



**ANALYSE COMPARATIVE DES PERFORMANCES DES BÉTONS
BITUMINEUX SEMI-GRENUS 0/10 ET 0/14 : ANALYSE DE LA RÉSISTANCE
AUX CONDITIONS CLIMATIQUES ET AUX CHARGES DE TRAFIC**

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2IE AVEC GRADE DE
MASTER
SPECIALITE GÉNIE CIVIL BÂTIMENT ET TRAVAUX PUBLICS

Présenté et soutenu publiquement le 22 Janvier 2025 par

Deyrell Dodava Wendnonga Manuel SAWADOGO (20190017)

Encadrant 2iE : Dr. Philbert NSHIMIYIMANA (enseignant-chercheur 2iE)

Maître de stage : M. Jonas KARDIOULA, Directeur du département laboratoire LBTP

Structures d'accueil du stage : Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics (LBTP)

Côte d'Ivoire

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr. Mamadou DIOP

Membres et correcteurs : Dr. Louis Arnaud OUEDRAOGO

M. Simon-Pierre SALASSI

Promotion [2024/2025]

DÉDICACES

Je dédie ce document à toute ma famille et proches plus particulièrement à mes parents, pour leur amour, leurs soutiens et leurs encouragements tout au long de mes années d'études.

Puissent-ils trouver en ce document le fruit de leurs efforts.

REMERCIEMENTS

Nous ne saurions commencer la rédaction de ce rapport sans toutefois remercier l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement 2iE et tout le corps enseignant pour les efforts remarquables mis en œuvre dans le cadre de notre formation.

Nos sincères remerciements vont à l'endroit de tout le personnel du Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics (LBTP) pour leur accueil chaleureux et leur disponibilité à nous aider tout au long de notre stage. Nos remerciements vont également à l'endroit des distinguées personnes ci-dessous citées sans lesquelles le bon déroulement du stage de fin d'études ainsi que la réalisation de ce rapport n'aurait été possible :

- **Docteur Césaire HEMA**, Chef du département génie civil de l'Institut 2iE, pour son engagement inlassable en faveur d'une formation de qualité au sein de la filière génie civil bâtiment et travaux publics ;
- **Docteur Philbert NSHIMIYIMANA**, Enseignant-chercheur de l'Institut 2iE et notre encadreur pédagogique pour sa grande disponibilité et le bon suivi de notre travail de fin d'études ;
- **Monsieur KOUASSI Jean-Claude**, Directeur Général du Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics (LBTP), pour l'opportunité de stage offerte ;
- **Monsieur KARDIOULA Jonas**, Directeur du département laboratoire LBTP, notre encadreur technique, pour son accueil chaleureux et sa disponibilité à répondre à nos préoccupations ;
- **Docteur KOUASSI Paulin Maxime Yao**, Conseiller Technique du Directeur Général du LBTP, pour son aide, ses précieux conseils et sa grande disponibilité ;
- **Monsieur N'GORAN Bernabé**, Chef laboratoire du LBTP, pour son aide dans la réalisation de notre étude technique et sa disponibilité ;

Enfin, nos remerciements vont à l'endroit de toutes les bonnes volontés qui n'ont pas été citées, mais qui de près ou de loin ont contribué à la bonne tenue de ce stage en nous aidant à satisfaire notre curiosité et en nous prodiguant de sages conseils et recommandations.

RÉSUMÉ

Le présent mémoire porte sur l'analyse comparative des performances des bétons bitumineux semi-grenus (BBSG) 0/10 et 0/14, en analysant leur résistance aux contraintes climatiques et aux charges de trafic, tout en évaluant leurs aspects financiers et environnementaux. Les deux formulations étudiées sur la base du même module de richesse, présentent les compositions suivantes : BBSG 0/10 (50% sables 0/4, 50% gravier 4/10, 5,68% bitume 35/50) et BBSG 0/14 (50% sables 0/4, 35% gravier 4/10, 15% gravier 10/14, 5,66% bitume 35/50).

Sur le plan technique, le BBSG 0/14 démontre une stabilité supérieure à la température élevée (1215 kg contre 1144 kg pour le 0/10), le rendant plus adapté aux climats chauds et aux charges lourdes. En revanche, le BBSG 0/10 offre une meilleure résistance à l'humidité (rapport immersion/compression de 78% contre 75% pour le 0/14), attribuée à sa granulométrie plus fine et sa teneur légèrement supérieure en bitume, améliorant son étanchéité. Concernant la résistance mécanique, le BBSG 0/14 présente une moindre sensibilité à l'orniérage (5,25% contre 7,70% pour le 0/10) et un module de rigidité plus élevé (8399 MPa contre 7416 MPa), confirmant sa meilleure aptitude à supporter les charges importantes. L'analyse financière, menée à l'échelle du laboratoire pour une production de 10 tonnes, révèle un coût légèrement supérieur pour le BBSG 0/10 (2891 FCFA de plus que le 0/14) en raison de sa plus forte teneur en bitume. Cependant, l'analyse des données de marché indique que le coût final de mise en œuvre des deux matériaux est comparable, dépendant principalement de l'épaisseur de la couche réalisée. L'évaluation environnementale met en évidence un impact légèrement plus important du BBSG 0/10 sur son cycle de vie, principalement dû à l'énergie supplémentaire requise pour la production des fractions granulaires fines et à sa durabilité.

Enfin, une analyse multicritère intégrant tous les aspects étudiés montre une prédominance du BBSG 0/14 avec un score global de 57% contre 43% pour le BBSG 0/10. Cette analyse conclut que le BBSG 0/14 est un choix plus pertinent pour les applications exigeant robustesse et durabilité, tandis que le BBSG 0/10 conserve son intérêt dans les contextes privilégiant la résistance à l'humidité et soumis à des charges moins intenses.

Mots Clés :

- 1 - Bétons bitumineux semi-grenus (BBSG)**
- 2 - Performances mécaniques**
- 3 - Analyse financière**
- 4 - Impact environnemental**
- 5 - Analyse multicritère**

ABSTRACT

This study compares the performance of semi-grained bituminous concrete (SGBC) 0/10 and 0/14, analysing their resistance to climatic conditions and traffic loads, as well as their financial and environmental implications. The two formulations, based on the same binder content, have the following compositions: SGBC 0/10 (50% 0/4 sand, 50% 4/10 gravel, 5.68% 35/50 bitumen) and SGBC 0/14 (50% 0/4 sand, 35% 4/10 gravel, 15% 10/14 gravel, 5.66% 35/50 bitumen).

Technically, SGBC 0/14 shows superior high-temperature stability (1215 kg vs. 1144 kg for 0/10), making it more suitable for hot climates and heavy loads. Conversely, SGBC 0/10 offers better moisture resistance (immersion/compression ratio of 78% vs. 75% for 0/14), due to its finer grading and slightly higher bitumen content, improving impermeability. Regarding mechanical resistance, SGBC 0/14 exhibits less rutting (5.25% vs. 7.70% for 0/10) and a higher stiffness modulus (8399 MPa vs. 7416 MPa), confirming its better ability to withstand heavy loads. The financial analysis, at laboratory scale for a 10-tonne production, reveals a slightly higher cost for SGBC 0/10 (2891 FCFA more than 0/14) due to its higher bitumen content. However, market data suggests comparable final implementation costs, mainly depending on layer thickness. The environmental assessment highlights a slightly greater life-cycle impact for SGBC 0/10, mainly due to the extra energy needed for producing fine aggregate fractions and its durability.

Finally, a multi-criteria analysis, considering all aspects, shows SGBC 0/14's predominance (57% vs. 43% for SGBC 0/10). This analysis concludes that SGBC 0/14 is a more relevant choice for applications requiring robustness and durability, while SGBC 0/10 remains relevant where moisture resistance is key and loads are less intense.

Key words:

-
- 1 - Semi-grained bituminous concrete (SGBC)**
 - 2 - Mechanical performance**
 - 3 - Financial analysis**
 - 4 - Environmental impact**
 - 5 - Multi-criteria analysis**

LISTE DES ABRÉVIATIONS

2iE : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

AFNOR : Association Française de Normalisation

ACV : Analyse du Cycle de Vie

BB : Béton Bitumineux

BBDR : Béton Bitumineux Drainant

BBM : Béton Bitumineux Mince

BBME : Béton Bitumineux à Module Elevé

BBS : Béton Bitumineux Souples

BBSG : Béton Bitumineux Semi-grenu

BBTM : Béton Bitumineux Très minces

BBUM : Béton Bitumineux ultra-minces

CEBTP : Centre Expérimental du Bâtiment et des Travaux Publics

EME : Enrobés à Module élevé

GB : Grave Bitume

GES : Gaz à Effet de Serre

ITSR : Indirect Tensile Strength Ratio

LA : Los Angeles

LBTP : Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics

LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

MTLH : Matériaux Traités aux Liants Hydrauliques

NE : Nombre d'essieux Équivalent

PL/J : Poids Lourds par Jour

S_{min} : Module de rigidité minimum

TL_{int} : Teneur en Liant initiale

TVC : Tout Venant de Carrière

V_i : Pourcentage de vides initial

V_{min} : Pourcentage de vides minimum

V_{max} : Pourcentage de vies maximum

V_s : Pourcentage de vides seuil

SOMMAIRE

DÉDICACES	i
REMERCIEMENTS	ii
RÉSUMÉ.....	iii
ABSTRACT	iv
LISTE DES ABRÉVIATIONS	v
SOMMAIRE	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES FIGURES.....	xi
LISTE DES IMAGES	xii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : PRÉSENTATION DE LA STRUCTURE D’ACCUEIL ET DE L’ÉTUDE ...	2
I. PRÉSENTATION DE LA STRUCTURE D’ACCUEIL.....	2
II. PRÉSENTATION DE L’ÉTUDE	3
1. Contexte et justification	3
2. Objectif de l’étude	4
CHAPITRE II : REVUE DE LITTÉRATURE.....	5
I. GÉNÉRALITÉS SUR LES BÉTONS BITUMINEUX.....	5
1. Définition	5
2. Types de bétons bitumineux.....	5
3. Critères de performances des bétons bitumineux.....	6
II. FORMULATION DES BÉTONS BITUMINEUX	7
1. Méthodes de formulation	7
2. Formulation performancielle.....	7
3. Épreuve de formulation des bétons bitumineux.....	8
III. INFLUENCE DES CONDITIONS CLIMATIQUES ET CHARGES DE TRAFIC SUR LES BÉTONS BITUMINEUX.....	8
1. Conditions climatiques.....	8
2. Charges de trafic.....	10
IV. BÉTON BITUMINEUX SEMI-GRENUS	10
1. Définition	10
2. Spécifications	11
CHAPITRE III : MATÉRIAUX ET MÉTHODES.....	12
I. MATÉRIAUX.....	12
1. Granulats	12
2. Bitume	12
II. MÉTHODES	12
1. Campagne expérimentale	12
2. Analyse financière.....	15
3. Étude d’impact environnemental	15

4.	Analyse multicritère	16
III.	HYPOTHÈSES	17
1.	Hypothèse sur les performances mécaniques	17
2.	Hypothèse sur la résistance aux conditions climatiques	17
3.	Hypothèse sur la durabilité.....	17
4.	Hypothèse sur le rapport coût-efficacité	17
5.	Hypothèse sur les performances environnementales	17
6.	Hypothèse sur les domaines d'application	17
CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.....		18
I.	CAMPAGNE EXPÉRIMENTALE	18
1.	Caractérisation des constituants :	18
2.	Formulation des bétons bitumineux	19
3.	Résistance aux conditions climatiques	23
4.	Résistance aux charges de trafic.....	26
II.	ANALYSE FINANCIÈRE	30
1.	Prix d'achats des matériaux.....	30
2.	Analyse comparative	30
III.	ÉTUDE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL	33
1.	Définition des objectifs et du champ de l'étude	33
2.	Inventaire du cycle de vie.....	33
3.	Évaluation des impacts	34
4.	Interprétation	37
5.	Mesures d'atténuation	37
IV.	ANALYSE MULTICRITÈRE	39
1.	Présentation des critères de choix	39
2.	Structuration hiérarchique du problème de choix	39
3.	Comparaison binaire des niveaux de prises de décisions.....	40
CONCLUSION ET PERSPECTIVES		44
I.	CONCLUSION	44
II.	PERSPECTIVES.....	45
LIMITES ET RECOMMANDATIONS		46
I.	LIMITES DE L'ÉTUDE.....	46
1.	Campagne expérimentale	46
2.	Analyse financière.....	46
3.	Étude d'impact environnemental	46
II.	RECOMMANDATIONS	46
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		48
RÉFÉRENCES NORMATIVES.....		49
ANNEXES		I

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : les différents types de bétons bitumineux et leurs épaisseurs de mises en œuvre ..	6
Tableau 2 : propriétés et attentes mécaniques des bétons bitumineux	6
Tableau 3 : niveaux de formulation associés aux bétons bitumineux	8
Tableau 4 : Spécifications des bétons bitumineux Semi-grenus	11
Tableau 5 : Résultat des essais d'identification sur les granulats	18
Tableau 6 : Résultats des essais d'identification sur le bitume	18
Tableau 7 : composition granulatoire	19
Tableau 8 : formules de teneur en liant des bétons bitumineux	19
Tableau 9 : Résultats d'essais par formule (bétons bitumineux 0/10)	20
Tableau 10 : Résultats de essais par formule (bétons bitumineux 0/14)	21
Tableau 11 : Récapitulatif des formules de l'étude	22
Tableau 12 : Résultats de l'essai PCG	22
Tableau 13 : Résultats de l'essai Marshall	23
Tableau 14 : Résultats de l'essai Duriez des BBSG 0/10	24
Tableau 15 : Résultats de l'essai Duriez des BBSG 0/14	24
Tableau 16 : Récapitulatif des résultats de l'essai Duriez	25
Tableau 17 : Résultats de l'essai d'orniérage	26
Tableau 18 : Récapitulatif des résultats de l'essai d'orniérage	27
Tableau 19 : Résultats de l'essai d'orniérage	28
Tableau 20 : prix d'achats des matériaux de l'étude	30
Tableau 21 : Coûts de formulation des bétons bitumineux semi-grenus de l'étude	30
Tableau 22 : Différence de coûts de formulation des bétons bitumineux semi-grenus	31
Tableau 23 : Prix de mise en œuvre des bétons bitumineux semi-grenus	31
Tableau 24 : Inventaires du cycle de vie des bétons bitumineux	33
Tableau 25 : Points de comparaison d'impact environnemental	34
Tableau 26 : impact environnementale des bétons bitumineux	35
Tableau 27 : Comparaison du cycle de vie des bétons bitumineux	35
Tableau 28 : Impact environnemental des bétons bitumineux semi-grenus	36
Tableau 29 : Critère de comparaison	39
Tableau 30 : Quantification de la comparaison binaire des critères	40
Tableau 31 : Poids des critères	40
Tableau 32 : Poids des sous-critères	41

Tableau 33 : Matrice de jugement des variantes	42
Tableau 34 : Agrégation finale des variantes	42
Tableau 35 : Résultats de l'analyse granulométrique des concassés	II
Tableau 37 : Résultats PCG (BBSG 0/10)	V
Tableau 38 : Résultats PCG (BBSG 0/14)	V
Tableau 38 : Matrice de FECTEAU	VI
Tableau 39 : Description des critères d'évaluation de la matrice de FECTEAU	VII
Tableau 40 : Description des critères d'importance de la matrice de FECTEAU	VII
Tableau 41 : Table de SAATY pour la comparaison binaire des éléments	IX

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Organisation du LBTP.....	3
Figure 2 : Niveaux de formulation performancielle.....	7
Figure 3 : Schématisation des sollicitations induites par la température	9
Figure 4 : Décollement des enrobés dû à des pertes d’adhésivité et de cohésion	9
Figure 5 : Schématisation des sollicitations induites par le trafic sous une roue.....	10
Figure 6 : Méthodologie d’analyse du cycle de vie (ACV)	15
Figure 8 : fluage en fonction de la teneur en liant (BBSG 0/10)	20
Figure 7 : stabilité en fonction de la teneur en liant (BBSG 0/10).....	20
Figure 10 : fluage en fonction de la teneur en liant (BBSG 0/14)	21
Figure 9 : stabilité en fonction de la teneur en liant (BBSG 0/14).....	21
Figure 11 : Comparaison de la stabilité Marshall	23
Figure 12 : Comparaison du fluage	23
Figure 13 : Comparaison du rapport immersion/compression	25
Figure 14 : Courbe d’orniérage des bétons bitumineux semi-grenus.....	26
Figure 15 : Comparaison du pourcentage du profondeur d’ornière	27
Figure 16 : Comparaison de la pente d’ornière	27
Figure 17 : Comparaison du module de rigidité.....	29
Figure 18 : impact sur le climat des bétons bitumineux.....	36
Figure 19 : impact sur les ressources des bétons bitumineux	36
Figure 20 : impact environnemental des bétons bitumineux.....	37
Figure 21 : Structure hiérarchique des différents niveaux de prises de décision	39
Figure 22 : Poids des critères à la décision finale	40
Figure 23 : Poids des sous-critères à la décision finale.....	41
Figure 24 : Poids des <i>solutions</i> à la décision finale.....	43
Figure 25 : Courbes d’analyse granulométrique des concassés	II
Figure 26 : Formulation à blanc théorique du BBSG 0/10	III
Figure 27 : Formulation à blanc réel du BBSG 0/10.....	III
Figure 28 : Formulation à blanc théorique du BBSG 0/14	IV
Figure 29 : Formulation à blanc réel du BBSG 0/14.....	IV
Figure 30 : Courbes de pourcentages de vides BBSG 0/10	V
Figure 31 : Courbes de pourcentages de vides BBSG 0/14	V
Figure 32 : Structure hiérarchique générique.....	VIII

LISTE DES IMAGES

Image 1 : Éprouvettes Marshall	XII
Image 2 : Écrasement des éprouvettes à la presse Marshall	XII
Image 3 : Éprouvettes Duriez.....	XII
Image 4 : Éprouvettes d’orniérage et de module de rigidité	XII
Image 5 : Éprouvettes du béton bitumineux semi-grenu 0/10 après essai d’orniérage.....	XIII
Image 6 : Éprouvettes du béton bitumineux semi-grenu 0/14 après essai d’orniérage.....	XIII

INTRODUCTION

Les routes constituent l'épine dorsale des échanges économiques et sociaux, reliant les communautés et facilitant le transport des marchandises. En Côte d'Ivoire, où l'état des infrastructures routières est essentiel pour soutenir le développement économique, il est primordial de garantir leur durabilité et leur efficacité. Cependant, ces infrastructures sont constamment soumises à des conditions climatiques exigeantes et à une augmentation du trafic routier, ce qui accélère leur dégradation.

Parmi les revêtements routiers les plus utilisés, les bétons bitumineux semi-grenus 0/10 et 0/14 sont souvent employés dans des contextes similaires et sous des charges de trafic identiques, sans qu'une distinction claire ne soit toujours faite entre leurs performances respectives. Bien que leurs propriétés techniques présentent des différences, le béton bitumineux 0/10 offrant une surface plus lisse et compacte tandis que le 0/14 montre une résistance accrue aux contraintes lourdes. Leur usage dans des situations comparables soulève des interrogations quant à leur efficacité relative.

Des observations sur le terrain et des données techniques recueillies dans différents projets routiers ivoiriens montrent que ces deux types de bétons sont généralement choisis sans analyse approfondie de leurs performances en fonction des contraintes locales. Cette situation pose une question cruciale : **dans des contextes comparables, quel type de béton bitumineux semi-grenu, 0/10 ou 0/14, représente la meilleure alternative pour assurer la pérennité des infrastructures routières ?**

C'est dans ce cadre que nous nous sommes penchés sur l'analyse comparative des performances de ces revêtements bitumineux face aux conditions climatiques et aux charges du trafic dans le contexte ivoirien. D'où le thème : « *ANALYSE COMPARATIVE DES PERFORMANCES DES BÉTONS BITUMINEUX SEMI-GRENUS 0/10 ET 0/14 : ANALYSE DE LA RÉSISTANCE AUX CONDITIONS CLIMATIQUES ET AUX CHARGES DE TRAFIC* »

Le présent document s'articule autour de grands points présentés dans l'ordre suivant : la présentation de la structure d'accueil et de l'étude, les objectifs et les hypothèses de travail, une revue de littérature, le matériel et les méthodes d'étude et les résultats et discussions.

CHAPITRE I : PRÉSENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL ET DE L'ÉTUDE

I. PRÉSENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL

Le Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics (LBTP) est une société créée en 1954 dans sa forme initiale et transformée en 1993 en Société d'économie mixte et placée sous la tutelle du ministère des infrastructures économiques et du ministère de l'économie et des finances de Côte d'Ivoire. Le Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics est un organisme d'études, de contrôle et de recherche dans le domaine du génie civil, du bâtiment, de l'économie d'énergie et du contrôle industriel.

Le LBTP, certifié ISO 9001 : 2015 et fort de plus de 60 ans d'expériences acquises depuis 1954 dans le secteur du Génie Civil, de l'industrie et de l'Énergie, a développé une expertise dans le domaine de la sécurité des infrastructures. Cette expertise permet d'assister les maîtres d'ouvrage, les maîtres d'œuvre et les entreprises dans la construction et la maintenance de leurs infrastructures.

Le Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics a pour missions principales :

- Apporter son expertise aux bureaux d'études techniques en mettant à leur disposition des données relatives aux sols d'assises pour la conception des routes, ponts, aéroports, ports, voies ferroviaires et bâtiments
- Effectuer des études de sols pour déterminer le type de fondations appropriés
- Assurer la sécurité des installations électriques, des équipements industriels et de l'économie d'énergie des bâtiments
- Contribuer au développement des nouveaux matériaux de construction
- Contribuer à la modernisation des infrastructures de transport
- Former aux techniques de contrôle qualité

Le Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics (LBTP) est organisé comme suit :

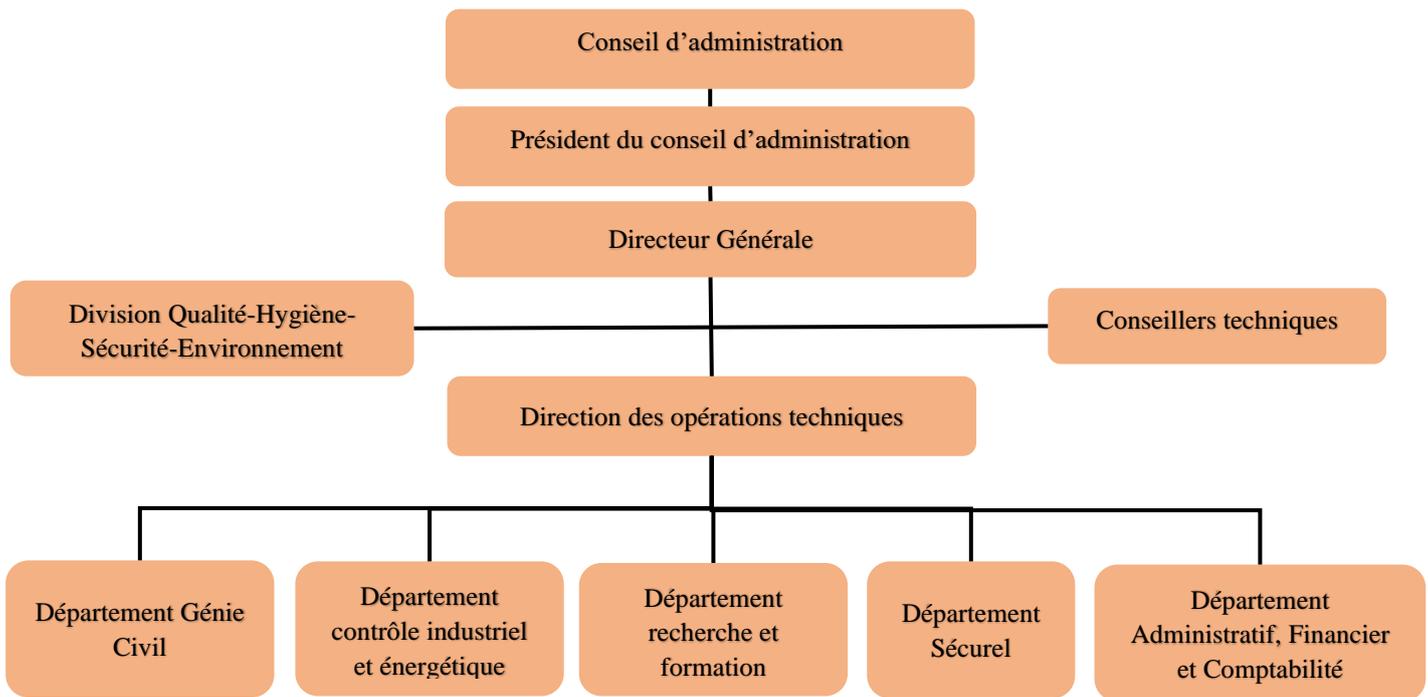


Figure 1 : Organisation du LBTP

Source : LBTP

II. PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE

1. Contexte et justification

Dans le contexte ivoirien, marqué par des conditions climatiques spécifiques et un trafic routier en constante évolution, il est crucial d'évaluer les performances des bétons bitumineux semi-grenus 0/10 et 0/14 qui constituent les principaux revêtements utilisés dans les projets routiers. En effet, les variations saisonnières importantes, caractérisées par une alternance de saisons sèches et humides, couplées à des précipitations parfois abondantes, soumettent les chaussées à des sollicitations thermiques et hydriques significatives. De plus, l'augmentation du trafic routier, notamment dans les zones urbaines, induit des charges dynamiques répétitives qui accélèrent la dégradation des matériaux. Cette étude vise à comparer la résistance de ces deux types d'enrobés aux agressions climatiques et aux charges du trafic et à guider les décideurs sur le choix de matériaux adapté offrant une bonne durabilité, un bon rapport coût-efficacité et l'impact environnemental le plus faible pour les infrastructures routières ivoiriennes. C'est dans ce cadre que ce thème nous a été confié au sein du Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics (LBTP).

2. Objectif de l'étude

a. Objectif général

L'objectif général de cette étude est de réaliser une analyse comparative approfondie des performances des enrobés bitumineux semi-grenus 0/10 et 0/14, en mettant l'accent sur leur résistance aux conditions climatiques et aux charges de trafic. Cette étude vise à déterminer le matériau le mieux adapté à différentes conditions d'exploitation, afin d'optimiser la conception et l'entretien des chaussées dans le contexte ivoirien.

b. Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques pour la réalisation de notre étude se présentent comme suit :

- **Étudier le comportement face aux températures élevées** : Évaluer la stabilité des deux granulométries sous des températures ambiantes élevées courantes.
- **Évaluer la résistance à l'humidité et à l'imbibition** : Analyser la performance des enrobés semi-grenus 0/10 et 0/14 face à l'infiltration d'eau, notamment en période de pluies abondantes, fréquentes dans ces zones.
- **Étudier la durabilité sous charges lourdes** : Examiner la capacité des deux types de granulats à résister aux déformations permanentes sous charges.
- **Évaluer le choix granulométrique le plus économique** : Déterminer lesquels des bétons bitumineux 0/10 ou 0/14 est le plus économique, en tenant compte des contraintes locales d'approvisionnement et des infrastructures de construction.
- **Évaluer l'impact environnemental** : Discuter des différences en termes d'empreinte écologique entre l'utilisation d'enrobés 0/10 et 0/14, en lien avec la disponibilité des ressources et les techniques de recyclage.

CHAPITRE II : REVUE DE LITTÉRATURE

Les bétons bitumineux sont des matériaux de construction largement utilisés pour les chaussées pour leurs bonnes caractéristiques, il est donc nécessaire de comprendre ces matériaux et leurs formulations. Cette revue de littérature permet de faire un état des lieux des connaissances sur les bétons bitumineux. Dans ce chapitre, nous allons aborder la notion de béton bitumineux, ses constituants, les différents types, les critères de performance et les facteurs influençant leurs performances.

I. GÉNÉRALITÉS SUR LES BÉTONS BITUMINEUX

1. Définition

Selon le dictionnaire professionnel du BTP, le « béton bitumineux » est un « type d'enrobé à chaud constitué d'un béton lié au bitume ; utilisé en particulier pour les couches de roulement des chaussées, des voiries ». Les couches de roulements ont pour rôle de protéger les couches sous-jacentes contre les agressions. Il est donc important que les bétons bitumineux qui seront utilisés présentent de bonnes caractéristiques afin de jouer ce rôle.

Les enrobés bitumineux à chaud, comme le béton bitumineux sont constitués par l'association de granulats (filler, sable, gravillons), formant le squelette granulaire et de liants hydrocarbonés (asphalte, goudron, bitume) qui assurent la cohésion. Ils comportent généralement en termes de proportion 95 % de granulats pour environ 5 % de liant.

2. Types de bétons bitumineux

Selon la norme NF 98-086, version 2019, Il existe de nombreuses catégories de béton bitumineux pour couche de roulement spécifiques par la granularité et les épaisseurs de mises en œuvre qui sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 1 : les différents types de bétons bitumineux et leurs épaisseurs de mises en œuvre

Type de bétons bitumineux	Granulométrie	Épaisseur (cm)
Les bétons bitumineux minces (BBM)	0/10	3 à 4
	0/14	3,5 à 5
Les bétons bitumineux très minces (BBTM)	0/6	2 à 3
	0/10	
Les bétons bitumineux ultra-minces (BBUM)	0/6	1,5
	0/10	
Les bétons bitumineux souples (BBS)	0/10 type 1	4 à 5
	0/10 type 2	
	0/10 type 3	8
	0/10 type 4	10 à 12
Les bétons bitumineux Drainant (BBD _r)	0/6	3 à 4
	0/10	4 à 5
Les bétons bitumineux Semi-Grenus (BBSG)	0/10	5 à 7
	0/14	6 à 9
Les bétons bitumineux à Modules Elevés (BBME)	0/10	5 à 7
	0/14	6 à 9

Source : NF P98-086,2019

3. Critères de performances des bétons bitumineux

Les bétons bitumeux doivent répondre à des exigences de performances spécifiées dans le tableau suivant :

Tableau 2 : propriétés et attentes mécaniques des bétons bitumineux

Propriétés	Granulométrie		Teneur en liant		Compactage
	Dense	Uniforme	Forte	Faible	
Stabilité	X			X	Fort
Tenue à l'eau	X		X		Fort
Rigidité et résistance à l'orniérage	X			X	Fort
Durabilité	X		X		Fort
Résistance à la fatigue	X		X		Fort

II. FORMULATION DES BÉTONS BITUMINEUX

L'objectif principal de la formulation des bétons bitumineux est de déterminer une composition optimale de granulats, de liants et de vides permettant d'atteindre les performances visées. Cette étude de formulation doit aboutir à une formule qui répond aux spécifications des documents contractuels.

1. Méthodes de formulation

Jusqu'à présent, l'optimisation des formulations pour les mélanges bitumineux repose encore sur une approche empirique, basée sur des essais traditionnels qui ne sont souvent que faiblement corrélés aux performances réelles des matériaux. Par ailleurs, selon les contextes des différents pays, nous pouvons indiquer qu'on rencontre l'une des méthodes suivantes :

- La méthode Marshall « Marshall Mix Design » ;
- La méthode française dite performancielle ;
- La méthode Américaine SUPERPAVE « SUPERPAVE Mix » ;
- Les recommandations LBTP (Côte d'Ivoire).

2. Formulation performancielle

La méthode de formulation fait appel aux caractéristiques des constituants, à la tenue à l'eau, au pourcentage de vides à la Presse à Cisaillement Giratoire, à la résistance à l'orniérage, au module de rigidité et à la résistance à la fatigue. (Manuel LCPC, 2007)

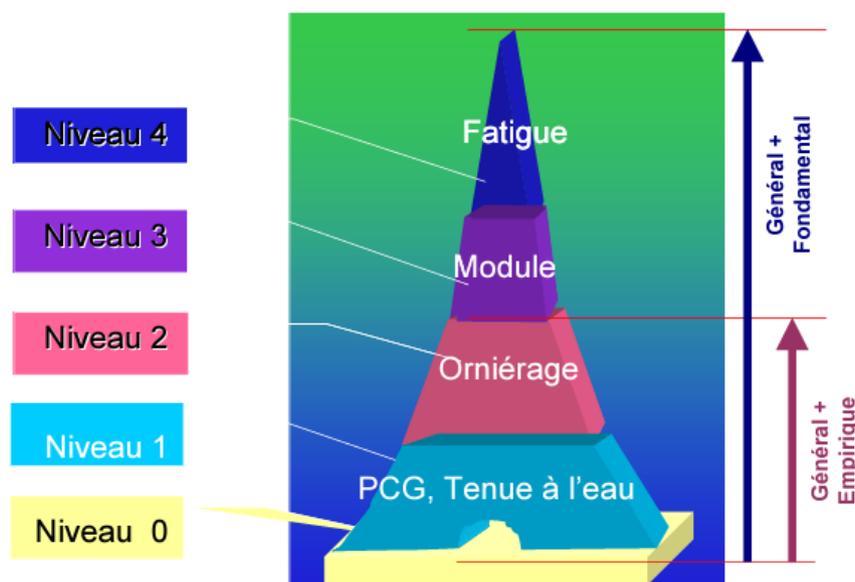


Figure 2 : Niveaux de formulation performancielle

Source : Manuel LCPC, 2007

3. Épreuve de formulation des bétons bitumineux

Selon le MOMETO des chaussées bitumineuses du CEBTP, le niveau de formulation des bétons bitumineux dépend du type et des spécifications particulières.

Tableau 3 : niveaux de formulation associés aux bétons bitumineux

Formule associée	Niveau de formulation possible
BBSG	1 ou 2
BBA	1,2 ou 3
BBM	1 ou 2
BBTM	1 ou 2
BBD _r	1
BBCS	1
GB	1, 2, 3 ou 4
EME	3 ou 4
BBME	3

Source : CEBTP, 2021

Recommandations : à minima, tout enrobé doit faire l'objet d'une étude de niveau 0 (détermination des constituants du mélange). Les enrobés appelés à recevoir du trafic poids lourds seront formulés au niveau 2 minimum. Les enrobés qui présentent des caractéristiques de module amélioré seront formulés au niveau 3 minimum. Pour le cas des enrobés présentant des caractéristiques de fatigue améliorées, ils seront formulés au niveau 4.

III. INFLUENCE DES CONDITIONS CLIMATIQUES ET CHARGES DE TRAFIC SUR LES BÉTONS BITUMINEUX

1. Conditions climatiques

- **La température :** Le comportement des enrobés est lié à celui du bitume, lequel dépend fortement de la température. Les variations de température affectent la rigidité et la viscosité des bétons bitumineux. Des températures élevées peuvent entraîner un ramollissement du bitume, augmentant ainsi les risques de déformations permanentes et de formation d'ornières. À l'inverse, des températures très basses peuvent rendre le bitume plus rigide et fragile, favorisant la fissuration thermique.

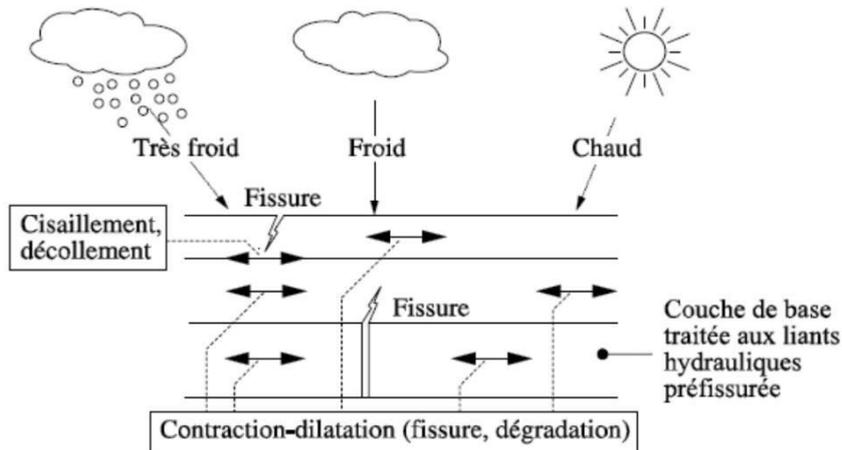


Figure 3 : Schématisation des sollicitations induites par la température

Source : M. Nguyen, 2009

- Les précipitations :** Les précipitations exercent une influence significative sur le comportement des enrobés bitumineux, pouvant entraîner une dégradation accélérée de ces revêtements routiers. La présence d'eau cause des dégradations au sein des bétons bitumineux. L'eau est à l'origine de plusieurs effets néfastes : la perte d'adhésivité entre le bitume et les granulats, la perte de cohésion du film bitumineux et/ou la rupture des agrégats, en particulier lorsqu'ils sont soumis au gel (Terrel & Al-Swailmi, 1994), (Bagampadde, et al., 2004), (N. Kingros, 2008), (Caro S., 2009) (Mehrara & Khodaii, 2013).

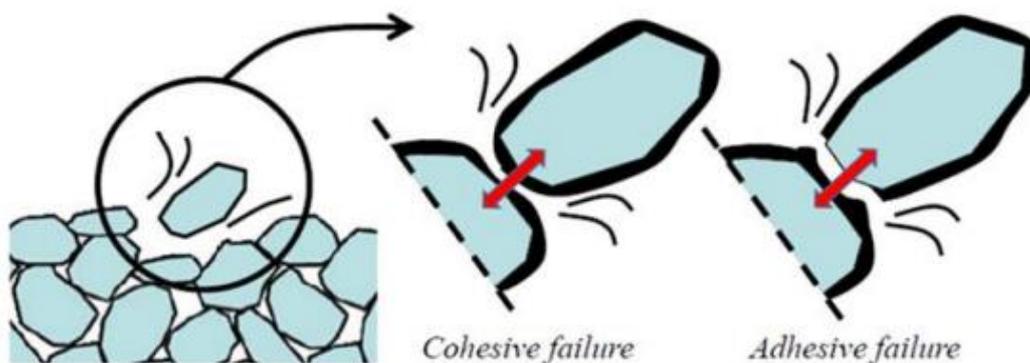


Figure 4 : Décollement des enrobés dû à des pertes d'adhésivité et de cohésion

Source : N. Kingros, 2008

2. Charges de trafic

Les couches de chaussées subissent des écrasements et des flexions sous l'effet du trafic (Figure 5). La répétition des chargements dus au trafic peut aboutir à des microfissures qui s'accumulent et entrainent le développement de fissures à travers le matériau, puis à travers les couches de chaussées. En particulier, la fissuration à la surface de la chaussée favorise les infiltrations d'eau. Ces dernières peuvent conduire à la réduction de portance du support, au décollement des couches et à une accélération de la dégradation des matériaux (Di Benedetto & Corté, 2005).

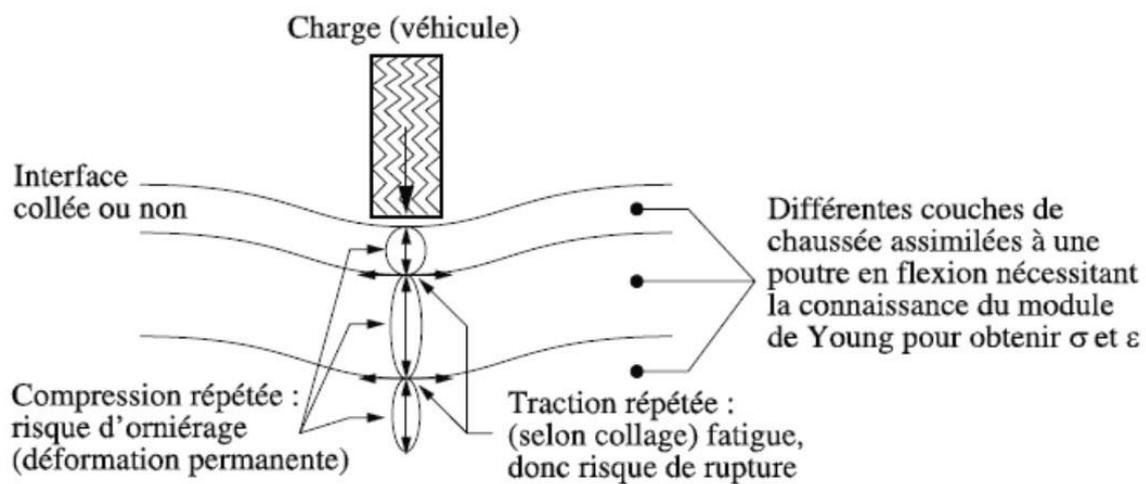


Figure 5 : Schématisation des sollicitations induites par le trafic sous une roue

Source : Di benedetto & Corté , 2005

Les compressions répétées sous l'effet des charges créent également des déformations permanentes qui induisent parfois un orniérage à la surface de la chaussée. Cet orniérage peut être dû aux déformations des couches d'enrobés bitumineux, mais également aux tassements différentiels des couches non liées inférieures éventuelles.

IV. BÉTON BITUMINEUX SEMI-GRENUX

1. Définition

Les bétons bitumineux semi-grenus (BBSG) sont des enrobés à chaud essentiellement utilisés en couche de roulement. Ils sont repartis en deux types selon la granulométrie :

- BBSG 0/10 granularité 0/10
- BBSG 0/14 granularité 0/14

Selon la norme NF P 98-086, 2019, ils sont mis en œuvre sur une épaisseur allant de 5 à 7 cm pour la granularité 0/10 et de 6 à 9 cm pour la granularité 0/14.

Il existe différentes classes de bétons bitumineux semi-grenus déterminés selon la nature du trafic :

- Classe 1 (C1) : $\leq T1$ (< 300 PL/J)
- Classe 2 (C2) : $T1$ ($300 < PL/J < 500$)
- Classe 3 (C3) : $> T1$ (> 500 PL/J)

2. Spécifications

Tableau 4 : Spécifications des bétons bitumineux Semi-grenus

Normes NF EN 13108-1		Bétons bitumineux semi-grenus (BBSG)					
		0/10			0/14		
		C1	C2	C3	C1	C2	C3
Teneur en liant (TLmin)		$\geq 5,2$ %			≥ 5 %		
PCG	Girations	V60			V80		
	Vmin – Vmax %	5 – 10			4 – 9		
Sensibilité à l'eau	ITSR %	≥ 70			≥ 70		
Orniérage	Vi – Vs %	5 – 8			5 – 8		
	% à 30 000 cycles (P)	≤ 10	$\leq 7,5$	≤ 5	≤ 10	$\leq 7,5$	≤ 5
Module de rigidité	Vi – Vs %	5 – 8			5 – 8		
	S _{min} (15°C – 10Hz) en MPa	≥ 5500	≥ 7000	≥ 7000	≥ 5500	≥ 7000	≥ 7000
Fatigue	Vi – Vs %	5 – 8			5 – 8		
	ε_6 (10°C – 25Hz) en μdef	≥ 100			≥ 100		

Source : NF EN 13108-1

CHAPITRE III : MATÉRIAUX ET MÉTHODES

I. MATÉRIAUX

Pour mener à bien cette étude comparative des bétons bitumineux semi-grenus 0/10 et 0/14, nous avons eu recours aux matériaux suivants des concassés et du bitume pur.

1. Granulats

Les concassés que nous avons eu a utilisé dans le cadre notre étude, ont été extraits dans la carrière de SISAG (Société Ivoir-Suisse Abidjanaise de Granit) dans les fractions suivantes :

- Sables 0/4
- Gravier 4/10
- Gravier 10/14

2. Bitume

Le bitume pur utilisé dans la formulation des bétons bitumineux semi-grenus est de classe 35/50 recueilli auprès de la structure SADEP (Société Africaine de Dérivés de Pétrole).

Pour le matériel d'étude, nous avons utilisé des normes citées en revue normatives, les différents accessoires de laboratoire pour réaliser les différents essais de la campagne expérimentale. Nous avons essentiellement utilisé comme logiciel le tableur Excel pour nos différents calculs et analyse de données.

II. MÉTHODES

1. Campagne expérimentale

Pour évaluer la résistance des bétons bitumineux semi-grenus 0/10 et 0/14 face aux conditions climatiques et aux charges de trafic, à la dimension du laboratoire, nous avons tout d'abord caractérisé les différents constituants des bétons bitumineux semi-grenus. Ensuite, nous avons formulé et préparé des échantillons de bétons bitumineux semi-grenus sur lesquels nous avons réalisé une série d'essais de performances.

a. Caractérisation des constituants

- **Granulats** : pour la caractérisation des concassés de notre étude, nous avons effectué les essais d'identification suivants : Analyse granulométrique (NF EN 12697), Équivalent de sables (NF EN 933-8), Poids spécifique (ISO 17892-3), Densité Apparente (NF EN 1097-3), Los Angeles (NF EN 1097-2), Micro-Déval (NF EN 1097-1).

- **Bitume** : pour la caractérisation du bitume pure de notre étude, nous avons effectué les essais d'identification suivants : Pénétrabilité (NF EN 1426), Point de ramollissement, Bille et anneau (NF EN 1427), Densité relative (ISO 3888).

b. Formulation des bétons bitumineux semi-grenus

- **Composition granulaire** : Pour déterminer la composition granulaire des bétons bitumineux, semi-grenus, nous avons eu recours aux données d'analyse granulométrique des granulats. En effet, les proportions de coupures granulaires pour la formulation des bétons bitumineux 0/10 et 0/14 ont été déterminés de manière théorique à travers un mélange à blanc des granulats et cadrer par les fuseaux granulométriques du LBTP. Ces proportions ont été ensuite vérifiées par un mélange à blanc réel des granulats.
- **Teneur en liant** : Pour déterminer la teneur en liant optimale de chaque béton bitumineux, nous avons d'abord déterminer une teneur en liant initiale à travers la formule basée sur le module de richesse K (Eq1).

$$T_{L_{int}} = K \times \alpha \times \sqrt[5]{\Sigma} \quad \text{Eq 1}$$

$$\text{Avec } \alpha = \frac{2,65}{PS_{sables}} ; \text{ coefficient correcteur}$$

PS_{sables} étant le poids spécifique de la fraction de sables et Σ est la surface spécifique des granulats, déterminée à l'aide de la relation empirique :

$$100\Sigma = 0.25G + 2.3S + 12s + 135 f. \quad \text{Eq 2}$$

Avec les proportions massiques : **G**, des éléments supérieurs à 6.3 mm ;

S, des éléments compris entre 6.3 mm et 0.315 mm ;

s, des éléments compris entre 0.315 mm et 0.08 mm ;

f, des éléments inférieurs à 0.08 mm.

Nous avons utilisé le module de richesse médian entre 3,2 et 3,5 pour déterminer la première formule de teneur en liant. Ensuite, nous avons déterminé deux autres formules en faisant varier la teneur en liant initiale de $\pm 0,5 \%$.

Ces différentes formules ont été soumises par la suite à l'essai Marshall, l'extraction de liant et d'analyse granulométrique afin de déterminer la formule qui présente une bonne stabilité pour chaque béton bitumineux semi-grenu donc une bonne teneur en liant et la formule à étudier.

- **Choix des formules de l'étude :** Dans le cadre de notre étude de performance et de faire une comparaison objective de ces deux bétons bitumineux, nous avons fait le choix de retenir les formules sur la base du même module de richesse ($K= 3,35$) permettant d'avoir des teneurs en liant sensiblement égale et respectant les spécifications de bases selon la norme NF EN 13108-1.

Nous nous sommes fixés comme critères d'évaluation la classe 2 des bétons bitumineux semi-grenus et les spécifications de la NF EN 13108-1 qui y sont associés.

c. Évaluation de la stabilité sous températures ambiantes élevées

Essai Marshall (NF EN 12697-34) : Cet essai a pour but de mesurer à l'échelle du laboratoire la stabilité (résistance maximale à la déformation) et le fluage (déformation) des bétons bitumineux sous température contraignante. L'essai Marshall est réalisé à $60 \text{ }^\circ\text{C}$ qui est une référence internationale permettant de simuler les conditions de températures élevées auxquelles les bétons bitumineux sont exposés en service.

d. Évaluation de la résistance à l'humidité et à l'imbibition

Essai Duriez (NF EN 12697-12) : Cet essai permet de déterminer, à travers plusieurs méthodes, la sensibilité à l'eau des bétons bitumineux. Les facteurs tels que l'immersion et la durée d'immersion permettent d'évaluer la résistance du béton bitumineux dans un environnement humide et de déterminer le matériau le plus adapté aux conditions climatiques.

e. Évaluation de la durabilité sous charges lourdes

Essai d'orniérage (NF EN 12697-22) : cet essai a pour but de déterminer la résistance du béton bitumineux aux déformations permanentes (ornières) en simulant les conditions de trafic réelles. L'essai est réalisé à température fixe permettant de déterminer le matériau le mieux adapté aux conditions de trafic et aux contraintes climatiques.

Essai du module complexe (NF EN 12697-26) : le principe de l'essai est de déterminer la rigidité du béton bitumineux, c'est-à-dire la résistance du matériau face à la déformation élastique sous l'effet d'une charge.

2. Analyse financière

Pour déterminer le choix granulométrique le plus économique entre les bétons bitumineux semi-grenus 0/10 et 0/14, nous avons mené une analyse financière. D'abord, cette analyse a consisté tout simplement à simuler, à l'aide des prix d'achats de nos matériaux, le coût de formulation des bétons bitumineux semi-grenus 0/10 et 0/14 (dimension laboratoire), notamment les formulations de notre étude. Cette première analyse permettra de présenter la différence qui peut exister entre les deux types d'enrobés au niveau de la formulation. Ensuite, nous allons nous étudier les prix de mise en œuvre des couches revêtements en béton bitumineux d'une entreprise de réalisation constituant la principale donnée dans les marchés routiers incluant la production, le transport et tenant compte des contraintes locales d'approvisionnement et des infrastructures de construction.

3. Étude d'impact environnemental

Afin d'évaluer l'impact environnemental des bétons bitumineux 0/10 et 0/14, nous avons procédé par une analyse du cycle de vie (ACV). L'analyse du cycle de vie est un outil du management environnemental qui permet de quantifier les impacts environnementaux d'un produit, d'un service ou d'un procédé tout au long de son cycle de vie. Cet outil normalisé par la série des normes ISO 14040 rentre dans le cadre des objectifs de développement durable (ODD), qui est un programme mondial pour un meilleur avenir.

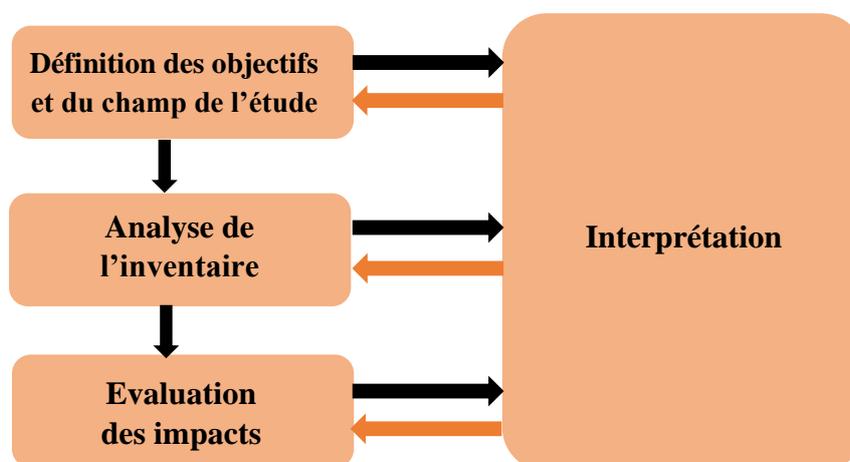


Figure 6 : Méthodologie d'analyse du cycle de vie (ACV)

Source : ISO 14040

Cependant, cette analyse présente des limites. En effet, l'analyse du cycle de vie, bien qu'elle soit un outil précieux pour prendre des décisions éclairées, elle est subjective dans le sens qu'elle dépend de l'appréciation de la personne qui réalise l'analyse et peut s'avérer complexe lorsqu'il y a de nombreux critères et alternatives.

4. Analyse multicritère

Afin de faire un choix éclairé sur le béton bitumineux le mieux adapté aux conditions locales, nous avons usé de l'analyse multicritère. L'analyse multicritère ou aide multicritère à la décision considère le comportement décisionnel guidé par la résultante de plusieurs critères en conflit ou contradictoires. Dans ce cadre, les modèles et outils d'aide à la décision s'appuient explicitement sur la construction d'une famille de critères traduisant les aspects pertinents du problème de décision. De ce fait, l'analyse multicritère vient en soutien pour aider à trouver la meilleure solution possible.

On retrouve plusieurs méthodes d'analyse multicritère selon que la problématique soit de :

- Choix ($P\alpha$) : TOPSIS, AHP, MAUT, UTA, SMART, EVAMIX, électre (I et IS).
- Classification ($P\beta$) : ÉLECTRICITÉ TRI, FLOWSOR.
- Rangement ($P\gamma$) : AHP, EVAMIX, ÉLECTRICITÉ (I, II, III et IV), PROMETHÉE (I et II).

Dans le cas de notre étude, il s'agit de choisir un matériau adapté aux conditions locales, cela se définit comme un problème de choix ($P\alpha$). A cet effet, nous avons décidé d'utiliser la méthode AHP (Analyse Hiérarchique des Procédés) car elle présente de nombreux avantages qui sont :

- La structuration hiérarchique du problème de décision : elle permet de décomposer un problème complexe en une hiérarchie de critères, sous-critères et alternatives, facilitant l'analyse et la prise de décision ;
- La cohérence des décisions : elle inclut des mécanismes pour vérifier la cohérence des jugements, assurant que les décisions sont rationnelles et bien fondées ;
- La Flexibilité et l'adaptabilité : la méthode AHP peut être appliquée à divers domaines.

La méthode AHP, depuis son invention par Thomas SAATY dans les années 1970, est très utilisée par les chercheurs et les praticiens partout dans le monde, surtout dans les pays anglophones. Les différents retours d'expérience de son utilisation rapportent un succès relatif.

III. HYPOTHÈSES

1. Hypothèse sur les performances mécaniques

Le béton bitumineux semi-grenu 0/14, en raison de sa granulométrie plus grossière, présenterait une meilleure résistance mécanique et une moindre sensibilité à l'orniérage sous des charges lourdes que le béton bitumineux semi-grenu 0/10.

2. Hypothèse sur la résistance aux conditions climatiques

Le béton bitumineux semi-grenu 0/10, avec une granulométrie plus fine et une teneur en bitume vraisemblablement plus élevée, serait moins sensible à l'humidité et présenterait une meilleure résistance au phénomène de ravinement (érosion d'une surface par jet d'eau) dans des climats pluvieux.

3. Hypothèse sur la durabilité

Le béton bitumineux semi-grenu 0/14 offrirait une durabilité accrue sur des routes soumises à des trafics intenses comparativement au béton bitumineux semi-grenu 0/10 qui en revanche, pourrait nécessiter des réparations plus fréquentes sur des voies soumises au même type trafic.

4. Hypothèse sur le rapport coût-efficacité

Le béton bitumineux semi-grenu 0/10 nécessitant plus de teneur en liant serait plus cher à produire que le béton bitumineux semi-grenu 0/14. Cependant, il serait moins coûteux à mettre en œuvre grâce à sa bonne compacité. Sur le long terme, le BBSG 0/14 serait plus rentable.

5. Hypothèse sur les performances environnementales

Le béton bitumineux semi-grenu 0/10 exigeant une teneur en liant légèrement supérieur, pourrait avoir un impact environnemental plus élevé lors de la production et sur le reste de son cycle de vie dû à sa durabilité relativement faible. Le béton bitumineux semi-grenu 0/14 présenterait une empreinte carbone réduite le long de son cycle de vie.

6. Hypothèse sur les domaines d'application

Le béton bitumineux semi-grenu 0/14 serait plus adapté aux voies principales, aux routes industrielles, ou aux zones à trafic intense en raison de sa résistance accumulée aux charges lourdes. Par contre, Le béton bitumineux semi-grenu 0/10 serait plus performant pour les chaussées exposées à des conditions climatiques difficiles, comme les zones tropicales où l'humidité est élevée

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

I. CAMPAGNE EXPÉRIMENTALE

1. Caractérisation des constituants :

a. Granulats

Tableau 5 : Résultat des essais d'identification sur les granulats

Essais	Normes	Spécifications LBTP	Sables 0/4	Gravier 4/10	Gravier 10/14
Analyse granulométrique	NF EN 12697	-	Conformes	Conformes	Conformes
Equivalent de Sable (ES)	NF EN 933-8	≥ 60 %	63 %	-	-
Poids Spécifique (PS)	ISO 17892-3	-	2,57	2,6	2,62
Densité Apparente (DA)	NF EN 1097-3	-	1,42	1,27	1,26
Los Angeles (LA)	NF EN 1097-2	≤ 30%	-	24 %	20 %
Micro-Déval (MDE)	NF EN 1097-1	≤ 12%	-	9 %	6 %

Le tableau et les courbes d'analyse granulométrique des concassés sont présentés en *Annexe I : Formulation des bétons bitumineux semi-grenus*.

b. Bitume

Tableau 6 : Résultats des essais d'identification sur le bitume

Essais	Normes	Spécifications	Bitume 35/50
Pénétrabilité	NF EN 1426	35 à 50 (mm)	39
Point de ramollissement Bille et anneau (TBA)	NF EN 1427	50 à 58 (°C)	50,45
Densité relative	ISO 3838	-	1,01

2. Formulation des bétons bitumineux

a. Composition granulaire

Les proportions retenues sont consignées dans le tableau suivant :

Tableau 7 : composition granulaire

Bétons	Sables 0/4	Gravier 4/10	Gravier 10/14
Béton bitumineux 0/10	50 %	50 %	-
Béton bitumineux 0/14	50 %	35 %	15 %

Les courbes granulométriques de mélange sont présentées en annexes comme suit : (*Annexe I : formulation des bétons bitumineux*)

- Figure 26 : Formulation à blanc théorique du BBSG 0/10 (*Page III*)
- Figure 27 : Formulation à blanc réel du BBSG 0/10 (*Page III*)
- Figure 28 : Formulation à blanc théorique du BBSG 0/14 (*Page IV*)
- Figure 29 : Formulation à blanc réel du BBSG 0/14 (*Page IV*)

b. Teneur en liant

Tableau 8 : formules de teneur en liant des bétons bitumineux

Bétons bitumineux	Données	Formule 1	Formule 2	Formule 3
		$TL_{\text{int}} - 0,5 \%$	TL_{int}	$TL_{\text{int}} + 0,5 \%$
Béton bitumineux 0/10	$\Sigma = 12,05$	5,18 %	5,68 %	6,18 %
	$\alpha = 1,03$			
Béton bitumineux 0/14	$\Sigma = 11,82$	5,16 %	5,66 %	6,16 %
	$\alpha = 1,03$			

Tableau 9 : Résultats d'essais par formule (bétons bitumineux 0/10)

Béton bitumineux 0/10				Spécifications NF EN 13108-1
Résultats	Formule 1	Formule 2	Formule 3	
Teneur en liant (%)	5,18	5,68	6,18	-
Essai Marshall (NF EN 12697-34)				
Stabilité Marshall (kg)	1100	1144	1576	≥ 1 000
Fluage (1/10 mm)	29,40	29,63	36,03	≤ 40
Compacité (%)	95,34	95,40	94,53	94 - 97
Extraction + AG (NF EN 12 697-1/ NF EN 12697-2)				
Teneur en liant externe (%)	5,11	5,68	6,11	≥ 5,2
AG	Conforme	Conforme	Conforme	-
MVRe (t/m ³)	2,41	2,40	2,39	-

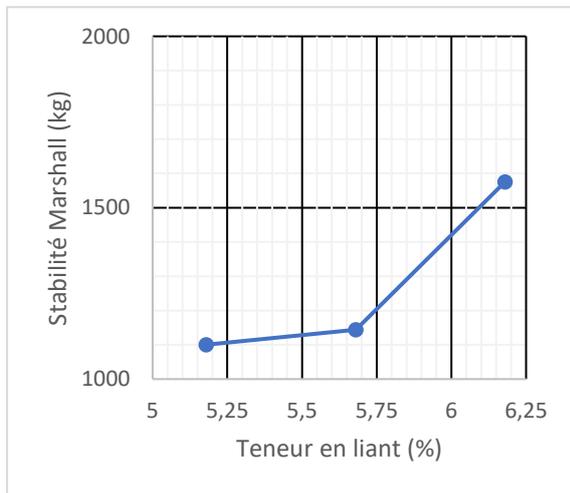


Figure 8 : stabilité en fonction de la teneur en liant (BBSG 0/10)

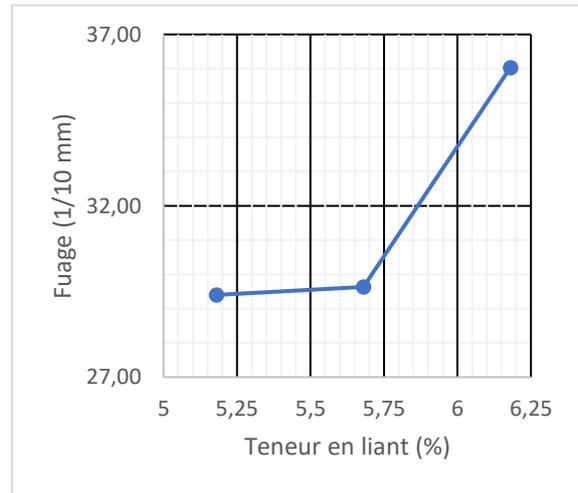


Figure 7 : fluage en fonction de la teneur en liant (BBSG 0/10)

Tableau 10 : Résultats de essais par formule (bétons bitumineux 0/14)

Béton bitumineux 0/10				Spécifications NF EN 13108-1
Résultats	Formule 1	Formule 2	Formule 3	
Teneur en liant (%)	5,16	5,66	6,16	-
Essai Marshall (NF EN 12697-34)				
Stabilité Marshall (kg)	1152	1215	1229,67	≥ 1 000
Fluage (1/10 mm)	32,93	34	34,3	≤ 40
Compacité (%)	95,65	94,40	96,53	94 - 97
Extraction + AG (NF EN 12 697-1/ NF EN 12697-2)				
Teneur en liant externe (%)	5,14	5,66	6,13	≥ 5,2
AG	Conforme	Conforme	Conforme	-
MVRe (t/m ³)	2,41	2,40	2,39	-

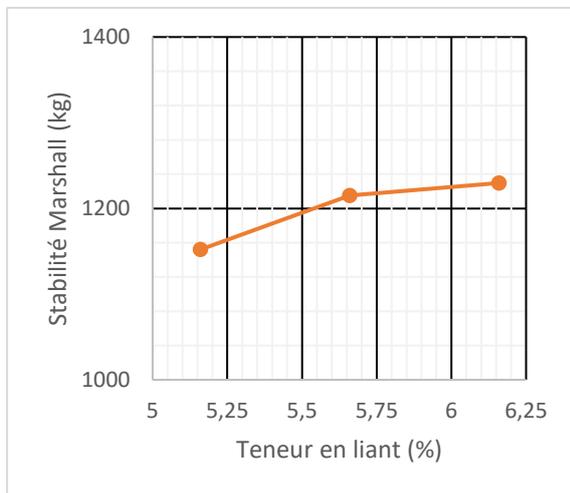


Figure 10 : stabilité en fonction de la teneur en liant (BBSG 0/14)

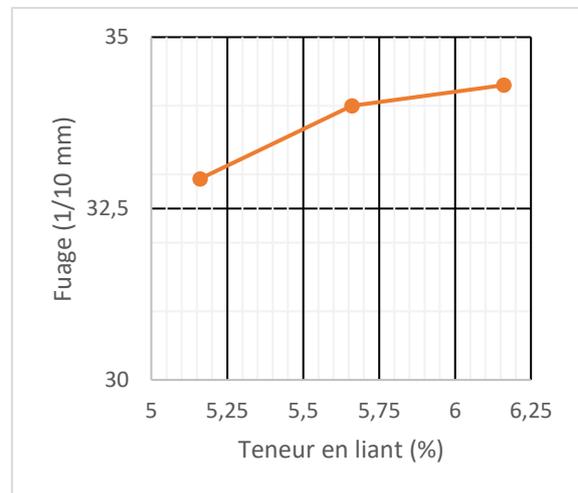


Figure 9 : fluage en fonction de la teneur en liant (BBSG 0/14)

Les formules retenues pour l'étude sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 11 : Récapitulatif des formules de l'étude

Proportions	Béton bitumineux 0/10	Béton bitumineux 0/14	Spécifications NF EN 13108-1 / LBTP
Teneur en liant	5,68 %	5,66 %	≥ 5,2 %
Sables 0/4	50 %	50 %	-
Gravier 4/10	50 %	35 %	-
Gravier 10/14	-	15 %	-

Ces formules ont été soumises à l'essai de Presse à Cisaillement Giratoire (PCG) (NF EN 12697-31) afin de s'assurer de la bonne compacité de ces matériaux. En effet, l'essai PCG permet d'évaluer la compacité d'un mélange bitumineux et ainsi prédire son comportement en service. Il simule les conditions de compactage rencontrées sur chantier, en soumettant l'échantillon à des cycles de cisaillement et de compression.

Tableau 12 : Résultats de l'essai PCG

Béton bitumineux	Nombres de girations	% vides	Spécifications NF EN 13108-1 / LBTP
BBSG 0/10	60	5,44	5-10
BBSG 0/14	80	8,68	4-9

De ces résultats, nous pouvons conclure que le BBSG 0/10, avec sa granulométrie plus fine, offre une meilleure compacité, ce qui le rend plus résistant aux conditions climatiques telles que le gel/dégel et à l'humidité, mais pourrait être moins performant sous charges lourdes ou trafic intense. En revanche, le BBSG 0/14, avec des granulats plus gros, serait mieux adapté aux zones à fort trafic en raison de sa meilleure résistance mécanique aux charges répétées, mais il pourrait être plus vulnérable aux dégradations causées par les variations climatiques extrêmes en raison de sa plus grande porosité.

3. Résistance aux conditions climatiques

a. Stabilité sous températures ambiantes élevées

Les résultats de l'essai Marshall réalisé sur les bétons bitumineux sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 13 : Résultats de l'essai Marshall

Essai Marshall (NF EN 12697-34)			Spécifications
Résultats	Béton bitumineux 0/10	Béton bitumineux 0/14	
Stabilité (kg)	1144	1215	$\geq 1\ 000$
Fluage (1/10 mm)	29,63	34	≤ 40
Compacité (%)	96	94	94 - 97

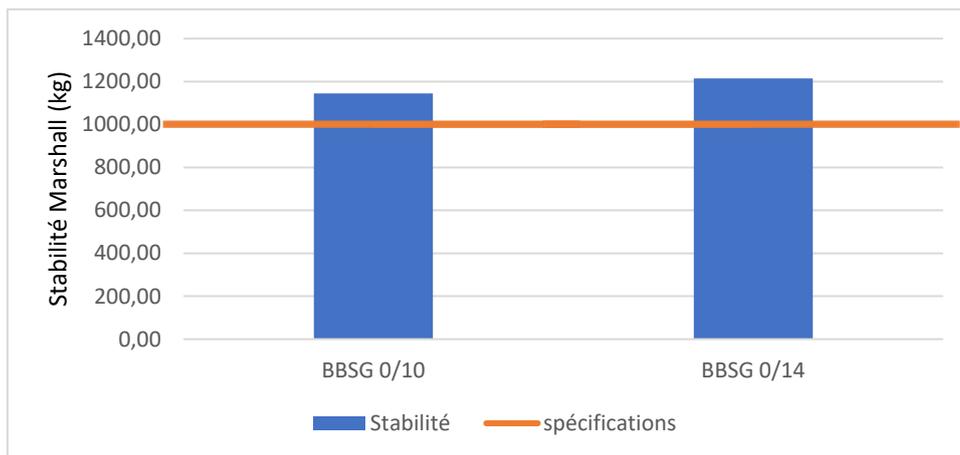


Figure 11 : Comparaison de la stabilité Marshall

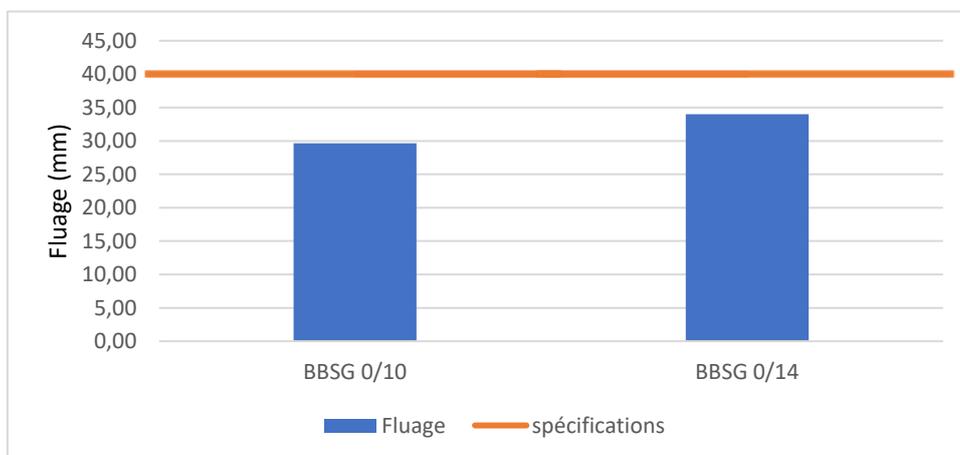


Figure 12 : Comparaison du fluage

Interprétation :

Les résultats de l'essai Marshall montrent que le béton bitumineux 0/14, bien qu'offrant une meilleure stabilité thermique sous haute température (c'est-à-dire une meilleure capacité à maintenir sa structure sans perte significative de viscosité), présente un fluage plus élevé par rapport au béton bitumineux 0/10. Cela signifie que, malgré une résistance accumulée à la déformation immédiate sous haute température, le 0/14 a tendance à se déformer de manière plus progressive sous charge prolongée. En revanche, le 0/10, bien que moins stable thermiquement, présente un fluage plus faible, ce qui suggère une meilleure résistance aux déformations sur le long terme. Ces résultats indiquent qu'une utilisation du 0/14 pourrait être favorable dans des environnements où la stabilité thermique est cruciale, mais avec une attention particulière à la gestion des charges sur une longue durée, tandis que le 0/10 pourrait être préféré pour des applications nécessitant une résistance au fluage à long terme, même si sa stabilité thermique est plus faible.

b. Résistance à l'humidité et l'imbibition

Les résultats de l'essai Duriez réalisés sur les bétons bitumineux sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 14 : Résultats de l'essai Duriez des BBSG 0/10

DURIEZ NF EN 12697-12	Air (C)	Eau (i)	MVA	Rapport i/C (%)
	Compression (kg)	Compression (kg)		
Éprouvette 1	62,94	49,95	2,37	79,36
Éprouvette 2	64,61	49,22	2,36	76,18
Éprouvette 3	64,51	50,71	2,36	78,61
Moyenne	64,02	49,96	2,36	78,05

Tableau 15 : Résultats de l'essai Duriez des BBSG 0/14

DURIEZ NF EN 12697-12	Air (C)	Eau (i)	MVA	Rapport i/C (%)
	Compression (kg)	Compression (kg)		
Éprouvette 1	39,66	29,92	2,29	75,44
Éprouvette 2	39,46	30,54	2,27	77,40
Éprouvette 3	39,25	29,20	2,27	74,40
Moyenne	39,46	29,89	2,277	75,74

Tableau 16 : Récapitulatif des résultats de l'essai Duriez

Essai Duriez (NF EN 12697-12)			Spécifications
Résultats	Béton bitumineux 0/10	Béton bitumineux 0/14	
Rapport i/C (%)	78,05	75,74	≥ 70
Compacité	96	92	92 - 96

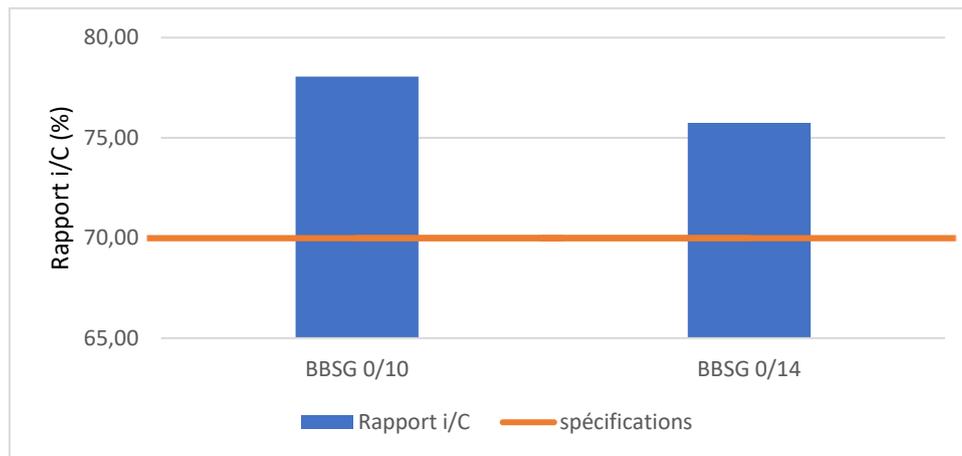


Figure 13 : Comparaison du rapport immersion/compression

Interprétation :

Les résultats de l'essai Duriez montrent un rapport immersion/compression (i/C) supérieur pour les bétons bitumineux semi-grenus 0/10 par rapport au 0/14, cela indique que les bétons bitumineux semi-grenus 0/10 sont plus résistants à l'humidité et à l'imbibition. Cette performance est attribuée à leur granulométrie plus fine, qui permet un enrobage plus homogène des granulats par le bitume, une densité accrue, et une meilleure étanchéité, limitant ainsi l'infiltration d'eau. En revanche, les bétons bitumineux semi-grenus 0/14, avec leurs granulats plus grossiers, sont plus sensibles à l'eau en raison d'interstices plus importants et d'un enrobage moins uniforme, ce qui peut entraîner une désagrégation accrue. Par conséquent, les bétons bitumineux semi-grenus 0/10 sont plus adaptés aux zones exposées à l'humidité, tandis que les 0/14 nécessitent des améliorations (comme des additifs) pour égaler leur durabilité en conditions humides.

4. Résistance aux charges de trafic

Pour évaluer la résistance aux charges de trafic et la durabilité sous charges lourdes des bétons bitumineux, nous avons eu recours aux différents essais suivants :

a. Essai d'orniérage (NF EN 12697-22)

Tableau 17 : Résultats de l'essai d'orniérage

Nombre de cycle	Profondeur moyenne d'ornière (mm)							Pourcentage de profondeur d'ornière à 10000 cycles	Pente d'ornière (mm/1000 cycles)
	50	500	1000	2000	5000	7000	10000		
Béton bitumineux semi-grenu 0/10									
Éprouvette N°1	0,59	1,56	2,08	2,66	3,43	3,78	4,20	7,03%	0,15
Éprouvette N°2	0,50	1,41	1,88	2,50	3,55	3,98	5,00	8,37%	0,29
Moyenne	0,54	1,48	1,98	2,58	3,49	3,88	4,60	7,70%	0,22
Béton bitumineux semi-grenu 0/14									
Éprouvette N°1	0,44	1,28	1,62	1,98	2,67	2,87	3,20	5,43%	0,11
Éprouvette N°2	0,68	1,44	1,75	2,12	2,69	2,93	3,16	5,07%	0,09
Moyenne	0,56	1,36	1,69	2,05	2,68	2,90	3,18	5,25%	0,10

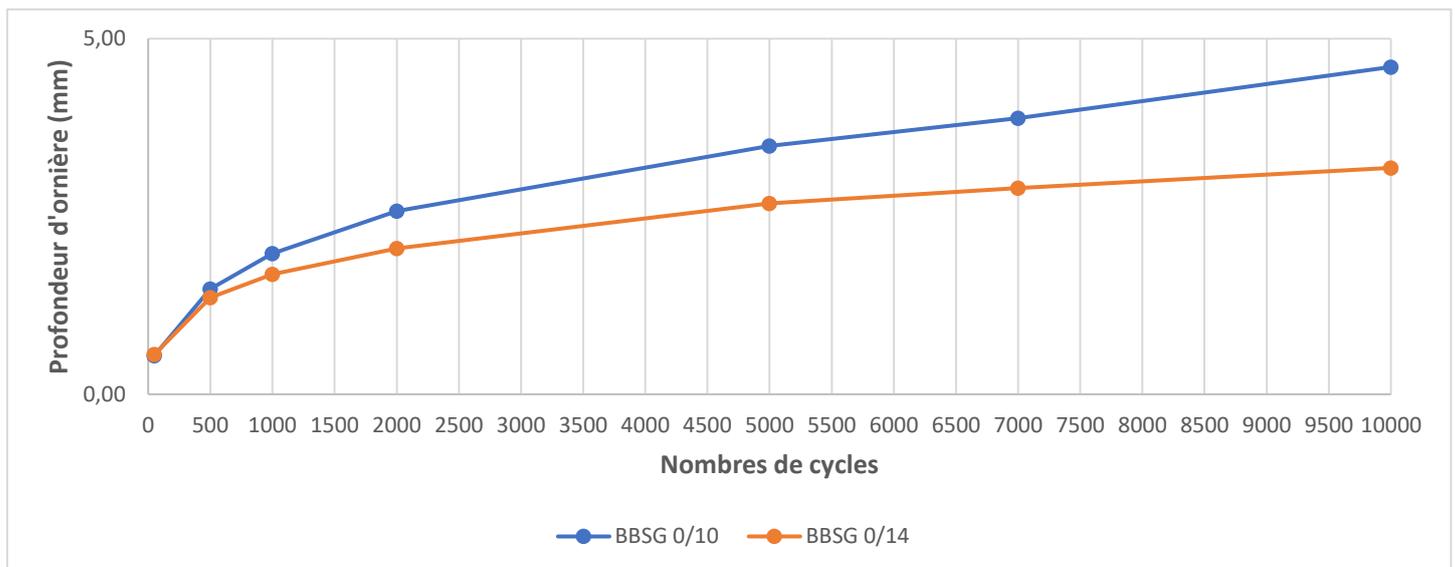


Figure 14 : Courbe d'orniérage des bétons bitumineux semi-grenus

Tableau 18 : Récapitulatif des résultats de l'essai d'orniérage

Essai d'orniérage (NF EN 12697-22)			Spécifications
Résultats	Béton bitumineux 0/10	Béton bitumineux 0/14	
Pourcentage de profondeur d'ornière à 10000 cycles	7,70%	5,25%	$\leq 9\%$
Pente d'ornière (mm /1000 cycles)	0,22	0,10	≤ 1

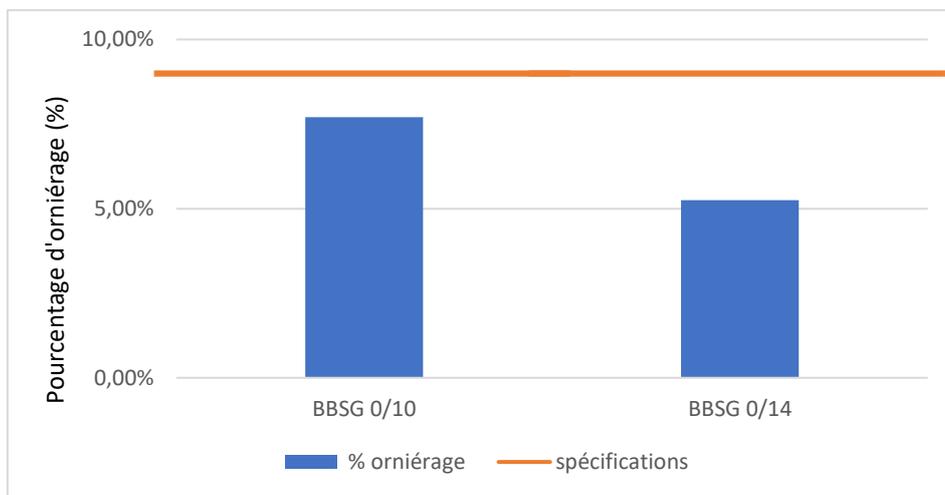


Figure 15 : Comparaison du pourcentage du profondeur d'ornière

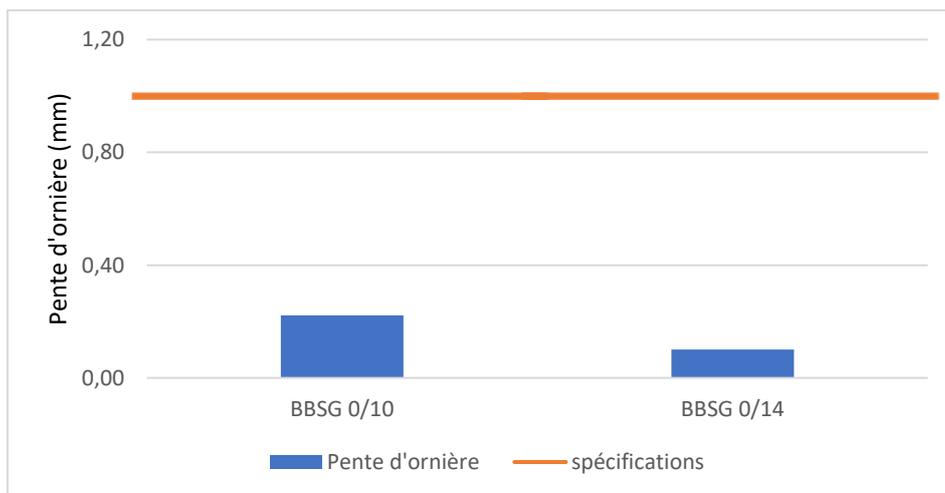


Figure 16 : Comparaison de la pente d'ornière

Interprétation :

Les résultats de l'essai d'orniérage réalisé à 60 °C en présence d'eau, montrent qu'à 10 000 cycles, le béton bitumineux semi-grenu 0/14 présente un pourcentage de profondeur d'ornière et une pente d'ornière inférieure à celui du béton bitumineux semi-grenu 0/10, ce qui suggère que le BBSG 0/14 offre une meilleure résistance aux charges lourdes dans ces conditions spécifiques. Cette performance supérieure peut être attribuée à la granulométrie plus grossière du 0/14, qui améliore la résistance mécanique du mélange sous charge, en offrant une meilleure capacité de support et une déformation plus faible par rapport au BBSG 0/10. Le béton bitumineux semi-grenu 0/10, en raison de sa granulométrie plus fine est plus sensible aux charges répétées et sujet à une déformation plastique plus importante. Ainsi, les bétons bitumineux semi-grenus 0/14 seraient plus adaptés aux environnements soumis à de lourdes charges répétées et un trafic plus intense comparés aux bétons bitumineux semi-grenus 0/10.

b. Essai de module de rigidité (NF EN 12697-26)

Tableau 19 : Résultats de l'essai de module de rigidité

Éprouvettes	Compacité	Force (N)	Déformation (mm)	Module (Mpa)
Béton bitumineux 0/10				
Éprouvette 1	95 %	4840,75	0,0062	8105
Éprouvette 2	95 %	4411,45	0,0061	7343
Éprouvette 3	94 %	4359,35	0,0066	6815
Éprouvette 4	95 %	4506,9	0,0063	7403
Moyenne	95 %	4404,61	0,0063	7416
Béton bitumineux 0/14				
Éprouvette 1	92 %	5419,25	0,0063	8834
Éprouvette 2	91 %	5306,85	0,0062	8731
Éprouvette 3	92 %	5020,4	0,0065	7960
Éprouvette 4	92 %	5059,25	0,0064	8070
Moyenne	92 %	5276,44	0,0064	8399

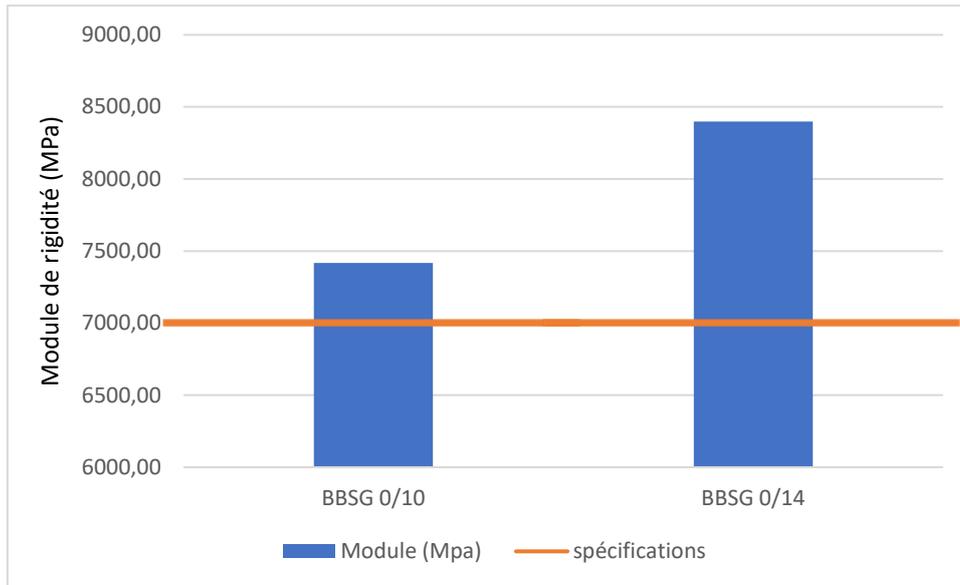


Figure 17 : Comparaison du module de rigidité

Interprétation :

Les résultats de l'essai de module de rigidité révèlent un module de rigidité supérieur pour le béton bitumineux semi-grenu 0/14 comparé au béton bitumineux semi-grenu 0/10, cela indique que le BBSG 0/14 offre une plus grande résistance à la déformation sous l'effet des charges lourdes. Concrètement, cela signifie que sous le passage de véhicules lourds, le BBSG 0/14 se déformera moins que le BBSG 0/10. Cette meilleure résistance à la déformation se traduit par une diminution du risque d'orniérage (formation de traces permanentes dans la chaussée) et une meilleure répartition des contraintes au sein de la structure de la chaussée. Par conséquent, dans un contexte de trafic lourd, un module de rigidité plus élevé pour le BBSG 0/14 suggère une performance supérieure en termes de durabilité et de résistance aux déformations permanentes, ce qui est un avantage majeur pour les routes soumises à des charges importantes.

II. ANALYSE FINANCIÈRE

Les bétons bitumineux semi-grenus 0/10 et 0/14, sont les matériaux couramment utilisés dans les revêtements de construction routière. Le choix entre ces deux types de BBSG est souvent motivé par des considérations techniques liées aux performances du revêtement (résistance, durabilité, etc.). Cependant, la dimension économique est tout aussi importante, notamment dans un contexte où les budgets sont contraints. Cette analyse financière comparative vise à évaluer les coûts associés à chacun de ces matériaux.

1. Prix d'achats des matériaux

Tableau 20 : prix d'achats des matériaux de l'étude

Fiches de prix		Sources
Composants	Prix (FCFA TTC/Tonne)	
Bitume 35/50	1 003 000	SADEP (Société Africaine de Dérivés de Pétrole)
Sables 0/4	7523	SISAG (Société Ivoir-Suisse Abidjanaise de Granit)
Gravier 4/10	11800	
Gravier 10/14	11210	

2. Analyse comparative

a. Coût de formulation des bétons bitumineux semi-grenus

Nous allons évaluer le prix de formulation des bétons bitumineux semi-grenus selon les proportions de notre étude sur une quantité de 10 tonnes.

Tableau 21 : Coûts de formulation des bétons bitumineux semi-grenus de l'étude

Composants	Béton bitumineux 0/10			Béton bitumineux 0/14		
	Proportions	Masse (kg)	Prix (FCFA)	Proportions	Masse (kg)	Prix (FCFA)
Bitume 35/50	5,68%	568	569704	5,66%	566	567698
Sables 0/4	50%	5000	37615	50%	5000	37615
Gravier 4/10	50%	5000	59000	35%	3500	41300
Gravier 10/14	-			15%	1500	16815
Masse granulats		10000	96 615		10000	95 730
Masse totale		10568	666 319		10566	663 428

Tableau 22 : Différence de coûts de formulation des bétons bitumineux semi-grenus

Calcul	Coûts de formulation	
BBSG 0/10 – BBSG 0/14	Coût des Granulats	885 FCFA
	Coût des Enrobés	2 891 FCFA

De cette analyse, nous pouvons constater que dans la formulation bétons bitumineux semi-grenus 0/10 et 0/14 à quantité égale, le BBSG 0/10 couterait légèrement plus cher comparer au BBSG 0/14, mais cette différence n'est vraiment pas significative au point de parfaitement les dissocier. Nous constatons également, que le prix de formulation des bétons bitumineux semi-grenus dépend fortement de la proportion de bitume qui est le constituant le plus cher. En effet, dans le cadre de cette comparaison, le coût du bitume représente approximativement plus de 85 % du prix de formulation du matériau.

b. Coût de mise en œuvre

Bien que théoriquement le béton bitumineux semi-grenu 0/14 semble plus économique que le béton bitumineux semi-grenu 0/10, la différence ne soit pas significative au point de les dissocier l'un de l'autre sur les prix des mises en œuvre. En effet, la donnée la plus prisée dans les différents termes de marché d'un projet routier constitue le prix de mise en œuvre au mètre-carré (m²) de la couche de revêtement. Après analyse de quelques marchés de projet routier ivoirien, nous pouvons conclure que cette donnée est similaire pour les deux bétons bitumineux semi-grenus pour des entreprises telles que PORTEO-BTP. Elle dépend juste de l'épaisseur de mise en œuvre de la couche de revêtement.

Tableau 23 : Prix de mise en œuvre des bétons bitumineux semi-grenus

Epaisseurs	Unité (U)	Prix U. HT. (F CFA)
3 cm	m ²	12 500
6 cm	m ²	18 500
7 cm	m ²	19 000

Source : Devis quantitatif et estimatif (DQE) de marchés de projet routiers ivoirien

En conclusion, l'analyse financière comparative des bétons bitumineux semi-grenus 0/10 et 0/14 révèle une complexité qui dépasse la simple comparaison des coûts initiaux. Bien que les bétons bitumineux semi-grenus 0/14 présente un avantage sur le coût des granulats, les coûts de production et probablement d'entretien à long terme, ils peuvent être fortement influencés par le type de trafic et les conditions climatiques, rendant cette conclusion moins applicable à tous les contextes. Une analyse du cycle de vie est donc indispensable pour évaluer les coûts globaux sur le long terme, en considérant la durabilité, les réparations et la reconstruction. Le choix final doit reposer sur une étude technico-économique spécifique à chaque projet, intégrant les spécificités locales (disponibilité des matériaux, budget) et les performances attendues, afin d'optimiser le rapport coût-efficacité.

III. ÉTUDE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Cette partie du mémoire se concentre sur l'évaluation comparative des BBSG 0/10 et 0/14 sous l'angle de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV). Elle vise à déterminer lequel de ces matériaux présente un impact environnemental réduit tout en maintenant des performances techniques adéquates. Les résultats obtenus permettent d'éclairer les choix des décideurs pour orienter leurs projets vers des solutions plus respectueuses de l'environnement, en ligne avec les objectifs de durabilité et de réduction des impacts négatifs des infrastructures.

1. Définition des objectifs et du champ de l'étude

a. Objectif

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'impact environnemental des bétons bitumineux semi-grenus 0/10 et 0/14, afin de déterminer le choix granulométrique ayant le plus faible impact sur l'environnement.

b. Champ de l'étude

L'étude couvre l'ensemble du cycle de vie des bétons bitumineux, de l'extraction de matière première jusqu'à la fin de vie du matériau.

2. Inventaire du cycle de vie

Tableau 24 : Inventaires du cycle de vie des bétons bitumineux

Étapes	Flux
Extraction de matières premières	Consommation d'énergie
	Consommation de ressources naturelles
	Émission de GES
	Destruction de la faune et de la flore
Production	Consommation d'énergie
	Émission de GES
Transport	Consommation de carburant
	Émission de CO ₂
Mise en œuvre	Consommation d'énergie
	Émissions polluantes
	Nuisance sonores
Utilisation	Fréquence d'entretien
	Durée de vie
Fin de vie	Recyclage, enfouissement
	Production de déchets

3. Évaluation des impacts

Pour évaluer l'impact environnemental des bétons bitumineux semi-grenus, nous allons utiliser la matrice de FECTEAU. Cette matrice a été inventée par Martin FECTEAU en 1997 qui permet d'attribuer une connotation quantitative à l'évaluation d'impact environnementale. Cette évaluation d'impact repose sur une grille de détermination de l'importance absolue de l'impact sur la base de trois paramètres qui sont l'intensité, l'étendue et la durée.

Les critères d'évaluation :

- Intensité (faible – Moyenne – Forte)
- Étendue (Ponctuelle – Locale – Régionale)
- Durée (Courte – Moyenne – Longue)

Les niveaux d'importance :

- Mineur – Moyen – Majeur

La matrice de FECTEAU, les descriptions des critères d'évaluation et des niveaux d'impact sont présentés en Annexe du document.

L'évaluation d'impact portera premièrement sur les bétons bitumineux semi-grenus en général et deuxièmement nous ferons une comparaison des bétons bitumineux 0/10 et 14 par attribution de points d'impact environnemental sur chaque étape du cycle de vie afin d'apprécier les différences qui puissent exister entre les deux matériaux.

Tableau 25 : Points de comparaison d'impact environnemental

Points d'impact environnemental	Correspondance
10 pts	Impact très faible
20 pts	Impact faible
30 pts	Impact moyen
40 pts	Impact fort
50 pts	Impact très fort

NB : les points d'évaluation d'impact et leurs attributions sont à caractère estimatif et peuvent varier en fonction de l'appréciation de l'utilisateur désirant réaliser l'analyse du cycle de vie.

Tableau 26 : impact environnementale des bétons bitumineux

Etapas	Impact sur le climat				Impact sur les ressources			
	Intensité	Etendue	Durée	Importance absolue	Intensité	Etendue	Durée	Importance absolue
Extraction de matière premières	Moyenne	Locale	Moyenne	Modérée	Moyenne	Ponctuelle	Moyenne	Modérée
Production	Moyenne	Locale	Moyenne	Modérée	Moyenne	Ponctuelle	Moyenne	Modérée
Transport	Faible	Régionale	Moyenne	Modérée	Faible	Locale	Moyenne	Modérée
Mise en œuvre	Moyenne	Ponctuelle	Moyenne	Modérée	Moyenne	Ponctuelle	Moyenne	Modérée
Utilisation	Faible	Ponctuelle	Longue	Mineure	Faible	Ponctuelle	Courte	Mineure
Fin de vie/Recyclage	Faible	Ponctuelle	Courte	Mineure	Faible	Ponctuelle	Courte	Mineure

Tableau 27 : Comparaison du cycle de vie des bétons bitumineux

Étapes	Impact sur le climat				Impact sur les ressources			
	BBSG 0/10		BBSG 0/14		BBSG 0/10		BBSG 0/14	
	Points	Poids	Points	Poids	Points	Poids	Points	Poids
Extraction de matière premières	20	14 %	20	17 %	30	21 %	40	29 %
Production	40	29 %	30	25 %	30	21 %	20	14 %
Transport	20	14 %	20	17 %	20	14 %	20	14 %
Mise en œuvre	20	14 %	20	17 %	20	14 %	30	21 %
Utilisation	10	7 %	10	8 %	10	7 %	10	7 %
Fin de vie/Recyclage	30	21 %	20	17 %	30	21 %	20	14 %
Somme	140	100 %	120	100 %	140	100 %	140	100 %

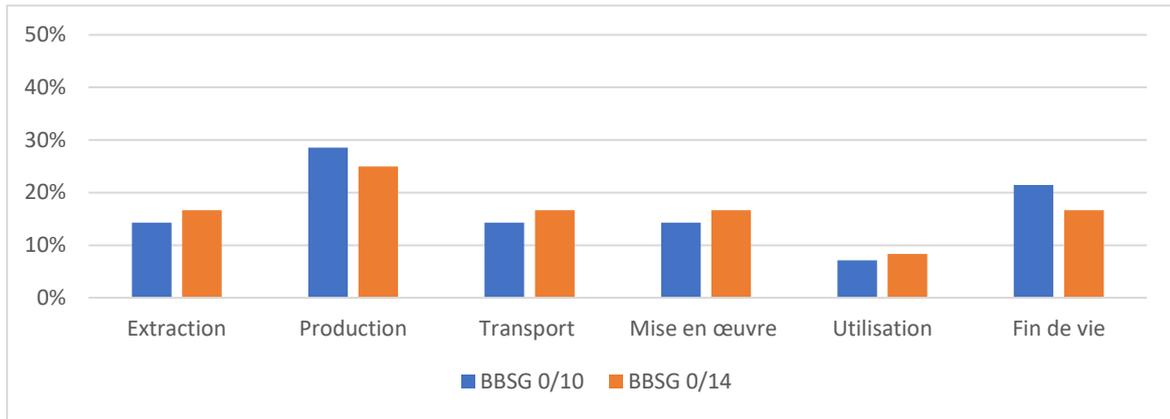


Figure 19 : impact sur le climat des bétons bitumineux

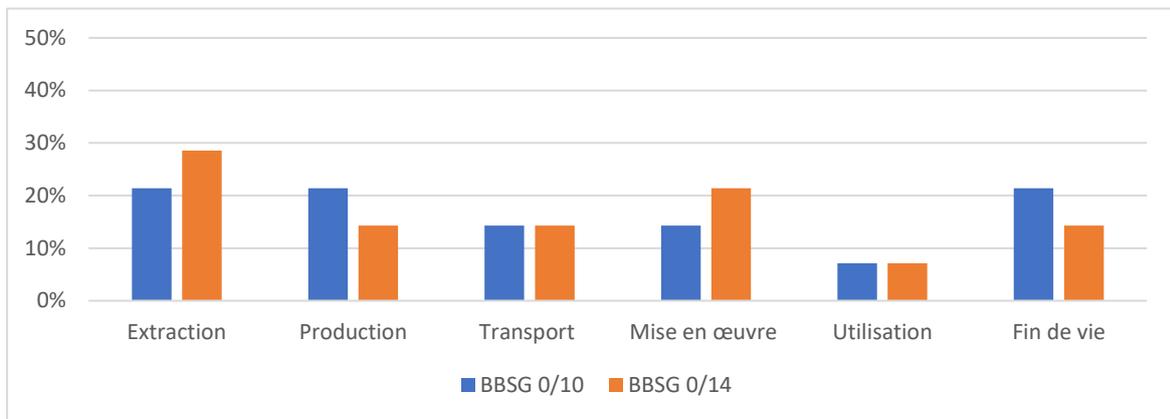


Figure 18 : impact sur les ressources des bétons bitumineux

Tableau 28 : Impact environnemental des bétons bitumineux semi-grenus

	Impact sur le climat		Impact sur les ressources	
	Points	Poids	Points	Poids
BBSG 0/10	140	54 %	140	50 %
BBSG 0/14	120	46 %	140	50 %
Somme	260	100 %	280	100 %

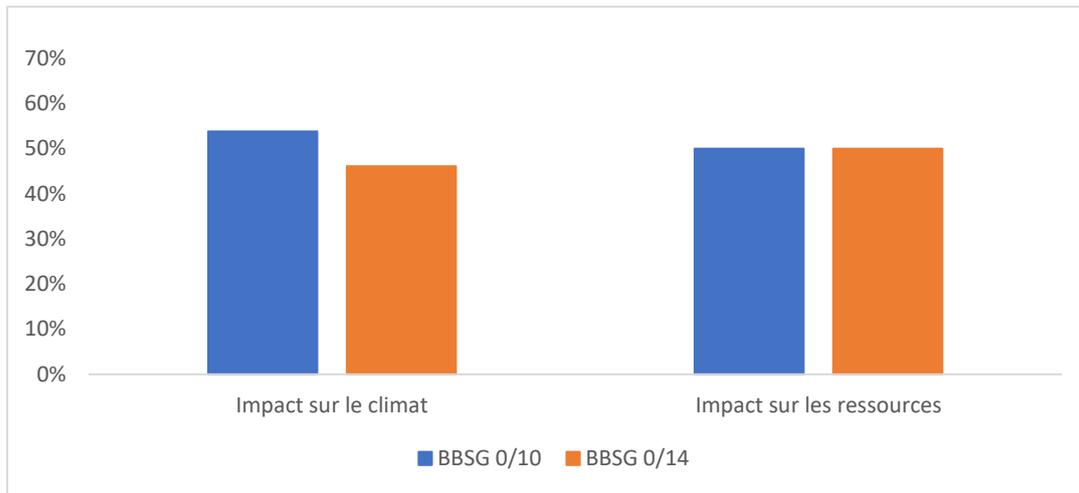


Figure 20 : impact environnemental des bétons bitumineux

4. Interprétation

Il ressort de cette analyse du cycle de vie que les bétons bitumineux selon les critères d'importance de la matrice de FECTEAU ont un impact globalement modéré sur le climat et l'utilisation des ressources. Ce qui veut dire que les différentes étapes de leur cycle de vie représentent des dommages réparables sur les systèmes écologiques et des dégradations partielles des milieux récepteurs. Après comparaison, nous pouvons dire que le béton bitumineux 0/10 bien qu'il soit composé de deux (2) fractions granulaires contre trois (3) pour le béton bitumineux 0/14 a un impact environnemental plus important. En effet, sur la base de l'impact de climatique, les bétons bitumineux 0/10 produisent plus d'émissions de CO₂ et une grande consommation d'énergie, car la production de petites fractions granulaires nécessite plus d'efforts. De plus, les bétons bitumineux 0/10 par leur durabilité relativement inférieure à celle des bétons bitumineux 0/14, nécessitent plus d'entretien donc l'utilisation de plus de ressources et de moyens.

5. Mesures d'atténuation

Pour réduire davantage l'impact environnemental des bétons bitumineux, nous pouvons proposer les mesures suivantes :

- **Optimisation de la production** : utilisation de matériaux recyclés ce qui permettra de réduire la consommation de ressources naturelles et l'énergie nécessaire à leur extraction.

- **Optimisation de la construction** : mettre en œuvre des techniques de construction moins énergivores.
- **Recyclage en fin de vie** : le recyclage ou la réutilisation des matériaux issus des revêtements bitumineux des chaussées permet de réduire la quantité de déchets et de récupérer des matériaux pour de nouvelles constructions.

En conclusion, l'analyse comparative du cycle de vie des bétons bitumineux 0/10 et 0/14 révèle que leurs impacts environnementaux sur le climat et les ressources sont relativement similaires. Les principales différences résident dans leurs propriétés mécaniques et leur comportement en service, qui peuvent influencer légèrement leur durabilité et donc leur impact indirect sur l'environnement. Les impacts les plus significatifs sont liés à l'extraction des matières premières, à la production et à la consommation d'énergie. Néanmoins, des pistes d'amélioration existent pour réduire ces impacts, telles que l'utilisation de matériaux recyclés, l'optimisation des formulations et l'amélioration des procédés de construction. En définitive, le choix entre un béton bitumineux 0/10 et un béton bitumineux 0/14 doit se faire en fonction des contraintes spécifiques de chaque projet, en tenant compte à la fois des performances requises et des enjeux environnementaux. Une analyse de cycle de vie détaillée permettrait d'affiner ce choix et de sélectionner la solution la plus optimale d'un point de vue environnemental.

IV. ANALYSE MULTICRITÈRE

1. Présentation des critères de choix

Tableau 29 : Critère de comparaison

Critères	Sous-critères
C1 : Technique	SC1 : performance du matériau
	SC2 : adaptabilité du matériau
C2 : Economique	SC3 : coût de production
	SC4 : coût de mise en œuvre
C3 : Environnemental	SC5 : impact sur le climat
	SC6 : impact sur les ressources

2. Structuration hiérarchique du problème de choix

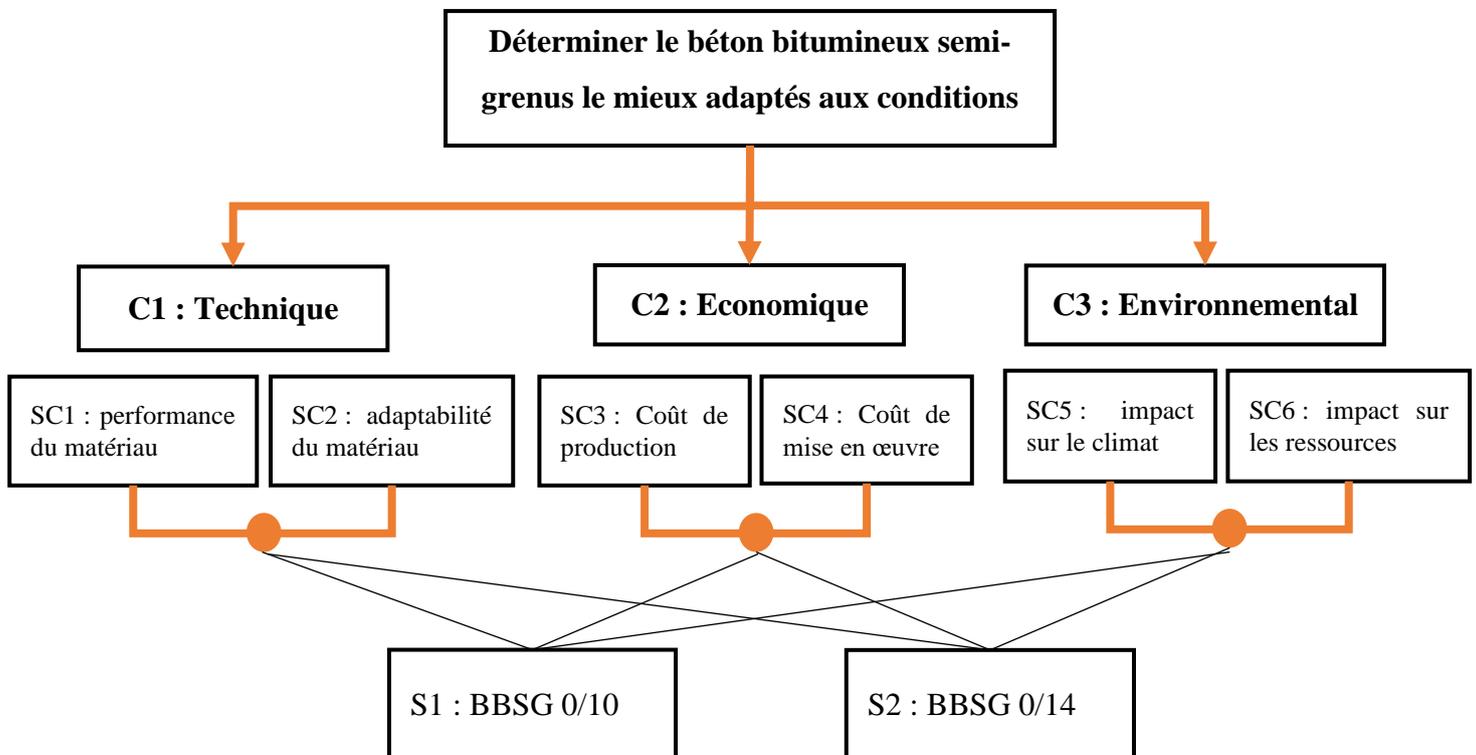


Figure 21 : Structure hiérarchique des différents niveaux de prises de décision

3. Comparaison binaire des niveaux de prises de décisions

Les différents niveaux de prises de décisions sont traités successivement par ordre décroissant allant du niveau 1 (Ci), ensuite au niveau 2 (SCi) et pour la fin le niveau 3 (Si). Cette comparaison a été réalisée par attribution de point d'importance relative exprimée par échelle de 1 à 9 selon la table de SAATY (voir annexe).

a. Niveau 1 : comparaison binaire des critères (Ci)

Tableau 30 : Quantification de la comparaison binaire des critères

Comparaison binaire	Critères considérés importants	Echelle d'importance	Evaluation
Environnemental/Économique	Economique	Légère importance	2
Technique/Économique	Technique	Grande importance	4
Environnemental/Technique	Environnemental	Même importance	1

Tableau 31 : Poids des critères

	Technique	Environnemental	Économique	Poids des critères
Technique	1	1	4	0,47
Environnemental	1	1	1/2	0,26
Économique	1/4	2	1	0,27

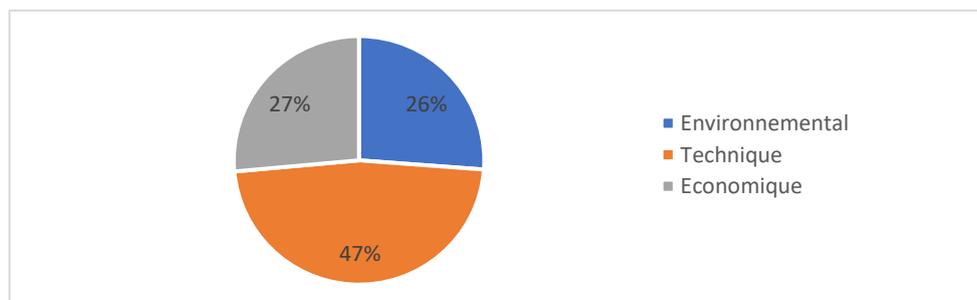


Figure 22 : Poids des critères à la décision finale

b. Niveau 2 : comparaison binaire des sous-critères (SCi)

Tableau 32 : Poids des sous-critères

Critères	Technique		Economique		Environnemental	
Poids	0,46		0,41		0,13	
Sous-critères	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6
Poids des sous-critères	0,75	0,25	0,25	0,75	0,333	0,667
Poids complet	0,355	0,118	0,066	0,198	0,087	0,175

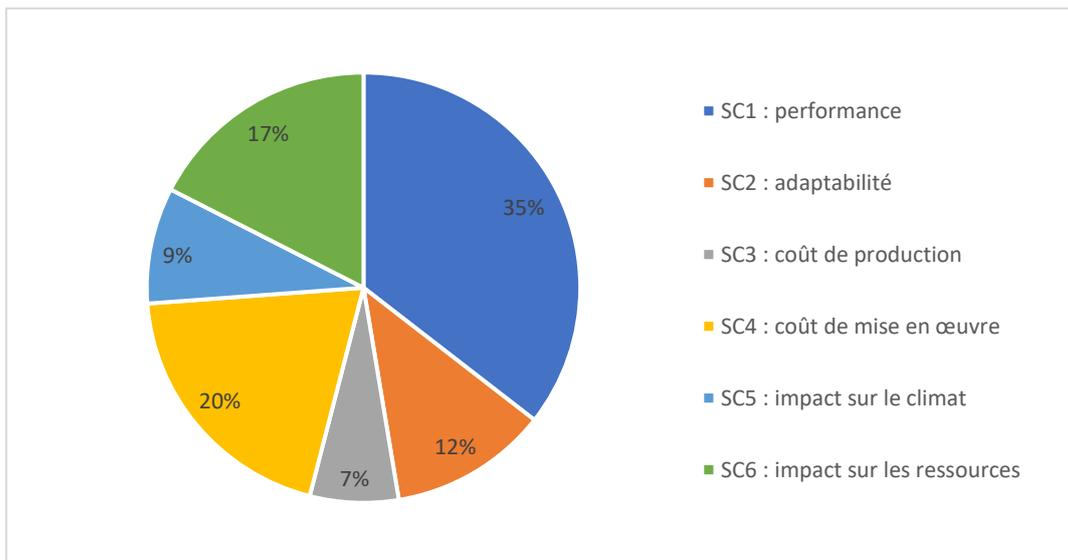


Figure 23 : Poids des sous-critères à la décision finale

c. Niveau 3 : comparaison des variantes en fonction des sous-critères

On notera :

S1 : Bétons bitumineux semi-grenus 0/10

S2 : Bétons bitumineux semi-grenus 0/14

Tableau 33 : Matrice de jugement des variantes

SC1				SC2			
	S1	S2	Poids		S1	S2	Poids
S1	1	1/3	0,25	S1	1	1/2	0,33
S2	3	1	0,75	S2	2	1	0,67
SC3				SC4			
	S1	S2	Poids		S1	S2	Poids
S1	1	0,5	0,33	S1	1	2	0,67
S2	2	1	0,67	S2	0,5	1	0,33
SC5				SC6			
	S1	S2	Poids		S1	S2	Poids
S1	1	0,5	0,33	S1	1	2	0,67
S2	2	1	0,67	S2	0,5	1	0,33

Nous allons finalement calculer l'agrégation finale des différentes variantes. Le calcul se fait en multipliant, pour chaque sous-critère, le poids de la variante associée, par le poids complet du sous-critère correspondant. Le poids final de chaque variante est obtenu en faisant la somme des valeurs obtenues pour chaque sous-critère.

Tableau 34 : Agrégation finale des variantes

	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6	Agrégation finale
Poids sous-critères	0,355	0,118	0,066	0,198	0,087	0,175	
Poids S1	0,250	0,333	0,333	0,667	0,333	0,667	
Agrégation S1	0,089	0,039	0,022	0,132	0,029	0,116	0,43
Poids S2	0,750	0,667	0,667	0,333	0,667	0,333	
Agrégation S2	0,267	0,079	0,044	0,066	0,058	0,058	0,57

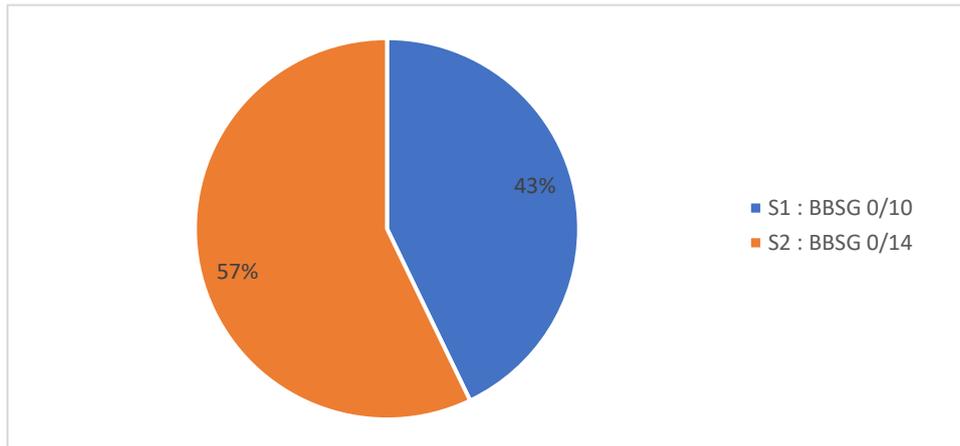


Figure 24 : Poids des *solutions* à la décision finale

À l'issue de cette analyse multicritère par la méthode AHP basé sur les critères techniques, économique et environnemental, il en ressort que le poids de la variante S2 est supérieur à celui de la variante S1. Ce qui voudrait dire que le béton bitumineux 0/14 représente le matériau le mieux adapté aux conditions locales à 57% contre 43 % pour le béton bitumineux 0/10.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

I. CONCLUSION

Cette étude comparative entre les bétons bitumineux semi-grenus (BBSG) 0/10 et 0/14 a permis de mettre en évidence leurs performances respectives sur les plans techniques, économiques et environnementaux, en lien avec leur adaptation aux conditions climatiques et aux charges de trafics.

Sur le plan technique, le béton bitumineux semi-grenu 0/14 s'est avéré supérieur en résistance aux charges de trafic, notamment grâce à une meilleure résistance à l'orniérage (5,25 % de profondeur d'ornière contre 7,70 % pour le 0/10) et un module de rigidité plus élevé (8399 MPa contre 7416 MPa pour le 0/10). Ces caractéristiques le rendent particulièrement adapté aux infrastructures routières soumises à de lourds trafics importants. De plus, sa meilleure stabilité à haute température (1215 kg contre 1144 kg pour le 0/10) le positionne avantageusement dans les régions chaudes. À l'inverse, le béton bitumineux semi-grenu 0/10 a démontré une meilleure résistance à l'humidité avec un rapport d'immersion/compression de 78 % contre 75 % pour le 0/14. Ce qui rend le BBSG 0/10 potentiellement plus pertinent dans des contextes climatiques humides. Sur le plan financier, l'analyse menée sur une simulation d'une production de 10 tonnes à la dimension du laboratoire montre que le BBSG 0/10 soit légèrement plus coûteux de 2891 FCFA. Cette analyse a permis également de mettre en évidence que le prix des bétons bitumineux semi-grenus dépend fortement du prix du bitume et que dans le cadre des projets routiers, les deux matériaux sont mis en œuvre au même prix qui dépend de l'épaisseur de réalisation. En termes d'impact environnemental, les bétons bitumineux semi-grenus 0/10 et 0/14 présentent une empreinte écologique assez similaire. Le BBSG 0/10 a un impact plus important en raison d'une teneur en bitume plus élevée, ce qui influe sur les émissions lors de sa production. Les impacts de ces matériaux peuvent être réparables, car ils causent des dommages partiels sur les milieux récepteurs.

Les résultats d'analyse multicritère montrent la pertinence du BBSG 0/14 pour les applications routières exigeantes, où la performance technique, la durabilité et un coût compétitif sont des critères primordiaux. En effet, avec un score de 57 % contre 43 % pour le BBSG 0/10, il constituerait un choix idéal.

En conclusion, il est important de souligner que le choix entre le béton bitumineux semi-grenu 0/10 et le béton bitumineux semi-grenu 0/14 doit être guidé par une analyse approfondie des besoins spécifiques du projet, en tenant compte des conditions climatiques, du type de trafic, des contraintes budgétaires et des objectifs environnementaux. Bien que le BBSG 0/14 apparaisse comme un choix plus performant dans de nombreux cas, le BBSG 0/10 peut trouver sa place dans des applications spécifiques où ses avantages, tels que la résistance à l'humidité, sont prépondérants.

II. PERSPECTIVES

Dans le cadre de l'amélioration des performances des revêtements routier, il serait judicieux d'orienter les recherches vers :

- L'étude des performances des revêtements routiers face aux effets du changement climatique afin d'optimiser les matériaux et les techniques de construction pour résister aux sollicitations extrêmes.
- Mener une analyse du cycle vie complète et bien détaillée des revêtements routiers afin d'évaluer leurs impacts environnementaux et intégrer de nouvelles technologies et matériaux écologiques

LIMITES ET RECOMMANDATIONS

I. LIMITES DE L'ÉTUDE

1. Campagne expérimentale

Dans le cadre de l'étude, certains essais pour évaluer les performances des bétons bitumineux, n'ont pas pu être réalisés dans les limites temps recommandé par les normes. Par conséquent, certains échantillons n'ont pas eu un temps de maturation suffisant pour évaluer au mieux les performances des bétons bitumineux et de simuler les conditions réelles d'utilisation. En général, les essais en laboratoire, bien que fondamentaux pour caractériser les bétons bitumineux, présentent certaines limitations. Les conditions de réalisation de ces essais ne reflètent pas toujours fidèlement les conditions réelles de service des chaussées.

2. Analyse financière

Il est difficile de fournir une analyse financière comparative généralisable avec des chiffres précis des bétons bitumineux 0/10 et 0/14. En effet, les prix varient énormément fonction de nombreux facteurs tels que la localisation géographique, les fournisseurs, les conditions de marché, le type de chantier et les spécifications. Mener une analyse avec des données précises serait rapidement obsolète ou non applicables à tous les contextes

3. Étude d'impact environnemental

L'étude de l'impact environnemental des bétons bitumineux rencontrent plusieurs limites, notamment la difficulté à quantifier les flux entrants et les sortants lié au cycle de vie précisément la consommation d'énergie, de ressources et les émissions de gaz à effet de serre (GES). Il existe également une incertitude sur les effets à long terme des matériaux utilisés, et les variations dans les pratiques de construction et de maintenance qui peuvent affecter les résultats.

II. RECOMMANDATIONS

Selon la synthèse technique du séminaire international : *PERFORMANCE DES REVÊTEMENTS ROUTIERS EN LIANT HYDROCARBONÉ DANS LE CONTEXTE DE L'AFRIQUE TROPICALE, DU 26 AU 28 FÉVRIER 2024 A L'ESPACE « CRRAE - UMOA », ABIDJAN*, nous nous associons aux recommandations formulées par le docteur KOUASSI Paulin Yao et monsieur TOURE Aboubacar qui sont de :

- Revoir à la hausse la température pour les essais d'orniérage en Afrique et la possibilité de les relever jusqu'à 70°C
- Utiliser des matériaux moins sensibles à l'eau dans les zones présentant un risque d'inondation
- Examiner la réglementation sur l'utilisation des camions de type poids lourd sur le réseau routier, en tenant compte de leur circulation en convoi. Mettre en œuvre le Règlement 14 de l'UEMOA.

En effet, ces recommandations permettront d'améliorer les performances des revêtements routiers pour maximiser leur résistance aux charges lourdes, aux conditions climatiques extrêmes et à l'usure due au trafic. En somme, ces recommandations permettront d'assurer la sécurité, la durabilité et l'efficacité des infrastructures routières. Elles permettront également d'optimiser les coûts de construction et de maintenance, tout en réduisant l'impact environnemental des revêtements.

Entretien des infrastructures : Quand bien même une bonne formulation du matériau et une bonne mise en œuvre, il faut tenir compte du fait que la structure de chaussée n'est pas éternelle et qu'il faut l'entretenir pour qu'elle soit pérenne. En effet, la chaussée est soumise à de nombreux facteurs qui peuvent entraîner une dégradation précoce de l'ouvrage. Certains de ces facteurs ne peuvent être ni contrôlés ni quantifiés de manière absolue pour être intégrés dans les paramètres de dimensionnement et de choix de matériaux. Il faut donc procéder à des travaux d'entretien de façon régulière pour assurer une longue durée de vie aux infrastructures routières. Nos recommandations s'intéressent plus à la période optimale pour réaliser un entretien afin d'accroître la durée de vie de l'infrastructure. À ce sujet, nous pouvons recommander qu'il soit souhaitable de prévoir un entretien le plus tôt possible et régulièrement pour accroître la durée de vie de l'infrastructure.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : Nelson Andrey Alvarado Patino (2018), *Évaluation des performances thermomécaniques des enrobés bitumineux à fort taux de recyclage : Apport du procédé de régénération Fenixfalt*, Rennes, thèse de doctorat, 259 pages
- [2] : CORTE Jean-François (2024), *Apports d'une formulation performancielle des enrobés bitumineux*, Abidjan, 2^{ème} Séminaire international du CNCI-Route, 15 pages
- [3] : KARDIOULA Jonas (2024), *Documents utiles pour la formulation, la fabrication et la mise en œuvre des revêtements routiers*, Abidjan, 2^{ème} Séminaire international du CNCI-Route, 23 pages
- [4] : A. Junod et Prof A.-G Dumont (2004), *Formulation et optimisation des formules d'enrobés*, Lausanne, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) Laboratoire des voies de circulation (LAVOC), 89 pages
- [5] : Alexandre T. BACHAND (2018), *Formulation d'enrobés bitumineux de type ESG10 et GB20 avec incorporation de particules de verre*, Montréal, Mémoire, 189 pages
- [6] : TAPSOBA Judicaël Honora (2012), *Etude de formulation et de mise en œuvre d'enrobés : Cas des travaux de renforcement de la route Ouaga-Sakoinsé*, Ouagadougou, Mémoire de fin d'études, 87 pages
- [7] : Menin MESSOU (2017), *LES CAHIERS DE MENSOU : NOTES SUR LE CONTÔLE GEOTECHNIQUE DES TRAVAUX ROUTIERS*, Abidjan, 254 pages
- [8] : LBTP (1977), *MANUEL pour la conception et le dimensionnement des chaussées neuves- Catalogue de structure types.*
- [9] : LBTP (2024), *MANUEL pour la conception et le dimensionnement des chaussées neuves des routes interurbaines.*

RÉFÉRENCES NORMATIVES

- [1] **NF EN 12697-1, 2012**, enrobés bitumineux, méthode de détermination de la teneur en liant soluble dans un mélange hydrocarboné à chaud.
- [2] **NF EN 12697-12, 2004**, enrobés bitumineux, détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses.
- [3] **NF EN 12697-22, 2004**, enrobés bitumineux, directives pour évaluer la résistance des mélanges hydrocarbonés aux déformations permanentes.
- [4] **NF EN 12697-24, 2005**, enrobés bitumineux, méthodes d'évaluation de la résistance à la fatigue des mélanges hydrocarbonés.
- [5] **NF EN 12697-26, 2004**, enrobés bitumineux, méthodes de caractérisation de leur rigidité sur les mélanges bitumineux.
- [6] **NF EN 12697-31, 2005**, enrobés bitumineux, méthode de compactage des éprouvettes cylindriques de mélanges bitumineux réalisé à l'aide d'une presse à compactage giratoire (PCG).
- [7] **NF EN 12697-34, 2004**, enrobés bitumineux, méthode de compactage des éprouvettes cylindriques de mélanges bitumineux réalisé à l'aide d'une presse à compactage giratoire (PCG).
- [8] **NF EN 13108-1, 2007**, enrobés bitumineux, exigences relatives aux mélanges appartenant à la famille des enrobés bitumineux.
- [9] **NF 98-086, 2019**, chaussée, méthode de dimensionnement des structures neuves de chaussées.
- [10] **ISO 14040, 2006**, référence internationale sur le cadre méthodologique pour réaliser des analyses de cycle de vie (ACV).

ANNEXES

ANNEXE I : formulation des bétons bitumineux semi-grenus.....	II
ANNEXE II : Essais de Presse à Cisaillement Giratoire (PCG).....	V
ANNEXE III : Étude d'impact environnemental	VI
ANNEXE IV : Analyse multicritère (présentation de la méthode AHP).....	VIII
ANNEXE V : Images.....	XII

ANNEXE I : formulation des bétons bitumineux semi-grenus

Tableau 35 : Résultats de l'analyse granulométrique des concassés

Modules AFNOR	Tamis (mm)	Sable 0/4	Gravier 4/10	Gravier 10/14
20	0,08	13,35	1,47	0,84
24	0,2	20,09	1,92	1,08
26	0,315	24,57	2,14	1,21
29	0,5	29,47	2,35	1,29
31	1	42,72	2,91	1,53
34	2	62,92	3,6	1,66
35	2,5	71,44	3,94	1,7
37	4	93,14	5,7	1,78
38	5	100	12,8	1,87
39	6,3	100	35,88	2,16
40	8	100	74,97	3,04
41	10	100	96,24	12,3
42	12,5	100	100	65,48
*	14	100	100	88,61
43	16	100	100	100
*	20	100	100	100

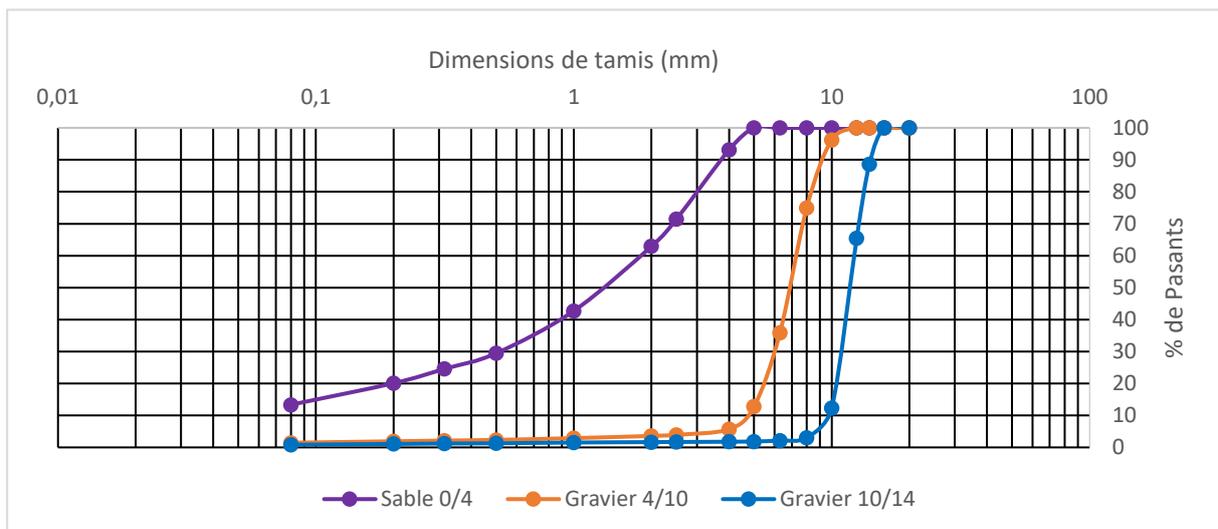


Figure 25 : Courbes d'analyse granulométrique des concassés

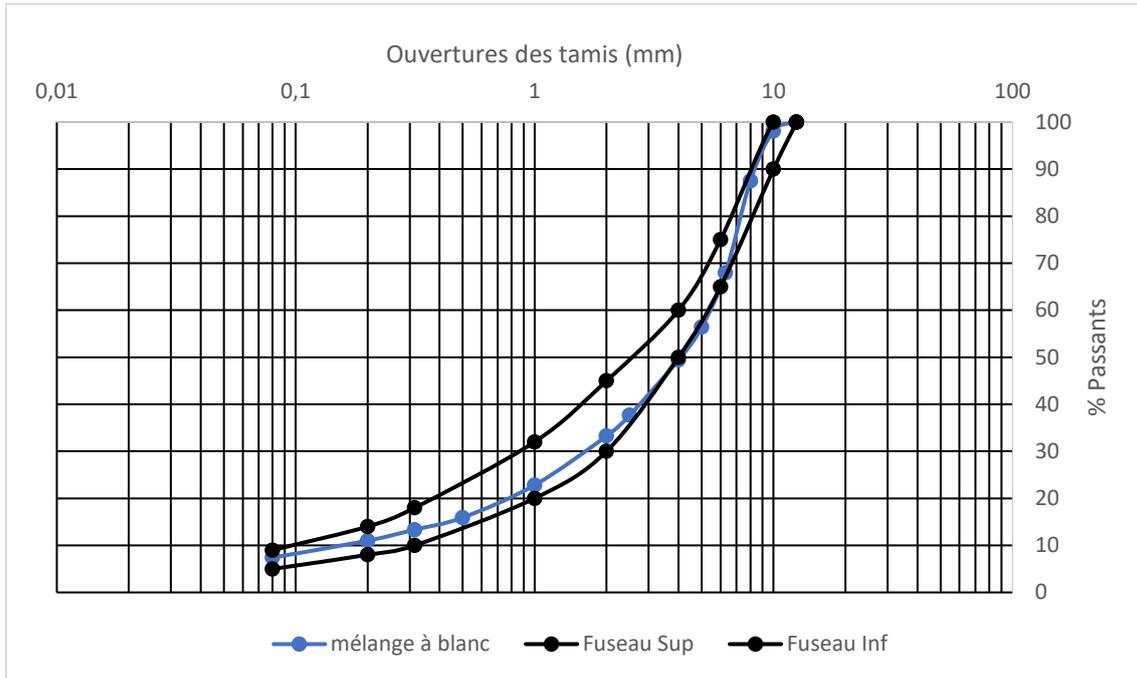


Figure 26 : Formulation à blanc théorique du BBSG 0/10

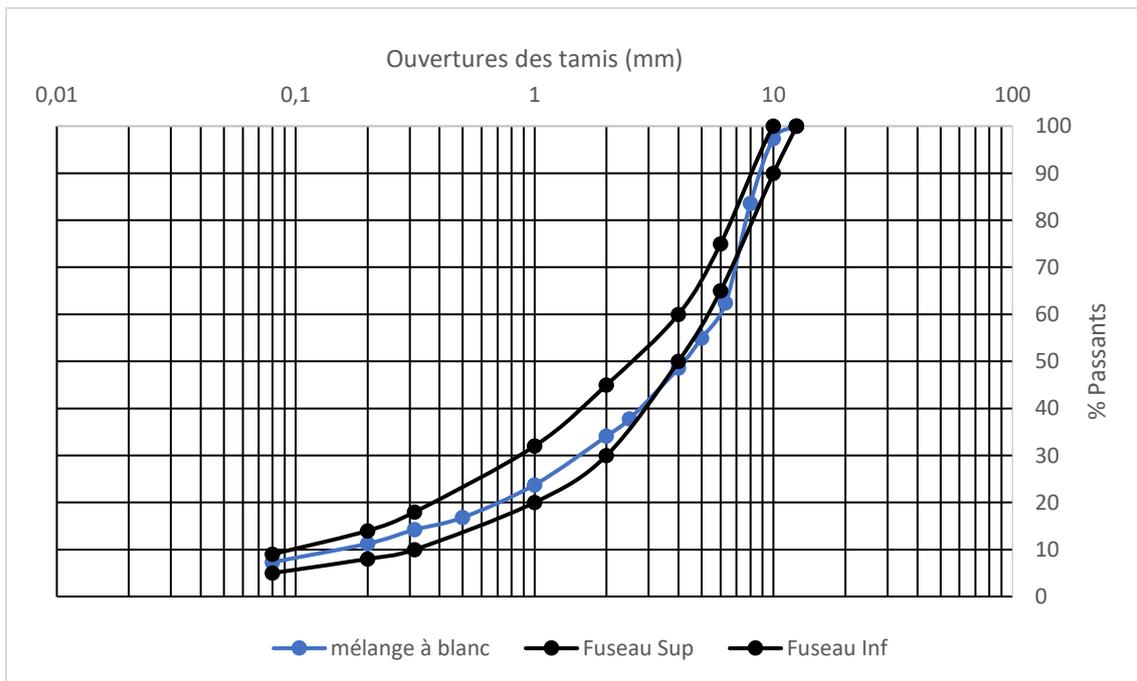


Figure 27 : Formulation à blanc réel du BBSG 0/10

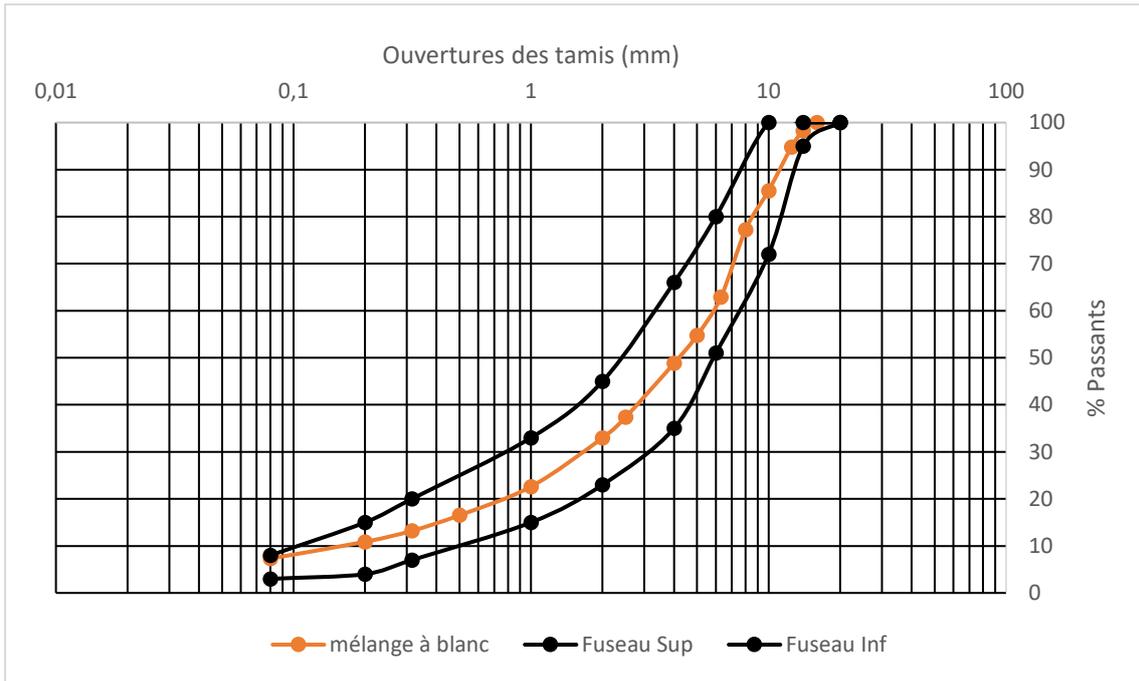


Figure 28 : Formulation à blanc théorique du BBSG 0/14

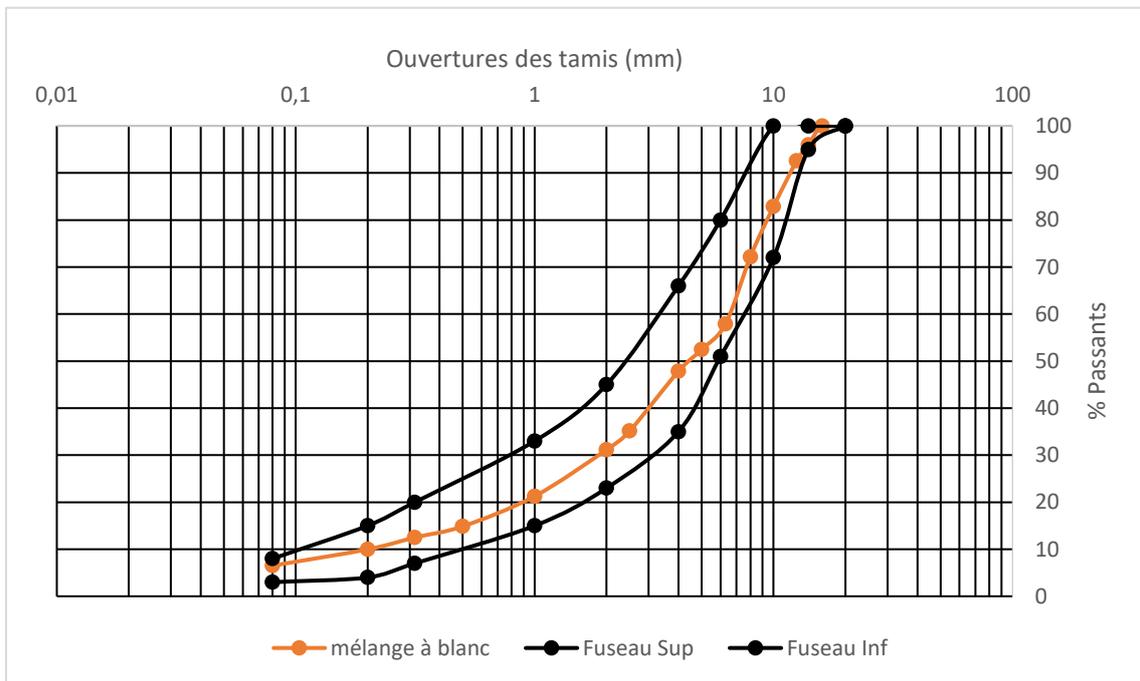


Figure 29 : Formulation à blanc réel du BBSG 0/14

ANNEXE II : Essais de Presse à Cisaillement Giratoire (PCG)

Tableau 36 : Résultats PCG (BBSG 0/10)

Nombre de girations	% Vides	Spécifications
5	14,64	-
10	12,09	-
15	10,53	-
20	9,41	-
25	8,56	-
30	7,87	-
40	6,82	-
50	6,04	-
60	5,44	5 - 10

Tableau 37 : Résultats PCG (BBSG 0/14)

Nombre de girations	% Vides	Spécifications
5	17,39	-
10	15,01	-
15	13,61	-
20	12,63	-
25	11,9	-
30	11,33	-
40	10,48	-
50	9,86	-
60	9,38	-
80	8,68	4 - 9

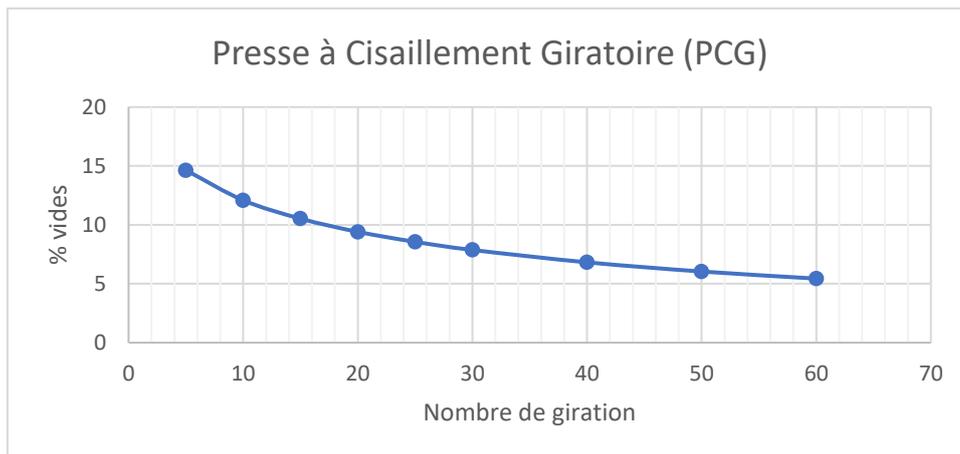


Figure 30 : Courbes de pourcentages de vides BBSG 0/10

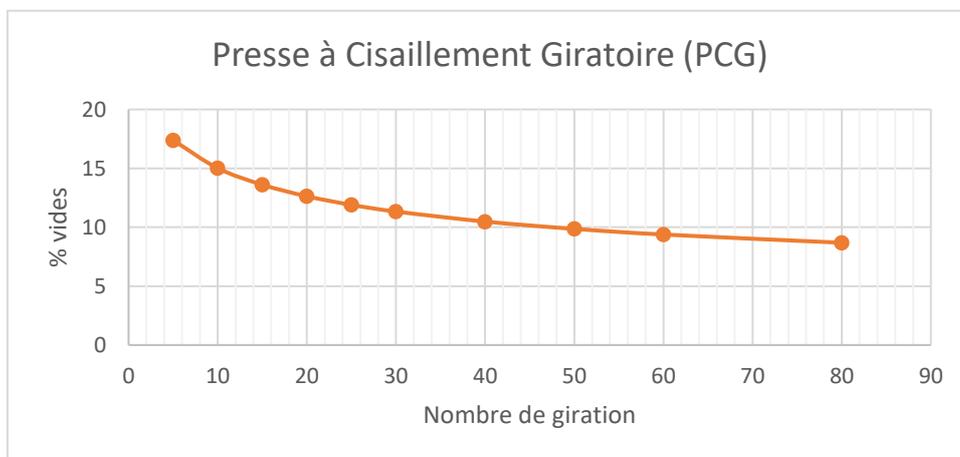


Figure 31 : Courbes de pourcentages de vides BBSG 0/14

ANNEXE III : Étude d'impact environnemental

Tableau 38 : Matrice de FECTEAU

Intensité	Étendue	Durée	Importance absolue
Forte	Régionale	Longue	Majeure
		Moyenne	Majeure
		Courte	Majeure
	Locale	Longue	Majeure
		Moyenne	Moyenne
		Courte	Moyenne
	Ponctuelle	Longue	Majeure
		Moyenne	Moyenne
		Courte	Mineure
Moyenne	Régionale	Longue	Majeure
		Moyenne	Moyenne
		Courte	Moyenne
	Locale	Longue	Moyenne
		Moyenne	Moyenne
		Courte	Moyenne
	Ponctuelle	Longue	Moyenne
		Moyenne	Moyenne
		Courte	Mineure
Faible	Régionale	Longue	Majeure
		Moyenne	Moyenne
		Courte	Mineure
	Locale	Longue	Moyenne
		Moyenne	Moyenne
		Courte	Mineure
	Ponctuelle	Longue	Mineure
		Moyenne	Mineure
		Courte	Mineure

Source : Martin FECTEAU, 1997

Tableau 39 : Description des critères d'évaluation de la matrice de FECTEAU

Critère	Catégorie	Description
Etendue	Ponctuelle	Au niveau du site du projet
	Locale	A moins de 10 km du site du projet
	Régionale	A plus de 10 km du site de projet
Intensité	Faible	Effets mineurs n'affectant pas les fonctions naturelles de l'écosystème ou impact légèrement positif ou négatif sur les conditions socio-économiques de base
	Moyenne	Altération négative modérée des fonctions naturelles de l'écosystème ou d'impact modérément positif ou négatif sur les conditions socio-économiques de base
	Forte	Altération importante des fonctions naturelles de l'écosystème ou d'impact considérablement positif ou négatif sur les conditions socio-économiques de base
Durée	Courte	Inférieur à un (1) an
	Moyenne	1 à 10 ans
	Longue	Supérieur à 10 ans

Source : ADEOSSI Giraude, 2024

Tableau 40 : Description des critères d'importance de la matrice de FECTEAU

Critères d'importance absolue	Description
Majeur	Dommages irréparables sur les systèmes écologiques, dégradations des milieux récepteurs ou impact très positif sur l'environnement socio-économique
Modéré	Dommages réparables sur les systèmes écologiques, dégradation partielle des milieux récepteurs ou impact relativement positif sur l'environnement socio-économique
Mineur	Dommages observés sans toutefois affecter les milieux récepteurs ou impact mineur sur l'environnement socio-économique

Source : ADEOSSI Giraude, 2024

ANNEXE IV : Analyse multicritère (présentation de la méthode AHP)

Généralités

L'analyse hiérarchique des procédés (AHP), inventée par Thomas SAATY mathématicien américain en 1980, permet la comparaison et le choix entre des options préétablies. Elle repose sur la comparaison par paires d'options et de critères.

Fonctionnement de la méthode AHP

L'AHP (Analyse Hiérarchique des Procédés) évalue un ensemble de critères et plusieurs alternatives pour aider à prendre la meilleure décision. Étant donné que certains critères peuvent être en conflit, la meilleure alternative n'est pas celle qui maximise chaque critère individuellement, mais plutôt celle qui trouve le meilleur compromis entre eux.

L'AHP attribue un poids à chaque critère en se basant sur des comparaisons par paires faites par le décideur. Plus le poids est élevé, plus le critère est jugé important. Pour chaque critère, l'AHP assigne ensuite un score à chaque alternative en se basant sur des comparaisons par paires des alternatives par le décideur. Un score plus élevé indique une meilleure performance de l'alternative par rapport au critère considéré.

Enfin, l'AHP combine les poids des critères et les scores des alternatives pour déterminer un score global pour chaque option, établissant ainsi un classement final.

Mise en œuvre de la méthode

L'AHP divise un problème en une hiérarchie de sous-problèmes, ce qui permet une compréhension et une évaluation plus faciles et subjectives. Les évaluations subjectives sont ensuite transformées en valeurs numériques, qui sont utilisées pour classer chaque alternative sur une échelle numérique.

- **Étape 1 : Arborescence du problème**

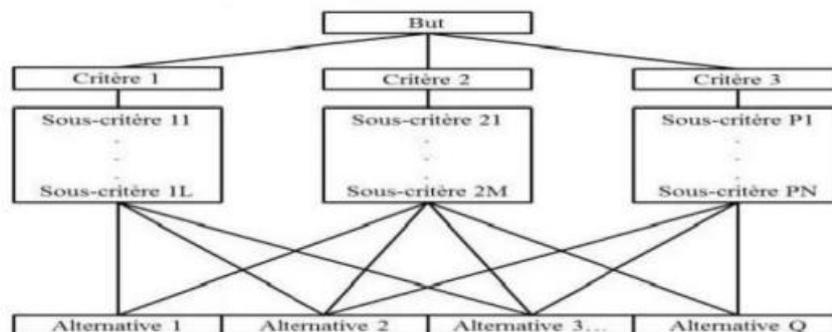


Figure 32 : Structure hiérarchique générique

Source : SAATY, 1990

Cette étape est cruciale et créative dans le processus de prise de décision. Structurer le problème de décision sous forme de hiérarchie est essentiel pour l'Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP). Cette hiérarchisation interconnecte tous les éléments, même indirectement. La Figure 32 illustre une structure hiérarchique typique. Au sommet se trouve l'objectif principal de l'étude et de l'analyse du problème. Les nœuds représentent les alternatives à comparer. Lors de la comparaison des éléments à chaque niveau, le décideur évalue uniquement la contribution des éléments du niveau inférieur à ceux du niveau supérieur. Cette focalisation locale permet au décideur de se concentrer sur une partie spécifique du problème global, ce qui constitue une fonctionnalité puissante de l'AHP.

- **Etape 2 : Comparaison par paire**

Les données sont collectées par des experts ou des décideurs suivant la structure hiérarchique, via des comparaisons par paires des alternatives sur une échelle qualitative comme décrit dans le tableau. Le décideur peut évaluer les comparaisons comme égales, légèrement fortes, fortes, très fortes, ou extrêmement fortes. Les comparaisons sont faites pour chaque critère et converties en valeurs quantitatives selon le tableau de SAATY. (Tableau 41).

Tableau 41 : Table de SAATY pour la comparaison binaire des éléments

Echelle numérique	Echelle verbale : définition	Commentaire
1	Importance égale des deux éléments : Également important	Les deux éléments concourent de la même manière à l'objectif
3	Un élément est un peu plus important que l'autre : légèrement important	L'expérience ou l'analyse favorisent légèrement un élément.
5	Un élément plus est important que l'autre : Fortement important	L'expérience ou l'analyse favorisent vraiment un élément.
7	Un élément est beaucoup plus important que l'autre : très fortement important	Une action est largement dominante sur l'autre
9	Un élément est absolument plus important que l'autre	La dominance d'un élément par rapport à un autre est démontrée et absolue.
2 ; 4 ; 6 ; 8	Valeurs intermédiaires entre deux jugements	Utilisées pour affiner le jugement
Réciprocité	Si l'élément i se voit attribuer l'un des chiffres précédents lorsqu'il est comparé à l'élément j, j aura donc la valeur inverse lorsque l'on le compare à i	

Source : SAATY, 1990

- **Etape 3 : Elaboration de la matrice de jugement**

Les comparaisons par paires de différents critères générées à l'étape 2 sont organisées dans une matrice carrée. Les éléments situés sur la diagonale de la matrice valent 1. Si la valeur de l'élément (i, j) est supérieure à 1, cela signifie que le critère de la rangée i est meilleur que celui de la colonne j ; sinon, le critère de la colonne j est meilleur que celui de la rangée i. L'élément (j, i) de la matrice est l'inverse de l'élément (i, j).

- **Etape 4 : Calcul de vecteur priorité**

La valeur propre principale et le vecteur propre droit normalisé correspondants de la matrice de comparaison déterminent l'importance relative des différents critères comparés. Les éléments du vecteur propre normalisé sont appelés **poinds** pour les critères ou sous-critères, et **notes** pour les alternatives.

- **Etape 5 : Vérification de la cohérence du jugement**

a consistance de la matrice d'ordre n est analysée pour évaluer la fiabilité des comparaisons. Étant donné que ces comparaisons sont subjectives, l'AHP accepte une certaine incohérence grâce à la redondance. Si l'indice de consistance n'atteint pas le niveau requis, les comparaisons peuvent être réexaminées. L'indice de consistance (IC) se calcule comme suit :

$$IC = (\lambda_m - n) / n$$

où λ_m est la valeur propre moyenne de la matrice de jugement. Cet indice est comparé à celui d'une matrice aléatoire (IA).

Le ratio IC/IA, appelé rapport de cohérence (RC), doit être inférieur à 0,1 selon SAATY (1980).

- **Etape 6 : Agrégation finale des projets**

Le classement de chaque alternative est d'abord multiplié par les poids des sous-critères, puis agrégé pour obtenir des classements locaux en fonction de chaque critère. Les évaluations locales sont ensuite multipliées par les poids des critères et agrégées pour obtenir les classements globaux. Le tableau 41 présente l'échelle de valeurs utilisée pour indiquer le degré d'importance d'un indicateur par rapport à un autre. Cette échelle sera utilisée pour établir les préférences.

Fondements mathématiques de la méthode AHP

L'utilisation des échelles de ratio pour les comparaisons aide à unifier le caractère multidimensionnel du problème dans une dimension unifiée du point de vue du résultat final. Théoriquement, l'AHP est basé sur quatre axiomes donnés par SAATY (1994) :

- **Axiome 1** : Le décideur peut fournir des comparaisons deux à deux a_{ij} de deux alternatives i et j correspondant à un critère/sous-critère sur une échelle de rapport qui est réciproque, à savoir
- **Axiome 2** : Le décideur ne juge jamais une alternative à être infiniment meilleur qu'une autre correspondant à un critère, à savoir : $a_{ij} \neq \infty$;
- **Axiome 3** : Le problème de décision peut être formulé comme une hiérarchie.
- **Axiome 4** : Tous les critères/sous-critères qui ont un certain impact sur le problème donné, et toutes les alternatives pertinentes, sont représentés dans la hiérarchie en une seule fois.

Limites de la méthode AHP

BHUSHAN et al (2004) énumèrent quelques difficultés liées à l'application de la méthode d'analyse multicritère AHP :

- L'inexactitude de l'échelle de ration ;
- La nécessité d'interpréter les résultats ;
- L'inversion de classement.

ANNEXE V : Images



Image 1 : Éprouvettes Marshall



Image 2 : Écrasement des éprouvettes à la presse Marshall



Image 3 : Éprouvettes Duriez



Image 4 : Éprouvettes d'orniérage et de module de rigidité



Image 5 : Éprouvettes du béton bitumineux semi-grenu 0/10 après essai d’orniérage



Image 6 : Éprouvettes du béton bitumineux semi-grenu 0/14 après essai d’orniérage