



Etude de formulation d'un béton bitumineux à froid destiné aux travaux de revêtement routier en milieu tropical

Israël MAMAH¹, Higinio Menendez MILANES², Kaboudja Djagri WADJA³
Komla BOUAMEY⁴

¹ Dr. Ing. en Génie des Structures de Bâtiments et d'Ouvrages, Consultant à Tropical Engineering Consult (TrEC), 13 BP 556, Lomé-Togo

² Professeur Titulaire, Bircham International University, Département des Sciences de l'Ingénierie Génie Civil, 2, C.P.28691, Madrid-Espagne

³ Directeur Général de Tropical Engineering Consult (TrEC), Expert Géotechnique auprès des Cours et Tribunaux, 13 BP 556, Lomé-Togo

⁴ Chef du Laboratoire de pointe du Bureau d'études géotechniques Tropical Engineering Consult (TrEC), 13 BP 556, Lomé-Togo

Résumé

Ce travail a pour but l'étude de formulation relative aux caractéristiques physiques et mécaniques d'un béton bitumineux à froid (BBF) compacté en milieu tropical. Le BBF est un matériau essentiellement composé de granulats (graviers et sables), de fines (charges minérales) et d'un liant hydrocarboné, généralement une émulsion de bitume qui agit à température ambiante pour enrober les granulats. A cet effet, le BBF reste un matériau de construction conventionnel en travaux routiers sauf qu'il n'est pas souvent utilisé dans les pays tropicaux comme le Togo parce qu'il a fait l'objet de beaucoup de réticence pour sa maîtrise d'œuvre de la part des constructeurs dans le domaine routier, compte tenu surtout des conditions de sa mise en œuvre en inadéquation à notre climat chaud. Cependant, on estime son coût de réalisation inférieur à celui de l'enrobé à chaud en termes de dépense en matériaux, matériels et de mains d'œuvre, ce qui nous a poussé à vouloir expérimenter ce matériau de construction routière via le développement d'une étude sur le béton bitumineux à froid en laboratoire. Les travaux se sont déroulés en trois phases : la première phase a consisté au prélèvement in-situ des échantillons cylindriques par carottage sur une route revêtue d'enrobé coulé à froid afin de déterminer la teneur en liant et les fractions granulaires à travers l'extraction du liant et l'analyse granulométrique. La deuxième phase a consisté à la formulation et à la fabrication en laboratoire des éprouvettes Marshall d'enrobé à froid compacté. A cet effet, la troisième phase s'est concentrée à la soumission de ces éprouvettes fabriquées aux tests de détermination des propriétés physiques et mécaniques entre autres la stabilité et le fluage. Cette étude de formulation et de fabrication d'enrobé à froid a été réalisée dans un premier temps sur 3 séries d'éprouvettes de 3 donc un total de 9 éprouvettes, chacune respectant un dosage standard en liant de 8,2% et selon un mode de conservation à savoir avant durcissement, à 14 jours d'âge dans un milieu ambiant et à 14 jours d'âge dans un milieu ensoleillé. Dans un second temps, sur 3 séries d'éprouvettes de 6 donc un total de 18 éprouvettes, chacune suivant un dosage allant de 13%, 13,5% à 14% d'émulsion pour des teneurs en pétrole de 0% et 1%. Il ressort après étude que les mélanges dosés à 14% d'émulsion avec 0% de pétrole ont une meilleure stabilité moyenne $S = 10,8$ KN et un fluage $F = 1,17$, ce qui correspond au quotient Marshall le plus élevé $S/F = 9,3$ qui est un indicateur de performance signifiant que l'enrobé est plus stable et plus apte à résister aux déformations permanentes dues au trafic routier.

Mots-clés: BBF, granulats, fines, émulsion de bitume, stabilité, fluage

Study on the formulation of a cold bituminous concrete intended for road surfacing works in tropical environments

Abstract

This study aims to examine the formulation related to the physical and mechanical characteristics of cold bituminous concrete (CBC) compacted in a tropical environment. CBC is a material primarily composed of aggregates (gravel and sand), fines (mineral fillers), and a hydrocarbon binder, usually a bitumen emulsion that works at ambient temperature to coat the aggregates. In this respect, CBC remains a conventional construction material in road works, except that it is not often used in tropical countries like Togo because it has faced much hesitation regarding its implementation from contractors in the road sector, mainly due to conditions of its application being unsuitable for our hot climate. However, its production cost is estimated to be lower than that of hot mix asphalt in terms of expenses for materials, equipment, and labor, which prompted us to experiment with this road construction material through the development of a study on cold bituminous concrete in the laboratory. The work was carried out in three phases: the first phase involved in-situ sampling of cylindrical samples by coring on a road surfaced with cold-applied asphalt in order to determine the binder content and the aggregate fractions through binder extraction and particle size analysis. The second phase consisted of the formulation and laboratory fabrication of Marshall specimens of compacted cold asphalt. To this end, the third phase focused on subjecting these manufactured specimens to tests to determine their physical and mechanical properties, including, among others, stability and creep. This study on the formulation and production of cold mix asphalt was initially carried out on 3 series of 3 specimens, totaling 9 specimens, each respecting a standard binder dosage of 8.2% and according to a storage method, namely before curing, at 14 days of age in an ambient environment, and at 14 days of age in a sunny environment. Subsequently, the study was conducted on 3 series of 6 specimens, totaling 18 specimens, each following a dosage ranging from 13%, 13.5%, and 14% emulsion for petroleum contents of 0% and 1%. It emerges after study that mixtures dosed with 14% emulsion with 0% petroleum have better average stability $S = 10.8$ KN and a flow $F = 1.17$, which corresponds to a higher Marshall quotient $S/F = 9.3$, indicating performance and meaning that the asphalt is more stable and better able to resist permanent deformations caused by road traffic.

Keywords: CBC, granules, fines, bitumen emulsion, stability, rutting

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.17687932>

1. Introduction

Un béton bitumineux à froid (BBF) est un mélange de granulats (pierres, sables) et bitume, fabriqué et appliqué à température ambiante entre 10° et 40°, sans nécessiter de chauffage [1]. En effet, les constituants du BBF à savoir le bitume est un liant hydrocarboné qui est mélangé aux granulats sous forme d'émulsion (un mélange de bitume et d'eau) et ces granulats utilisés sont de différentes tailles, allant de très fins (sables) à plus grossiers (graviers) [2]. L'enrobé à froid est souvent utilisé pour les réparations de nids-de-poule et de trottoirs. Il convient également à réaliser les travaux de maintenance notamment les travaux d'entretien après les périodes de gel qui peuvent endommager les revêtements et l'aménagement de petites surfaces telles que les allées carrossables. Contrairement aux enrobés à chaud, le BBF ne nécessite pas de chauffage des granulats ni de bitume, ce qui facilite sa mise en œuvre et permet de l'utiliser dans des conditions plus froides. A cet effet, sa formulation peut varier en fonction de son utilisation et des performances souhaitées, notamment en termes de compacité, de résistance à l'eau et de durabilité, selon des études de formulation [3]. Par conséquent, notre présente étude sur le béton bitumineux à froid va se faire en trois principales phases dont la première sera consacrée à la détermination de la teneur en liant et la granulométrie des échantillons cylindriques de BBF obtenus par prélèvement à l'aide d'une carotteuse (une machine de forage) sur un chantier routier expérimental via l'application d'un enrobé à froid d'un projet exécuté, la seconde phase va porter sur la formulation et la fabrication des enrobés à froid en laboratoire à l'aide des éprouvettes Marshall tandis que la troisième phase sera concentrée sur la détermination des caractéristiques physico-mécaniques du mélange compacté de l'enrobé à froid [4].

2. Matériel et méthodes

2-1. Matériel

Le matériel à utiliser dans le cadre de notre étude est divers donc spécifique à chaque type d'essai ou test à réaliser. A cet effet, le matériel est listé comme suit :

- Pour l'essai de détermination de la teneur en liant, l'opération s'est déroulée en trois (3) phases à savoir :
 - L'extraction du liant qui a nécessité: une balance, capable de peser la masse d'une prise d'essai avec une exactitude de 0,05 % de cette masse, appareil d'extraction de liant, conforme aux exigences appropriées [5],
 - La séparation de la matière minérale pour laquelle nous avons fait recours aux bacs pouvant être chauffés sans subir de dommage ni modification de leur masse et utilisées pour sécher le granulat récupéré, dispositif pour séparer le filler de la solution de liant, conformément aux exigences appropriées [5],
 - Le dosage du liant pour lequel il nécessite l'appareillage de récupération, conforme aux exigences de la méthode choisie [5].
- Pour l'essai d'analyse granulométrique du mélange granulaire des échantillons de carottes de BBF, il a été utilisé : l'appareillage requis selon la norme NF EN 933-1 pour le tamisage par voie sèche et au lavage est utilisé, les tamis ayant des ouvertures de dimension inférieure ou égale à 2,8 mm sont conformes à l'ISO 3310-1, les tamis ayant des ouvertures de dimension supérieure ou égale à 4 mm sont conformes à l'ISO 3310-2 [6, 7].
- Pour la formulation, la fabrication et l'essai Marshall de détermination des caractéristiques physiques et mécaniques du mélange compacté nous avons procédé comme suit :
 - La confection des éprouvettes Marshall par compactage par impact selon la norme NF EN 12697-30 ; Le compacteur à impact avec enclume métallique est une machine automatique muni des composants, plateau d'acier, de 15 mm d'épaisseur et d'environ 600 mm × 610 mm, placé horizontalement sur un socle solide, trois pieds de même rigidité dans la direction de la compression et dans celle du cisaillement, équipés de blocs en caoutchouc adaptés à la masse du support de compactage, support de compactage réalisé en fonte et dont la masse est d'au moins 100 kg, système de fixation pour maintenir le moule de compactage, dame de compactage, constituée d'une tige de guidage cylindrique, d'une masse coulissante, pesant $(4\,550 \pm 20)$ g, et d'un pied, pesant $(3\,960 \pm 20)$ g, mécanisme de levage par chaîne pour la masse coulissante, conçue de sorte que la hauteur de chute libre soit de (460 ± 3) mm, système pour compter les coups et les enregistrer (Il convient de compter le nombre de coups cumulés), transformateur différentiel à variable linéaire (optionnel) [8].
 - La détermination du pourcentage de vide avant durcissement et la détermination du pourcentage de vide selon la norme NF EN 12697-6 à 14 jours d'âge ont nécessité une balance, avec une capacité convenable pour la pesée de l'éprouvette dans l'air et dans l'eau (par exemple à l'aide d'un panier métallique dont le déplacement d'eau et la masse sont pris en compte par tarage), ayant une exactitude d'au moins $\pm 0,1$ g ; un bain-marie maintenu à une température uniforme à $\pm 1,0$ °C près aux alentours des éprouvettes ; une grille doit être prévue pour permettre la circulation de l'eau autour de l'éprouvette. Le bain doit avoir une capacité trois fois plus importante que celle du volume de l'éprouvette ; thermomètre ; peau de chamois, humide pour sécher et essuyer l'éprouvette, la peau de chamois doit être suffisamment humide pour, lors de l'essuyage, faire disparaître l'eau se trouvant à la surface de l'éprouvette sans absorber l'eau des vides internes [9].
 - La détermination du fluage et de la stabilité selon la norme NF EN 12697-34 avant durcissement et à 14 jours d'âge nécessite : une machine d'essai de compression, de classe 2 ou mieux selon la norme EN ISO 7500-1, ayant une capacité minimale recommandée de 28 kN et capable d'appliquer des charges sur les éprouvettes à une vitesse constante de déformation de (50 ± 2) mm/min, après une période transitoire de moins de 20 % du temps de charge. La vitesse de déformation est à maintenir pendant toute la durée d'application de la charge ; un dispositif de mesurage du fluage capable de déterminer une déformation avec une exactitude de $\pm 0,1$ mm ; un éditeur graphique : dispositif pour évaluer la courbe de force en fonction du fluage, par exemple une table traçante, un enregistreur ou un logiciel informatique ; une tête d'essai : des mâchoires d'écrasement supérieures et inférieures avec les dimensions données dans l'Annexe B de la norme; un bain d'eau, ayant une profondeur d'au moins 150 mm et capable de maintenir l'eau thermostatiquement à une température de (60 ± 1) °C. Le bain doit disposer d'un double-fond ou d'une étagère perforée permettant de suspendre les éprouvettes à au moins 25 mm au-dessus du fond du bain et de laisser une hauteur d'eau d'au moins 25 mm au-dessus des éprouvettes. La dimension du bain doit permettre de placer les éprouvettes faces en bas et sans contact entre elles. Il doit être équipé également d'un dispositif assurant une circulation d'eau continue ; thermomètre, capable de mesurer 60 °C avec une exactitude de 0,5 °C; étuve, capable de maintenir une température de (110 ± 5) °C [10].

2.2. Méthodes

2.2.1. Extraction du liant et de la matière minérale conformément à la norme NF EN 12697-1

L'essai d'extraction du liant consiste à dissoudre du bitume à l'aide d'un solvant à froid pour récupérer tout le bitume sinon la majeure partie du bitume contenu dans les échantillons de BBF car dans des cas limités, il peut être difficile de dissoudre toutes les traces de liant adhérent au granulat. Pour ce faire, des échantillons cylindriques (*figure 1*) sont prélevés par carottage in-situ à l'aide d'une carotteuse sur une route nouvellement revêtue d'enrobé bitumineux coulé à froid afin de vérifier les caractéristiques physiques relatives à la densité apparente via des pesées hydrostatiques du BBF, l'extraction du liant et des matières minérales contenues dans les carottes. Il est alors nécessaire de rappeler que la route sur laquelle ont été prélevées ces carottes de BBF a été exécutée dans les conditions normatives de chantier routier et convenablement compactée in-situ conformément aux techniques et méthodes relatives aux spécifications et dispositions techniques nécessaires de mise en œuvre d'un enrobé à froid [5, 11].

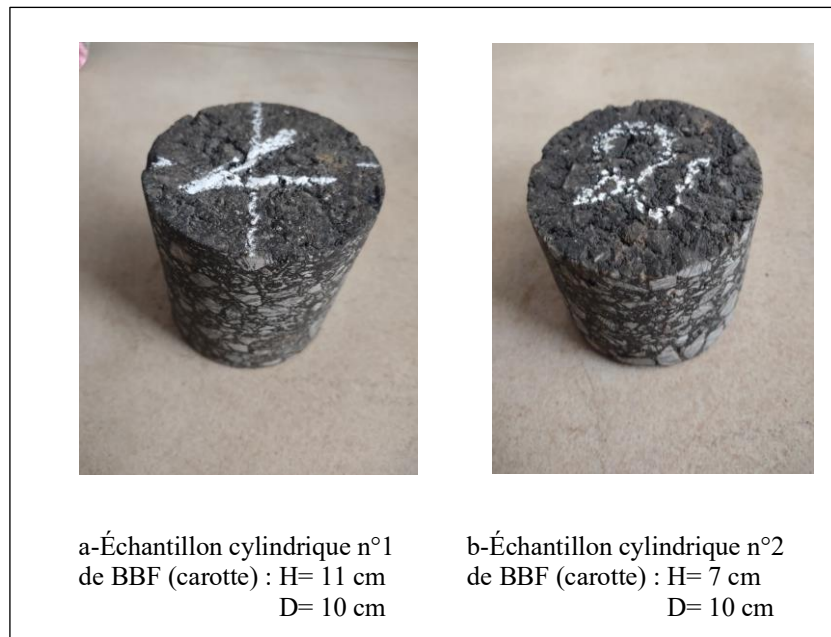


Figure 1 : Echantillons cylindriques 1 et 2 obtenus par carottage sur une chaussée en BBF

A cet effet, l'essai pour déterminer la teneur en liant hydrocarboné de la prise d'essai de matériaux enrobés de l'émulsion s'est déroulé suivant la méthode à la centrifugeuse en quelques opérations de base à savoir: l'extraction du liant par dissolution dans un solvant froid qui est un composé chimique appelé perchloroéthylène ou le tétrachloroéthylène conforme aux exigences, la séparation de la matière minérale et de la solution de liant, la détermination de la quantité de liant par récupération du liant et le calcul de la teneur en liant soluble déterminé par différence au moyen de la formule normative suivante:

$$S = \frac{100 \times [M - (M_1 + M_W)]}{M - M_W}$$

D'où :

S : est la teneur en liant soluble, exprimée en pourcentage (%) ;

M : est la masse de prise d'essai non séchée, exprimée en grammes (g) ;

M_1 : est la masse de matière minérale récupérée, exprimée en grammes (g) ;

M_W : est la masse d'eau de la prise d'essai non séchée, exprimée en grammes (g).

Le **tableau 1**, présente les valeurs de la teneur extérieure et intérieure en liant hydrocarboné de 2 échantillons de BBF après l'extraction de liant et de matières minérales avec une valeur moyenne de teneur en liant intérieur égale à 8,2 %.

Tableau 1 : Présentation des valeurs extérieures et intérieures en liant

Prélèvement d'échantillons : 1 et 2							
Date : 23/05/2025							
Nature : BBF 0/10							
TENEUR EN LIANT : Méthode à la centrifugeuse							
prise d'essai	Poids de l'enrobé (g)	Poids sec du granulat désenrobé (g)	Poids du liant (g)	Teneur en liant extérieur (%)	Moyenne teneur en liant extérieur (%)	Teneur en liant intérieur (%)	Moyenne teneur en liant intérieur (%)
1	576,0	529,0	47	8,9%	9,0%	8,2%	8,2%
2	660,0	605,0	55,0	9,1%		8,3%	

Par la suite, il est nécessaire de transférer le granulat récupéré lavé dans un bac. Faire sécher par évaporation du solvant, le granulat et le dispositif d'extraction de liant. Transférer dans le bac, avec le reste des granulats récupérés, la totalité des éléments fins présents sur le dispositif d'extraction du liant, et s'assurer qu'il ne reste aucun élément minéral sur le dispositif d'extraction. Peser et noter la masse du granulat présent dans le bac. Le cas échéant, procéder à l'analyse granulométrique du granulat récupéré conformément aux exigences de l'EN 933-1, en tenant compte, si nécessaire, de la totalité du filler recueilli sur le papier-filtre.

2.1.1. Analyse granulométrique du mélange granulaire selon les normes NF EN 12697-2 et EN 933-1

Cet essai consiste à déterminer la granularité du mélange bitumineux par tamisage et pesée selon la norme NF EN 12697-2 des mélanges bitumineux. Une analyse granulométrique des granulats est réalisée en deux (2) prises d'essais de deux échantillons cylindriques (prise d'essai n°1 et prise d'essai n°2) après l'extraction du liant et des matières minérales (gravillons, sables et fillers) pesant respectivement 489g et 565g (**tableau 2**). L'essai est effectué sur les granulats récupérés après réalisation du précédent essai d'extraction du liant conformément à la norme EN 933-1 [6, 7].

Au vu des résultats de l'analyse granulométrique, il faut noter que le granulat est dit d/D car d et D sont respectivement la plus petite et la plus grande dimension de ces grains mais étant donné que dans notre cas spécifique $d = 0,063\text{mm} < 0,5\text{ mm}$ et $D = 10\text{mm} \Rightarrow$ le mélange granulaire du BBF est dit de classe granulaire 0/10. La courbe granulométrique d'essai n°1 en rouge et celle n°2 en vert (**figure 2**) sont visiblement confondues et s'inscrivent dans le fuseau de la norme NF EN 10108-1, ce qui signifie que la classe granulaire utilisée pour la fabrication de l'enrobé bitumineux à froid a respecté les exigences normatives sur ce chantier [2, 12, 13].

Le **tableau 2** et la **figure 2** présentent respectivement les données de l'analyse granulométrique et la courbe granulométrique du mélange du BBF.

Tableau 2 : Tableau d'analyse granulométrique

GRANULOMÉTRIE								
Tamis (mm)	Prise d'essai n°1			Prise d'essai n°2			fuseau	
	masse de refus cumulé (g)	pourcentage de refus cumulé (%)	pourcentage de passant cumulé (%)	masse de refus cumulé (g)	pourcentage de refus cumulé (%)	pourcentage de passant cumulé (%)	min	max
20	0	0	100	0	0	100	100	100
16	0	0,00	100,00	0	0,00	100,00		
14	0	0,00	100,00	0	0,00	100,00	100	100
12,5	0	0,00	100,00	0	0,00	100,00		
10	3	0,57	99,43	3	0,50	99,50	90	100
8	37	6,99	93,01	35	5,79	94,21		
6,3	116	21,93	78,07	126	20,83	79,17	30	80
5	199	37,62	62,38	220	36,36	63,64		
4	257	48,58	51,42	292	48,26	51,74	37	49
2	348	65,78	34,22	399	65,95	34,05	10	60
1	403	76,18	23,82	463	76,53	23,47	4	25
0,5	433	81,85	18,15	500	82,64	17,36		
0,315	449	84,88	15,12	518	85,62	14,38		
0,25	456	86,20	13,80	527	87,11	12,89		
0,08	483	91,30	8,70	560	92,56	7,44		
0,063	489	92,44	7,56	565	93,39	6,61	2	12

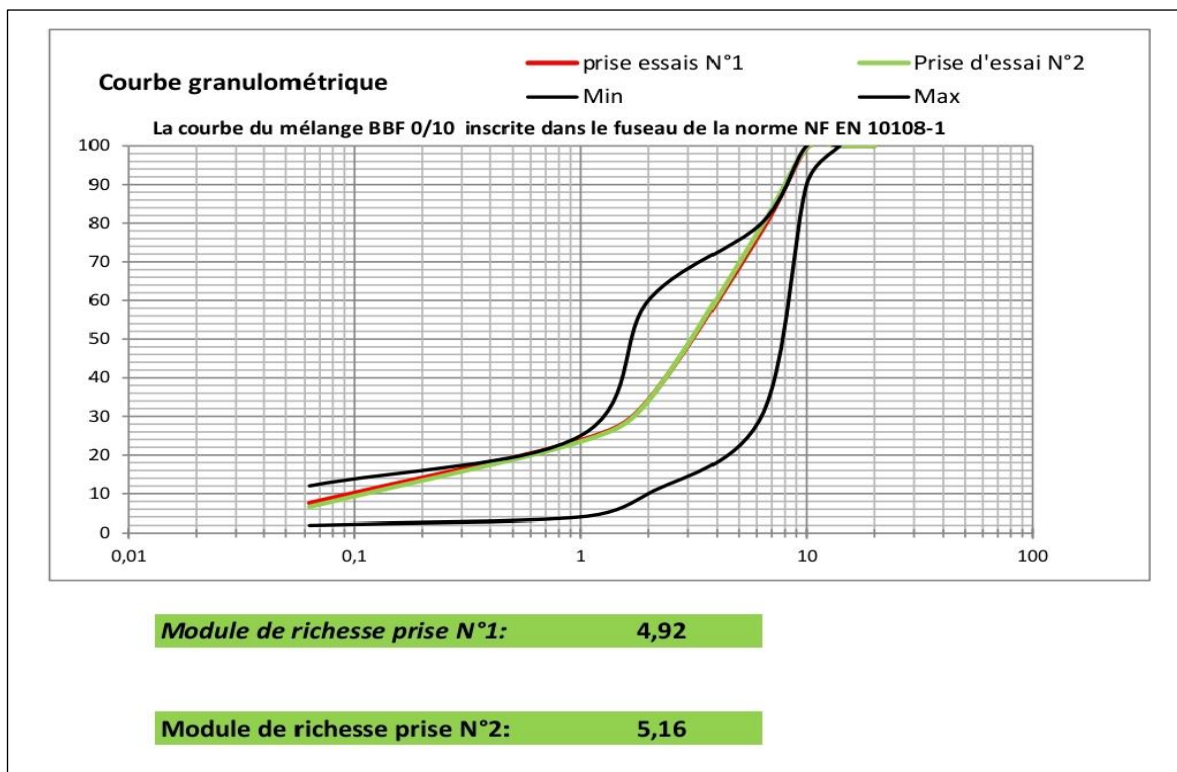


Figure 2 : Courbe granulométrique du mélange du BBF inscrite dans le fuseau de la norme NF EN 10108-1

2.1.2. Formulation et confection des éprouvettes Marshall selon la norme NF EN 12697-30

Le principe de compactage par impact de l'essai consiste à compacter un échantillon cylindrique d'enrobé bitumineux préalablement fabriqué en laboratoire selon les normes spécifiques avec une masse tombante, pour obtenir une qualité répétitive. Cet enrobé à froid a été formulé et mélangé de bitume de classe 70/100 (matériau visqueux dérivé du pétrole) dosé à 8,2 % utilisé pour l'émulsion (système colloïdal composé de 65% de bitume et 35% d'eau et d'émulsifiants) et des granulats (graviers et sables) de classe 0/10 dosés à 91,8 % à température ambiante. Ces éprouvettes cylindriques d'enrobé à froid fabriquées ont une mesure standard de hauteur $H = 72\text{mm}$ et de diamètre $D = 100\text{mm}$ (*figure 3.a*).

Le processus de compactage a ensuite commencé sans délai en remplissant le moule du mélange bitumineux à froid et compacter l'éprouvette en moins de 4 min. La rehausse est fixée sur le corps cylindrique du moule et fixée au socle de compactage à l'aide du dispositif de serrage. Une fois que la dame de compactage a été montée, compacter l'éprouvette par l'application du nombre fixé de coups, la masse coulissante tombant d'une hauteur de $(460 \pm 3)\text{ mm}$ en compactant par impact. La masse coulissante n'est pas retenue lorsqu'elle rebondit après impact. Le temps de compactage de l'éprouvette est compris entre 55s et 60s pour un nombre de coups de référence égal à 50. La fréquence de chute du marteau de compactage a été la même quel que soit le nombre de coups.

Pour ce faire, il a été fabriquées au total 9 échantillons d'éprouvettes Marshall d'enrobé à froid dont 3 éprouvettes destinées à chaque type de cure et durée de conservation notamment avant murissement (jour du prélèvement), à 14 jours d'âge à la température ambiante et à 14 jours d'âge au soleil [8, 12, 14].

2.1.3. Essai Marshall selon la norme NF EN 12697-34

L'essai Marshall consiste à appliquer une force sur un échantillon d'enrobé compacté, provoquant une déformation jusqu'à la rupture, et à enregistrer la stabilité (résistance maximale) et le fluage (déformation verticale). Il revient à préciser que l'essai Marshall ne mesure pas directement « le poinçonnement » au sens géotechnique, mais plutôt la résistance à la déformation d'un enrobé bitumineux par poinçonnement diamétral. Après différents modes de conservations définies précédemment, les éprouvettes sont placées dans une presse Marshall et soumises à l'application d'une force de compression diamétrale à une vitesse constante de 50 mm/min (*figure 3.b*). La stabilité Marshall qui est la force maximale (kN) que l'échantillon peut supporter avant la rupture est enregistrée ainsi que le fluage qui est la déformation verticale de l'échantillon au moment de la rupture (mm) est également mesurée [10].



a-Éprouvettes de BBF soumises aux trois méthodes de cure (conservation)



b-Éprouvette de BBF soumise à l'essai Marshall de résistance à la déformation

Figure 3: Eprouvettes de BBF soumises aux méthodes de cure et à l'essai Marshall

La stabilité est la résistance maximale à la déformation, en kilo newton (kN), d'une éprouvette moulée d'enrobé. La charge maximale atteinte représente la valeur de stabilité du mélange, seulement si la hauteur de l'éprouvette est égale aux 63,5 mm requis. La stabilité doit être notée comme corrigée lorsque la charge maximale est multipliée par un facteur de correction calculé à partir des équations suivantes qui sont compte tenu du volume de l'échantillon déterminé selon 6.2 :

$$\text{Où : } C = 5,2e^{-0,025 \cdot 8 h} \text{ ou } C = 5,24e^{-0,003 \cdot 2V}$$

C : est le facteur de correction,

h : est la hauteur en millimètres (mm)

V : est le volume de l'éprouvette déterminé en 6.1.2, en millilitres (ml)

Notons la stabilité S à 0,1 KN près.

Note : des corrections hors de la plage de hauteurs comprises entre 60,5 mm et 66,5 mm peuvent conduire à des résultats erronés.

Le fluage par contre est la déformation d'une éprouvette moulée, en millimètres (mm), à la charge maximale moins la déformation nominale obtenue par extrapolation de la tangente du graphe effort-déformation, ramenée à une charge nulle, (entre A et M', voir Annexe A)

Nous avons noté les valeurs de fluage obtenues à 0,1 mm près comme le recommande la norme NF EN 12697-34.

3. Résultats

Les résultats des essais sont considérés comme étant fiables si l'étendue, Vs, des valeurs de stabilité est inférieure à 15 % et si l'étendue des valeurs de fluage, Vf est inférieure à 20 %. Si les résultats d'une ou plusieurs éprouvettes diffèrent par rapport à la valeur moyenne de plus de 15 % pour la stabilité et de 20 % pour le fluage, rejeter la valeur la plus éloignée et retenir la valeur moyenne des autres éprouvettes. Dans le cadre de notre étude sur le BBF, la valeur de stabilité pour chaque éprouvette est de loin inférieure à 15% de la valeur moyenne de stabilité et 20% pour le fluage, par conséquent, les résultats de ces essais Marshall sont fiables donc ne sont plus à reprendre. Les **tableaux 4, 5 et 6** présentent les valeurs moyennes de stabilité et de fluage des éprouvettes de BBF respectivement avant murissement à la date du prélèvement, à 14 jours d'âge à la température ambiante et à 14 jours d'âge séché au soleil [12].

Tableau 4 : Présentation des valeurs de stabilité et de fluage avant murissement (jour du prélèvement)

Teneur en liant : 8,2 %		MVRG : 2,52		
1	N° de l'éprouvette	1	2	3
2	Poids sec dans l'air	1202,1	1204,6	1204,5
3	Poids dans l'eau	686,6	672,7	685,5
4	Poids après immersion	1232,6	1227,6	1230,4
5	Densité de l'eau 24 ° c	0,9973		
6	Poids eau déplacé (4 - 3)	546	554,9	544,9
7	Volume éprouvette	547,5	556,4	546,4
8	Densité apparente: MVA (2/7)	2,196	2,165	2,205
9	Densité apparente: MVA moy.	2,188		
10	Densité réelle des granulats : MVRg	2,420		
11	Densité réelle de l'enrobé: MVR	2,256		
12	% vide d'air (11-9)/11	3,0		
13	Compacité (100 - 12)	97,0		
14	% vides occupés par air + bitume V	15,4		
15	% vides comblés par le bitume V1	80,6		
16	Stabilité mesuré (KN)	9,5	9,5	9,6
17	Facteur de correction	0,89	0,89	0,93
18	Stabilité corrigée (16 X 17)	8,4	8,5	8,9
19	Stabilité moyenne	8,6		
20	Fluage à 1/10mm	1,7	1,7	1,8
21	Fluage moyen à 1/10mm	1,7		

Tableau 5 : Présentation des valeurs de stabilité et de fluage à 14 jours d'âge à la température ambiante

Teneur en liant : 8,2 %		MVRG : 2,52		
1	N° de l'éprouvette	1	2	3
2	Poids sec dans l'air	1201,2	1202	1200,6
3	Poids dans l'eau	694,8	704,7	682,3
4	Poids après immersion	1222,7	1230,3	1229
5	Densité de l'eau 24 ° c	0,9973		
6	Poids eau déplacé (4 - 3)	527,9	525,6	546,7
7	Volume éprouvette	529,3	527,0	548,2
8	Densité apparente: MVA (2/7)	2,269	2,281	2,190
9	Densité apparente: MVA moy.	2,247		
10	Densité réelle des granulats : MVRg	2,420		
11	Densité réelle de l'enrobé: MVR	2,256		
12	% vide d'air (11-9)/11	0,4		
13	Compacité (100 - 12)	99,6		
14	% vides occupés par air + bitume V	12,9		
15	% vides comblés par le bitume V1	96,9		
16	Stabilité mesuré (KN)	12,5	11,2	12
17	Facteur de correction	0,96	0,96	0,89
18	Stabilité corrigée (16 X 17)	12	10,8	10,7
19	Stabilité moyenne	11,2		
20	Fluage à 1/10mm	2,5	2,4	2,4
21	Fluage moyen à 1/10mm	2,4		

Tableau 6 : Présentation des valeurs de stabilité et de fluage à 14 jours d'âge au soleil

Teneur en liant : 8,2 %		MVRG : 2,52		
1	N° de l'éprouvette	1	2	3
2	Poids sec dans l'air	1201,6	1202,1	1202,8
3	Poids dans l'eau	672,4	685,5	684,1
4	Poids après immersion	1230,5	1228,2	1227,8
5	Densité de l'eau 24 ° c	0,9973		
6	Poids eau déplacé (4 - 3)	558,1	542,7	543,7
7	Volume éprouvette	559,6	544,2	545,2
8	Densité apparente: MVA (2/7)	2,147	2,209	2,206
9	Densité apparente: MVA moy.	2,188		
10	Densité réelle des granulats : MVRg	2,420		
11	Densité réelle de l'enrobé: MVR	2,256		
12	% vide d'air (11-9)/11	3,0		
13	Compacité (100 - 12)	97,0		
14	% vides occupés par air + bitume V	15,4		
15	% vides comblés par le bitume V1	80,4		
16	Stabilité mesuré (KN)	9,3	9,1	9,0
17	Facteur de correction	0,89	0,93	0,93
18	Stabilité corrigée (16 X 17)	8,2	8,5	8,4
19	Stabilité moyenne	8,4		
20	Fluage à 1/10mm	1,7	1,7	1,6
21	Fluage moyen à 1/10mm	1,7		

3.1. Valeur de la stabilité Marshall (MSV)

La valeur de la stabilité Marshall (MSV) est définie comme la charge maximale supportée par un échantillon compact à une température standard de 60 °C pour les enrobés à chaud et entre 10°C et 40° C pour les enrobés à froid. Les exigences de stabilité du mélange bitumineux conformément aux spécifications techniques de MORTH (Ministry of Transport and Highways / Ministère Des Transports Routiers et des Routes) sont présentées dans le **tableau 7**. Ces valeurs doivent être respectées lors de la conception du mélange [15].

Tableau 7 : Valeurs de la stabilité du Marshall

Propriété	Trafic moyen	Circulation dense
Valeur de stabilité du marshall (KN)	5,45 – 9,1	> 9,1

3.2. Calcul des quotients Marshall

L'indicateur important pour la conception des mélanges d'enrobés à froid est essentiellement considéré à travers le quotient Marshall qui est un rapport calculé dans le cadre de l'essai Marshall pour évaluer la rigidité et la résistance aux déformations permanentes des enrobés bitumineux. Ce quotient est obtenu en divisant la stabilité Marshall (S) par le fluage Marshall (F), soit S/F en notant la valeur obtenue à 0,1 KN/mm près comme le présente le tableau 8.

Tableau 8 : Valeurs du quotient Marshall S/F pour différents méthodes de cure

Méthode de cure	Avant murissement	14 jours d'âge à température ambiante	14 jours d'âge au soleil
Teneur en liant	8,2%	8,2%	8,2%
S/F	5,1	4,7	4,9

Au vu des résultats nous constatons que le quotient Marshall le plus élevé est S/F = 5,1 qui est celui de l'éprouvette avant murissement et le BBF devrait plutôt croître en stabilité au fur et à mesure qu'il prend de l'âge à 14 jours mais a plutôt chuté de 5,1 à 4,7. Cette contre-performance nous a amené à faire d'autres propositions de formulation de l'enrobé à froid avec augmentation progressive du dosage en liant ainsi que de sa composition chimique en variant la teneur en pétrole.

3.3. Formulation et confection des éprouvettes Marshall avec un dosage en liant de 13%, 13,5% et 14%

Le prélèvement des matériaux pour la formulation de l'enrobé à froid pour les 3 divers dosages précédemment cités a été une étape cruciale dans le cadre de notre étude. Ce prélèvement consiste à rechercher des carrières en granulats (sable et graviers concassés), en liant bitumineux et plus précisément de l'émulsion ECM-65 composé de 65% de bitume et 35% d'eau et d'émulsifiant tel que la teneur en pétrole compris entre 0 et 1%.

Le principe de compactage étant le même comme au cours des formulations précédemment, cet enrobé à froid a été formulé à l'aide d'une émulsion asphalte cationique ECM-65 (système colloïdal composé de 65% de bitume et 35% d'eau et d'émulsifiants) utilisée dans la construction routière. C'est une émulsion à base d'eau avec une charge positive, utilisée comme liant pour les enrobés asphalte. A cet effet, les dosages en liant hydrocarboné dans le mélange d'enrobé bitumineux à froid pour la fabrication des éprouvettes Marshall sont fixés à 13%, 13,5% et 14% (incluant 0% et 1% de pétrole) et des granulats (graviers et sables) de classe 0/10 (62% de 0/6 et 38% de 6/10) dosés respectivement à 87 %, 86,5% et 86% conservées à température ambiante. Ces éprouvettes cylindriques d'enrobé à froid fabriquées ont une mesure standard de hauteur H = 72mm et de diamètre D = 100mm.

Les moyennes des valeurs mécaniques de la stabilité et du fluage de chaque série d'éprouvettes ainsi que d'autres caractéristiques physiques des nouvelles formulations à 13%, 13,5% et 14% en liant sont présentées dans les tableaux 9 et 10 [3].

Tableau 9 : Caractéristiques Marshall du mélange BBF 0-10 avec ECM65 à 0% de pétrole (62% de 0/6 ; 38% de 6/10)

Numéro du mélange	1	2	3	SPECIFICATION	NORMES
Teneur en liant	13,3%	13,5%	14,0%	Sans objet	Sans objet
MVA (t/m ³)	2,220	2,215	2,211	Sans objet	Sans objet
MVR (t/m ³)	2,309	2,309	2,309	Sans objet	Sans objet
Compacité Marshall (%)	96,2	96,0	95,8		Selon NF EN 12697-30
% vides (%)	3,8	4,0	4,2	3-6%	Selon NF EN 12697-8
% vides dans les agrégats	21,2	21,4	21,5	≥ 14 %	
% vides comblé par le liant (%)	82,0	81,1	80,4		Sans objet
Fluage (mm)	2,617	1,477	1,167	2-4	Selon NF EN 12697-34
Stabilité (KN)	13,13	11,89	10,82	≥10,00	Selon NF EN 12697-34

Tableau 10 : Caractéristiques Marshall du mélange BBF 0-10 avec ECM65 à 1% de pétrole (62% de 0/6 ; 38% de 6/10)

Numéro du mélange	1	2	3	SPECIFICATION	NORMES
Teneur en liant	13,0%	13,5%	14,0%	Sans objet	
MVA (t/m ³)	2,233	2,226	2,206	Sans objet	
MVR (t/m ³)	2,309	2,309	2,309	Sans objet	
Compacité Marshall (%)	96,7	96,4	95,6		Selon NF EN 12697-30
% vides (%)	3,3	3,6	4,4	3-6%	Selon NFV EN 12697-8
% vides dans les agrégats	20,8	21,1	21,7	≥ 14 %	
% vides comblé par le liant (%)	84,3	82,9	79,5		Sans objet
Fluage (mm)	2,686	1,531	1,269	2-4	Selon NF EN 12697-34
Stabilité (KN)	14,57	12,07	11,03	≥10,00	Selon NF EN 12697-34

Au vu des résultats des tests Marshall effectués sur les éprouvettes de BBF, l'indicateur important pour la conception des mélanges d'enrobés à froid est essentiellement considéré à travers le quotient Marshall qui est un rapport calculé dans le cadre de l'essai Marshall pour évaluer la rigidité et la résistance aux déformations permanentes des enrobés bitumineux. Ce quotient est obtenu en divisant la stabilité Marshall (S) par le fluage Marshall (F), soit S/F . A cet effet, un quotient Marshall plus élevé indique une meilleure résistance à la déformation. Ainsi, dans le cadre de notre étude, le quotient Marshall le plus élevé est $S/F = 9,3$ pour $S = 10,82$ KN et $F = 1,17$ mm. Les valeurs des quotients des divers dosages sont présentées dans le tableau 11 [3].

Tableau 11 : Valeurs du quotient Marshall S/F pour différents dosages en liant

Numéro du mélange	1	2	3
Dosage en liant	13%	13,5%	14%
S/F (0% pétrole)	5	8	9,3
S/F (1% pétrole)	5,4	7,9	8,7

4. Discussion

Conformément aux spécifications techniques de MORTH (Ministry of Transport and Highways / Ministère Des Transports Routiers et des Routes), la valeur de stabilité Marshall (MSV) de l'enrobé bitumineux pour un trafic intense ne doit pas être inférieure à 9,1 KN. Cependant, une valeur minimale de 3,4 KN doit être maintenue dans les cas extrêmes et ceci étant, les valeurs moyennes de stabilité dans le cas de nos mélanges dosés à 13%, 13,5%

et 14% de liant bitumineux sont respectivement de 13,13 KN, 11,89 KN et 10,82 KN pour 0 % de dosage en pétrole et 14,57 KN, 12,07 KN et 11,03 KN pour 1% de dosage en pétrole. Ces valeurs étant supérieures à 9,1 KN, qui est la valeur normative signifie que ces stabilités émanant de ces 6 mélanges ont une aptitude ou performance mécanique requise à être utilisés en revêtement de chaussée en BBF pour des trafics intenses [16, 15]. Par contre, l'évaluation de la rigidité et de la résistance des BBF aux déformations dues au trafic routiers ne se limitant pas à la seule considération des valeurs de stabilité, l'on est amené à tenir compte aussi du rapport stabilité et fluage appelé quotient Marshall (S/F) qui est un indicateur de performance. A cet effet, la meilleure formulation à retenir dans le cadre de notre étude est celle du dosage en liant à 14% et à 0 % de pétrole avec une stabilité de 10,82 KN et un fluage de 1,17 mm impliquant un meilleur quotient Marshall de 9,3 donc assurant une stabilité, une rigidité et une aptitude à résister aux déformations permanentes, comme les déformations dues au trafic.

Par ailleurs, il faut reconnaître que le dosage du pétrole de 0% à 1% dans l'émulsion a contribué de façon significative à l'amélioration des propriétés mécaniques des éprouvettes de BBF notamment la stabilité du BBF allant de 13,13 KN à 14,57 KN pour 13% de liant, de 11,89 KN à 12,07 KN pour 13,5% de liant et de 10,82 KN à 11,03 KN pour 14% de liant sauf que la stabilité décroît au fur et à mesure que le dosage en émulsion ECM-65 augmente. De plus, pour un dosage en pétrole allant de 0 à 1%, le fluage (déformation d'une éprouvette sous charge mesurée en mm) augmente passant de 2,62 mm à 2,69 mm pour 13% d'émulsion ; de 1,48 mm à 1,53 mm pour 13,5% d'émulsion et de 1,17 mm à 1,27 mm pour 14% d'émulsion. Ce qui donne respectivement un quotient Marshall de 5,4 ; 7,9 et 8,7 qui sont tous inférieurs au quotient 9,3 retenu précédemment en tant que meilleur indicateur de performance dans le cadre de notre étude. Ce qui signifie qu'en définitive, la teneur en pétrole dans l'émulsion n'a pas eu d'impact significatif sur la formulation du mélange de l'enrobé à froid donc il revient à noter que son ajout au mélange bitumineux n'a pas été d'une si grande importance pour l'amélioration des propriétés mécaniques.

En outre, avec la mise en œuvre des enrobés à froid [17,1] ont constaté des intérêts d'ordre environnemental, social et économique. Sur le plan environnemental, ils ont assisté à une réduction des prélèvements sur les ressources naturelles (gravières, sableux), une réduction des émissions de gaz à effet de serre, une réduction des émissions de composés organiques volatils, une valorisation des matériaux ou des produits par recyclage, une diminution des consommations d'énergies, une préservation de la biodiversité et les milieux naturels, une limitation des impacts sur le climat et l'atmosphère. Sur le plan social nous réalisons une amélioration de la sécurité des usagers, une diminution des nuisances des riverains, une amélioration de la sécurité et/ou le confort du personnel et une production et une consommation de manière responsable. Sur le plan économique, nous bénéficions d'un coût inférieur à des techniques classiques, une diminution des transports, une diminution des carburants et une diminution des délais de fabrication.

A cet effet, par le biais du Ministère des Travaux Publics du Togo, l'expérimentation pratique relative à l'exécution de l'enrobé à froid a été faite avec succès sur les chantiers des travaux urgents d'entretien périodique de certaines routes nationales transversales revêtues de la ville de Kara et d'Atakpamé par [18], d'Avril 2024 à nos jours. De plus, un autre chantier routier à travers l'Afrique utilisant des enrobés à froid est celui de la route Akoupé-Kotobi-Bongouanou (RAKB) en Côte d'Ivoire, réalisé entre 2017 et 2018. Ce projet expérimental relatif à la technique du recyclage à l'émulsion de bitume, initiée pour le renforcement d'anciennes chaussées, s'inscrit dans une démarche de développement durable. En effet, le recyclage en place a permis d'utiliser l'ancienne chaussée (revêtement ancien et ancienne couche d'assise) pour en faire une nouvelle couche d'assise, tout en limitant l'ouverture de nouveaux sites de prélèvement de graveleux latéritiques qui s'accompagnent du défrichage de parcelles forestières équatoriales. Cette technique a permis d'économiser ainsi l'apport d'une couche d'assise de matériaux nouveaux et l'atelier d'extraction et de transport y afférent, souvent prescrits dans le cadre d'un renforcement de chaussée [19].

5. Conclusion

Cette étude portant sur le béton bitumineux à froid, est un matériau de réparation pratique et polyvalent, adapté aux travaux de maintenance et aux petites surfaces. Il doit être conservé ou mûrir en milieu ambiant à l'abri de la chaleur afin d'espérer de meilleures performances mécaniques en termes de stabilité et de rigidité. Cependant, pour les grands trafics, l'enrobé à chaud est plus adapté car il est plus performant et plus durable que le béton bitumineux à froid. De plus, le BBF présente des fissures plus facilement et une déformation plus grande due au fluage comme le démontre notre étude surtout en cas de fortes sollicitations ou de variation de température. Cependant, en dépit de ces inconvénients de l'enrobé à froid, ce dernier présente néanmoins quelques avantages qui sont l'utilisation de moins de matériel, un temps de travaux moindre, son prix plus attractif que celui de l'enrobé

à chaud car il est le produit le moins cher pour des travaux de réparation sur route et aux travaux routiers à trafic faible et moyen. A cet effet, au terme de cette étude, la meilleure formulation retenue est celle dosée à 14% d'émulsion et à 0% de pétrole ayant une stabilité de 10,82 KN et un fluage de 1,17 mm, correspondant à un quotient Marshall $S/F = 9,3$ le plus élevé, ce qui indique une meilleure résistance à la déformation des chaussées due à l'application des charges relatives au trafic routier.

Références

- [1]- S. SAMMOURI, "Recyclage à froid des enrobés : Optimisation des formulations des enrobés à froid à fort taux d'AE" thèse unique en génie civil, Université de Limoges (2023) 209p.
- [2]- J. SERFASS, "Enrobés à froid : quelles spécifications pour la construction et l'entretien?", SCREG (Groupe COLAS) – 4, Rue Jean Mermoz – 78772 MAGNY LES HAMEAUX CEDEX-France.
- [3]- Tropical Engineering Consult (TrEC), "Etude de Formulation de Béton Bitumineux à Froid", N/Réf.: 04/2025/RPEBBF/DRI/DT/DG/TrEC, Octobre 2025
- [4]- J. P. SERFASS, "Enrobés à froid : quelles spécifications pour la construction et l'entretien?" SCREG (Groupe COLAS) CEDEX-FRANCE,
- [5]- Association française de normalisation AFNOR, Norme NF EN 12697-1 "Mélange bitumineux, méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud, Partie 1 : Teneur en liant soluble", Août 2012, Paris.
- [6]- Association française de normalisation AFNOR, Norme NF EN 933-1, "Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats-partie 1: détermination de la granularité-Analyse granulométrique par tamisage", mai 2012, Paris, URL: <https://urls.fr/rIwxGM>, (juillet 2024)
- [7]- Association française de normalisation AFNOR, Norme NF EN 12697-2 "Mélange bitumineux, méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud, Partie 2 : Granulométrie", Juin 2003, Paris.
- [8]- Association française de normalisation AFNOR, Norme NF EN 12697-30 "Mélange bitumineux, méthodes d'essai, Partie 30 : Confection d'éprouvettes par comparateur à impact", Décembre 2018, Paris.
- [9]- Association française de normalisation AFNOR, Norme NF EN 12697-6 "Mélange bitumineux, méthodes d'essai, Partie 6 : Détermination de la masse volumique apparente des éprouvettes bitumineuses", Août 2012, Paris.
- [10]- Association française de normalisation AFNOR, Norme NF EN 12697-34 "Mélange bitumineux, Partie 34 : Essai Marshall", Décembre 2004, Paris.
- [11]- I. MAMAH, "Mini-projet de géotechnique routière : Dimensionnement Routier", août 2016, 5ème année,
- [12]- Tropical Engineering Consult (TrEC), "Projet d'Etude d'un Béton Bitumineux à Froid (BBF)", N/Réf.: 03/2025/RPEBBF/DRI/DT/DG/TrEC, Août 2025
- [13]- V. GAUDEFROY (IFSTTAR), "Bonne pratique avec les enrobés à froid" Conférence JERI, Lausanne, 20 novembre 2018, URL : www.ifsttar.com
- [14]- Association française de normalisation AFNOR, Norme NF EN 13108-31, "Mélanges bitumineux – Spécifications pour le matériau – Partie 31 : enrobés bitumineux à l'émulsion de bitume", Septembre 2019, Paris, URL: <https://urls.fr/sVIVb9>, (septembre 2025)
- [15]- Ministry of Transport and Highways (MORTH), "As per MORTH specifications, the minimum Marshall stability" URL : <http://urls.fr/IfVK0k>
- [16]- S. SAMMOURI, "Recyclage à froid des enrobés : Optimisation des formulations des enrobés à froid à fort taux d'AE" thèse unique en génie civil, Université de Limoges (2023) 209p.

[17]- A. BUQUET, J. D. TALLIEU, P. ROBIN, “Grave Emulsion (GE) et Béton Bitumineux à Froid (BBF) : des techniques à froid économes et performantes pour un entretien durable des chaussées”, Centre d’études et d’expertise sur les risques, l’environnement, la mobilité et l’aménagement (CEREMA), Direction Territoriale Méditerranée, 9 décembre 2016

[18]- Tropical Engineering Consult (TrEC), “ Prestation de contrôle géotechnique et de qualité des travaux urgents d’entretien périodique de certaines routes nationales transversales revêtues et voiries non revêtues de certaines villes de l’intérieur : région des plateaux et de la Kara ” Ministère des Travaux Publics, Marché N° 00303/2024/AMI/MTP/PI/SAFER, Avril 2024 à nos jours.

[19]- A. Sabran-Pontevès, “ International Chantier Routier en Côte d’Ivoire : recyclage des latérites à l’émulsion de bitume” Revue Générale des Routes et de l’Aménagement (RGRA), Revue N° 971, Editeur des infrastructures pour la mobilité, mars 2020, URL : <https://urls.fr/Q7DabW>