'essai

Un pendule porte à son extrémité un patin de caoutchouc frottant pendant l'essai sur la surface à mesurer. Pendant le frottement un ressort applique le patin sur cette surface avec une force déterminée. Un dispositif de réglage permet de maintenir la longueur de frottement dans des limites déterminées (cf. figure ci-dessous). La hauteur maximale de remontée du pendule, qui dépend de l'énergie absorbée par frottement, est repérée par une aiguille placée devant un cadran gradué directement en coefficient de frottement longitudinal (CFL) mesurés avec le pendule.

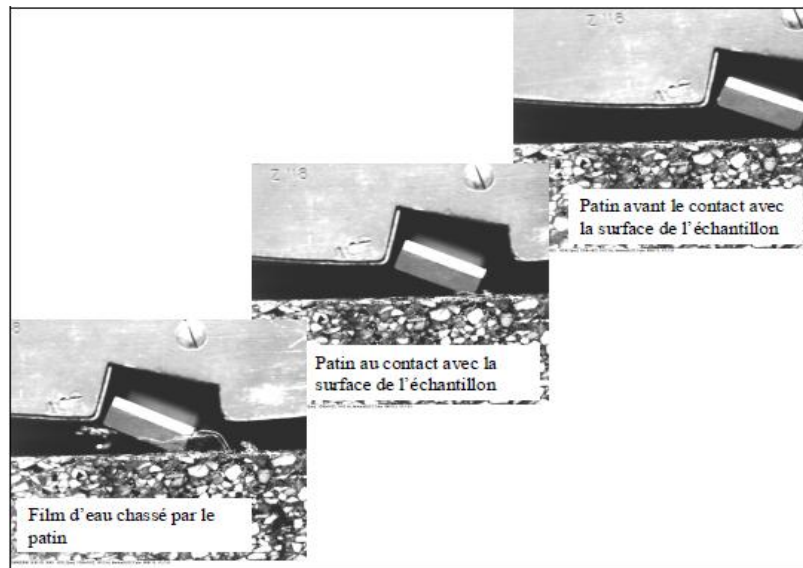


Figure 58 : Visualisation du contact entre un patin de gomme et une surface de chaussée

3.2.3. Appareillage

Le pendule de frottement est composé d'un bâti sur lequel est fixé un pendule dont l'extrémité porte un patin de caoutchouc. L'ensemble pèse 10 kg et est constitué des principaux éléments suivant :

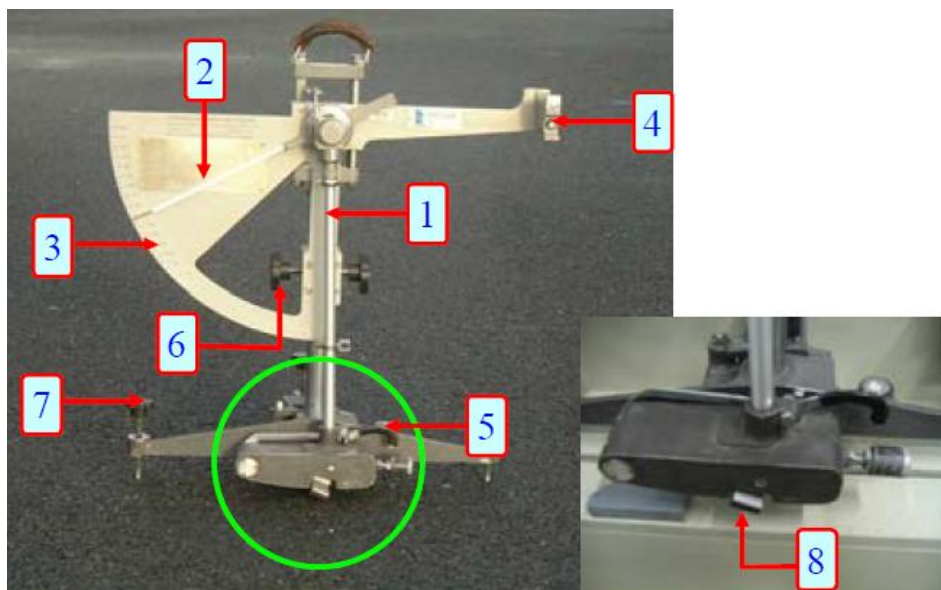


Figure 59 : Eléments constituant le pendule S.R.T

1. pendule (rayon de 500 mm) ; 2. Aiguille ; 3. Cadran gradué : échelle C (longueur de glissement de 126 mm), échelle F (longueur de glissement de 76 mm) ; 4. Point d'accrochage du pendule à l'horizontale et bouton de déclenchement ; 5. Niveau à bulle ; 6. Vis de réglage vertical ; 7. Vis de mise à niveau ; 8. Patin en caoutchouc.

3.2.4. Exécution de l'essai

La détermination de la valeur pendulaire (CFL) est obtenue de la façon suivante :

1. Réglage à zéro, le pendule n'étant soumis à aucun frottement ;

2. Réglage de la longueur de frottement qui doit être comprise entre 124,5 et 127mm ;
3. Le pendule est verrouillé en position horizontale ;
4. Le pendule est ensuite libéré pour effectuer la mesure. Une valeur est repérée par l'aiguille d'indication, ce qui permet de lire directement le coefficient de frottement mesuré par le pendule. Cette dernière opération doit être répétée à différents endroits de la chaussée.

3.2.5. Expression des résultats

Pour une surface donnée, la valeur du CFL est égale à la moyenne de 5 points de mesures élémentaires avec la réalisation sur chacun d'eux 5 lâchers.

On calcule la moyenne brute des lectures des lâchers individuels pour les cinq emplacements successifs. La moyenne générale des lectures subit une correction du zéro et une correction de la température (tableau ci-dessous).

Température °C	0	2	5	8	10	13	15	20	25	30	40
Correction	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3

Tableau 11 : Correction de la température

Après correction, le résultat final exprime le CFL mesuré avec le pendule. Ce résultat doit être comparé avec le CFL de la norme B40 [33] afin de vérifier la conformité du résultat obtenu avec les recommandations de la norme. Les valeurs du CFL selon la norme B40 sont variables avec la vitesse (tableau ci-dessous) :

V (km/h)		120	100	80	60	40
		Catégorie				
Cat 1 - 2	CFL	0,33	0,36	0,39	0,42	0,45
Cat 3 - 4 - 5	CFL	0,36	0,40	0,43	0,46	0,49

Tableau 12 : Valeurs des coefficients CFL selon la norme B40

3.3. Campagnes de mesures

Au total, cinq (5) campagnes d'essai avec le pendule S.R.T ont été réalisées au niveau des points accidentogènes des routes nationales 20, 21 et 80. Le but de ces campagnes est de connaître le niveau d'adhérence des différents points noirs afin d'encourager l'amélioration du réseau routier de la Wilaya de Guelma. Il faut préciser ici qu'une zone d'accumulation d'accidents (ou points noirs) est une section de route de 200 m de longueur minimum où se sont produits au moins 10 accidents au cours de 5 années [32].



Figure 60 : Photo prise au cours d'une mesure du CFL sur la RN20

Les trois premières campagnes se sont déroulées sur la route nationale 20 reliant Guelma avec Constantine (sortie Est de la ville). Cet itinéraire est emprunté par des milliers de véhicules par jours (transport de voyageurs, échanges commerciaux et touristiques,...), de ce fait, cette route présente un trafic élevé (TMJA fourni dans le tableau ci-dessous). La première campagne de la RN 20 a été réalisée au niveau du premier virage à droite après la station-service de Séraïdi entre le PK91+600 et le Pk91+800. La deuxième campagne a été effectuée au dernier virage à droite avant d'arriver à Medjez Amar entre le PK82+750 et le Pk83+000. Concernant la troisième campagne de la RN 20, elle a été effectuée au niveau du virage à droite entre le PK76+600 et le Pk76+850 avant d'arriver à Houari Boumediene.

La quatrième campagne a été effectuée sur la RN 21 reliant Guelma avec Annaba entre le PK48+500 et le Pk49+000 (entre Guelma et Héliopolis). Ce tronçon est un double virage (à gauche ensuite à droite) situé sur une rampe (10%).

Enfin, la dernière campagne a été menée sur la RN 80 reliant Guelma avec Skikda. Les mesures ont été précisément effectuées à ELfedjoudj entre le PK43+850 et le Pk44+000.

Il faut préciser que la couche de roulement de la RN20 et la RN21 (réalisé respectivement en 2006 et 2011 par ALTRO-Annaba) ainsi que la RN80 (réalisé en 2012 par Eldjazeera Elarabiya) est un BB 0/14. Les différentes fractions granulaires proviennent de la carrière de Bouzitoune, ainsi que le bitume de classe 40/50.

Année 2013	RN 20	RN 21	RN 80 Nord	RN 80 Sud
TMJA (v/j)	12700	15500	8200	3000
% Poids Lourds (PL)	40	30	28	28

Tableau 13 : TMJA des différentes routes concernées par les campagnes d'essai

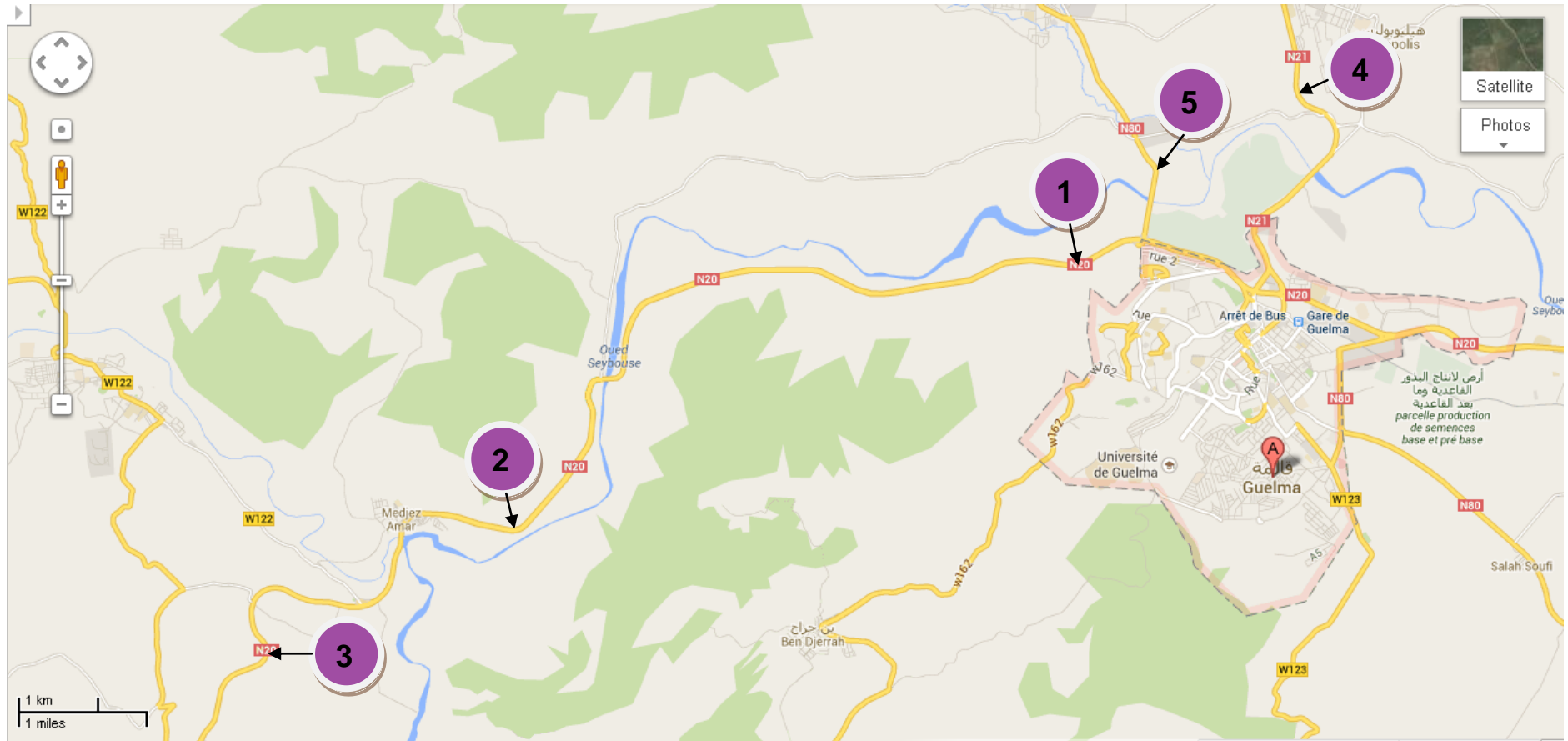


Figure 61 : Positions des mesures effectuées durant les 5 campagnes d'essais

4. Résultats et discussions

4.1. Campagne d'essai N°1

Le tronçon de la RN20 entre Guelma et Medjez Amar est un 2x2 voies. Les résultats du **CFL mouillé** (cas le plus défavorable) obtenus pour les 4 voies sont présentés dans le tableau ci-dessous. Les positions des points de mesures sur les voies sont illustrées dans la figure ci-après.

Point de mesure	Guelma vers Constantine		Constantine vers Guelma	
	Voie droite	Voie gauche	Voie droite	Voie gauche
Point N°1	41,00	51,00	38,60	44,33
Point N°2	39,33	50,66	35,33	40,00
Point N°3	34,33	49,33	/	35,33
Moyenne (%)	38,22	50,33	36,96	39,88
Lecture corrigée (%)	40,07	52,18	38,56	41,73
CFL mouillé	0,40	0,52	0,38	0,42

Tableau 14 : Résultats de la 1^{ère} campagne d'essai

Pour chaque voie, nous constatons une variation marquée des CFL en fonction des différents points.

Dans la direction Guelma-Constantine, sur la voie de droite nous voyons une diminution progressive du coefficient de frottement tout au long du virage abordé, de même sur la voie de gauche. Cela est peut être expliqué par l'influence de la force centrifuge qui a tendance à augmenter progressivement entre l'entrée et le plein virage. A la sortie du virage les véhicules reprennent l'accélération ce qui sollicite encore le revêtement et diminue par conséquent l'adhérence.

L'écart entre les valeurs du CFL des deux voies (gauche et droite) est assez conséquent d'environ 0,12 en moyenne, ce qui montre que la voie de droite est plus sollicitée que la voie de gauche. Cet écart peut être expliqué par l'influence des poids lourds qui ont tendance à prendre la voie de droite plus que la voie de gauche (virage difficile). De même, les conducteurs des véhicules légers préfèrent aussi emprunter la voie de droite pour une meilleure négociation du virage.

Toutes les remarques faites précédemment sont valables dans la direction Constantine-Guelma, l'écart entre les valeurs du CFL étant de l'ordre de 0,04. On constate aussi que parmi les quatre voies, celle de droite dans la direction Constantine-Guelma présente le coefficient de frottement le plus faible.

La RN 20 avec un TMJA de 12700 v/j, est une route de catégorie 1. La vitesse est limitée dans le virage à 40 km/h. Le coefficient de frottement admissible d'après le B40 pour cette route est égal à « 0,45 ». On remarque que seule la voie de gauche dans la direction Guelma-Constantine a un CFL supérieur à la valeur réglementaire comparativement aux autres qui présentent un défaut d'adhérence.

A vitesse supérieure (60 km/h) le CFL préconisé doit être supérieure ou égale à 0,42, dans ces conditions le véhicule ne risque pas de déraiper sur les deux voies de gauche dans les deux sens. En revanche, le risque est toujours existant pour les deux voies de droite.

Par temps de pluie avec un effort de freinage brutale, ce virage constitue donc un véritable danger pour les automobilistes ce qui explique le nombre important d'accidents au niveau de ce virage.



Figure 62 : Positons des essais sur la RN20 (1^{ère} campagne d'essai)

4.2. Campagne d'essai N°2

A partir des résultats présentés dans le tableau ci-dessous, nous remarquons une variation aléatoire du coefficient de frottement tout au long du virage pour chaque voie mais avec un écart relativement modéré. Cela peut être expliqué par l'effet aléatoire du trafic sur chaque voie (dépassement de véhicule sur le virage, changement de position des véhicules dans le virage,...).

Point de mesure	Guelma vers Constantine		Constantine vers Guelma	
	Voie droite	Voie gauche	Voie droite	Voie gauche
Point N°1	45,00	55,60	50,00	40,25
Point N°2	47,00	59,00	49,75	40,75
Point N°3	45,66	55,40	46,25	40,50
Point N°4	44,50	56,00	/	/
Point N°5	49,20	51,00	/	/
Moyenne	46,27	55,40	48,66	40,50
CFL corrigé	45,37	54,50	47,76	39,60
CFL mouillé	0,45	0,54	0,48	0,40

Tableau 15 : Résultats de la 2^{ème} campagne d'essai

Les résultats montrent des différences entre les deux voies (gauche et droite) pour le même sens. Pour la direction Guelma-Constantine la voie de droite présente un CFL inférieure à celui de gauche (écart de 0,09), cela montre que la voie de droite est plus sollicitée que la voie de gauche. En revanche, pour le sens Constantine-Guelma c'est l'inverse c'est-à-dire que la voie de gauche est plus sollicitée par rapport à la voie de droite (écart de 0,08). Cela peut être lié à deux causes, d'une part, les véhicules ont tendance à rouler à gauche car le virage est à gauche dans le sens Constantine-Guelma (coupure de virage), et d'autre part, nous avons remarqué une stagnation d'eau de pluie (marécage à cause d'un mauvais drainage routier) sur cette voie de gauche et donc un vieillissement plus rapide de la chaussée. Cette dernière hypothèse est également soutenue par le fait que cette voie présente le CFL le plus bas des 4 voies (0,40).

La vitesse dans ce virage est limitée à 60 km/h, le CFL admissible selon le B40 doit être supérieur ou égale à 0,42. Nous constatons que toutes les voies ont un CFL acceptable sauf celle de gauche dans la direction Constantine-Guelma.



Figure 63 : Positions des essais sur la RN20 (2^{ème} campagne d'essai)

4.3. Campagne d'essai N°3

Les résultats des mesures effectuées durant la 3^{ème} campagne d'essai sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Point de mesure	Guelma-Constantine	Constantine-Guelma
Point N°1	41,0	40,0
Point N°2	48,8	35,2
Point N°3	40,6	33,6
Point N°4 (Partie refaite du revêtement)	32,6	42,2
Point N°5	44,0	41,0
Moyenne	41,4	38,4
CFL corrigé	42,3	39,3
CFL mouillé	0,42	0,39

Tableau 16 : Résultats de la 3^{ème} campagne d'essai

Nous remarquons que la valeur du CFL diffère d'un point de mesure à l'autre et cela dans les deux sens de circulation (route bidirectionnelle) ce qui montre une hétérogénéité du revêtement de la chaussée sur ce tronçon de route.

Nous avons constaté au cours des essais qu'au niveau du point de mesure N°4 le revêtement a été refait sur 7 à 8 m de long suite à un affaissement de la chaussée (glissement du remblai supportant la route). Ce point présente la valeur la plus faible du CFL comparativement aux autres valeurs, ce qui peut être expliqué par une qualité inférieure et/ou la mise en œuvre du béton bitumineux de la partie refaite de la chaussée par rapport au revêtement d'origine.

Sur l'ensemble des autres 4 points de mesure, l'hétérogénéité du revêtement peut être expliquée par la géométrie de la section concernée. En effet, selon que l'on soit en début, plein ou fin de virage, nous avons une variation de la déclivité (pente ou rampe selon le sens de circulation) et du dévers. Ces deux paramètres ont certainement une incidence direct sur la répartition des sollicitations du au trafic sur la surface de la chaussée. Nous avons remarqué que la valeur la plus faible se trouve en plein virage (point N°3).

La vitesse réglementaire sur ce tronçon est de 80 km/h, le coefficient de frottement admissible pour cette route est égal à 0,39. Nous observons que les valeurs du CFL sont satisfaisantes par rapport à la valeur préconisée par le B40 pour les deux voies.



Figure 64 : Positions des essais sur la RN 20 (3^{eme} campagne d'essai)

4.4. Campagne d'essai N°4

Les résultats obtenus au lieu dit « Kaf elboumba » sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Point de mesure	Guelma - Héliopolis	Héliopolis - Guelma
Point N°1	25,0	25,8
Point N°2	25,0	25,2
Point N°3	22,4	24,4
Point N°4	21,0	17,0
Point N°5	21,2	17,25
Point N°6	17,25	17,4
Point N°7	15,5	18,8
Moyenne	21,05	20,83
CFL corrigé	20,6	20,38
CFL mouillé	0,20	0,20

Tableau 17 : Résultats de la 4^{ème} campagne d'essai

Nous observons une décroissance de la valeur du coefficient de frottement tout au long de ce long tronçon constitué de deux virages (à gauche puis à droite dans le sens Guelma – Héliopolis). Les valeurs du coefficient sont remarquablement très faible comparativement aux autres routes. La valeur la plus petite affichée par le pendule étant de 15,5. On pourrait imputer cela au fort trafic existant sur cette route et à l'influence de la déclivité (effort de freinage dans la pente, effort de traction dans la rampe) qui ont usé très rapidement ce tronçon (revêtement refait en 2011).

La RN21 avec un TJMA de 15500 v/j est une route de catégorie 1, la vitesse est limitée sur ce tronçon à 60km/h. Le CFL admissible pour cette route est de 0,42. Le CFL mesuré est très bas (0,20) par rapport à cette valeur admissible, de ce fait cette route représente un grand danger pour les usagers et nécessite au plus vite une intervention de la part des gestionnaires de cette route pour améliorer l'adhérence.



Figure 65 : Positions des essais sur la RN 21 (4^{eme} campagne d'essai)

4.5. Campagne d'essai N°5

A partir des résultats présentés dans le tableau ci-dessous, nous remarquons une diminution du CFL pour les deux voies le long du virage dans le sens de Guelma.

Point de mesure	Elfdjoudj – Guelma	Guelma – Elfdjoudj
Point N°1	34,8	38,6
Point N°2	33,2	27,0
Point N°3	27,0	28,4
Moyenne	31,66	31,33
CFL corrigé	31,21	30,88
CFL mouillé	0,31	0,31

Tableau 18 : Résultats de la 5^{ème} campagne d'essai

Cette route est très empruntée par les gros porteurs étant à proximité d'une zone de production agricole et d'usines (groupe Amor-Benamor, moulin à huile d'olive, carrières,...) et ce tronçon est également un évitement de la ville de Guelma des poids lourds d'où les faibles valeurs du coefficient de frottement.

La RN80 avec un TJMA de 8200 v/j est une route de catégorie 1. La vitesse réglementaire sur ce tronçon étant de 80 km/h, le coefficient de frottement admissible pour cette route est donc de 0,39 d'où nous pouvons conclure que cette route ne présente pas une bonne adhérence et serait peut être à l'origine des accidents sur ce tronçon.



Figure 66 : Positions des essais sur la RN 80 (5^{eme} campagne d'essai)



CONCLUSION GENERALE



CONCLUSION GENERALE

A travers ce travail nous avons pu appréhender l'importance de l'adhérence d'un revêtement pour assurer la sécurité des usagers de la route. L'identification des tronçons des routes au comportement glissant est primordial afin d'appliquer une action corrective si nécessaire.

L'objectif de ce travail était d'effectuer des mesures de l'adhérence des revêtements routiers de la wilaya de Guelma : mesure du coefficient de frottement longitudinal (CFL) à l'aide du Pendule S.R.T. Le bien-fondé de cette méthode de mesure est jugé à partir de la comparaison entre les résultats obtenus de nos différentes campagnes d'essais sur les routes nationales N° 20, 21 et 80, avec les valeurs données par la norme B40 en vigueur en Algérie.

Dans la première partie essentiellement basée sur une étude bibliographique, nous avons abordé principalement les nouvelles générations de revêtements de chaussée ainsi que les différents types de revêtements existants. A partir de cela nous avons présenté l'importance du choix du type de revêtement dans le mécanisme d'adhérence. Ensuite nous avons évoqué l'importance de l'adhérence dans la sécurité routière. En termes d'infrastructures routières la sécurité des usagers est un axe majeur. Dans ce contexte l'adhérence représente l'une des propriétés d'usage essentielles des revêtements routiers, conditionnant la capacité de freinage et de contrôle directionnelle des véhicules. De ce fait dans ce travail nous avons expliqué l'adhérence transversale et longitudinale et les mécanismes physiques à l'origine de l'adhérence. Nous avons montré également l'évolution de l'adhérence au cours du temps. Le décapage, le polissage de la texture, les variations saisonnières, le vieillissement sont entre autres des facteurs influençant l'évolution de l'adhérence. Enfin, nous avons énuméré les différents essais de mesures de l'adhérence et de la texture fréquemment utilisés.

La deuxième partie a été consacrée à la présentation du travail expérimental réalisé sur cinq tronçons répartis sur la RN20, RN21 et RN80 de la wilaya de Guelma. L'utilisation du Pendule S.R.T a permis de déterminer l'adhérence des différents revêtements en mesurant leur état de surface.

Les résultats de ses essais ont montré que le potentiel d'adhérence d'un revêtement routier peut changer radicalement d'une chaussée à une autre, selon l'intensité du trafic, le tracé géométrique, la déclivité, le dévers, la durée de vie, les caractéristiques des matériaux utilisées,... Et pour un revêtement donné, d'autres facteurs déterminent les conditions d'adhérence : la température ambiante, la présence d'eau, de poussières, de terre ou de gravillons, etc.

Nous avons remarqué que sur les cinq tronçons testés, trois possèdent une adhérence satisfaisante tandis que les deux dernières présentent un défaut d'adhérence longitudinale.

Ce travail nous a permis également de constater que l'essai d'adhérence n'est jamais demandé par le maître d'ouvrage à la livraison de la chaussée ou au cours de sa durée de vie, car ils donnent peu d'importance à ces essais malgré la relation directe entre l'adhérence et les accidents de route (en particulier dans les virages). Une faible adhérence longitudinale provoque la perte du contrôle du véhicule (dérapage) en cas de freinage brusque par temps de pluie.

Perspectives

Ces premiers travaux dans le domaine de l'adhérence méritent d'être poursuivis. Pour mieux appréhender l'adhérence, les mesures doivent s'étendre sur toute la durée de vie du revêtement alors que nos mesures sont, pour le moment ponctuelles. Des progrès sont à réaliser dans le domaine de l'adhérence et de son évolution notamment :

- une meilleure compréhension de l'influence des variations saisonnières sur l'évolution de l'adhérence,
- une meilleure compréhension de l'influence mutuel des paramètres de formulation de l'enrobé sur l'adhérence.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Organisation de Coopération et de Développement économiques - Forum international des transports : Des chaussées à longue durée de vie pour routes à forte circulation.
- [2] Juliette Ferrand, Johann Duffait, Laurent Josserand, ESEM Orléans – Les chaussées urbaines démontables- Etude bibliographique.
- [3] SETRA-Note d'information N°113 : Enduits superficiels d'usure, Enrobés coulés à froid, Actualisation des connaissances sur les revêtements superficiels, Avril 2005.
- [4] Enduits superficiels d'usure : prescriptions techniques et informatives – Note d'information –série Chaussées Dépendances – n°105 – SETRA – août 1998 – réf. D9825.
- [5] Techniques de l'Ingénieur : Les routes - Matériaux de chaussées souples et semi-rigides, Octobre 2012.
- [6] SETRA-Note d'information N°94 : Bétons Bitumineux Très Minces et Ultra Minces, Avril 1997.
- [7] LCPC centre de Nantes : Les Chaussées ; Tristan LORINO.
- [8] Enrobés drainants, note d'information SETRA, juin 1997.
- [9] Dispositions particulières pour l'exploitation hivernale des bétons bitumineux drainants, note d'information SETRA, Septembre 2001.
- [10] Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Méthode d'essai N°50 -version 2.0- Mesure de l'adhérence des chaussées routières et aéronautiques, Techniques et méthodes des laboratoires de ponts et chaussées, 2006.
- [11] Thèse : Polissage et Adhérence des chaussées routières, Zhenzhong Tang, Octobre 2007, ENPC.
- [12] Société Michelin, Le pneu/L'adhérence, Clermont-Ferrand : Société de Technologie Michelin, 2000.
- [13] SETRA Note d'information N°11/ Mars 2005- Comité Français pour les Techniques Routières.
- [14] Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Laboratoire des voies de circulation, A. Junod, Mandat de recherche VSS 2000/360.
- [15] DLC, Bulletin d'information technique – Adhérence de chaussée en enrobé, Vol.12, N°2, Mai 2007.

- [16] Centre de recherche routière-Bruxelles, Code de bonne pratique pour le choix du revêtement bitumineux lors de la conception ou de l'entretien des chaussées R 78/ 06.
- [17]. AFNOR, Norme NF EN 13036-1, Caractéristiques de surface des chaussées routières et aéroportuaires –Méthode d'essai – Partie 1 : Méthode volumétrique à la tâche pour mesurer la macrotecture d'une surface de chaussée, CEN/TC 227/WG 5, Janvier 2002.
- [18] AFNOR, norme NF EN ISO 13473-1, Caractéristiques de la texture d'un revêtement de chaussée à partir de relevés de profils – Partie 1 : détermination de la profondeur moyenne du profil, AFNOR – ISO TC 43/SC1/WG 39 et CEN/TC 227/WG 5, Octobre 2004.
- [19] Société Michelin et LCPC, Évaluation comparatives de surfaces routières – Piste de Glissance (1986-1987), Mars 1988.
- [20] AFNOR, Norme NF EN 13036-4, Caractéristiques de surface des chaussées routières et aéroportuaires –Méthode d'essai – Partie 4 : Méthode pour mesurer l'adhérence d'une surface : l'essai au Pendule, CEN/TC 227/WG 5, Août 2003.
- [21] ASTM Standard E 1844-96, Standard Specification for a Size 10 x 4-5 Smooth-Tread Friction Test Tyre, Road and Paving Materials; Pavement Management Technologies, February 2004, Vol.04.03.
- [22] LCPC : Modèle d'évolution temporelle de l'adhérence de la chaussée et de la retro-réflexion des marquages N°1 C.2, Version 2.1, Mai 2008.
- [23] Ecole doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur, Adhérence des chaussées : de l'étude cognitive aux applications, Minh-Tan Do, Septembre 2013.
- [24] LCPC: infrastructure et sécurité routière/ l'adhérence et facteurs influents, division Entretien, Sécurité et Acoustique des Routes (ESAR)
- [25] DR BOUTELDJA Fathe, Projet Massif Central : Matériaux locaux pour des revêtements routiers à caractéristiques adaptées à leur usage.
- [26] Observation du bruit en île de France: Etat des lieux des performances acoustiques des revêtements de chaussées, dossier technique et pédagogique, Décembre 2011.
- [27] Vadémécum du bruit routier urbain, Volume I, Chapitre 7.
- [28] Chaussées bitumineuses claires et éclaircies en tunnel-caractéristique et intérêt économiques, CETU, Octobre2004.
- [29] Conception et dimensionnement des structures des chaussées : guide technique SETRA 1994

[30] CTTP, novembre 2001, « catalogue de dimensionnement des chaussées neuves », fascicule1, 2 et 3, Ministère des travaux publics.

[31] Sous-secteur entretien, Aperçu sur les priorités de l'entretien et l'exploitation routière. Sécurité des routes, signalisation routière. Ministère des travaux publics, 24/09/2013.

[32] CTTP, juillet 1996, «Guide de Réhabilitation des Routes », fascicule1, Ministère des travaux publics.

[33] B40 _ Normes techniques d'aménagement des routes, Etude technique et économique des aménagements routiers, Manuel du projeteur, Octobre 1977.

ANNEXES : POINTS NOIRS SUR LE RESEAU ROUTIER DE LA WILAYA DE GUELMA

N° de la route	PK début	PK fin	Longueur du tronçon	Nom de l'endroit	Commune	Nombres d'accidents	Cause des accidents
RN 21*	48 + 000	48 + 500	500 m	Kaf El Boumba	Héliopolis	Entre 02 et 09	Non respect des panneaux de signalisation
RN 20 (N°1)	36 + 500	Point fixe	Point fixe	Pont métallique	Aïn Regada	Entre 03 et 05	Non ralentissement en plus des dépassements dangereux
RN 20 (N°2)	67 + 000	73 + 000	05 km	Entre Selaoua et Aïn amara	Salaoua Anouna	Entre 07 et 12	Non ralentissement en plus des dépassements dangereux
RN 20 (N°3)*	82 + 000	Point fixe	Point fixe	Virage dangereux dans les deux sens	Medjez Amar	Entre 02 et 04	Non ralentissement et les dérapages
RN 20 (N°4)	85 + 500	Point fixe	Point fixe	Salah Salah	Houari Boumediene	Entre 01 et 05	Non ralentissement et la traversé des piétons
RN 20 (N°5)*	87 + 150	92 + 000	5,6 km	Entre Serfani et station Seraïdi	Guelma	Entre 04 et 06	Non respect de la distance de sécurité et la traversé des piétons
RN 20 (N°6)	99 + 700	Point fixe	Point fixe	Passage à niveau sur la RN20	Boumahra Ahmed	/	Non ralentissement
RN 20 (N°7)	113 + 90	Point fixe	Point fixe	Mechtat el douakha	Boumahra Ahmed	/	Non ralentissement

* Points noirs qui ont fait l'objet de mesures à l'aide du pendule S.R.T

Tableau 19 : Points noirs sur le réseau routier de Guelma