



Faculty of Sciences and Technology
Civil Engineering Department

كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية

N° d'ordre : M2 /GC/2025

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Travaux publics

Option : Voie et Ouvrage d'Art (VOA)

Thème

**Évaluation multicritère floue de variantes de structures de
chaussée par AHP, TOPSIS et VIKOR : Cas d'étude sur la
RN11 entre Khadra et Sidi Lakhdar**

Présenté par :

- HENNOUS Alia

Soutenu le 24 /06/2025 devant le jury composé de :

Pr MEBROUKI Abdelkader	Président :	Université de Mostaganem
Dr ZAOUI Mohamed	Encadrant :	Université de Mostaganem
Mr ROUAM SERIK Mohamed	Examineur :	Université de Mostaganem
Mr CHERIF Mourad	Invité	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2024/2025

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout-puissant qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.

Je souhaite également remercier ma famille, en particulier mes parents, pour leur amour, leur patience et leur soutien moral constant.

Je remercie chaleureusement mon encadrant, Docteur ZAOUI Mohamed, pour son accompagnement, ses conseils avisés et sa disponibilité tout au long de ce travail.

Son soutien a été déterminant dans la réalisation de ce projet.

Je me remercie moi-même pour tous mes efforts et ma capacité à mener à bien ce projet.

Je remercie également l'ensemble du corps enseignant de la filière « VOA » du département de Génie Civil de l'Université de Mostaganem, pour la qualité de leur enseignement et leur accompagnement tout au long de mon parcours universitaire.

Enfin, j'adresse mes remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes parents bien-aimés.

À ma mère

Symbole de tendresse et de dévouement, dont le soutien, l'amour et les prières
m'ont toujours accompagné.

À mon père

Pour ses sacrifices, son amour, et son engagement constant pour mon bien-être
et ma réussite.

À mes frères et sœurs

Je vous souhaite un avenir plein de bonheur, de santé et de réussite.

Résumé

Ce projet de fin d'études porte sur le choix optimal d'une structure de chaussée parmi plusieurs alternatives. Pour cela, deux méthodes classiques de dimensionnement ont été utilisées : la méthode CBR et le catalogue algérien de dimensionnement du CTTP. Chaque structure proposée a été évaluée selon des critères techniques et économiques : le coût, l'épaisseur totale, la déflexion sous charge et le rayon de courbure. Afin de mieux gérer les incertitudes liées aux jugements d'experts et aux données approximatives, nous avons fait appel à des méthodes multicritères de décision intégrant la logique floue : Fuzzy AHP, Fuzzy TOPSIS et Fuzzy VIKOR. L'étude a été appliquée à un tronçon de la route nationale numéro 11 reliant la ville de Khadra et la ville de Sidi Lakhdar situé dans la wilaya de Mostaganem. Les résultats ont permis de classer les différentes structures et de proposer la solution la plus équilibrée, à la fois performante sur le plan technique et économiquement raisonnable.

Mots-clés : dimensionnement routier, MCDA, Fuzzy AHP, Fuzzy TOPSIS, Fuzzy VIKOR, structure de chaussée, incertitude.

Abstract

This final year project focuses on selecting the optimal pavement structure among several alternatives. Two classical pavement design approaches were used: the California Bearing Ratio (CBR) method and the Algerian design catalogue provided by the CTTP. Each proposed structure was evaluated based on technical and economic criteria: total cost, overall thickness, deflection under load, and radius of curvature. To better manage uncertainties related to expert judgments and imprecise data, we employed multi-criteria decision-making (MCDA) methods incorporating fuzzy logic: Fuzzy AHP, Fuzzy TOPSIS, and Fuzzy VIKOR. The case study was applied to a section of National Road No. 11 linking the town of Khadra and the town of Sidi Lakhdar, located in the wilaya of Mostaganem. The results enabled ranking the different alternatives and identifying the most balanced solution, both technically reliable and economically feasible.

Keywords: pavement design, MCDA, Fuzzy AHP, Fuzzy TOPSIS, Fuzzy VIKOR, pavement structure, uncertainty.

الملخص

يهدف هذا المشروع لنهاية الدراسة إلى اختيار الهيكل الأمثل للرصيف الطرقي من بين عدة بدائل ممكنة. تم اعتماد طريقتين تقليديتين في التصميم: طريقة نسبة التحمل كالفورنيا (CBR) وكذا الدليل الجزائري للتصميم الصادر عن مركز البحث في تقنيات الطرق (CTTP). تم تقييم كل بديل مقترح بناءً على معايير تقنية واقتصادية، وهي: التكلفة الإجمالية، السماكة الكلية، الهبوط تحت الحمل، ونصف قطر الانحناء. ولمعالجة الغموض المرتبط بأحكام الخبراء والبيانات التقريبية، تم استخدام ثلاث طرق لاتخاذ القرار متعددة المعايير تعتمد على المنطق الضبابي Fuzzy AHP، و Fuzzy TOPSIS، و Fuzzy VIKOR. تم تطبيق الدراسة على مقطع من الطريق الوطني رقم 11 الذي يربط بين مدينة خضرة ومدينة سيدي الأخضر، الواقعتين في ولاية مستغانم. وقد مكنت النتائج من تصنيف البدائل المختلفة واقتراح الحل الأكثر توازنًا من حيث الأداء الفني والمعقولة الاقتصادية.

الكلمات المفتاحية: المنطق الضبابي، (MCDA) تصميم الرصيف الطرقي، اتخاذ القرار متعدد المعايير، هيكل الرصيف، عدم اليقين، Fuzzy AHP، Fuzzy TOPSIS، Fuzzy VIKOR.

Table des matières

Remerciement

Dédicace

Résumé

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les chaussées	2
I.1 Introduction :	3
I.2 Historique :	3
I.3 La chaussée :	4
I.3.1 Définition :	4
I.3.2 Rôles :	4
I.3.3 Constitution des structures de chaussée :	4
I.3.3.1 Couche de surface : Elle est composée de la couche de roulement et de liaison et elle est en contact direct avec le pneumatique de véhicule et la charge extérieure....	4
I.3.3.2 Couches d'assises :	5
I.3.3.3 Plate-forme support de corps de chaussée :	5
I.3.4 Les différents types de chaussée :	6
I.3.4.1 Chaussée souple :	6
I.3.4.1.1 Les avantages des chaussées souples :	6
I.3.4.1.2 Les inconvénients des chaussées souples	6
I.3.4.1.3 Rôle de revêtement :	6
I.3.4.1.4 Rôle de fondation :	7
I.3.4.1.5 Rôle de sous-fondation :	7
I.3.4.2 Chaussée rigide :	7
I.3.4.2.1 Les avantages des chaussées rigide :	7
I.3.4.2.2 Les inconvénients des chaussées rigide :	7
I.3.4.2.3 Rôle de revêtement :	7
I.3.4.2.4 Rôle de fondation :	8
I.3.4.2.5 Rôle de sous-fondation :	8
I.3.4.3 Chaussée semi-rigide :	8
I.3.5 Conception et construction des chaussées :	9
I.3.5.1 Principales considérations pour la conception et la construction de la chaussée	9
I.3.5.2 Objectifs et contraintes de conception :	10

I.3.5.2.1	Objectifs de la chaussée	10
I.3.5.2.2	Objectifs de la conception de la chaussée :	11
I.3.5.2.3	Contraintes de conception	11
I.3.6	Entretien et gestion des chaussées :	11
I.3.7	Mécanique de chaussée :	12
I.3.7.1	Les modèles de la mécanique des chaussées :	12
I.3.7.1.1	Modèle de Boussinesq :	12
I.3.7.1.2	Les modèles bicouche :	13
I.3.7.1.3	Modèle de Hogg :	14
I.3.7.1.4	Modèles aux éléments finis :	14
I.4	Conclusion:	15
Chapitre II : Généralités sur le dimensionnement du corps de chaussée		16
II.1	Introduction :	17
II.2	Les règles du dimensionnement :	17
II.3	Les paramètres de dimensionnement des chaussées souples :	17
II.3.1	Le trafic :	17
II.3.1.1	Agressivité de trafic :	17
II.3.1.2	Prise en compte du trafic dans le dimensionnement :	18
II.3.2	Le sol support :	19
II.3.3	Les conditions environnementales :	19
II.3.3.1	Impact du climat sur les chaussées	19
II.3.4	Matériaux de chaussée souple :	20
II.3.4.1	Les Graves Non Traitées (G.N.T)	20
II.3.4.2	Le béton bitumineux :	20
II.3.5	Le risque de calcul : Fiabilité	21
II.3.6	Durée de service :	21
II.4	Principales méthodes de dimensionnement :	22
II.4.1	METHODE DE C.B.R (CALIFORNIA – BEARING – RATIO):	23
II.4.2	Méthode de catalogue de dimensionnement des chaussées neuves du CTTP : .	24
II.4.2.1	Données d'entrées du dimensionnement :	25
II.4.2.1.1	Durée de vie :	25
II.4.2.1.1	Risque de calcul :	26
II.4.2.1.2	Les données climatiques :	26

II.4.2.1.3	Trafic :.....	28
II.4.2.2	Sol support :.....	30
II.4.2.2.1	La portance de sol-support de chaussée :.....	30
II.4.2.2.2	Classes de sols supports par niveau de réseau principal (RPi).....	30
II.4.2.3	Amélioration de la portance du sol support :.....	31
II.4.2.4	Calcul des déformations admissibles sur le sol support (ϵ_z, adm).....	31
II.4.2.5	Matériaux :.....	31
II.4.2.6	Performances mécaniques :.....	31
II.4.2.7	Calcul des sollicitations admissibles :.....	32
II.4.2.7.1	Vérification en fatigue des structures et de la déformation du sol support :	
	34	
II.5	Logiciel Alizé LCPC :.....	34
II.5.1	Définition :.....	34
II.5.2	Principe de logiciel :.....	34
II.5.3	Les onglets principaux du logiciel :.....	35
II.5.3.1	Onglet structure :.....	35
II.5.3.2	Onglet charge :.....	36
II.5.3.3	Onglet trafic :.....	36
II.5.3.4	Onglet valeurs admissibles :.....	37
II.5.3.5	Onglet résultats :.....	37
II.6	Conclusion :.....	38
Chapitre III	: La prise de décision multicritère	39
III.1	Introduction :.....	40
III.2	Définition :.....	40
III.3	Les principaux éléments dans MCDM :.....	40
III.3.1	Le décideur :.....	40
III.3.2	Les alternatives :.....	40
III.3.3	Les critères :.....	41
III.4	Les méthodes multicritères d'aide à la décision dans un domaine flou :.....	41
III.4.1	Définition :.....	41
III.4.2	Extensions en la Logique Floue :.....	41
III.4.2.1	Logique Floue : Définition et Concept	41
III.4.2.2	Les nombres flous :.....	42
III.4.2.2.1	Définition :.....	42

III.4.2.2.2 Les opérations arithmétiques sur les nombres triangulaires flous (TFNs)	42
III.5 Les différentes méthodes multicritères d'aide à la décision :	43
III.5.1 Méthode Fuzzy AHP	43
III.5.2 Méthode Fuzzy TOPSIS :	45
III.5.3 Méthode Fuzzy VIKOR :	48
III.6 Conclusion :	51
Chapitre IV : dimensionnement et vérification mécanique des structures de chaussée	52
IV.1 Introduction :	53
IV.2 Présentation de projet :	53
IV.2.1 Présentation de la wilaya de Mostaganem :	54
IV.2.1.1 Situation géographique :	54
IV.2.1.2 Relief :	54
IV.2.1.3 Climat :	54
IV.2.1.4 Réseau routier :	54
IV.2.1.5 Dairas et Communes de la wilaya de Mostaganem :	55
IV.2.1.6 Les données de projet :	57
IV.2.1.6.1 Les données de trafic :	57
IV.2.1.6.2 Les données de la chaussée :	57
IV.2.1.7 Dimensionnement du corps de chaussée :	57
IV.2.1.7.1 Méthode CBR :	57
IV.2.1.7.2 Méthode du catalogue de dimensionnement des chaussées neuves du CTPP :	59
IV.2.1.7.3 Vérification par logiciel alize :	61
IV.3 Conclusion :	66
Chapitre V : évaluation multicritère floue et sélection optimale de la structure de chaussée	68
V.1 Introduction :	69
V.2 Présentation des critères :	69
V.2.3 La déflexion :	70
V.3 Présentation des alternatives :	70
V.3.1 Évaluation technique et économique des alternatives :	72
V.3.1.1 Coût global de chaque structure :	72
V.3.1.2 L'épaisseur totale des structures :	74
V.3.1.3 Résultat mécaniques relatifs à la déflexion et au rayon de courbure :	74

V.4	Application des méthodes multicritères :	78
V.4.1	La méthode AHP flou :	78
V.4.2	La méthode TOPSIS Flou :	89
V.4.3	Fuzzy VIKOR :	92
V.5	Interprétation des résultats :	94
V.6	Interprétation des résultats – Synthèse finale	94
V.7	Conclusion.....	95
Conclusion Générale		96
Références bibliographiques		97

Listes des tableaux

Tableau II.1 : Composition des mélanges bétons bitumineux et enrobés denses.....	21
Tableau II.2 : fiabilité.....	21
Tableau II.3 : Coefficient d'équivalence.....	24
Tableau II.4 : Durées de vie adoptées.....	25
Tableau II.5 : Risque adopté pour le réseau RP1.....	26
Tableau II.6 : Risque adopté pour le réseau RP2.....	26
Tableau II.7 : Choix des zonages climatique.....	27
Tableau II.8 : Choix des températures équivalentes.....	28
Tableau II.9 : Classe du trafic.....	28
Tableau II.10 : Valeur du coefficient d'agressivité A.....	30
Tableau II.11 : Présentation des classes de portance des sols.....	30
Tableau II.12 : Sur-classement avec couche de forme en matériau non traité.....	31
Tableau II.13 : performances mécaniques des matériaux bitumineux.....	31
Tableau II.14 : performances mécaniques des matériaux traités aux liants hydrauliques.....	32
Tableau II.15 : performances mécaniques des matériaux non traités.....	32
Tableau II.16 : Valeurs de $t=f(r\%)$	32
Tableau III.1 : L'échelle fondamentale pour la comparaison par paires dans FUZZY AHP..	44
Tableau III.2 : L'échelle d'importance dans FUZZY-TOPSIS.....	46
Tableau III.3 : L'échelle d'importance des critères dans FUZZY-VIKOR.....	49
Tableau III.4 : L'échelle d'importance des alternatives dans FUZZY-VIKOR.....	49
Tableau IV.1 : le réseau routier de la Wilaya de Mostaganem.....	55
Tableau IV.2 : daïras et communes de la wilaya de Mostaganem.....	57
Tableau V.1 : Présentation des alternatives de structure de chaussée.....	72
Tableau V.2 : prix unitaire de chaque matériau.....	73
Tableau V.3 : coût global des différentes structures.....	74
Tableau V.4 : comparaison des critères par paires.....	80
Tableau V.5 : matrice de contribution par paire.....	80
Tableau V.6 : les moyennes géométriques.....	81
Tableau V.7 : les poids flous.....	81
Tableau V.9 : comparaison des alternatives par rapport au critère coût	82
Tableau V.10 : matrice de contribution par paire.....	82
Tableau V.11 : les moyennes géométriques.....	83
Tableau V.12 : les poids flous.....	83
Tableau V.13 : Défuzzification et normalisation des poids flous.....	84
Tableau V.14 : comparaison des alternatives par rapport au critère épaisseur totale.....	84
Tableau V.15 : matrice de contribution par paire.....	85
Tableau V.16 : les moyennes géométriques.....	85
Tableau V.17 : les poids flous.....	85
Tableau V.18 : Défuzzification et normalisation des poids flous.....	86
Tableau V.19 : comparaison des alternatives par rapport au critère déflexion.....	86
Tableau V.20 : matrice de contribution par paire.....	87

Tableau V.21 : les moyennes géométriques.....	87
Tableau V.22 : les poids flous.....	87
Tableau V.23 : Défuzzification et normalisation des poids flous.....	88
Tableau V.24 : comparaison des alternatives par rapport au critère rayon de courbure.....	88
Tableau V.25 : matrice de contribution par paire.....	89
Tableau V.26 : les moyennes géométriques.....	89
Tableau V.27 : les poids flous.....	89
Tableau V.28 : Défuzzification et normalisation des poids flous.....	90
Tableau V.29 : résultats finals du poids de chaque alternative.....	90
Tableau V.30 : Matrice de décision floue des alternatives	90
Tableau V.31 : Application numérique de la matrice de décision floue.....	91
Tableau V.32 : Matrice de décision floue des critères.....	91
Tableau V.33 : Application numérique de la matrice de décision floue.....	91
Tableau V.34 : Les géométriques \tilde{r}_{ij}	92
Tableau V.35 : la matrice de décision floue normalisée pondérée.....	92
Tableau V.36 : les valeurs de A^+ et A^-	92
Tableau V.37 : Le FBIS et le FNIS.....	92
Tableau V.38 : résultat TOPSIS floue	93
Tableau V.39 : Matrice de décision floue des critères.....	93
Tableau V.40 : application numérique de la matrice de décision floue des critères.....	93
Tableau V.41 : Matrice de décision floue des alternatives.....	93
Tableau V.42 : application numérique de la matrice de décision floue des alternatives	94
Tableau V.43 : application numérique de la matrice de décision floue des alternatives.....	94
Tableau V.44 : la distance floue \tilde{d}_{ij}	94
Tableau V.45 : mesures de séparation \tilde{S}_j et \tilde{R}_j	94
Tableau V.46 : Les valeurs Q.....	95
Tableau V.47 : Rangement final des alternatifs par les trois méthodes.....	95

Listes des figures

Figure I.1 : sentier	3
Figure I.2 : Différentes couches d'une structure de chaussée.....	6
Figure I.3 : Structure d'une chaussée souple.....	7
Figure I.4 : Structure d'une chaussée rigide.....	8
Figure I.5 : Structure d'une chaussée semi-rigide.....	9
Figure I.6 : les différentes catégories de chaussées.....	9
Figure I.7 : Contrainte sous une charge axisymétrique.....	13
Figure I.8 : Schéma du modèle bicouche.....	15
Figure I.9 : Schéma du modèle de Hogg.....	15
Figure II.1 : démarche du catalogue.....	25
Figure II.2 : La carte climatique de l'Algérie.....	27
Figure II.3 : la barre d'onglet du logiciel alize.....	35
Figure II.4 : onglet structure.....	35
Figure II.5 : vue globale de l'onglet charge.....	36
Figure II.6 : onglet trafic.....	36
Figure II.7 : onglet structure.....	37
Figure II.8 : onglet résultats.....	38
Figure III.1 :la logique floue.....	42
Figure III.2 : Structure de la hiérarchie AHP.....	44
Figure IV.1 : Le tronçon étudié.....	54
Figure IV.2 : réseau routier de la wilaya de mostaganem.....	56
Figure IV.3 : Carte des daïras et communes de la wilaya de Mostaganem.....	55
Figure IV.4 : résultat de la vérification de la structure 1 obtenue par le logiciel alize....	62
Figure IV.5 : résultat de la structure 1 modifiée.....	63
Figure IV.6 : résultat de la vérification de la structure 2 obtenue par le logiciel alize....	63
Figure IV.7 : résultat de la structure 2 modifiée.....	64
Figure IV.8 : résultat de la vérification de la structure 3 obtenue par le logiciel alize....	64
Figure IV.9 : résultat de la structure 3 modifiée.....	65
Figure IV.10 : résultat de la vérification de la structure 4 obtenue par le logiciel alize...	66
Figure IV.11 : résultat de la vérification de la structure obtenue par le logiciel alize....	66
Figure IV.12 : résultat de la structure 5 modifiée.....	67
Figure V.1 : Bassin de déflexion et rayon de courbure.....	71
Figure V.2 : résultat mécaniques simulés par Alize-structure 1.....	76
Figure V.3 : résultat mécaniques simulés par Alize-structure 2.....	77
Figure V.4 : résultat mécaniques simulés par Alize-structure 3.....	77
Figure V.5 : résultat mécaniques simulés par Alize-structure 4.....	78
Figure V.6 : résultat mécaniques simulés par Alize-structure 5.....	79
Figure V.7 : Structure de la hiérarchie AHP.....	79

Les abréviations

MCDM : Multi-Criteria Decision Making

F AHP: Fuzzy Analytic Hierarchy Process

F TOPSIS: Fuzzy Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

F VIKOR: Fuzzy VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje

ϵt : La déformation de traction.

ϵz : La déformation verticale du sol support.

σt : La contrainte de traction.

E : module de Young

GB : Grave Bitume

GNT : Grave Non Traitée

GL : grave-laitier

TUF : encroûtement calcaire

SG : Sable gypseux

AG : arène granitique

GC : grave ciment

BCg : béton de ciment goujonné

Introduction générale

Les infrastructures routières constituent un pilier fondamental du développement socio-économique d'un pays. En assurant la mobilité des personnes et le transport des biens, elles facilitent les échanges commerciaux, renforcent l'intégration des territoires et améliorent l'accès aux services essentiels. Parmi les éléments clés de ces infrastructures figure la structure de chaussée, dont la conception influence directement la performance, la durabilité et le coût d'entretien du réseau routier.[2]

Traditionnellement, la conception des structures de chaussées repose sur des méthodes de dimensionnement éprouvées, telles que la méthode CBR ou le catalogue algérien établi par le CTTP. Bien que largement utilisées, ces approches ne permettent pas toujours de comparer rigoureusement plusieurs alternatives structurelles, notamment lorsque des critères multiples souvent conflictuels doivent être pris en compte simultanément. [2]

Face aux contraintes croissantes d'ordre budgétaire, technique et environnemental, il devient impératif d'adopter une démarche d'aide à la décision plus globale, intégrant à la fois des paramètres techniques et économiques. Le choix optimal d'une structure de chaussée ne peut ainsi se limiter à une seule dimension. Il convient de considérer plusieurs critères pertinents, tels que le coût global, l'épaisseur totale de la structure, la déflexion sous charge (qui reflète sa souplesse et sa résistance) ainsi que le rayon de courbure, indicateur de sa performance mécanique.

Dans ce contexte, les méthodes multicritères d'aide à la décision (MCDA) apparaissent comme des outils méthodologiquement robustes, permettant d'évaluer plusieurs alternatives en tenant compte de l'ensemble des critères jugés importants. De plus, l'intégration de la logique floue dans ces méthodes permet de mieux modéliser les incertitudes liées aux jugements subjectifs des experts et aux imprécisions des données disponibles.

C'est dans cette optique que s'inscrit le présent projet de fin d'études, qui vise à comparer et évaluer différentes variantes de structures de chaussée à l'aide de trois méthodes MCDA basées sur la logique floue : Fuzzy AHP, Fuzzy TOPSIS et Fuzzy VIKOR. L'étude est appliquée à un cas réel situé dans la wilaya de Mostaganem, plus précisément sur un tronçon de la route nationale n°11 reliant Khadra à Sidi Lakhdar. L'objectif est de proposer une solution techniquement viable et économiquement rationnelle, en s'appuyant sur une démarche d'analyse multicritère rigoureuse et structurée.

Le mémoire est structuré en cinq chapitres. Le **premier chapitre** est consacré aux notions de base relatives aux chaussées routières. Le **deuxième chapitre** traite du dimensionnement des structures de chaussées. Le **troisième chapitre** introduit les principes fondamentaux de la décision multicritère. Le **quatrième chapitre** présente l'étude de cas appliquée à la wilaya de Mostaganem. Enfin, le **cinquième chapitre** expose les résultats obtenus, leur interprétation ainsi qu'une discussion critique, avant de conclure par une synthèse et des perspectives pour de futurs travaux.

Chapitre I : Généralités sur les chaussées

I.1 Introduction :

La qualité d'un projet de route ne repose pas uniquement sur l'obtention d'un tracé satisfaisant en plan et d'un profil longitudinal adéquat. Effectivement, une fois construite, la route devra être capable de résister aux agressions des éléments externes (circulation, eaux de pluie, variations de température), ainsi qu'aux surcharges d'utilisation, y compris l'impact des essieux des véhicules lourds. Il suffira donc d'assurer que la route possède de bonnes propriétés géométriques et mécaniques qui lui permettront de supporter toutes les charges tout au long de sa durée d'existence. Le rôle de la qualité de la construction de chaussée est primordial. Cela commence par une compréhension approfondie du sol de support et une sélection judicieuse des matériaux constituant la structure de la chaussée, ce qui constitue un aspect crucial de l'analyse.[1]

I.2 Historique :

La chronologie des chaussées remonte jusqu'à l'Antiquité, période durant laquelle les premières voies de communication ont été construites pour favoriser le commerce et les mouvements militaires. Initialement, ces voies étaient surtout des pistes de terre ou des sentiers formés par les passages d'hommes et d'animaux, comme le montre la figure I.1.



Figure I.1 : sentier

Toutefois, c'est véritablement sous l'Empire romain que la construction de routes pavées a réellement décollé. L'Empire romain a construit un immense réseau routier, avec des routes de pierres polies fréquemment élaborées en diverses strates. Ce dispositif inclut des bases en pierre, ainsi que des strates de gravillons et de sable, garantissant une surface plane et durable. Suite à la chute de l'Empire romain, l'activité de construction des voies s'est nettement réduite, jusqu'à la fin du Moyen Âge. Durant la Renaissance, l'importance accordée à la construction routière a resursé, avec l'aménagement de voies dans les grandes cités pour rendre le transport des marchandises plus aisé.

Au XVIII^e siècle, l'avancement des méthodes de construction et l'apparition des machines à vapeur ont redynamisé la construction de chaussées en pierre. Ainsi, les chaussées pavées ont progressivement été substituées par des voies en macadam, une technique qui consiste à recourir à des pierres broyées densifiées pour constituer la route. Au XX^e siècle, les chaussées ont évolué avec l'usage du béton et de l'asphalte, offrant ainsi des surfaces plus lisses et plus résistantes pour les véhicules. Aujourd'hui, les chaussées continuent de se perfectionner grâce à l'utilisation de technologies avancées visant à améliorer leur résistance, leur durabilité et leur sécurité. Elles sont également devenues plus écologiques, avec l'emploi de matériaux recyclés et une réduction de l'impact environnemental lié à la construction et à l'entretien des routes.[2]

I.3 La chaussée :

I.3.1 Définition :

- a) **Au sens géométrique** : c'est la surface aménagée de la route sur laquelle circulent les véhicules.[3]
- b) **Au sens structurel** : c'est l'ensemble des couches de matériaux superposées de façons à permettre la reprise des charges. [3]

I.3.2 Rôles :

- Absorber les charges dues aux véhicules.
- Supporter les variations quotidiennes et saisonnières de température et d'humidité.
- Résister au poinçonnement causé par le stationnement des véhicules.
- Évacuer les eaux pluviales vers l'extérieur.
- Supporter les effets du roulage et du freinage des véhicules.[4]

I.3.3 Constitution des structures de chaussée :

Dans une chaussée, on distingue du haut vers le bas les couches suivantes :

I.3.3.1 Couche de surface : Elle est composée de la couche de roulement et de liaison et elle est en contact direct avec le pneumatique de véhicule et la charge extérieure.

1. Couche de roulement : Elle constitue la couche supérieure de la structure de la chaussée, exposée directement aux agressions combinées du trafic et des conditions climatiques [4]. L'épaisseur de la couche de roulement en général entre 6 et 8 cm [5]. Elle assure une ou plusieurs des fonctions suivantes :

Sécurité :

- Adhérence.
- Drainage.
- Uniformité longitudinale et transversale.

➤ Confort :

- Bruit de roulement

➤ Protection de l'assise :

- Imperméabilisation
- Résistance mécanique (cisaillement, formation d'ornières, etc.)
- Résistance aux agents externes (eau, sel, etc.) [4]

2. Couche de liaison :

Lorsqu'une couche de liaison est utilisée, elle est placée entre les couches d'assise et la couche de roulement. Selon la composition de la couche de roulement, le volume du trafic, la nature de la couche de base et les exigences en termes d'uniformité, une couche de liaison peut être indispensable pour remplir les fonctions suivantes :

- Imperméabilisation
- Résistance à l'orniérage
- Amélioration de l'uniformité
- Retardement de la remontée des fissures [4]

I.3.3.2 Couches d'assises :

Les couches d'assise se composent généralement de deux niveaux : la couche de base, suivie de la couche de fondation. Elles remplissent les fonctions suivantes :

- **Répartition des charges sur la plate-forme** : elles permettent de répartir les pressions sur le support de chaussée, garantissant que la déformation reste dans les limites acceptables.
- **Offrir de bonnes performances mécaniques** : elles assurent à la chaussée une résistance face aux charges générées par le trafic.
- **Fournir une protection thermique efficace.** [4]

1. Couche de base : elle reprend les efforts verticaux et répartit les contraintes normales qui en résultent sur les couches sous-jacentes. L'épaisseur de la couche de base varie en général de 10 à 25 cm. [5]

2. Couche de fondation : forme avec la couche de base le corps de la chaussée, elle a le même rôle que celui de la couche de base mais elle est constituée d'un matériau non traité de moindre qualité et de coût. L'épaisseur de la couche de fondation varie en général de 15 à 35] cm. [5]

I.3.3.3 Plate-forme support de corps de chaussée :

1. Couche de forme : La couche de forme est une structure qui peut varier en complexité et qui a pour objectif d'adapter les caractéristiques aléatoires et hétérogènes des matériaux de remblai ou du sol naturel aux exigences mécaniques, géométriques et thermiques nécessaires pour optimiser les couches de chaussée [4]. Elle est principalement utilisée pour réaliser des ajustements géométriques et renforcer la portance du sol sur le long terme, contribuant ainsi à la stabilité de la structure. Ses rôles incluent :

- Lors des travaux, elle facilite le nivellement du terrain et permet le passage des engins et véhicules sur le chantier.
- Elle sert à uniformiser le terrain naturel.
- Elle protège contre les effets du gel.
- Elle est composée de matériaux recyclés. [4]

2. Le sol support : Le sol de support est généralement recouvert d'une couche de forme, créant ainsi une structure appelée plate-forme support de chaussée. Comme son nom l'indique, cette plate-forme joue le rôle de fondation pour la chaussée durant la phase de construction. [4]

Les différentes couches des structures de chaussée sont indiquées dans la figure I.2

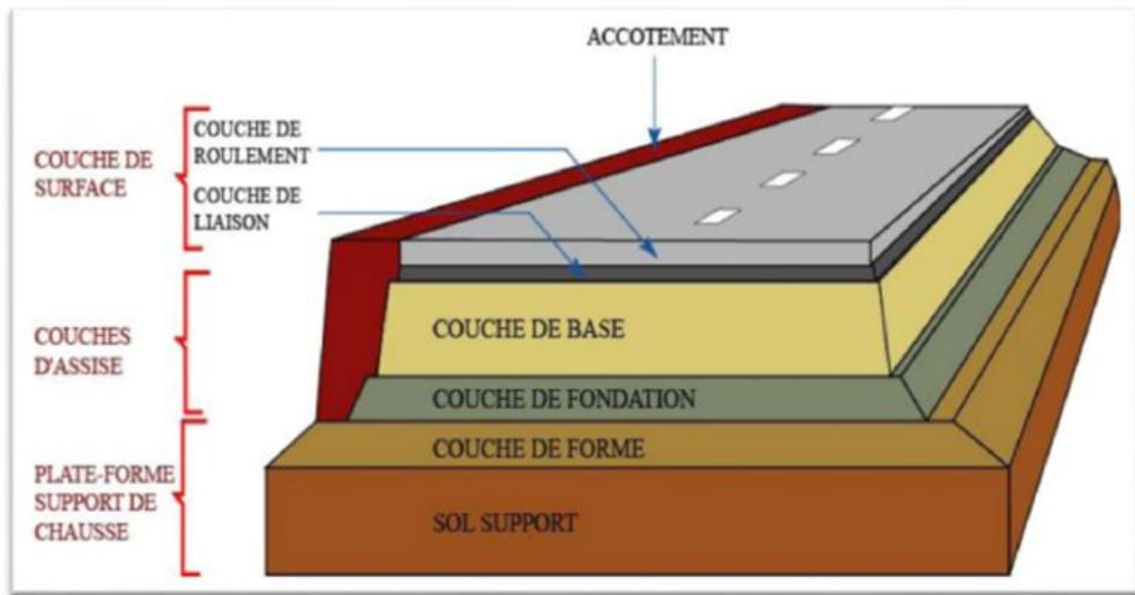


Figure I.2 : Différentes couches d'une structure de chaussée [6]

I.3.4 Les différents types de chaussée :

I.3.4.1 Chaussée souple :

Les chaussées souples sont constituées d'une couche de surface en matériaux bitumineux, reposant sur une assise en matériaux granulaires non traités, qui peut être composée d'une ou plusieurs couches. L'épaisseur totale de la chaussée se situe généralement entre 30 et 60 cm. Il est essentiel de souligner que la qualité du sol support joue un rôle déterminant dans la durabilité de la chaussée au fil des années.

I.3.4.1.1 Les avantages des chaussées souples :

- Structures économiques.
- E très élevé de 1000 à 15000 MPa.
- Dosage en liant faible. [4]

I.3.4.1.2 Les inconvénients des chaussées souples

- Faible rigidité.
- Epaisseur élevée. [4]

I.3.4.1.3 Rôle de revêtement :

- Il empêche l'infiltration des eaux de pluie dans la structure de la chaussée.
- Il participe à la distribution des charges appliquées.
- Il garantit l'adhérence des pneus à la chaussée, tout en offrant une surface lisse, confortable et sécuritaire.
- Il prévient la perte de granulats et la formation de poussière. [7]

I.3.4.1.4 Rôle de fondation :

- Elle représente l'élément porteur principal.
- Elle soutient le revêtement.
- Elle participe à la répartition des charges appliquées.
- Elle protège le sol support du gel.
- Elle fournit une surface stable pour l'installation du revêtement. [7]

I.3.4.1.5 Rôle de sous-fondation :

- Elle aide à répartir les charges appliquées sur l'infrastructure ;
- Elle protège le sol support contre le gel ;
- Elle garantit un drainage efficace de la fondation et empêche la contamination du corps de la chaussée par le sol support. [7]

La structure type d'une chaussée souple est présentée dans la figure I.3 ci-après :

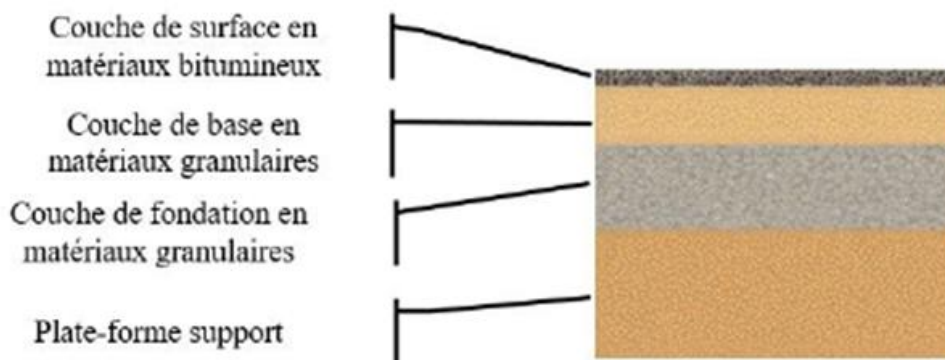


Figure I.3 : Structure d'une chaussée souple [6]

I.3.4.2 Chaussé rigide :

Les chaussées rigides sont composées d'un revêtement en béton de ciment, mis en œuvre par vibration ou coulé fluide. Ce type de chaussée est conçu pour absorber les efforts et transmettre très peu de charges au sol support.

I.3.4.2.1 Les avantages des chaussées rigide :

- Réduction de l'épaisseur.
- E très élevé de 35000 à 40000 MPa.
- Durabilité élevée. [4]

I.3.4.2.2 Les inconvénients des chaussées rigide :

- Fissures possibles.
- Pas d'utilisation en pente.
- Structure onéreuse. [4]

I.3.4.2.3 Rôle de revêtement :

- Il rend le corps de la chaussée imperméable pour empêcher l'infiltration des eaux de pluie.

- Il aide à répartir les charges appliquées sur une large surface de l'infrastructure, grâce à une dalle de béton qui fléchit de manière élastique ;
- Il garantit l'adhérence des pneus à la chaussée, tout en offrant une surface lisse, confortable et sécuritaire. [7]

I.3.4.2.4 Rôle de fondation :

- Il garantit la continuité des dalles au niveau des joints.
- Il participe à la répartition des charges appliquées.
- Il protège le sol support contre le gel.
- Il empêche la remontée des fines par pompage au niveau des joints.
- Il fournit une surface stable pour l'installation du revêtement. [7]

I.3.4.2.5 Rôle de sous-fondation :

La couche de sous-fondation n'est pas nécessaire au point de vue structural dans le cas des chaussées rigides toutefois une sous-couche drainante ou anti contaminante peut être souhaitable, dans certains cas, entre l'infrastructure et la fondation. [7]

La structure type de chaussée rigide se présente par la figure I.4 comme suit :

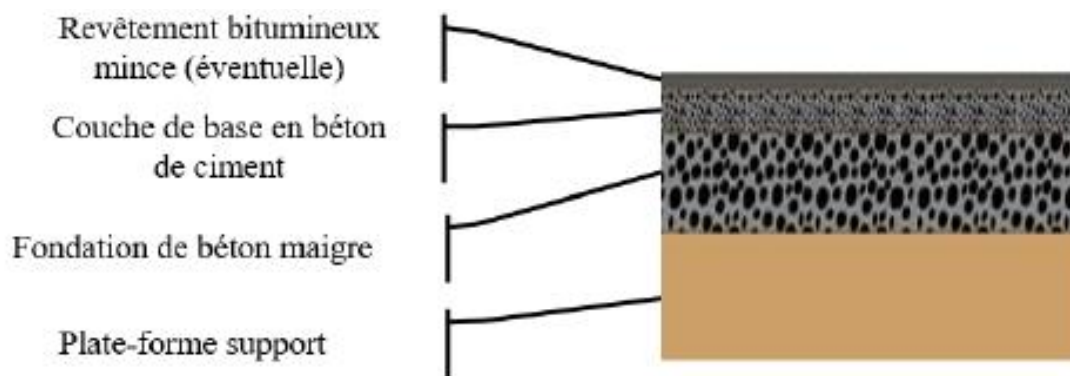


Figure I.4 : Structure d'une chaussée rigide [6]

I.3.4.3 Chaussé semi-rigide :

Ce type de chaussée est doté d'une assise traitée aux liants hydrauliques, est composé d'une couche de surface bitumineuse reposant sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques, dont l'épaisseur varie entre 20 et 50 cm. En raison du risque élevé de retraites thermiques, des fissures peuvent se former et se propager jusqu'à la couche de surface.

La structure type de chaussée semi-rigide est présentée dans la figure I.5 ci-après :

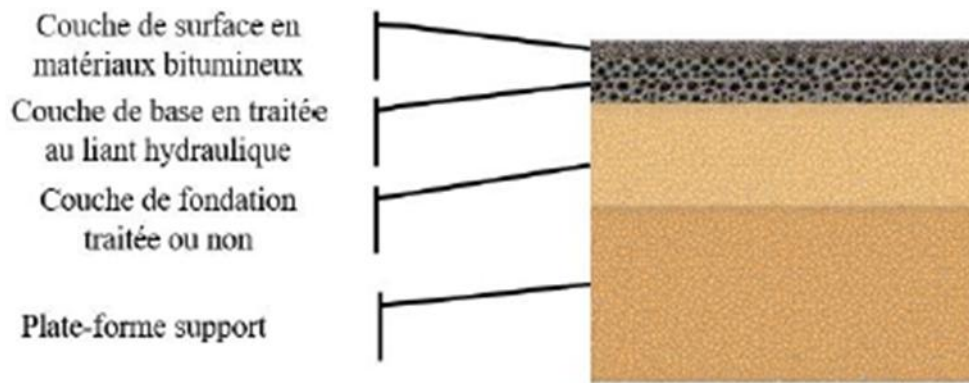


Figure I.5: Structure d'une chaussée semi-rigide [6]

L'organigramme I.6 ci-dessous illustre les diverses catégories de chaussées :

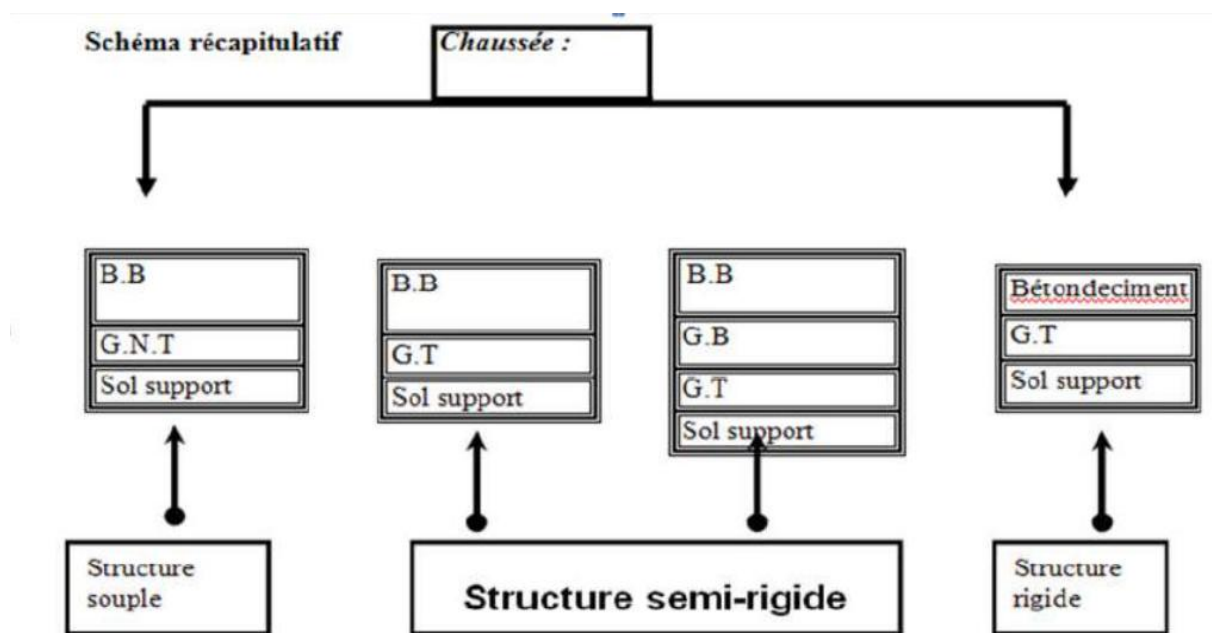


Figure I.6 : les différentes catégories de chaussées [8]

I.3.5 Conception et construction des chaussées :

La conception et la construction de la chaussée sont des étapes essentielles pour assurer la création de routes et de voies de circulation sûres et durables.

I.3.5.1 Principales considérations pour la conception et la construction de la chaussée

a. Conception : La conception de la chaussée varie en fonction du type de route (autoroute, route nationale, route régionale ou rue), ainsi que du volume et du type de trafic. La structure de la chaussée doit être pensée pour supporter le poids des véhicules qui l'utilisent et résister aux effets de l'usure causée par les conditions climatiques. Les concepteurs doivent aussi tenir compte des caractéristiques du terrain environnant, telles que les pentes, les courbes, les intersections et les accès, tout en assurant la sécurité des usagers de la route.

b. Matériaux : Les matériaux choisis pour la construction de la chaussée doivent être résistants, durables et capables de supporter le poids des véhicules. En règle générale, la chaussée est composée d'un lit d'assise stable, d'un remblai en matériaux granulaires, d'une couche de liaison et d'une couche de roulement en asphalte.

c. Construction : La construction de la chaussée commence par le nivellement et le compactage du sol pour obtenir une surface plane et solide. Ensuite, une couche de fondation est posée et compactée, suivie de couches de matériau granulaire, de la couche de liaison et enfin de la couche de roulement. Des équipements spécialisés sont utilisés pour appliquer et compacter chaque couche, garantissant ainsi une finition uniforme et robuste.

d. Maintenance : Un entretien régulier est crucial pour assurer la sécurité et la durabilité de la chaussée. Cela inclut le colmatage des fissures et des nids-de-poule, la réparation des dégradations, la rénovation de la couche de roulement et la gestion de la surface de la chaussée pour éviter l'accumulation des intempéries. [2]

I.3.5.2 Objectifs et contraintes de conception :

Dans un processus de conception de chaussées, selon une approche systémique, il est essentiel de clairement définir les objectifs et les contraintes du projet. Ces objectifs et contraintes s'appliquent à la fois à la chaussée elle-même et au processus de conception.

I.3.5.2.1 Objectifs de la chaussée

Les objectifs d'une chaussée, tant pendant la phase de construction qu'en service, sont principalement d'ordre économique et social. Il s'agit de garantir :

- 1) Des économies optimales sur les coûts de construction et d'exploitation, prises en charge par les administrations routières ainsi que sur les coûts pour les usagers.
- 2) Une sécurité maximale ou suffisante.
- 3) Un niveau de qualité de service maximal ou adéquat.

μUne capacité de transport maximale ou suffisante, en termes d'amplitude et de fréquence des charges.

- 4) Une détérioration physique minimale ou restreinte en raison du trafic et des conditions climatiques.
- 5) Une pollution (bruit, air) réduite au minimum ou limitée durant la phase de construction.
- 6) Une continuité harmonieuse avec les zones environnantes.
- 7) Une esthétique soignée et agréable.

Il est impossible de garantir la réalisation simultanée de ces huit objectifs. Certains d'entre eux sont contradictoires, ce qui est fréquent dans tout processus complexe visant à répondre à des besoins économiques et sociaux. Dans un projet routier, l'objectif est toujours de trouver un compromis entre les différents enjeux. L'impact de chaque objectif varie en fonction du type de chaussée et du trafic. [2]

I.3.5.2.2 Objectifs de la conception de la chaussée :

L'objectif d'un processus de conception de chaussée est de créer une structure qui une fois réalisée, répond aux objectifs définis précédemment pour la chaussée. Les objectifs spécifiques de ce processus sont de nature technique, économique et sociale. Certains de ces objectifs s'alignent avec les objectifs globaux de la chaussée, tandis que d'autres sont propres au processus de conception lui-même. On distingue huit objectifs principaux, à savoir :

- 1) Élaborer une stratégie de conception visant à optimiser les économies, la sécurité et la qualité de service.
- 2) Examiner toutes les options de conception possibles.
- 3) Prendre en compte l'hétérogénéité et la variabilité des paramètres de conception.
- 4) Optimiser la précision en termes de viabilité, qualité de roulement, sécurité et détérioration pour toutes les options alternatives.
- 5) Maximiser la précision des estimations des coûts et des bénéfices.
- 6) Réduire au minimum les coûts de conception.
- 7) Favoriser les échanges d'informations entre les équipes en charge de la construction et celles responsables de l'exploitation.
- 8) Maximiser l'utilisation des matériaux et de la main-d'œuvre locaux dans le design proposé.

[2]

I.3.5.2.3 Contraintes de conception

Les contraintes de conception sont généralement d'ordre économique, physique et technique.

Elles comprennent :

- 1) La disponibilité du temps et du budget pour la conception et la construction.
- 2) Un niveau de service minimum requis avant la réhabilitation.
- 3) La disponibilité des matériaux nécessaires.
- 4) Les épaisseurs minimales et maximales des différentes couches.
- 5) La durée minimale entre les opérations de resurfaçage.
- 6) La disponibilité des ressources humaines qualifiées et des équipements appropriés pour les travaux d'entretien.
- 7) La disponibilité de modèles structuraux et économiques adaptés.
- 8) La qualité et la quantité des données disponibles pour la conception. [2]

I.3.6 Entretien et gestion des chaussées :

L'entretien et la gestion des chaussées jouent un rôle crucial dans la sécurité et la pérennité des routes et autoroutes. L'entretien consiste principalement à réparer les dommages causés par l'usure naturelle, les conditions climatiques et des incidents comme les accidents. La gestion, quant à elle, englobe un ensemble plus large d'activités visant à planifier, surveiller et améliorer l'ensemble du réseau routier.

Les tâches d'entretien incluent la réparation des fissures, le rebouchage des nids-de-poule, le resurfaçage, l'entretien des accotements et la remise en état des caniveaux. Les méthodes de réparation varient selon l'ampleur des dégradations et les matériaux utilisés pour construire les chaussées. Par exemple, les routes en béton requièrent souvent des interventions plus complexes et coûteuses que celles en asphalte.

La gestion de la chaussée repose sur la surveillance de l'état des routes et la planification des travaux d'entretien en fonction des résultats observés. Cette surveillance peut être réalisée grâce à des véhicules équipés de capteurs ou d'autres dispositifs spécialisés permettant de collecter des données sur l'état des chaussées. Ces informations servent à établir des plans d'entretien et d'amélioration, ainsi qu'à évaluer les coûts et l'efficacité des différentes méthodes de réparation et de maintenance.

Outre la gestion et l'entretien, il est essentiel de prendre en compte des facteurs comme la sécurité routière et l'impact environnemental liés à la construction et à l'entretien des infrastructures routières. Ainsi, les techniques de construction et de maintenance doivent être choisies en fonction de leur impact écologique, de leur coût et de leur efficacité.

En conclusion, l'entretien et la gestion des chaussées sont des activités essentielles pour garantir la sécurité et la durabilité des routes et autoroutes. Il est crucial d'évaluer les méthodes de réparation et de gestion en fonction de leur efficacité à long terme, de leur coût et de leur impact environnemental. [2]

I.3.7 Mécanique de chaussée :

La mécanique des chaussées est une sous-discipline de la mécanique des milieux continus, spécialisée dans l'étude du comportement des différentes structures de chaussées. Ce domaine vise à évaluer les sollicitations subies par les matériaux des chaussées et le sol support sous l'effet du trafic, en utilisant des modèles mathématiques. Ces modèles ont pour objectif de déterminer les contraintes et les déformations des matériaux de chaussée et du sol sous l'impact d'une charge roulante en surface. Ils doivent reproduire de manière aussi fidèle que possible le comportement mécanique de la structure.

Les modèles de mécanique des chaussées ont évolué au fil du temps, en réponse aux changements dans les conceptions des structures de chaussées et à l'essor de l'utilisation des calculateurs numériques. [7]

I.3.7.1 Les modèles de la mécanique des chaussées :

I.3.7.1.1 Modèle de Boussinesq :

En 1885, Boussinesq a déterminé la répartition des contraintes et des déformations dans un milieu élastique, homogène et semi-infini (hypothèse de Boussinesq), soumis à une force concentrée ou à une pression répartie sur sa surface. Si cette force est uniformément distribuée sur un cercle de rayon a (voir figure I.7) [7], les résultats pour les points situés sur l'axe de révolution sont les suivants :

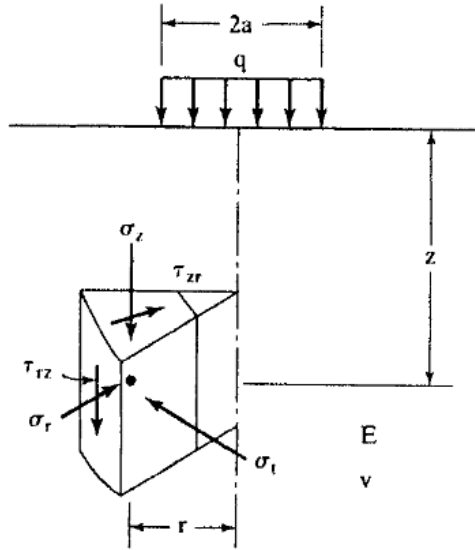


Figure I.7 : Contrainte sous une charge axisymétrique

$$\sigma_z = q \left[1 - \frac{z^3}{(a^2+z^2)^{\frac{3}{2}}} \right] \quad \text{I.1}$$

$$\sigma_r = \frac{q}{2} \left[1 + 2\nu - \frac{2(1+\nu)z}{(a^2+z^2)^{\frac{1}{2}}} + \frac{z^3}{(a^2+z^2)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad \text{I.2}$$

$$W = \frac{2(1-\nu^2)qa}{E} \quad \text{I.3}$$

Avec :

q : la charge axisymétrique

a : le rayon

z : l'épaisseur de la chaussée

ν : coefficient de poisson

E : module de Young

W : la déflexion verticale au centre du cercle chargé.

I.3.7.1.2 Les modèles bicouche :

L'analyse des chaussées revêtues ne peut pas se limiter au modèle de Boussinesq, car les revêtements, sous l'effet des charges roulantes, influencent la distribution des pressions. Cet effet structurel doit être pris en compte. Ainsi, l'emploi d'un modèle bicouche devient indispensable. [7] la figure I.8 représente ce modèle.

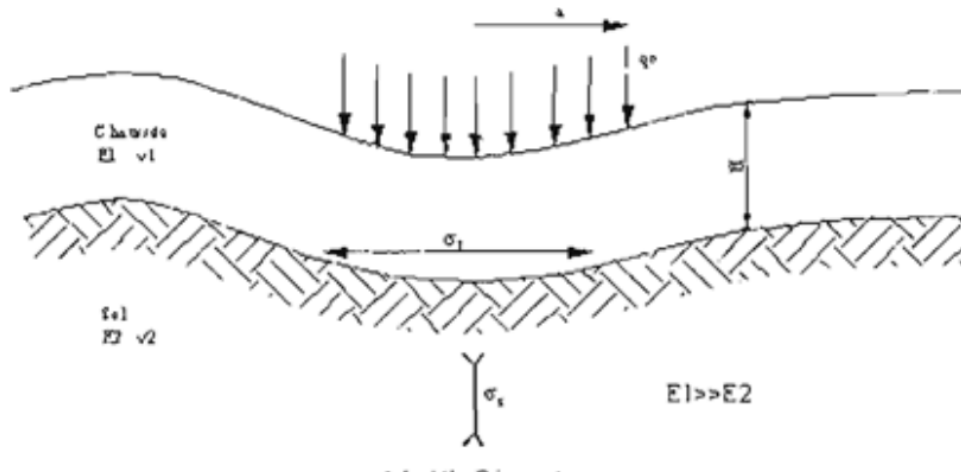


Figure I.8 : Schéma du modèle bicouche

I.3.7.1.3 Modèle de Hogg :

Le modèle de Hogg est une extension du modèle de Boussinesq. Dès 1938, Hogg a étudié le problème d'une plaque reposant sur un milieu de type Boussinesq (milieu élastique, homogène, isotrope et semi-infini). Le modèle de Hogg, illustré par la figure I.9, représente la plaque comme une simulation du comportement rhéologique de la chaussée, tandis que le massif représente le comportement du sol. [7].

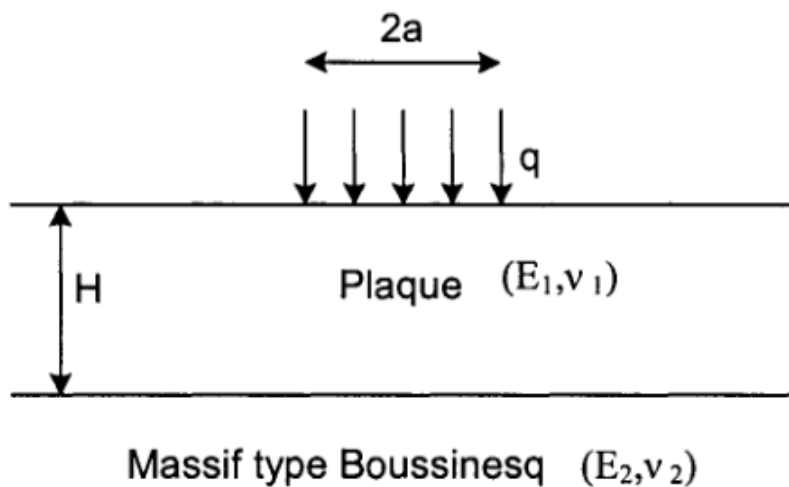


Figure I.9 : Schéma du modèle de Hogg

I.3.7.1.4 Modèles aux éléments finis :

Le principe de la méthode des éléments finis repose sur le découpage de la structure de la chaussée en un nombre limité d'éléments géométriques reliés par des nœuds. L'ensemble de la structure est formé par l'assemblage de ces éléments. L'analyse est effectuée sur chaque élément de manière individuelle, puis sur l'ensemble de la structure. Cela conduit, dans la méthode des déplacements, à une formulation matricielle du type (voir eq I.4) [7].

$$R \times U = C \quad I.4$$

Avec :

R= la matrice de rigidité de la structure ; c'est une caractéristique de la géométrie et des propriétés mécaniques de la structure.

U= Le vecteur déplacement des nœuds, il constitue l'inconnu de problème à résoudre.

C= le vecteur des charges appliquées à la structure.

I.4 Conclusion :

La chaussée constitue un élément fondamental de l'infrastructure routière, assurant la sécurité des usagers, la fluidité du trafic et la durabilité des réseaux de transport. Sa conception repose sur des principes techniques essentiels tels que le choix des matériaux, la structure en couches, les conditions de mise en œuvre et les stratégies d'entretien. Cependant, au-delà de ces aspects techniques, il devient indispensable d'adopter une vision globale et intégrée de la problématique. La chaussée doit être considérée comme un système complexe, soumis à des influences multiples et interdépendantes : trafic, conditions environnementales, contraintes économiques, méthodes de gestion, etc. C'est cette approche systémique qui permet de mieux comprendre les interactions entre les composants du système et d'anticiper les conséquences à long terme des choix de conception. Dans cette logique, le présent travail s'inscrit dans une démarche d'aide à la décision multicritère, en mobilisant des méthodes fondées sur la logique floue (AHP, VIKOR, TOPSIS). Celles-ci permettent de traiter l'incertitude, la subjectivité des jugements d'experts et la diversité des critères, afin de classer les alternatives de structures de corps de chaussées

Chapitre II : Généralités sur le dimensionnement du corps de chaussée

II.1 Introduction :

Le sol naturel ne peut supporter un trafic sans subir des déformations significatives. Afin de permettre au sol de résister aux contraintes, il est nécessaire de poser un corps de chaussée par-dessus. Le dimensionnement structural détermine ainsi les épaisseurs et les caractéristiques des différentes couches pour garantir qu'au cours de toute la durée de vie de l'ouvrage, la chaussée ne subira pas de déformations nuisibles en termes de confort et de sécurité. La conception structurale des chaussées consiste donc à créer une chaussée qui, à l'issue d'une période donnée, offrira la qualité de service souhaitée, en tenant compte d'un niveau de risque défini à l'avance.

II.2 Les règles du dimensionnement :

Les règles de dimensionnement des chaussées reposent :

- **D'une part**, sur la connaissance techno-expérimentale, qui permet de définir les caractéristiques de rupture et de déformabilité des matériaux, déterminées par des essais en laboratoire ainsi que par l'observation du comportement des chaussées ;
- **D'autre part**, sur l'utilisation de méthodes mathématiques, à travers un modèle mathématique approprié ;
- **Enfin**, sur la confrontation entre les connaissances technologiques et les résultats théoriques. [4]

II.3 Les paramètres de dimensionnement des chaussées souples :

La durée de vie d'une chaussée dépend de la fatigue des matériaux qui la composent. Pour le béton bitumineux, la fatigue est liée aux déformations qu'il subit. Pour les sols support, elle se traduit par des tassements, tandis que pour les matériaux granulaires, la fatigue est sensible à l'état hydrique, ce qui réduit leur rigidité. Le dimensionnement des chaussées souples repose sur deux critères principaux [4] :

- Limiter la déformation radiale à la base de la couche de béton bitumineux pour prévenir la fissuration par fatigue.
- Limiter la déformation verticale à la surface du sol support pour éviter l'orniérage.

II.3.1 Le trafic :

Le trafic, en particulier les poids lourds, constitue l'un des principaux paramètres dans le dimensionnement des chaussées. Il est essentiel de l'analyser en termes d'agressivité vis-à-vis des chaussées sur lesquelles il circule. [4]

II.3.1.1 Agressivité de trafic :

Le passage répété de charges lourdes entraîne l'apparition de dommages progressifs au sein de la structure routière, tels que :

- La fissuration par fatigue dans les couches bitumineuses ;
- Le développement de l'orniérage dans les couches inférieures ;
- Le tassement différentiel du sol support.

Ces effets cumulatifs justifient l'intégration d'un coefficient d'agressivité du trafic, qui permet d'exprimer l'impact relatif de différents types de véhicules sur la dégradation de la chaussée, en tenant compte du nombre d'essieux, de la charge par essieu et de la fréquence de passage. Le support de la chaussée, qu'il s'agisse du sol naturel ou d'une couche de forme constituée de matériaux non traités, subit des déformations permanentes à chaque passage de charge. Ces déformations sont directement liées à l'intensité de la contrainte verticale appliquée. L'accumulation progressive de ces déformations provoque des irrégularités à la surface de la chaussée, en particulier dans le cas des structures traditionnelles non traitées.

En revanche, lorsque la structure repose sur des assises traitées aux liants hydrauliques ou hydrocarbonés, les contraintes verticales transmises au sol support sont généralement suffisamment faibles pour que les déformations permanentes restent limitées. Toutefois, les chaussées comportant des couches liées se comportent différemment : à chaque passage de charge, elles subissent des contraintes de traction induites par flexion, notamment à la base de la couche traitée. Ces sollicitations répétées engendrent une fatigue progressive des matériaux, conduisant à l'apparition de fissures structurelles et à la dégradation prématurée de la chaussée. Ce mécanisme de rupture par flexion répétée est typique des chaussées renforcées avec des liants hydrauliques ou bitumineux.

Par ailleurs, le passage répété des charges peut également entraîner d'autres types de détériorations, notamment au niveau du revêtement de surface :

- Une usure accrue de la couche de roulement, pouvant altérer l'adhérence et accroître le risque de glissance (due aux efforts tangentiels),
- Et un orniérage progressif, résultant du phénomène de fluage sous l'effet des sollicitations verticales répétées. [4]

II.3.1.2 Prise en compte du trafic dans le dimensionnement :

Le dimensionnement des chaussées repose sur la prise en compte de la fatigue des matériaux, qui sont également sélectionnés pour répondre à d'autres critères, comme la résistance au fluage et les caractéristiques antidérapantes. Caractériser le trafic pour le dimensionnement d'une chaussée consiste à déterminer le nombre équivalent de passages de poids lourds (n_{eq}), soit le trafic cumulé équivalent à celui qui circulera réellement sur la chaussée pendant sa durée de vie, définie de manière conventionnelle. À partir de ce chiffre, on calcule les contraintes et les déformations à ne pas dépasser dans les différents matériaux de la chaussée.

Le nombre n_{eq} dépend :

- Du trafic à la mise en service, exprimé en nombre de poids lourds ou d'essieux.
- De l'agressivité de ce trafic, exprimée en nombre d'essieux standards.
- De la durée de service et du taux de croissance.

Selon les méthodes, c'est soit le nombre de cycles n_{eq} , soit le trafic à la mise en service qui sert de paramètre pour le dimensionnement pratique de la chaussée. [4]

La détermination de n_{eq} nécessite de faire des hypothèses sur l'agressivité du trafic, la durée de vie de la chaussée et le taux de croissance. Ces hypothèses peuvent être implicites (comme dans le cas des catalogues de structures-type pour chaussées neuves) ou laissées à la discrétion du maître d'ouvrage (comme dans les manuels de conception pour chaussées à faible trafic). [4]

II.3.2 Le sol support :

Les sols de support sont généralement classés en fonction de leur portance, elle-même déterminée par l'indice CBR.

L'analyse d'un sol-support de chaussée suit une démarche logique en trois étapes distinctes :

- 1) **Identification géotechnique** : Cette étape permet d'associer le comportement prévisible du sol à celui d'une famille de sols connue. Elle repose sur une classification des sols.
- 2) **Étude des paramètres d'état** : Pour chaque famille de sols, il existe des paramètres caractéristiques influençant leur comportement. Il est essentiel de comparer ces valeurs à une valeur de référence, en utilisant notamment la courbe Proctor-CBR.
- 3) **Évaluation de la portance** : À partir des paramètres d'état, comme la teneur en eau, l'objectif est d'obtenir une évaluation quantitative de la capacité portante du sol. Des essais tels que l'essai de plaque ou l'essai CBR, utilisés pour évaluer la portance des sols sensibles à l'eau, sont réalisés dans ce cadre.

Enfin, il est important de noter que d'autres éléments, au-delà des seules données géotechniques, sont nécessaires pour analyser les contraintes et déformations dans une structure de chaussée. Ces éléments proviennent d'études en laboratoire et de l'observation des comportements des chaussées. [4]

II.3.3 Les conditions environnementales :

Les variations climatiques permettent d'évaluer l'état hydrique des plates-formes et de prévoir le comportement des matériaux bitumineux en fonction de la température.

II.3.3.1 Impact du climat sur les chaussées

Les principaux paramètres pouvant influencer la stabilité d'une chaussée sont les précipitations et la température.

a) Impact de la précipitation :

L'eau a toujours été le principal ennemi des chaussées. Un contact direct et prolongé avec celle-ci provoque une instabilité de l'ensemble de la structure, entraînant une dégradation rapide. Il est donc crucial de protéger la chaussée des précipitations.

b) Impact de la température :

La température est un facteur clé à considérer dans le dimensionnement des routes. Les variations de températures agissent sur le comportement des matériaux utilisés :

- Pour les matériaux granulaires non traités, les variations de température provoquent principalement des changements dans la teneur en eau.
- Pour les matériaux traités avec des liants hydrauliques (comme la latérite-ciment, largement utilisé), des fissures dues aux retraits thermiques sont fréquemment observées.

- Les chaussées à revêtement hydrocarboné se trouvent dans un état critique lorsqu'elles sont soumises à une combinaison de températures élevées, de fortes contraintes de traction et d'une application prolongée de la charge. [4]

II.3.4 Matériaux de chaussée souple :

Les matériaux composant les couches d'une chaussée souple doivent avoir des caractéristiques mécaniques suffisantes pour résister aux différentes contraintes auxquelles la chaussée est soumise tout au long de sa durée de vie. [4]

II.3.4.1 Les Graves Non Traitées (G.N.T)

Ils sont couramment utilisés dans les chaussées à faible et moyen trafic (chaussées souples) pour la construction des couches d'assise et des couches de forme. Les performances mécaniques des GNT sont généralement évaluées en fonction des caractéristiques suivantes :

- Dureté des granulats (évaluée par les essais Los Angeles et micro-Delval, réalisés sur la fraction 10/14),
- Propreté des gravillons,
- Angularité des granulats (indice de concassage, coefficient d'aplatissement).

Attribuer les performances mécaniques des GNT uniquement sur la base de la dureté de leurs granulats est toutefois réducteur et ne permet pas toujours une évaluation complète. C'est pourquoi les Laboratoires des Ponts et Chaussées ont développé un appareil triaxial à chargements répétés (le TCR), spécifiquement conçu pour l'étude des sols supports de chaussées et des matériaux non traités utilisés en couche d'assise. [4]

II.3.4.2 Le béton bitumineux :

Le béton bitumineux est un mélange de haute qualité, soigneusement contrôlé et préparé à chaud. Il est composé de granulats de bonne qualité et bien calibrés, provenant uniquement de roches massives, ainsi que de bitume pur, qui joue à la fois le rôle de mouillant et d'agglutinant. Il doit être compacté de manière à obtenir une masse uniforme et dense.

Aujourd'hui, les bétons bitumineux représentent l'une des solutions les plus avancées pour la construction des couches de roulement des chaussées revêtues. Comparé à d'autres types de mélanges bitumineux (comme le sand-asphalt ou l'enrobé dense), le béton bitumineux présente plusieurs avantages :

- Une homogénéité supérieure,
- Une meilleure étanchéité et une grande stabilité,
- Une résistance accrue au glissement. [4]

Selon le pourcentage de vides, l'ajout de filler et la granulométrie, les bétons bitumineux se distinguent des enrobés denses, comme le montre le tableau II.1 ci-après :

Tableau II.1 : Composition des mélanges bétons bitumineux et enrobés denses

Type de mélange	Granulats	Liant
Bétons bitumineux	Concassés (sable peut rond) Roche dure, non polissable Forme cubique, propre fuseau étroit % vides de 4 à 6	Bitume ou bitume-goudron en pourcentage dépendant du pourcentage de filler
Enrobé denses	Concassées, ronds ou mélange de deux fuseaux larges % vides de 8 à 12	Bitume % de 4 à 5

II.3.5 Le risque de calcul : Fiabilité

La fiabilité représente la probabilité de défaillance de la chaussée à la fin de sa durée de vie utile. Cette probabilité dépend du niveau de service souhaité. Elle est influencée par les objectifs définis par l'administration routière. La notion de fiabilité est intégrée dans la méthode AASHTO pour prendre en compte la variabilité des principaux facteurs de dimensionnement des chaussées. Lors du calcul du dimensionnement, la Ville choisit généralement des indices de fiabilité qui varient en fonction de l'importance fonctionnelle de la chaussée, comme indiqué dans le Tableau II.2[4]

Tableau II.2 : fiabilité

Classes de trafic	Indice de fiabilité
T1	60 %
T2	60 %
T3	70 %
T4	80 %
T5	90 %

II.3.6 Durée de service :

La durée de service d'un ouvrage correspond à la période durant laquelle il n'exige aucun entretien-structurel. En général, la durée de vie d'une chaussée souple est de 15 à 20 ans, tandis que celle d'une chaussée rigide se situe entre 20 et 30 ans. La durée de vie d'une nouvelle couche de revêtement souple est d'environ 9 à 12 ans.

L'état d'une chaussée est évalué en fonction de certains défauts qui, au fil du temps et de l'usage, ont tendance à se détériorer. Ces défauts sont généralement décrits selon les éléments suivants :

- L'uni : Il mesure le confort de roulage, et les défauts sont perçus sous forme d'ondes, telles que des secousses, des creux ou des bosses.
- Les ornières : Ce sont les affaissements de la surface dans les pistes de roues.
- La fissuration et autres dégradations visibles de la surface.

Le comportement d'une chaussée dépend de plusieurs facteurs, notamment la nature des sols, la position de la nappe phréatique, l'épaisseur des couches, le climat, le type et la géométrie de la chaussée, ainsi que les caractéristiques des matériaux utilisés et le trafic. Il est essentiel de prendre en compte tous ces paramètres pour diagnostiquer correctement les causes de la détérioration.

Comprendre les phénomènes de dégradation des chaussées permet de développer des solutions pour mieux les contrer. L'objectif principal de cette thématique est d'acquérir une meilleure compréhension des interactions entre les pneus des véhicules et les revêtements de chaussée, et de proposer des outils permettant de prévoir l'adhérence. Ces outils sont cruciaux pour l'étude de la dynamique des véhicules, notamment en ce qui concerne les risques de pertes de contrôle. Plusieurs facteurs influencent l'adhérence, et l'un des plus importants est la texture des revêtements de chaussée. Des recherches précédentes ont étudié le lien entre les différentes échelles d'irrégularités de surface et l'adhérence. Les travaux actuels se concentrent principalement sur deux facteurs qui dégradent l'adhérence :

- Le mouillage.
- Le polissage. [4]

II.4 Principales méthodes de dimensionnement :

On distingue 02 familles principales de calcul :

- Les méthodes empiriques dérivées des études expérimentales sur les performances des chaussées.
- Les méthodes dites « rationnelles » basées sur l'étude théorique du comportement des chaussées. [3]

Les méthodes du dimensionnement de corps de chaussée les plus utilisées sont :

- La méthode de C.B.R (California -Bearing - Ratio) :
- Méthode du catalogue de dimensionnement des chaussées neuves.
- Méthode du catalogue des structures.
- La méthode L.C.P.C (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées). [4]

Pour le dimensionnement du corps de chaussée dans notre projet on va utiliser deux méthodes qui sont :

- La méthode CBR

- La méthode de catalogue algérienne

Ensuite, les dimensions de ces structures sont évaluées numériquement à l'aide de logiciel alisé LCPC.

II.4.1 METHODE DE C.B.R (CALIFORNIA – BEARING – RATIO):

C'est une méthode semi-empirique fondée sur un essai de poinçonnement réalisé sur un échantillon de sol support, obtenu en compactant des éprouvettes à une teneur en humidité de 90 à 100 % de l'optimum Proctor modifié, sur une épaisseur inférieure à 15 cm.

La valeur finale du CBR correspond à la plus faible valeur obtenue après immersion de l'échantillon. Pour garantir la stabilité de la chaussée, la contrainte verticale répartie, selon la théorie de Boussinesq, doit être inférieure à une contrainte limite, laquelle est proportionnelle à l'indice CBR. [5]

L'épaisseur est donnée par la formule II.1 :

$$E_{eq} = \frac{100 + \sqrt{P} \times [75 + 50 \log(\frac{N}{10})]}{I_{CBR} + 5} \quad \text{II.1}$$

Avec :

I_{CBR} : Indice CBR

P : charge par roue $P = 6.5$ t (essieu 13 t).

Log : logarithme décimal.

E_{eq} : épaisseur équivalent.

N : désigne le nombre moyen de camion de plus 1500 kg à vide. Le calcul du N comme désigné dans l'équation II.2.

$$N = \text{TMJA} \times \text{PL}\% \quad \text{II.2}$$

Avec :

PL : pourcentage poids lourds [%]

TMJA : Trafic Moyenne Journalier Annuelle [v/j]

La notion d'épaisseur équivalente est utilisée pour prendre en compte les différences de propriétés mécaniques entre les couches. L'épaisseur équivalente d'une couche correspond à son épaisseur réelle multipliée par un coefficient, désigné sous le nom de coefficient d'équivalence, noté « a ».

L'épaisseur équivalente de la chaussée est égale à la somme des équivalents des couches comme montré dans l'équation II.3 :

$$E_{eq} = \sum e_i(\text{réel}) \times a_i = e_1 \times a_1 + e_2 \times a_2 + e_3 \times a_3 \quad \text{II.3}$$

Avec :

e_1 : épaisseur réelle de la couche de roulement.

e_2 : épaisseur réelle de la couche de base.

e_3 : épaisseur réelle de la couche de fondation.

a_1, a_2, a_3 : sont Les coefficients d'équivalence respectivement des matériaux des couches e_1, e_2, e_3 . [4]. Le tableau II.3 montre les coefficients des épaisseurs équivalentes en fonction des matériaux utilisés.

Tableau II. 3 : Coefficient d'équivalence.

Matériaux utilisés	Coefficient d'équivalence
Béton bitumineux ou enrobe dense	2.00
Grave ciment – grave laitier	1.50
Grave bitume	1.20-1.70
Grave concassée ou gravier	1.00
Grave roulée – grave sableuse T.V. O	0.60
Sable ciment	1.00-1.20
Sable	0.50
Tuf	0.75

❖ **Remarque :**

Les épaisseurs e_1, e_2 et e_3 sont toutes arbitraires. Une troisième épaisseur (parmi e_1, e_2 et e_3) est obtenue en ayant fixé les deux autres.

II.4.2 Méthode de catalogue de dimensionnement des chaussées neuves du CTPP :

L'utilisation d'un catalogue de dimensionnement repose sur les mêmes paramètres que ceux employés dans les autres méthodes de dimensionnement des chaussées, tels que le trafic, les matériaux et le sol support. Ces paramètres servent souvent de données d'entrée pour le dimensionnement, permettant ainsi de définir la structure de chaussée la plus appropriée.

La méthode du catalogue de dimensionnement des chaussées neuves est une approche rationnelle qui combine deux perspectives :

- L'approche théorique.
- L'approche empirique. [9]

Le démarche de cette méthode est illustré par la figure II.1 :

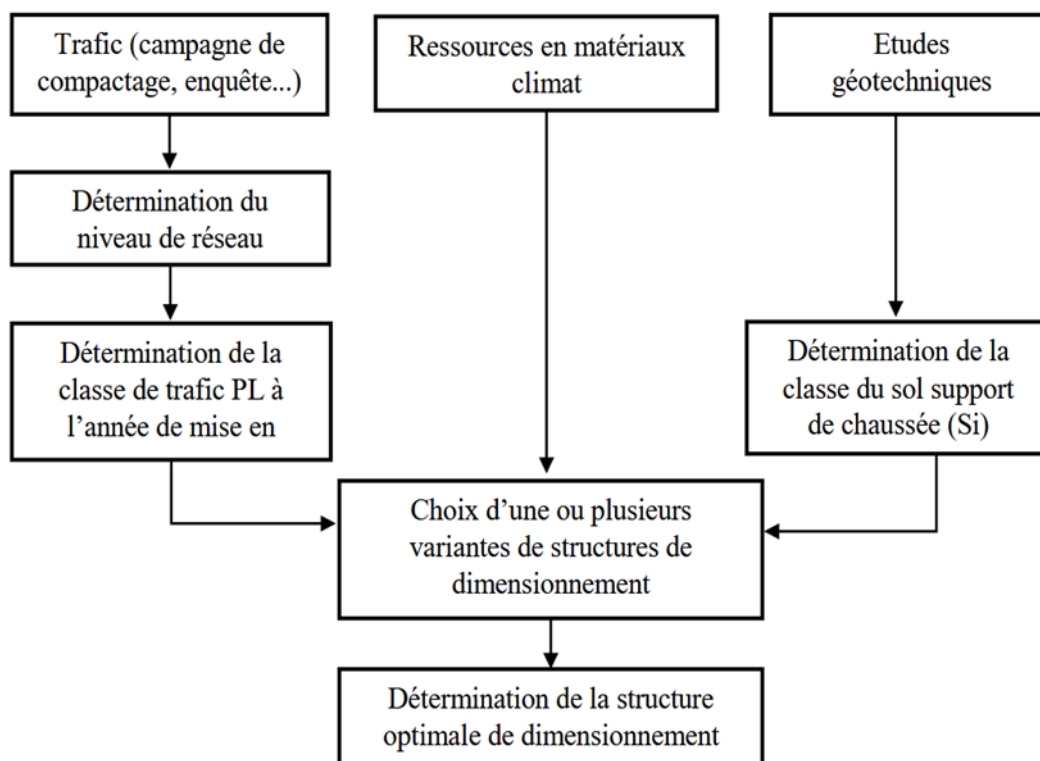


Figure II.1: démarche du catalogue

II.4.2.1 Données d'entrées du dimensionnement :

Les données essentielles pour dimensionner une chaussée par la méthode CTTTP sont :

II.4.2.1.1 Durée de vie :

La durée de vie d'une chaussée dépend des matériaux utilisés et du type de structure. Le tableau (II.4) présente la durée de vie des réseaux principaux. [9]

Tableau II.4 : Durées de vie adoptées

Niveau de réseau principal (RPi)	Types de matériaux	Types de structure	Durée de vie (années)
RP1	MTB (matériaux traités au bitume)	GB/GB, GB/GNT, GB/TUF, GB/SG	20
	MTLH (matériaux traités aux liants hydrauliques)	GL/GL	20
		BCg	25
RP2	MNT (matériaux non traités)	GNT/GNT, TUF/TUF, SG/SG, AG/AG	15
	MTB (matériaux traités au bitume)	SB/SG	15

II.4.2.1.1 Risque de calcul :

Un risque de r% sur une période de x années, utilisé pour le dimensionnement de la chaussée, correspond à la probabilité que des dégradations structurelles surviennent au cours de ces x années, nécessitant des travaux de renforcement de la chaussée. Ce pourcentage de risque est indiqué dans le tableau II.5 et le tableau II.6 [9]

Tableau II.5: Risque adopté pour le réseau RP1

	Classe de trafic (TPLi)(PL/j/sens)	TPL3	TPL4	TPL5	TPL6	TPL7
Risque (%)	GB/GB ; GB/GNT	20	15	10	5	2
	GL/GL	15	10	5	2	2
	BCg /GC	12	10	5	2	2

Tableau II.6 : Risque adopté pour le réseau RP2

	Classe de trafic (TPLi)(PL/J/sens)	TPL0	TPL1	TPL2	TPL3
Risque (%)	GNT/GNT ; Tuf /Tuf ; SG/SG ; SB/SG	25		20	

II.4.2.1.2 Les données climatiques :

Le dimensionnement du corps de chaussée se réalise en prenant en compte une température de consistance, c'est-à-dire la température équivalente θ_{eq} , en intégrant les variations thermiques annuelles.

- La température équivalente est habituellement déterminée en fonction du zonage climatique spécifique au site. [9]

La figure II.2 ci-dessous désigne la carte climatique en Algérie et le tableau II.7 désigne le choix de zonages climatiques :

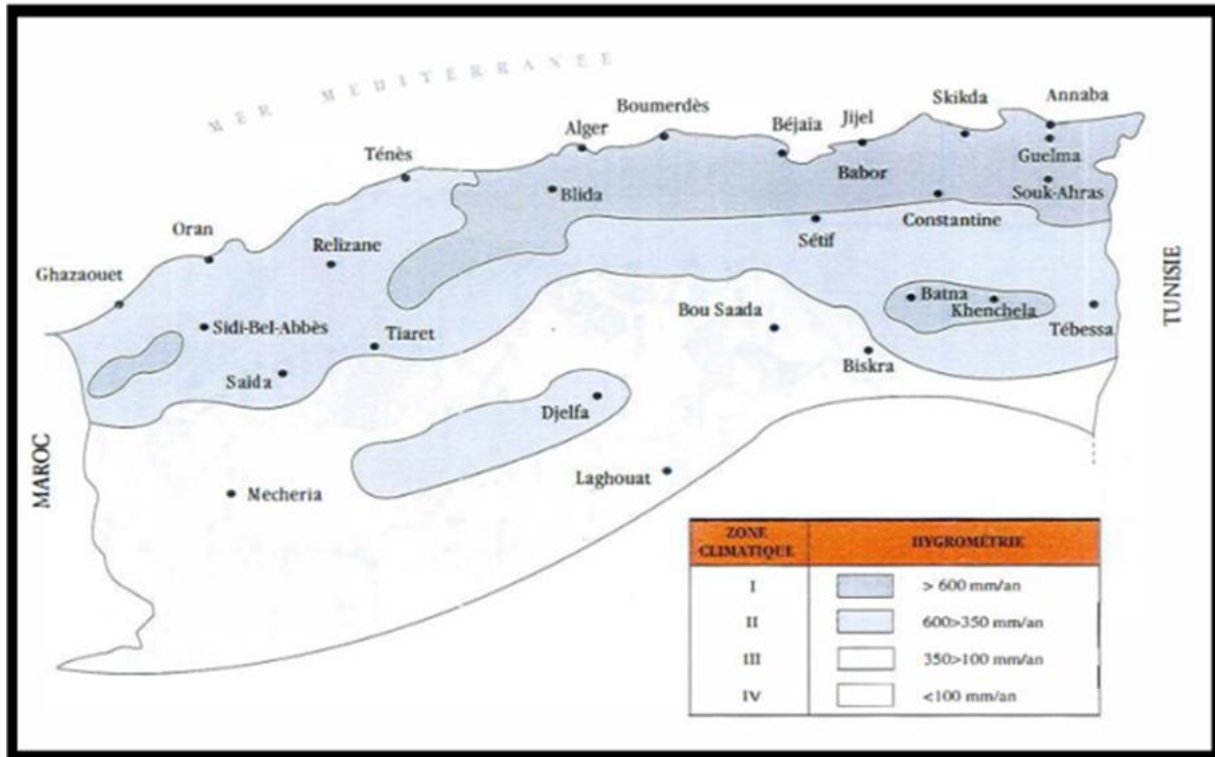


Figure II.2 : La carte climatique de l'Algérie

Tableau II.7 : Choix des zonages climatique

Zone climatique	Pluviométrie	Climat	Région
I	>600	Très humide	Nord
II	350-600	Humide	Nord, hauts-plateaux
III	100-350	Semi-aride	Hauts-plateaux
IV	<100	Aride	Sud

- Cycles saisonniers de température

Les variations saisonnières de température, qui impactent les propriétés mécaniques des matériaux bitumineux (GB, BB, SB), sont prises en compte via le concept de température équivalente. [9]

- **La température équivalente :**

Le calcul du dimensionnement est effectué en utilisant une température constante, appelée température équivalente. Cette température est définie de manière à ce que la somme des dommages subis par la chaussée au cours d'une année, pour une distribution de températures donnée, soit équivalente aux dommages causés par une température constante sous le même trafic. Les valeurs de température équivalente utilisées pour le calcul du dimensionnement sont indiquées dans le tableau II.8. [9]

Tableau II.8 : Choix des températures équivalentes

Température équivalente θ_{eq} (°C)	Zone climatique		
	I et II	III	IV
	20	25	30

II.4.2.1.3 Trafic :

La connaissance du trafic, en particulier du trafic poids lourds (véhicules de plus de 3,5 tonnes), est essentielle :

- Comme paramètre d'entrée pour le dimensionnement des structures de chaussées.
- Dans le choix des caractéristiques des matériaux, pour la fabrication des matériaux de chaussées. [9]

1) La classe du trafic (TPL_i) :

Les classes de trafic (TPL_i) indiquées dans les fiches de dimensionnement des structures (tableau II.9) sont spécifiées, pour chaque niveau de réseau principal, en termes de nombre de poids lourds par jour et par sens, pour l'année de mise en service. [9]

Tableau II.9 : Classe du trafic

		TPL0	TPL1	TPL2	TPL3	TPL4	TPL5	TPL6	TPL7
(PL/J/sens)	RP1	/	/	/	150 à 300	300 à 600	600 à 1500	1500 à 3000	3000 à 6000
	RP2	0 à 50	50 à 100	100 à 150	150 à 300	/	/	/	/

2) Répartition transversale du trafic :

En l'absence d'informations précises sur la répartition des poids lourds sur les différentes voies de circulation, on adoptera les valeurs suivantes :

- Chaussées unidirectionnelles à 2 voies : 90% du trafic PL sur la voie lente de droite.
- Chaussées unidirectionnelles à 3 voies : 80% du trafic PL sur la voie lente de droite.
- Chaussées bidirectionnelles à 2 voies : 50% du trafic PL.
- Chaussées bidirectionnelles à 3 voies : 50% du trafic PL. [6]

3) Trafic cumulé de PL (TC_i) :

Le TC_i est le trafic cumulé de PL sur la période considérée pour le dimensionnement (durée de vie). Il est donné par la formule II.4 [9]

$$TC_i = TPL_i \times 365 \times \frac{(1+i)^n - 1}{i} \quad \text{II.4}$$

Avec :

i = taux d'accroissement géométrique [%]

n = Durée de vie considéré [ans]

TPL_i = trafic poids lourds [v/j/sens]

4) Trafic cumulé équivalent (TCE_i) :

- Il représente le total des essieux équivalents de 13 tonnes accumulés sur la durée de vie prise en compte. Il est donné par la formule II.5 [9]

$$TCE_i = TPL_i \times \frac{(1+i)^n - 1}{i} \times 365 \times A \quad \text{II.5}$$

Avec :

i : taux de croissance du trafic.

A : coefficient d'agressivité de poids lourd par rapport à l'essieu de référence de 13 tonnes en fonction de réseau principal RP_i comme illustré dans le tableau II.10

TPL_i = trafic poids lourds [v/j/sens]

Tableau II. 10 : Valeur du coefficient d'agressivité A.

Niveau de réseau principal (RPi)	Types de matériaux	Valeurs de A
RP1	Chaussées à matériaux traités au bitume : GB/GB, GB/Tuf, GB/SG...	0.6
	Chaussées à matériaux traités liants hydraulique :GL/GL, BCg/GC	1
RP2	Chaussées à matériaux non traités : GNT/GNT, Tuf/Tuf, SG/SG, AG/AG	0.6
	Chaussées à matériaux traités au bitume SB/SG	0.4
RP1 et RP2	Sol support (calcul de $\varepsilon_{z,adm}$)	0.6

II.4.2.2 Sol support :

II.4.2.2.1 La portance de sol-support de chaussée :

Le tableau II. 11 regroupe les classes de portance des sols par ordre de S4 à S0.

Cette classification sera également utilisée pour les sol-supports de chaussée. [9]

Tableau II.11 : Présentation des classes de portance des sols

Portance (Si)	S4	S3	S2	S1	S0
E	15-25	25-50	50-125	125-200	> 200

Les valeurs des modules indiquées sont calculées à partir de la relation empirique II.6:

$$E(\text{MPa})=5 \times \text{CBR} \quad \text{II.6}$$

II.4.2.2.2 Classes de sols supports par niveau de réseau principal (RPi)

Il existe un lien entre la qualité du sol support et le bon fonctionnement des chaussées. C'est pourquoi, pour chaque niveau de réseau principal (RP1 et RP2), les classes de sol support prises en compte sont les suivantes :

Pour le réseau principal RP1 : S0, S1, S2.

Pour le réseau principal RP2 : S0, S1, S2, S3. [9]

II.4.2.3 Amélioration de la portance du sol support :

Pour renforcer la portance d'un sol, on utilise des couches de forme. Le CTTP a mené des recherches sur la variation du CBR en fonction des différentes épaisseurs de ces couches, du mode de leur mise en place (nombre de couches) et de la nature des matériaux utilisés (les plus courants en Algérie) pour la réalisation de ces couches. [9]

Les résultats de ces recherches sont résumés dans le tableau II.12 suivants :

Tableau II. 12 : Sur-classement avec couche de forme en matériau non traité

Classe de portance de sol terrassé (Si)	Matériau de couche de forme	Epaisseur de matériau de CF	Classe de portance de sol support visée (Sj)
< S4	MNT	50cm (en 02 couches)	S3
S4	MNT	35cm	S3
S4	MNT	60cm (en 02 couches)	S2
S3	MNT	40 cm (en 02 couches)	S2
S3	MNT	70 cm (en 02 couches)	S1

II.4.2.4 Calcul des déformations admissibles sur le sol support ($\varepsilon_{z,adm}$)

D'après le modèle alize on détermine la déformation verticale ε_z calculé, il doit être inférieur à la déformation admissible $\varepsilon_{z,adm}$ puisque c'est le critère dominant dans le calcul de dimensionnement. [9]

II.4.2.5 Matériaux :

II.4.2.6 Performances mécaniques :

Les performances mécaniques correspondantes aux différents types de matériaux sont données dans les tableaux II.11, II.12, II.13 ci-dessous. [9]

- **Matériaux traités au bitume :**

Tableau II. 13 : performances mécaniques des matériaux bitumineux

Matériau (MTB)	E(30°C,10 Hz) (MPa)	E(25°,10Hz) z) (MPa)	E(20°,10Hz) (MPa)	E(10°,10Hz) z) (MPa)	$\varepsilon_6(10°,25Hz) (10^6)$	-1/b	SN	Sh (cm)	ν	kc
BB	2500	3500	4000	-	-	-	-	-	0.35	-
GB	3500	5500	7000	12500	100	6.84	0.45	3	0.35	1.3
SB	1500	-	-	3000	245	7.63	0.68	2.5	0.45	1.3

- **Matériaux traités aux liants hydrauliques :**

Tableau 14 : performances mécaniques des matériaux traités aux liants hydrauliques

Matériaux (MTLH)	E(MPa)	σ_6 (MPa)	-1/b	SN	Sh(cm)	ν	kd	kc
GL	20000	0.50	18.4	1.24	3	0.25	1	1.5
GC	20000	0.70	12	1	3	0.25	1	1.5
BCg	35000	2.15	16	1	3	0.25	1/1.47	1.5

- **Matériaux non traités :**

Tableau 15 : performances mécaniques des matériaux non traités

Niveau de la couche	Modules des MNT (MPa)	Valeurs de K	ν
Base ($15 \leq h \leq 20$ cm)	GNT=500	2.5	0.25
	Tuf 1=500	2	0.25
	Tuf 2=300	2	0.25
	SG1=700	2	0.25
	SG2=300	2	0.25
	AG=300	2	0.25
Fondation (En sous couches de 25cm)	$E_{MNT}(\text{sous couche } 1) = k E_{sol \text{ support}}$ $E_{MNT}(\text{sous couche } i) = k E_{MNT}(\text{sous couche } i - 1)$ Avec E_{MNT} borné à E_{MNT} couche de base		
Fondation MNT sous GB et SB (GB/MNT)	$E_{MNT}(\text{sous couche } 1) = k E_{sol \text{ support}}$ (Avec K idem ci-dessus) $E_{MNT}(\text{sous couche } i) = k E_{M.vr}(\text{sous couche } i - 1)$ Avec E_{MNT} borné à E_{MNT} 350 MPa		

II.4.2.7 Calcul des sollicitations admissibles :

- **Matériaux traités au bitume :**

La déformation admissible de traction $\varepsilon_{t,adm}$ à la base des couches bitumineuses est donnée par la relation II.7 ci-après :

$$\varepsilon_{t,adm} = \varepsilon_6(10^\circ C, 25Hz) \times Kne \times k\theta \times Kr \times Kc \quad \text{II.7}$$

Avec :

$\varepsilon_6(10^\circ C, 25Hz)$ = déformation limite détenue au bout de 10^6 cycles avec une probabilité de rupture de 50% à $10^\circ C$ et 25Hz (essai de fatigue).

Kne = facteur lié au nombre cumulé d'essieux équivalents supporté par la chaussée (voir l'équation II.8)

$$Kne = \left(\frac{TCE_i}{10^6}\right)^6 \quad \text{II.8}$$

K θ = facteur lié à la température (voir équation II.9)

$$K\theta = \sqrt{\frac{E(10^\circ C)}{E(30eq)}} \quad \text{II.9}$$

Kr = facteur lié au risque et aux dispersions (voir équation II.10)

$$Kr = 10^{-tb\delta} \quad \text{II.10}$$

Kc = facteur lié au calage des résultats du modèle de calcul avec le comportement observé sur chaussées, on le retrouve dans le tableau II.11.

TCE_i : trafic en nombre cumulé d'essieux équivalents de 13 tonnes sur la durée de vie considérée.

b = pente de la droite de fatigue ($b < 0$) on le retrouve dans le tableau II.11.

E(10°C) : module complexe du matériau bitumineux à $10^\circ C$ (voir le tableau II.11).

E(θeq) : module complexe du matériau bitumineux à la température équivalente qui est fonction de la zone climatique considérée. (Voir le tableau II.11)

$$\delta : f(\text{dispersion}) \quad \delta = \sqrt{SN^2 + \left(\frac{c}{b} sh\right)^2} \quad \text{II.11}$$

Avec :

SN : dispersion sur la loi de fatigue.

Sh : dispersion sur les épaisseurs (en cm).

c = coefficient égal à 0.02

t = fractile de la loi normale, qui est fonction du risque adopté ($r\%$). Voir le tableau II.16 ci-dessous :

Tableau II.16 : Valeurs de $t=f(r\%)$

R%	2	3	5	7	10	12	15
t	-2.054	-1.881	-1.645	-1.520	-1.282	-1.175	-1.036
R%	20	23	25	30	35	40	50
t	-0.842	-0.739	-0.674	-0.524	-0.385	-0.253	0

- **Matériaux traités aux liants hydrauliques**

La contrainte admissible de traction $\sigma_{t,adm}$ à la base des couches traitées aux liants hydrauliques est donné par la relation II.12:

$$\sigma_{t,adm} = \sigma_6 \cdot Kne \cdot Kr \cdot Kd \cdot Kc \quad \text{II.7}$$

σ_6 : contrainte de flexion limite à 10^6 cycles donnés par l'essai de fatigue.

Kne, Kr, Kc : idem matériaux traités au bitume montrés par le tableau II.11.

Kd : facteur lié aux effets des discontinuités (fissures) et gradient thermique (dalle en béton).

- **Matériaux non traités (MNT) :**

Il n'existe pas de calcul de sollicitations admissibles pour ce type de matériau. Il faut s'assurer du bon choix des caractéristiques du matériau afin d'asseoir une bonne tenue à l'orniérage. Il faut également s'assurer que le sol support ne soit pas trop déformable.

II.4.2.7.1 Vérification en fatigue des structures et de la déformation du sol support :

- **Matériaux traités au bitume (MTB) :**

Il faudra vérifier que ϵ_t et ϵ_z calculées à l'aide d'alize, sont inférieures aux valeurs admissibles calculées, c'est-à-dire respectivement à $\epsilon_{t,adm}$, $\epsilon_{z,adm}$ comme indiqué dans l'équation II.8

$$\epsilon_t < \epsilon_{t,adm} \text{ et } \epsilon_z < \epsilon_{z,adm} \quad \text{II.8}$$

- **Matériaux traités au liants hydraulique (MTLH) :**

Dans ce cas également, il faudra vérifier que les contraintes et déformations calculées par Alize sont inférieures aux contraintes et déformations admissibles calculées par l'équation II.9

$$\sigma_t < \sigma_{t,adm} \text{ et } \epsilon_z < \epsilon_{z,adm} \quad \text{II.9}$$

- **Matériaux non traités (MNT) :**

Dans le cas des MNT la seule vérification est à faire sur le sol-support par l'équation II.10 [9]

$$\epsilon_z < \epsilon_{z,adm} \quad \text{II.10}$$

II.5 Logiciel Alizé LCPC :

II.5.1 Définition :

Le logiciel Alizé LCPC est utilisé pour effectuer des calculs sur les structures de chaussées. Ces chaussées peuvent être destinées à la circulation routière, portuaire, logistique ou aéronautique. Les fonctionnalités facilitent le dimensionnement des chaussées neuves, tout en offrant la possibilité de réutiliser des projets antérieurs réalisés dans des contextes plus anciens. Le logiciel élaboré par le LCPC et le SETRA. [6]

II.5.2 Principe de logiciel :

La méthode rationnelle intégrée dans le logiciel ALIZE - LCPC vise à assurer le dimensionnement mécanique des structures de chaussée, en particulier lors de la conception de nouvelles chaussées routières pour toutes les catégories de trafic. En utilisant un modèle multicouche, élastique et linéaire selon l'hypothèse de BURIMESTER, il est possible de

calculer les contraintes et déformations aux différentes interfaces d'une structure pouvant comporter jusqu'à six couches infinies en plan. [6]

II.5.3 Les onglets principaux du logiciel :

Dès que le projet est lancé ou nouvellement établi, l'utilisateur aura la possibilité d'effectuer son calcul mécanique en suivant les diverses étapes requises, indiquées par la barre d'onglets située en bas de l'écran, comme indiquées dans la figure II.3. [10]



Figure II.3 : la barre d'onglet du logiciel alize

II.5.3.1 Onglet structure :

Le premier onglet illustré dans la figure II.4 sert à établir toutes les caractéristiques des diverses couches de la structure à concevoir :

- Son épaisseur
- Son module
- Son coefficient de Poisson
- Le matériau qui la compose ainsi que la bibliothèque d'origine
- Sa température
- Sa fréquence
- Sa relation ou non avec la fondation de la structure [10]

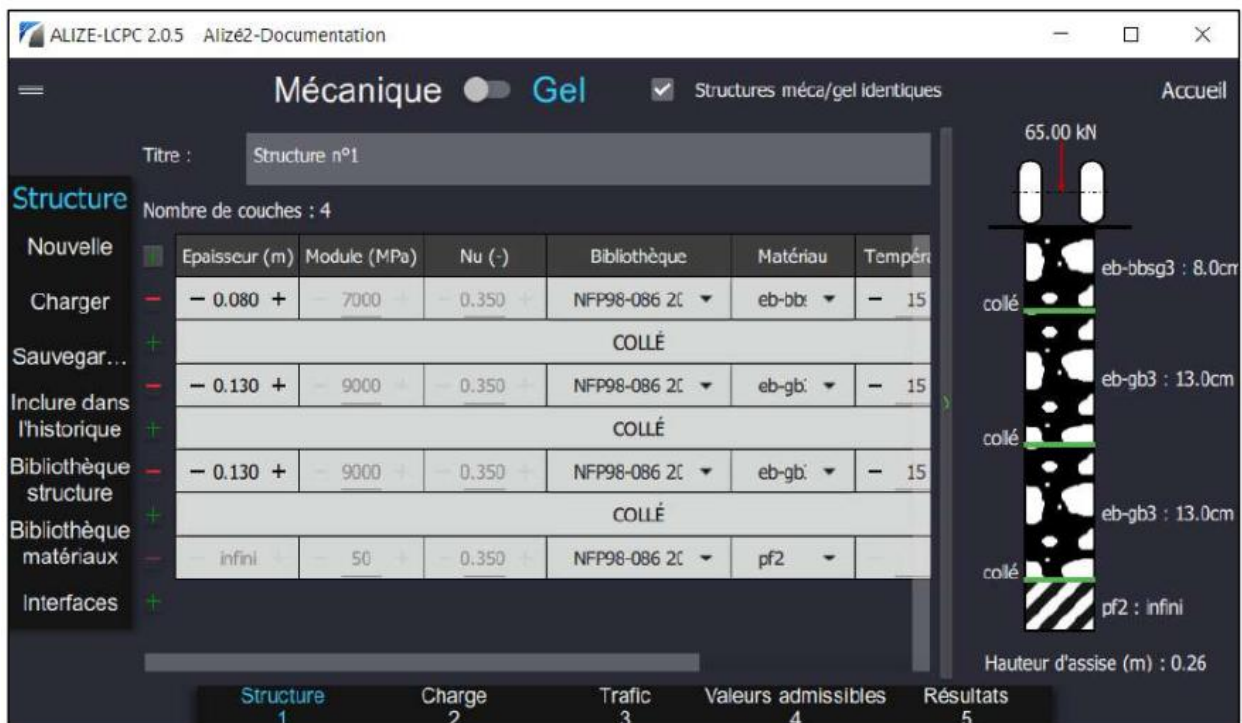


Figure II.4 : onglet structure

II.5.3.2 Onglet charge :

Le deuxième onglet permet de définir la charge à appliquer (voir figure II.5) [10]

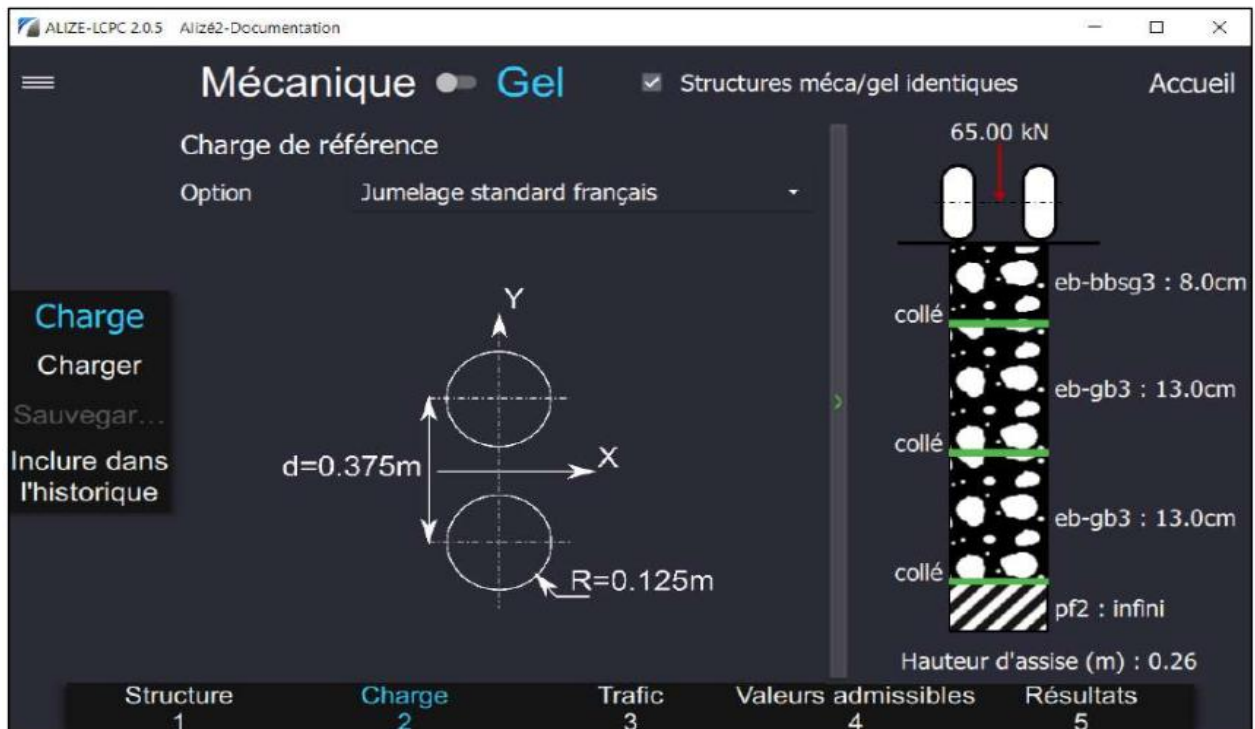


Figure II.5 : vue globale de l'onglet charge

II.5.3.3 Onglet trafic :

Le troisième onglet est dédié à l'explication du trafic de poids lourds anticipé auquel l'infrastructure à concevoir sera exposée. (Voir figure II.6) [10]

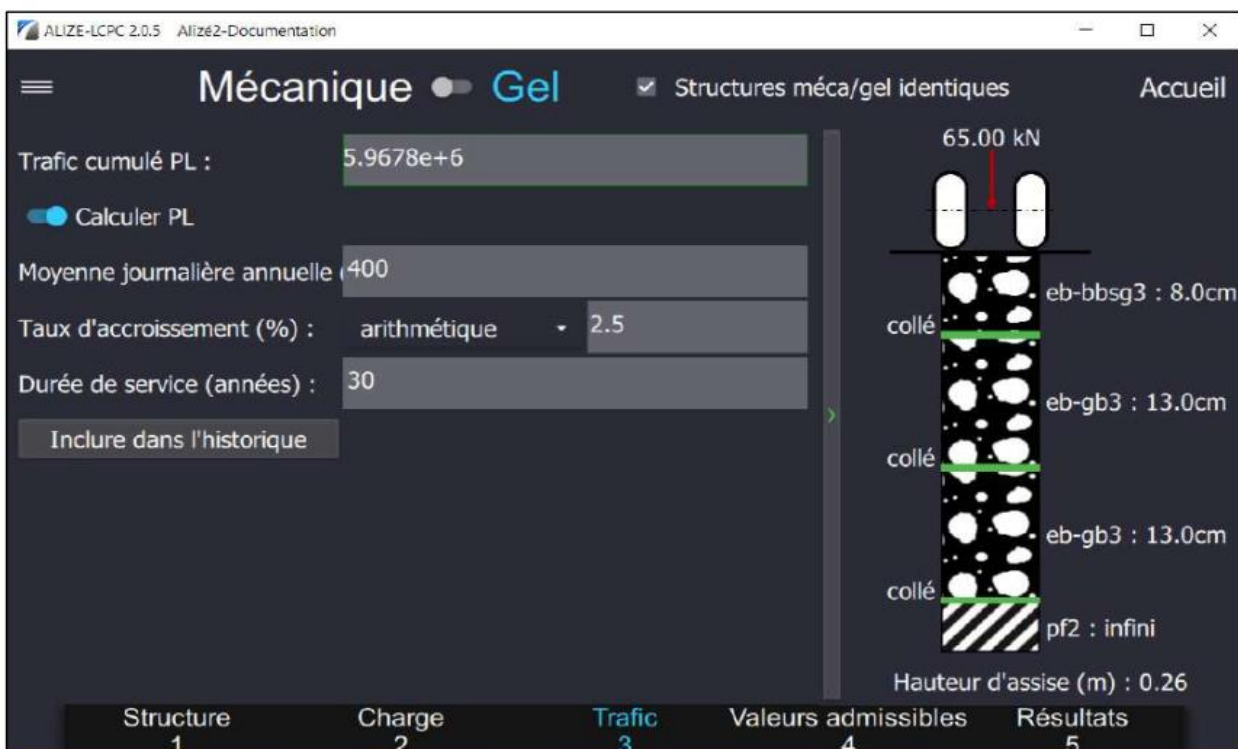


Figure II.6 : onglet trafic

II.5.3.4 Onglet valeurs admissibles :

Le quatrième onglet offre la possibilité de déterminer les valeurs acceptables pour chacune des couches de la structure analysée. (Voir figure II.7) [10]

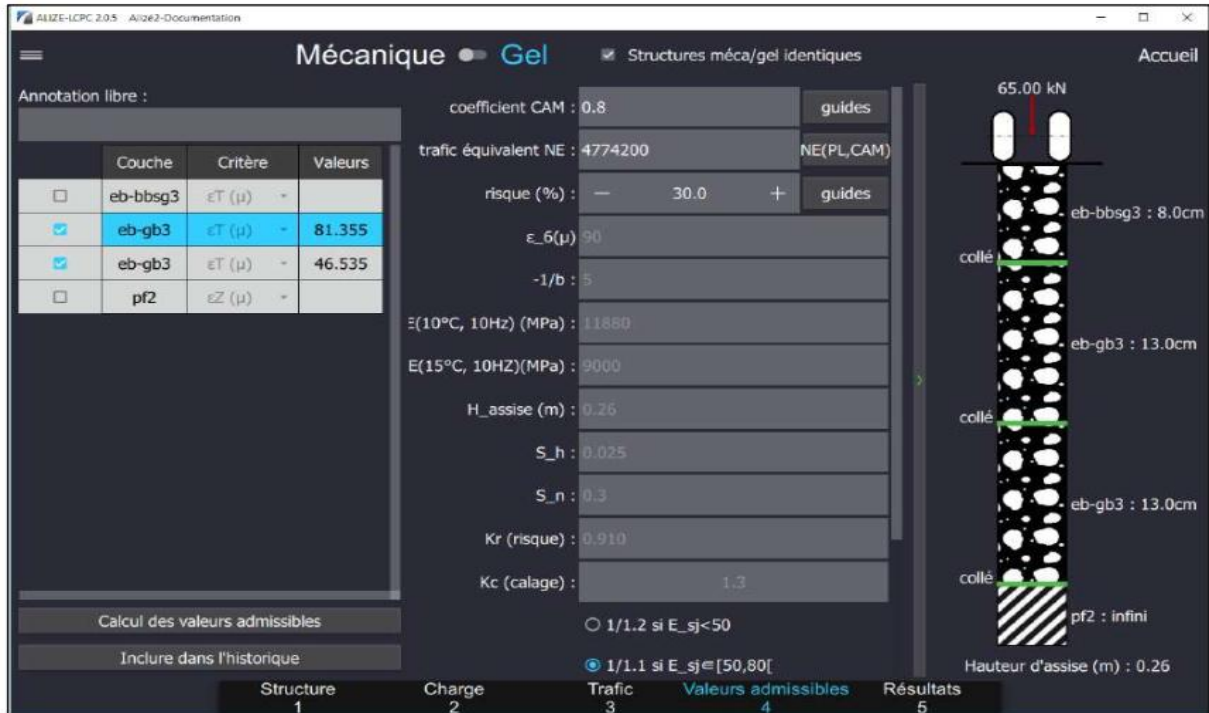


Figure II.7 : onglet structure

II.5.3.5 Onglet résultats :

- Les onglets antérieurs remplis, Alizé 2 offre un dernier onglet résumant les résultats accessibles. Les résultats sont affichés sous forme de tableaux indiquant les valeurs de dimensionnement, les contraintes et les déformations en fonction de la sélection effectuée par l'utilisateur comme indiquer dans la figure II.8 [10]



Figure II.8 : onglet résultats

II.6 Conclusion :

En conclusion, le dimensionnement des infrastructures routières repose sur des normes rigoureuses et des critères techniques visant à assurer leur sécurité, leur pérennité et leur performance. Les méthodes classiques telles que la méthode CBR et la méthode CTTP offrent des bases solides pour évaluer la portance des sols et sélectionner les matériaux appropriés. L'utilisation de logiciels comme Alizé permet de fiabiliser ces démarches en automatisant les calculs et en simulant le comportement des structures sous différents scénarios de trafic.

Cependant, dans un contexte où plusieurs variantes de structures peuvent satisfaire aux exigences minimales, le choix final dépend de multiples critères simultanés. Or, les méthodes classiques ne permettent pas toujours de prendre en compte cette complexité multicritère. C'est pourquoi il devient pertinent d'introduire une approche d'aide à la décision, fondée sur la logique floue et les méthodes AHP, VIKOR et TOPSIS, afin de ranger rationnellement les variantes de structures selon un ensemble de critères pondérés. Le chapitre suivant développe ces méthodes multicritères et leur application au cas étudié.

Chapitre III : La prise de décision multicritère

III.1 Introduction :

Dans le prolongement des méthodes classiques de dimensionnement étudiées au chapitre précédent, se pose la question du choix rationnel entre plusieurs variantes de structures de chaussées, toutes potentiellement valables du point de vue technique. Cette problématique de sélection ou de hiérarchisation justifie le recours aux méthodes multicritères d'aide à la décision (MCDM).

L'aide à la décision multicritère constitue un champ innovant qui regroupe des concepts, des approches et des outils visant à assister le décideur dans la sélection, l'évaluation ou le classement de plusieurs options, en tenant compte de critères multiples et parfois conflictuels. Ces critères peuvent porter sur des objectifs techniques, économiques, environnementaux ou sociaux, et sont évalués à travers des scores, des préférences, ou des fonctions d'utilité.

Dans ce chapitre, nous présentons le rôle fondamental des méthodes MCDM dans le classement des variantes de structures de chaussée, en nous appuyant sur des approches fondées sur la logique floue. Les méthodes retenues sont :

- Fuzzy AHP (Analytic Hierarchy Process),
- Fuzzy TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution),
- Fuzzy VIKOR (VIsekriterijumska Optimizacija i KOmpromisno Resenje).

Ces méthodes permettent d'aboutir à des choix objectivés et justifiables, même en présence d'incertitudes ou de préférences imprécises.

III.2 Définition :

Philippe Vincke a décrit l'aide multicritère comme suit : « L'aide multicritère à la décision vise, comme son nom l'indique, à fournir à un décideur des outils lui permettant de progresser dans la résolution du problème de décision à plusieurs points de vue, souvent contradictoires, doivent être pris en compte ». [11]

III.3 Les principaux éléments dans MCDM :

III.3.1 Le décideur :

C'est une personne ou un groupe de personne qui décide la méthode qu'il utilisera, et l'importance des critères pour choisir la meilleure alternative.

$$DM = \{DM_k | k = 1; 2 \dots M\} \quad \text{III.1}$$

III.3.2 Les alternatives :

Désignent les différentes options ou choix disponibles que le décideur doit évaluer et comparer.

$$AA = \{A_i | i = 1; 2 \dots m\} \quad \text{III.2}$$

III.3.3 Les critères :

Sont les caractéristiques ou les facteurs que le décideur utilise pour évaluer et comparer les différentes alternatives.

$$C = \{C_j | j=1 ; 2 \dots n\} \quad \text{III.3}$$

Ainsi, le processus de prise de décision multicritère repose à la fois sur des données objectives (issues du dimensionnement ou de l'analyse technique) et sur des jugements subjectifs exprimés par les décideurs. Pour structurer ces choix de manière rigoureuse, plusieurs méthodes ont été développées dans le cadre de la logique floue, permettant de mieux gérer l'incertitude, les préférences imprécises et les critères hétérogènes.

Parmi ces méthodes, trois approches se distinguent par leur robustesse et leur popularité dans les projets d'infrastructure :

- Fuzzy AHP (Analytic Hierarchy Process),
- Fuzzy TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution),
- Fuzzy VIKOR (VIsekriterijumska Optimizacija i KOmpromisno Resenje).

Chacune de ces méthodes sera présentée dans les sections suivantes, en détaillant leur logique de fonctionnement, leur formulation mathématique, ainsi que leur application au classement de variantes de structures de chaussée.

III.4 Les méthodes multicritères d'aide à la décision dans un domaine flou :

III.4.1 Définition :

Les méthodes multicritères d'aide à la décision en environnement flou sont des approches permettant de prendre des décisions lorsque plusieurs critères doivent être considérés simultanément, dans un contexte d'incertitude et d'imprécision. Ces méthodes reposent sur la logique floue, qui permet de modéliser l'imprécision des préférences, des jugements et des informations disponibles. [12]

III.4.2 Extensions en la Logique Floue :

III.4.2.1 Logique Floue : Définition et Concept

La logique floue est une branche de la logique qui permet de traiter des concepts ou des situations qui ne peuvent pas être définis de manière précise ou binaire, mais qui peuvent plutôt être décrits de manière floue.

Contrairement à la logique classique, qui repose sur des valeurs soit vraies soit fausses (0 ou 1), la logique floue permet de représenter des degrés de vérité entre 0 et 1 comme représenté la figure III.1. Elle est particulièrement utile pour modéliser des situations où les frontières entre les catégories sont imprécises ou où les données sont incomplètes.

Concrètement, la méthode floue consiste à définir des variables linguistiques, pouvant prendre des valeurs floues ou imprécises, par exemple "grand", "petit", "moyen", "faible", etc. Ces variables sont représentées par des fonctions d'appartenance floues, qui montre leur degré

d'appartenance à chaque valeur possible. Ensuite, la méthode floue permet de combiner ces variables et fonctions d'appartenance pour aboutir à des conclusions floues ou imprécises. Cela peut se faire par des opérations telles que la composition, l'agrégation, la décomposition, la défuzzification, etc. [12]

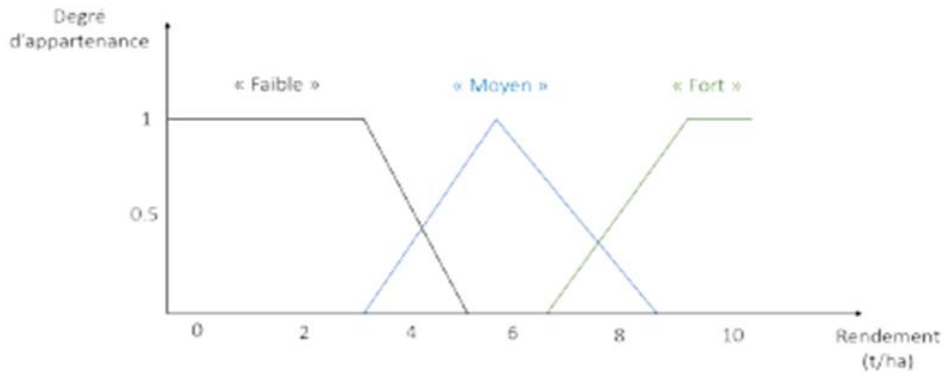


Figure III.1: la logique floue

III.4.2.2 Les nombres flous :

Les ensembles flous, qui définissent des nombres flous, sont établis sur l'ensemble des réels R , constituant ainsi le domaine d'expression ou de référence. La fonction d'appartenance d'un nombre flou contrôle certaines propriétés mentionnées dans la définition suivante : [13]

III.4.2.2.1 Définition :

Un nombre flou N est un ensemble flou normalisé ce qui signifie que la fonction d'appartenance $\mu_N(x)$ est une fonction de R dans $[0,1]$ qui vérifie les propriétés suivantes

- Son support est borné
- $\exists x_0 \in R$ Lequel $\mu_N(x_0) = 1$
- $\mu_N(x)$ Est semi-continue supérieurement, c'est-à-dire que pour tout $x_0 \in R$, si x_n est une suite croissante de nombres réelles telle que $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x_0$, alors $\lim_{n \rightarrow \infty} \mu_N(x_n) \geq \mu_N(x_0)$

Ces caractéristiques définissent les nombres flous et sont indispensables pour garantir que les opérations arithmétiques sur ces derniers produisent des résultats logiques et sensés. [13]

III.4.2.2.2 Les opérations arithmétiques sur les nombres triangulaires flous (TFNs) :

Les nombres flous triangulaires sont fréquemment employés, en raison de leur simplicité et de leur pertinence dans la prise de décisions floues. Voici les opérations arithmétiques de base pour les nombres flous triangulaires [13] :

Un nombre triangulaire floue TFN = (l, m, u)

Supposant : $TFN_1 = (l_1, m_1, u_1)$ et $TFN_2 = (l_2, m_2, u_2)$ III.4

$TFN_1 \otimes TFN_2 = (l_1, m_1, u_1) \otimes (l_2, m_2, u_2) = (l_1 \times l_2, m_1 \times m_2, u_1 \times u_2)$ III.5

$$\text{TFN}_1 \oplus \text{TFN}_2 = (l_1, m_1, u_1) \oplus (l_2, m_2, u_2) = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \quad \text{III.6}$$

$$\text{TFN}_1 \ominus \text{TFN}_2 = (l_1, m_1, u_1) \ominus (l_2, m_2, u_2) = (l_1 - l_2, m_1 - m_2, u_1 - u_2) \quad \text{III.7}$$

$$\text{TFN}_1 \div \text{TFN}_2 = (l_1, m_1, u_1) \div (l_2, m_2, u_2) = \left(\frac{l_1}{l_2}, \frac{m_1}{m_2}, \frac{u_1}{u_2}\right) \quad \text{III.8}$$

$$(l, m, u)^{-1} = \left(\frac{1}{u}, \frac{1}{m}, \frac{1}{l}\right) \quad \text{III.9}$$

III.5 Les différentes méthodes multicritères d'aide à la décision :

III.5.1 Méthode Fuzzy AHP

Le Fuzzy Analytic Hierarchy Process, souvent abrégé en Fuzzy AHP, est une méthode de prise de décision qui introduit une couche de flou dans le processus traditionnel de la Hiérarchie Analytique (AHP). Cette amélioration permet aux décideurs de gérer des données imprécises ou incertaines, ce qui en fait un outil précieux dans les situations où la clarté fait défaut.

Le Fuzzy AHP reconnaît que, dans la pratique, de nombreux facteurs et critères ont des valeurs incertaines ou floues [14]. Voici comment le Fuzzy AHP étend le processus :

Etape 1 : définir le problème

Pour définir le problème, il est essentiel d'identifier l'objectif cible et les solutions souhaitées.

Etape 2 : Analyse hiérarchique

Les critères organisés dans une structure hiérarchique comme l'indique dans la figure III.2 , ce qui permet une évaluation plus systématique et une meilleure compréhension des relations entre eux ;

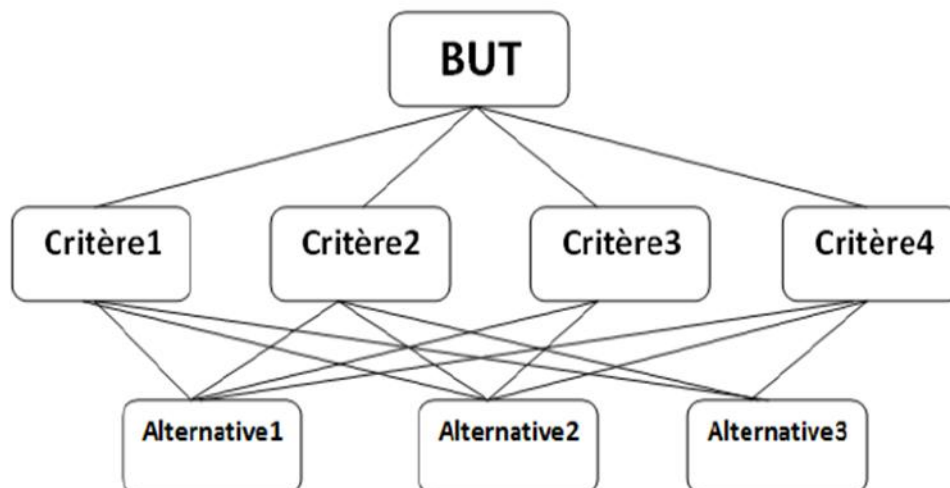


Figure III.2 : Structure de la hiérarchie AHP

Etape 3 : Comparaisons par paires avec flou

Les décideurs effectuent des comparaisons par paires, mais tiennent compte du flou. Ils utilisent des variables linguistiques, des nombres flous ou d'autres ensembles flous pour exprimer leurs jugements ; Selon le tableau III.1 suivant :

Tableau III.1 : L'échelle fondamentale pour la comparaison par paires dans FUZZY-AHP

Echelle de saaty	Variables linguistique	Echelle triangulaire floue
1	Importance égale (Imp.eg)	(1.1.1)
3	Faible Importance (Fb. Imp)	(2.3.4)
5	Très important (T. Imp)	(4.5.6)
7	Fortement Important (F. Imp)	(6.7.8)
9	Absolument Important (A. Imp)	(9.9.9)
2	Peuvent être utilisés pour les valeurs intermédiaire	(1.2.3)
4		(3.4.5)
6		(5.6.7)
8		(7.8.9)

Etape 4 : Matrice de comparaison FAHP

La matrice de contribution par paires est représentée dans l'équation III.10, ou \tilde{d}_{ij}^k indique la préférence du $k^{ème}$ décideur pour la $i^{ème}$ alternative par rapport au $j^{ème}$ critère, par l'intermédiaire de nombres flous triangulaires. [14]

$$\tilde{A}^k = \begin{bmatrix} \tilde{d}_{11}^k & \tilde{d}_{12}^k & \dots & \dots & \tilde{d}_{1n}^k \\ \tilde{d}_{21}^k & \dots & \dots & \dots & \tilde{d}_{2n}^k \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{d}_{m1}^k & \tilde{d}_{m2}^k & \dots & \dots & \tilde{d}_{mn}^k \end{bmatrix} \quad \text{III.10}$$

Etape 5 : S'il y a plus d'un décideur, les préférences de chaque décideur (\tilde{d}_{ij}^k) sont moyennées, et (\tilde{d}_{ij}) est calculée comme dans l'équation III.11.

$$\tilde{d}_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^K \tilde{d}_{ij}^k}{K} \quad \text{III.11}$$

Selon les préférences moyennes, la matrice de contribution par paire est mise à jour comme indiqué dans l'équation III.12 :

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} \tilde{d}_{11} & \dots & \tilde{d}_{n1} \\ \dots & \ddots & \dots \\ \tilde{d}_{n1} & \dots & \tilde{d}_{nn} \end{bmatrix} \quad \text{III.12}$$

Etape 6 : Calcul des moyennes géométriques et des poids flous

Calcul des moyennes géométriques et des poids flous : La moyenne géométrique de chaque ligne calculée après que les poids flous sont calculés par normalisation selon l'équation III.14. La moyenne géométrique de chaque ligne est donnée par l'équation III.13

$$\tilde{r}_i = \left(\prod_{j=1}^n \tilde{d}_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad \text{III.13}$$

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \otimes (\tilde{r}_1 \oplus \tilde{r}_2 \oplus \tilde{r}_3 \dots \oplus \tilde{r}_n)^{-1} = (lw_i, mw_i, uw_i) \quad \text{III.14}$$

Etape 7 : défuzzification des poids par la méthode « center of area » proposé par Chang et Chou montrer dans l'équation III.15.

$$M_i = \frac{lw_i + mw_i + uw_i}{3} \quad \text{III.15}$$

Etape 8 : M_i est des non nombre flou mais il faut normalisé par l'équation III.16 ci-dessus [14]

$$N_i = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad \text{III.16}$$

III.5.2 Méthode Fuzzy TOPSIS :

La méthode Fuzzy TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) est une extension de la méthode classique TOPSIS qui intègre des concepts de logique floue pour traiter l'incertitude et la subjectivité dans les données. Elle est utilisée dans le cadre de l'analyse multicritère pour classer un ensemble d'alternatives selon leur proximité avec une solution idéale et loin d'une solution anti-idéale. Fuzzy TOPSIS utilise des nombres flous pour représenter les performances des alternatives par rapport à chaque critère. La méthode Fuzzy TOPSIS suit généralement les étapes suivantes [15] :

- Normalisation des valeurs floues des critères et pondération des critères.
- Calcul des distances entre chaque alternative et les solutions idéale et anti-idéale.
- Calcul des scores de proximité pour chaque alternative en fonction de sa distance par rapport à la solution idéale et anti-idéale.
- Classement des alternatives en fonction de leurs scores de proximité.

Etape 1 : Echelle d'importance dans FTOPSIS

On définit les alternatives entre lesquelles on souhaite choisir la meilleure entre eux. Le tableau III.2 présente l'échelle d'importance entre les sous-critères et alternatives. [15]

Tableau III.2 : L'échelle d'importance dans FUZZY-TOPSIS.

Echelle triangulaire floue	Variabes linguistiques (Alternatives)	Variabes linguistiques (Critères)
(1, 1,3)	Very Poor (VP)	Very low (VL)
(1, 3,5)	Poor (P)	Low (L)
(3, 5,7)	Fair (F)	Medium (M)
(5, 7,9)	Good (G)	High (H)
(7, 9,9)	Very Good (VG)	Very High (VH)

Etape 2 : Matrice de comparaison F TOPSIS

La matrice de contribution par paires est représentée dans l'équation III.17, ou X_{ij}^k indique la préférence du $k^{ème}$ décideur pour la $i^{ème}$ alternative par rapport au $j^{ème}$ critère, par l'intermédiaire de nombres flous triangulaires. [15]

$$\tilde{D}^k = \begin{bmatrix} \tilde{X}_{11}^k & \tilde{X}_{12}^k & \dots & \dots & \tilde{X}_{1n}^k \\ \tilde{X}_{21}^k & \dots & \dots & \dots & \tilde{X}_{2n}^k \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{X}_{m1}^k & \tilde{X}_{m2}^k & \dots & \dots & \tilde{X}_{mn}^k \end{bmatrix} \quad \text{III.17}$$

Etape 3 : S'il y a plus d'un décideur, les préférences de chaque décideur (\tilde{X}_{ij}^k) sont moyennées et (\tilde{X}_{ij}) est calculée comme dans l'équation III.18 ; et les poids de chaque critère sont moyennés comme dans l'équation III.19

$$\tilde{X}_{ij}^K = (l_{ij}^k, m_{ij}^k, u_{ij}^k)$$

$$l_{ij} = \min(l_{ij}^k), m_{ij} = 1/K \sum_{k=1}^K m_{ij}^k, u_{ij} = \max(u_{ij}^k) \quad \text{III.18}$$

$$W_j^K = (w_{j1}^k, w_{j2}^k, w_{j3}^k)$$

$$w_{j1} = \min(w_{j1}^k), w_{j2} = 1/K \sum_{k=1}^K w_{j2}^k, w_{j3} = \max(w_{j3}^k) \quad \text{III.19}$$

La matrice obtenue comme montré l'équation III.20

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} \tilde{X}_{11} & \dots & \tilde{X}_{n1} \\ \dots & \ddots & \dots \\ \tilde{X}_{n1} & \dots & \tilde{X}_{nn} \end{bmatrix} \quad \text{III.20}$$

Ensuite, il est nécessaire de définir les critères bénéficiaires et ceux de coûts :

- **Critères Bénéficiaires** : Ce sont des critères pour lesquels une valeur plus élevée est préférable. Dans le contexte de la prise de décision multicritère, les bénéfices représentent les aspects positifs ou les objectifs à maximiser. Dans ce cas le calcul se fait selon l'équation III.21 suivante [12] :

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{l_{ij}}{u_j^*}, \frac{m_{ij}}{u_j^*}, \frac{u_{ij}}{u_j^*} \right) \text{ Avec } u_j^* = \max_i u_{ij} \quad \text{III.21}$$

- **Critères de Coût** : Ce sont des critères pour lesquels une valeur plus basse est préférable. Dans le contexte de la prise de décision multicritère, les coûts représentent les aspects négatifs ou les objectifs à minimiser. Dans ce cas le calcul se fait selon l'équation III.22 suivante [12] :

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{l_j^-}{u_{ij}}, \frac{l_j^-}{m_{ij}}, \frac{l_j^-}{l_{ij}} \right) \text{ Avec } l_j^- = \min_i l_{ij} \quad \text{III.22}$$

Etape4 : Construction de la matrice de décision floue normalisée pondérée

Pour en faire la relation III.23 ci-dessous est utilisée [15] :

$$\tilde{P} = [\tilde{P}_{ij}] \text{ avec } \tilde{P}_{ij} = \tilde{r}_{ij} * \tilde{w}_j \quad \text{III.23}$$

Avec :

$$i=1, 2, \dots, m ; j=1, 2, \dots, n$$

Etape 5: Calculer le FPIS (A) et le FNIS (A)

Calculer le FPIS (Fuzzy Positive Idéale Solution) et le FNIS (Fuzzy Negative Idéale Solution) est essentiel dans l'analyse multicritère floue. Le FPIS représente la solution idéale positive, c'est-à-dire la meilleure performance possible pour chaque critère, tandis que le FNIS représente la solution idéale négative, correspondant à la pire performance possible pour chaque critère. Ces valeurs permettent de définir des repères pour évaluer les alternatives, en les comparant respectivement à la meilleure et à la pire référence possible, facilitant ainsi le processus de prise de décision. [15]

Voici les relations III.24, III.25, III.26 et III.27 utilisées :

$$A^+ = (P_1^+, P_2^+, \dots, P_n^+) \quad \text{III.24}$$

$$\text{Avec : } P_j^+ = \max(P_{ij}), i=1, 2, \dots, m ; j=1, 2, \dots, n$$

$$A^- = (P_1^-, P_2^-, \dots, P_n^-) \quad \text{III.25}$$

$$\text{Avec : } P_j^- = \min(P_{ij}), i = 1, 2, \dots, m ; j=1, 2, \dots, n$$

Sélectionner la valeur maximale de chaque ligne comme que P^+ et sélectionner la valeur minimale de chaque ligne comme P^- .

$$FPIS=d (P_{ij}, P_j^+) \quad \text{III.26}$$

$$FNIS=d (P_{ij}, P_j^-) \quad \text{III.27}$$

Etape 6 : La distance de chaque alternative pondérée est calculée comme montré dans les équations III.28 et III.29

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^n d(P_{ij}, P_i^+) \quad \text{III.28}$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n d(P_{ij}, P_i^-) \quad \text{III.29}$$

Etape 7 : déterminer le coefficient de proximité (CCi) pour chaque alternative par l'équation III. 30 ci-dessus

$$CC_i = d_i^- / (d_i^- + d_i^+) \quad \text{III. 30}$$

III.5.3 Méthode Fuzzy VIKOR :

La méthode Fuzzy VIKOR est une extension floue de la méthode VIKOR (VIseKriterijumsko KOmpromisno Raniganj), une technique multicritère d'aide à la décision développée par Serafim Opricovic en 1998. Cette méthode est conçue pour résoudre des problèmes de décision où plusieurs critères conflictuels doivent être évalués et où il est nécessaire de trouver un compromis entre ces critères, notamment en présence d'incertitudes et d'informations imprécises. [16]

Elle est particulièrement utile lorsque les évaluations des critères et des alternatives sont incertaines ou subjectives, ce qui est fréquent dans les décisions réelles.

La méthode Fuzzy VIKOR suit généralement les étapes suivantes :

Etape1 : échelle d'importance dans Fuzzy VIKOR [16] ; illustré dans le tableau III.3

Tableau III.3 : L'échelle d'importance des critères dans FUZZY-VIKOR

Variables linguistiques	Echelle triangulaire flou
Very Low (VL)	(0,0.1, 0.3)
Low (L)	(0.1, 0.3, 0.5)
Medium(M)	(0.3, 0.5, 0.7)
High (H)	(0.5, 0.7, 0.9)
Very High (VH)	(0.7; 0.9, 1)

Tableau III.4 : L'échelle d'importance des alternatives dans FUZZY-VIKOR

Variabes linguistiques	Echelle triangulaire flou
Very Poor (VP)	(0, 0, 0.2)
Poor (P)	(0, 0.2, 0.4)
Fair(F)	(0.2, 0.4, 0.6)
Good (G)	(0.4, 0.6, 0.8)
Very Good (VG)	(0.6; 0.8, 1)
Excellent	(0.8, 0.8, 1)

Etape2 : Détermination l'importance du poids des critères [16]

Pour déterminer le poids de chaque critère en utilise les variables linguistiques dans le tableau III.3 ceci exprimé dans l'équation III. 31 comme un vecteur

$$\tilde{W}: \tilde{W}_j = [\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_n] \quad j=1, 2, \dots, n \quad \text{III. 31}$$

Où \tilde{W}_j représente le poids du $j^{ème}$ critère basé sur la préférence linguistique attribuée par un décideur. Chaque poids $\tilde{W}_j^k = (\tilde{w}_{j1}^k, \tilde{w}_{j2}^k, \tilde{w}_{j3}^k)$ est exprimé comme un TFN. Ces préférences signifient l'importance attribuée à un critère par un décideur. On utilise la méthode d'intégration moyenne graduée pour agréger les opinions des décideurs. Le poids de l'importance floue \tilde{w}_j pour le critère C_j est calculé à partir les formules suivantes :

$$w_{j1} = \min(w_{j1}^k), w_{j2} = 1/K \sum_{k=1}^k w_{j2}^k, w_{j3} = \max(w_{j3}^k) \quad i=1, 2 \dots m; j=1, 2 \dots n$$

Pour classer l'ordre d'importance de chaque critère. On utilise la méthode COA (Centrer Of Area) pour calculer la valeur de BNP (Best Non-Fuzzy Performance)

La valeur BNP d'un nombre flou $w_j = (l_{wj}, m_{wj}, u_{wj})$ est calculée comme illustré dans l'expression III. 32

$$BNP_{wj} = l_{wj} + [(u_{wj} - l_{wj}) + (u_{wj} - m_{wj})]/3 \quad \text{III. 32}$$

Etape 3 : Construction de la matrice de décision floue [16]

Une matrice de K décideurs (D_1, D_2, \dots, D_K);présenté par m alternatives (A_1, A_2, \dots, A_m) et n critères (c_1, c_2, \dots, c_n) est construit comme indiqué dans l'équation III. 33

$$\tilde{D}^k = \begin{bmatrix} \tilde{X}_{11}^k & \tilde{X}_{12}^k & \dots & \dots & \tilde{X}_{1n}^k \\ \tilde{X}_{21}^k & \dots & \dots & \dots & \tilde{X}_{2n}^k \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{X}_{m1}^k & \tilde{X}_{m2}^k & \dots & \dots & \tilde{X}_{mn}^k \end{bmatrix} \quad i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n \quad \text{III. 33}$$

Avec $\tilde{X}_{ij}^k = (l_{ij}^k, m_{ij}^k, u_{ij}^k)$ est un NTF. De même que l'étape 2, On utilise la méthode d'intégration moyenne graduée pour agréger les opinions des décideurs

$$l_{ij} = \min(l_{ij}^k), m_{ij} = \frac{1}{K \sum_{k=1}^K m_{ij}^k}, u_{ij} = \max(u_{ij}^k) \quad i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$$

Et ont obtenu la matrice III. 34 ci-dessus :

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} \tilde{X}_{11} & \dots & \tilde{X}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{X}_{m1} & \dots & \tilde{X}_{mn} \end{bmatrix} \quad i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n \quad \text{III. 34}$$

Etape 4 : meilleure valeur floue f_i^* et pire valeur floue f_i^- [16]

Meilleure valeur floue $f_i^* = (l_i^*, m_i^*, u_i^*)$ et pire valeur floue $f_i^- = (l_i^-, m_i^-, u_i^-)$

$$f_i^* = \max_j f_{ij}, f_i^- = \min_j f_{ij} \quad i \in B$$

$$f_i^* = \min_j f_{ij}, f_i^- = \max_j f_{ij} \quad i \in c$$

Où **B** est un critère de bénéfice et **C** est un critère de cout.

Etape 5 : détermination la différence floue \tilde{d}_{ij} par l'équation III. 35 et III. 36

$$\tilde{d}_{ij} = (\tilde{f}_i^- - \tilde{X}_{ij}) / (u_i^* - l_i^-) \in \mathbf{B} \quad \text{III. 35}$$

$$\tilde{d}_{ij} = (\tilde{X}_{ij} - \tilde{f}_i^*) / (u_i^- - l_i^*) \in \mathbf{C} \quad \text{III. 36}$$

Etape 6 : calculs des mesures de séparation \tilde{S}_j par l'équation III. 37 et \tilde{R}_j par l'équation III. 38

$$\tilde{S}_j = \sum_{i=1}^n (\tilde{w}_j \otimes \tilde{d}_{ij}) \quad \text{III. 37}$$

$$\tilde{R}_j = \max_i (\tilde{w}_j \otimes \tilde{d}_{ij}) \quad \text{III. 38}$$

Où $\tilde{S}_j = (S_j^l, S_j^m, S_j^u)$ est une somme pondérée floue da la mesure de séparation de A_j de la meilleure valeur f_i^* .

Et $\tilde{R}_j = (R_j^l, R_j^m, R_j^u)$ est un max flou qui fait référence à la mesure de séparation de A_j de la pire valeur f_i^- .

\tilde{w}_j Est l'importance du poids du critère c_j .

Etape 7 : calcul de la valeur de \tilde{Q}_j

La valeur $\tilde{Q}_j = (Q_j^l, Q_j^m, Q_j^u)$ est calculée par l'expression III. 39 suivante :

$$\tilde{Q}_j = v(\tilde{S}_j - \tilde{S}^*) / (S^{-u} - S^{*l}) \oplus (1-v)(\tilde{R}_j - \tilde{R}^*) \quad \text{III. 39}$$

Avec :

$$\tilde{S}^* = \min_j \tilde{S}_j$$

$$S^{-u} = \max_j S_j^u$$

$$\tilde{R}^* = \min_j \tilde{R}_j$$

$$R^{-u} = \max_j R_j^u$$

$$v = 1 + n/2n$$

Etape 8 : défuzzifier \tilde{S}_j , \tilde{R}_j et \tilde{Q}_j

Dans la logique floue, la défuzzification est le processus de conversion des nombres flous en valeurs nettes. On utilise la méthode de défuzzification de COA pour le classement des nombres flous (voir l'équation III. 32) [16]

Etape 9 : Classement des alternatives

La valeur nette « Q » des alternatives est classée de la plus petite valeur à la valeur la plus élevée. [16]

III.6 Conclusion :

En résumé, les méthodes multicritères d'aide à la décision constituent des outils modernes et puissants pour traiter des situations complexes où plusieurs critères doivent être évalués simultanément. Leur capacité à intégrer à la fois des informations quantitatives et qualitatives, souvent issues de jugements d'experts, les rend particulièrement pertinentes dans le contexte du choix de variantes de structures de chaussées.

L'introduction de la logique floue permet de mieux gérer l'incertitude et l'imprécision des préférences exprimées, ce qui renforce la fiabilité des résultats obtenus par les méthodes Fuzzy AHP, Fuzzy TOPSIS et Fuzzy VIKOR. Ces approches offrent ainsi une base rationnelle pour orienter les décisions techniques et économiques dans les projets routiers. Le chapitre suivant sera consacré à la mise en œuvre de ces méthodes sur un cas pratique, afin d'illustrer concrètement leur application dans le cadre de ce travail.

**Chapitre IV : dimensionnement et
vérification mécanique des
structures de chaussée**

IV.1 Introduction :

Le choix d'une structure de chaussée est une décision stratégique essentielle pour garantir la sécurité, la durabilité et l'efficacité d'un réseau routier. Dans un contexte de développement durable et de gestion des infrastructures, cette décision doit prendre en compte une multitude de critères techniques, économiques et environnementaux. Cependant, ces critères sont souvent conflictuels et comportent un degré d'incertitude, notamment en ce qui concerne les coûts, les performances mécaniques et l'impact environnemental des différentes alternatives.

Dans ce contexte, les méthodes multicritères floues sont particulièrement adaptées, car elles permettent de gérer l'incertitude et la subjectivité qui caractérisent souvent les jugements humains. Parmi ces méthodes, Fuzzy VIKOR, Fuzzy AHP et Fuzzy TOPSIS se distinguent par leur capacité à traiter simultanément plusieurs critères de décision, tout en prenant en compte des informations floues et imprécises. [12]

Pour chaque projet routier, il est donc nécessaire de procéder à une analyse multicritère détaillée et comparative des diverses solutions afin d'établir les atouts de chacune d'entre elles.

IV.2 Présentation de projet :

Le projet vise à réaliser le dédoublement de tronçon de la RN 11, qui fait partie du réseau national des routes et se situe dans la wilaya de Mostaganem. Ce tronçon s'étend du PK 303+575 au 298+800, et relie la commune de Sidi Lakhdar à la commune de Khadra, couvrant une distance totale d'environ 4 kilomètres et 775 mètres, La figure IV.1ci-après illustre le tronçon étudié. [18]

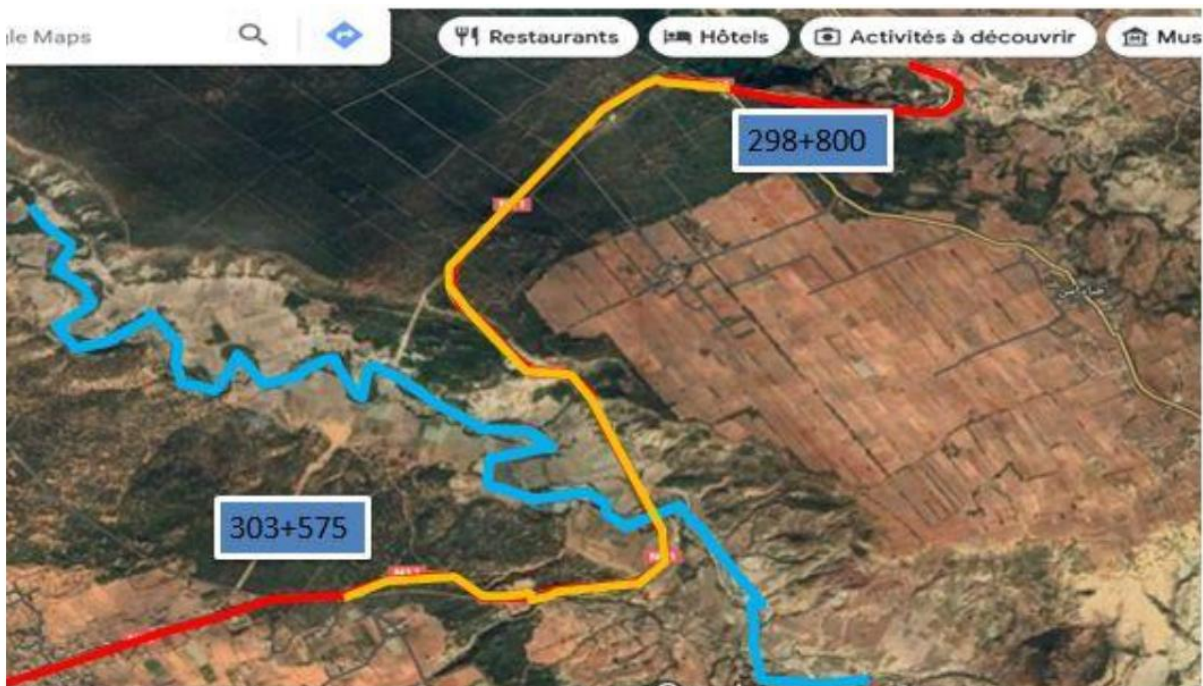


Figure IV.1 : Le tronçon étudié

IV.2.1 Présentation de la wilaya de Mostaganem :

IV.2.1.1 Situation géographique :

La wilaya de Mostaganem est située sur le littoral Ouest du pays, elle dispose d'une façade maritime de 124 km. Le Chef-lieu de la wilaya est situé à 365 km à l'Ouest de la capitale, Alger, La wilaya s'étend sur une superficie de 2 269 km².

La wilaya de Mostaganem est limitée :

- A l'Est par les Wilayas de Chlef et Relizane.
- Au Sud par les Wilayas de Mascara et Relizane.
- A l'Ouest par les Wilayas d'Oran et Mascara.
- Au Nord par la Mer Méditerranée. [18]

IV.2.1.2 Relief :

Le relief de la Wilaya de Mostaganem se divise en quatre unités morphologiques :

- Les vallées basses de l'Ouest englobent les communes : Hassi Mameche, Mazagran, Stidia, Aïn Nouïssy, El Hassaine et Fornaka.
- Les Monts du Dahra englobent les communes : Sidi Belattar, Oued El Kheir, Sidi Ali, Ouled Maallah, Tazgait, Nekmaria, Kheireddine, Ain Boudinar et Safsaf.
- Le plateau de Mostaganem englobe les communes : Mostaganem, Ain Tedles, Sour, Bouguirat, Sirat, Souafliia, Mesra, Aïn Sidi Cherif, Mansourah, Touahria et Sayada.
- Les vallées de l'Est englobent les communes : Achaacha, Khadra, Ouled Boughalem, Sidi Lakhdar, Hadjadj et Abdelmalek Ramdane. [18]

IV.2.1.3 Climat :

Le climat de Mostaganem se caractérise par un climat semi-aride en hiver tempéré et une pluviométrie qui varie entre 350 mm sur le plateau et 400 mm sur les piémonts du Dahra. [18]

IV.2.1.4 Réseau routier :

En infrastructure de base, le réseau routier de la Wilaya de Mostaganem (Voir Figure IV.2) est présenté dans le tableau IV.1 ci-après :

Tableau IV.1: le réseau routier de la Wilaya de Mostaganem

Désignation	Longueur (Km)
Routes nationales	332.43
Chemins de wilaya	653.83
Chemins communaux	1147.98

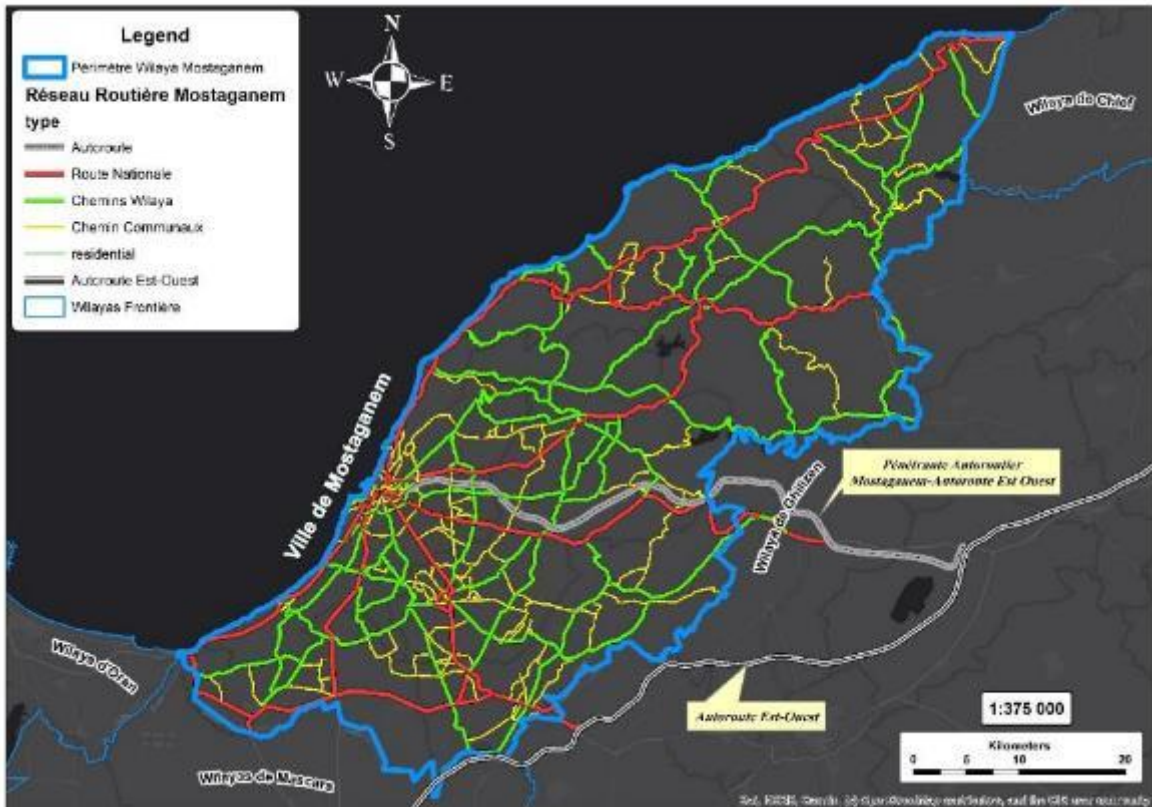


Figure IV.2 : réseau routier de la wilaya de mostaganem

IV.2.1.5 Daïras et Communes de la wilaya de Mostaganem :

La figure IV.3 expose la carte des daïras et communes de la wilaya de Mostaganem, la zone de notre projet en couleur blanc. [18]

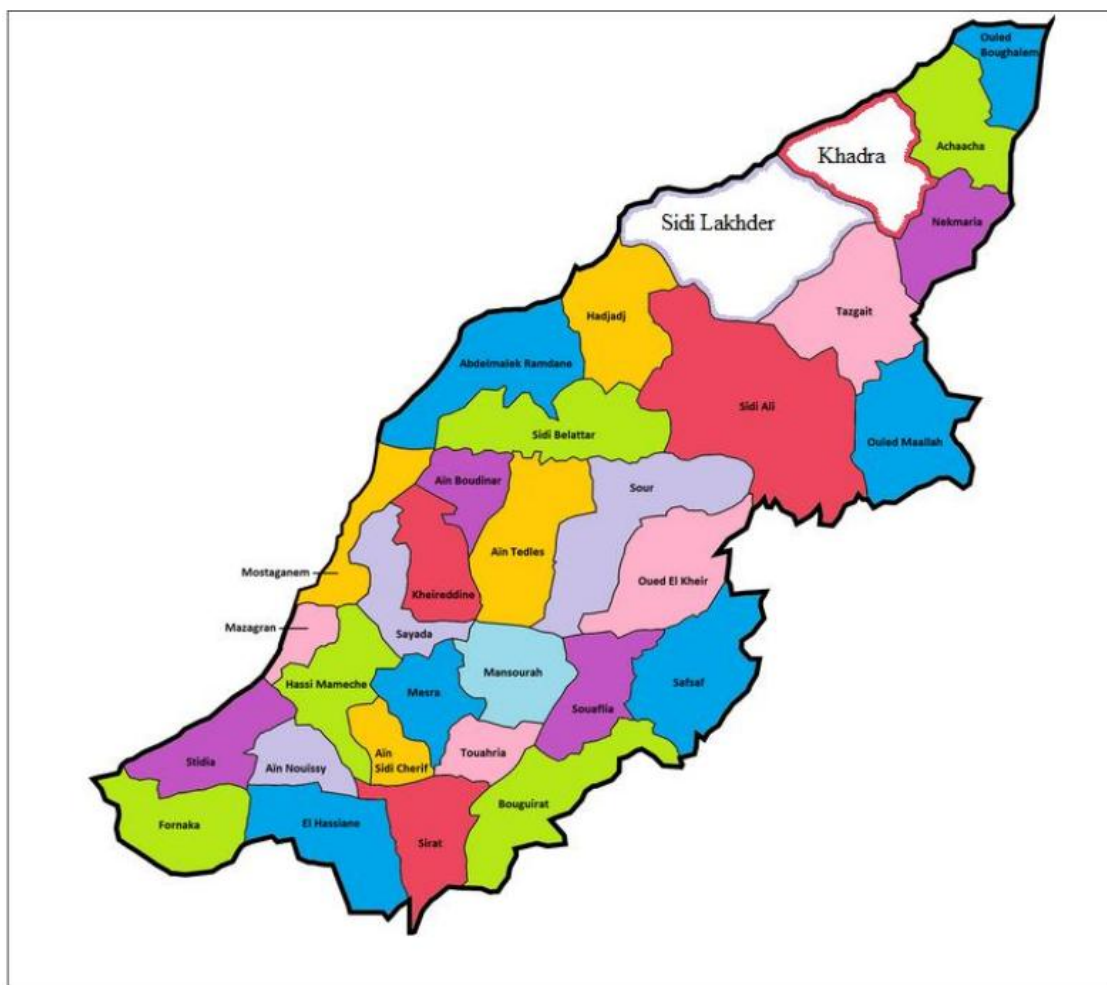


Figure IV.3: Carte des daïras et communes de la wilaya de Mostaganem.

Tableau IV.2 : daïras et communes de la wilaya de Mostaganem.

Daïra	Communes
Mostaganem	Mostaganem
Hassi-Mameche	Hassi mameche, Mazagran, Stidia
Ain Tedles	Ain Tedles, Sour, Sidi Belattar, Oued El Kheir
Bougirat	Bougirat, Safsaf, Sirat, Souaflia
Sidi Ali	Sidi Ali, Ouled Maallah, Tazgait
Achaacha	Achaacha, Khadra, Nekmaria, Ouled Boughalem
Ain Nouïssy	Ain Nouïssy, El Hassiane, Fornaka
Mesra	Mesra, Ain Sidi Cherif, Mansourah, Blad Touahria
Sidi Lakhdar	Sidi Lakhdar, Hadjadj, Abdelmalek Ramdane
Kheireddine	Kheireddine, Ain Boudinar

IV.2.1.6 Les données de projet :

Toutes les données de base essentielle pour le dimensionnement sont [18] :

IV.2.1.6.1 Les données de trafic :

- Le trafic à l'année de mise en service TMJA2023= 10341 (uvp/j).
- Le taux d'accroissement annuel du trafic $\tau = 4\%$.
- La vitesse de base sur le tracé $V_r = 80$ km /h.
- Le pourcentage moyen de poids lourds $Z = 30\%$.
- Environnement (E1) - Catégorie (CAT1).
- La durée de vie estimée à 20 ans.
- ICBR=10.
- Coefficient d'équivalence $P=2,5$.

IV.2.1.6.2 Les données de la chaussée :

- Largeur de la chaussée : 7.2m
- Nombres de voie : 2
- Largeur de la voie : 3.6m
- Dévers : -2 %
- Largeur de l'accotement : 1.5m
- Dévers de l'accotement : -4 % [18]

IV.2.1.7 Dimensionnement du corps de chaussée :

IV.2.1.7.1 Méthode CBR :

1. Calcul du trafic de VPL à l'année de mise en service :

$$N_1 = \text{TMJA } 2023 \times \% \text{PL} = 10341 \times 0,3$$

$$N_1 = 3102.3 \text{ VPL/J} \approx 3103 \text{ VPL/J}$$

2. Calcul du trafic de VPL à l'année horizon

$$N_n = N_1 \times (1 + \tau)^n$$

$$N_{20} = 3103 \times (1 + 0,04)^{20}$$

$$N_{20} = 2416.8 \text{ VPL/J} \approx 2417 \text{ VPL/J}$$

3. Calcul de l'épaisseur théorique :

$$e = \frac{100 + \sqrt{P} \times (75 + 50 \times \log(\frac{N}{10}))}{I_{CBR} + 5}$$

$$e = \frac{100 + \sqrt{6.5} \times (75 + 50 \times \log(\frac{2417}{10}))}{10 + 5} = 39.66 \Rightarrow e = 40 \text{ cm}$$

4. Calcul des épaisseurs des différentes couches :

En utilisant l'équation II.3:

➤ Structure 1 :

Couche de surface : « en béton bitumineux BB » D'après le tableau II.3: $c_1 = 2,00$

$$e_1 = 6 \text{ cm} ; e_1 = c_1 \times e_1 = 2,00 \times 6 = 12 \text{ cm}$$

Couche de base : « en Grave bitume » D'après le tableau II.3; $c_2 = 1,2$

$$e_2 = 10 \text{ cm} ; e_2 = c_2 \times e_2 = 1,2 \times 10 = 12 \text{ cm}$$

Couche de fondation : « en Tuf » D'après le tableau II.3; $c_3 = 0,75$

$$e = c_1 \times e_1 + c_2 \times e_2 + c_3 \times e_3 = 40 \text{ cm}$$

$$e_3 = \frac{e - (c_1 \times e_1 + c_2 \times e_2)}{c_3}$$

$$e_3 = \frac{40 - (12 + 12)}{0,75}$$

$$e_3 = 21,33 \text{ cm} = 22 \text{ cm}$$

6BB
10GB
22TUF

➤ Structure 2 :

Couche de surface : « en béton bitumineux BB » D'après le tableau II.3 : $c_1 = 2,00$

$$e_1 = 6 \text{ cm} ; e_1 = c_1 \times e_1 = 2,00 \times 6 = 12 \text{ cm}$$

Couche de base : « en Tuf » D'après le tableau II.3; $c_2 = 0,75$

$$e_2 = 15 \text{ cm} ; e_2 = c_2 \times e_2 = 0,75 \times 15 = 11,25 \text{ cm}$$

Couche de fondation : « en Tuf » D'après le tableau II.3; $c_3 = 0,75$

$$e = c_1 \times e_1 + c_2 \times e_2 + c_3 \times e_3 = 40 \text{ cm}$$

$$e_3 = \frac{e - (c_1 \times e_1 + c_2 \times e_2)}{c_3}$$

$$e_3 = \frac{40 - (12 + 11,25)}{0,75}$$

$$e_3 = 22,33 \text{ cm} = 23 \text{ cm}$$

6BB
15TUF
23TUF

➤ **Structure 3 :**

Couche de surface : « en biton bitumineux BB » D'après le tableau ci-dessous : $c_1 = 2,00$

$$e_1 = 6 \text{ cm} ; e_1 = c_1 \times e_1 = 2,00 \times 6 = 12 \text{ cm}$$

Couche de base : « en Grave concassé » D'après le tableau ci-dessous ; $c_2 = 1$

$$e_2 = 12 \text{ cm} ; e_2 = c_2 \times e_2 = 1 \times 12 = 12 \text{ cm}$$

Couche de fondation : « en TUF » D'après le tableau ci-dessous ; $c_3 = 0,75$

$$e = c_1 \times e_1 + c_2 \times e_2 + c_3 \times e_3 = 40 \text{ cm}$$

$$e_3 = \frac{e - (c_1 \times e_1 + c_2 \times e_2)}{c_3}$$

$$e_3 = \frac{40 - (12 + 12)}{0,75}$$

$$e_3 = 21,33 \text{ cm} = 22 \text{ cm}$$

6BB
12GC
22TUF

IV.2.1.7.2 Méthode du catalogue de dimensionnement des chaussées neuves du CTPP :

a) Duré de vie :

TJMA 2023 = $10341v/j > 1500 v/j$ → Donc le réseau principal est **RP1**

Selon le tableau II.4 la durée de vie de ce projet est **20 ans**.

b) Risque de calcul :

La classe du trafic TPLi

TJMA2023 = $10341v/j$ (l'année de mise en service)

$$TJMA\ 2023 = 10341/2 = 5171\ v/j/sens$$

$$TPL2023 = Z \times TJMA\ 2023 = 0.4 \times 5171 = 2069\ PL/j/sens.$$

La chaussée dans cette étude est une chaussée bidirectionnelle à 2 voies. D'après le catalogue algérien du dimensionnement des chaussées neuves(2001CCTP) [9], la répartition du poids lourd est de 50%.

$$TPL2023 = 2069 \times 0.5 = 1035\ (PL/j/sens).$$

D'après le tableau II.9 la classe de trafic est **TPL5**.

Selon le tableau de risque II.5 adopté pour le réseau RP1, le risque de calcul est :

$$R\% = 10\%$$

c) Les données climatiques :

✓ **La zone climatique :**

Selon le zonage dans la carte climatique (voir figure II.2) et le tableau II.7, la zone du projet est classée en **zone II**.

✓ **La température équivalente :**

D'après le tableau II.8 la température équivalente de la zone climatique II est : $\theta_{eq} = 20^{\circ}C$

d) Sol support :

Détermination de la portance de sol-support :

D'après l'équation II.6

$$E = 5 \times CBR, E = 5 \times 10 = 50\ MPA$$

Et d'après le tableau II.4

On trouve que la classe du sol-support **S2**

Le réseau principal est (RP1), la zone climatique 2, la durée de vie est de 20 ans, taux d'accroissement moyen égale à 4%, la classe de portance du sol est la classe (S2) et une classe de trafic (TPL5). Selon les données citées en haut, le catalogue Algérien (fascicule N°3) [17] propose les structures suivantes :

Structure 4 :

6BB
11GB
12GB

Structure 5 :

6BB
20GB
30GNT

IV.2.1.7.3 Vérification par logiciel alize :

Structure 1 :

Cette structure initialement dimensionnée ne vérifiait pas les critères de performance lors de la simulation sur le logiciel Alize-LCPC, notamment en termes de déformations admissibles et de contraintes, comme indiqué dans la figure IV.4.



Figure IV.4: résultat de la vérification de la structure 1 obtenue par le logiciel alize

Pour remédier à cela, j'ai procédé à une augmentation de l'épaisseur des couches concernées, jusqu'à obtention d'une structure conforme aux exigences normatives. Comme indiqué dans la figure IV.5.

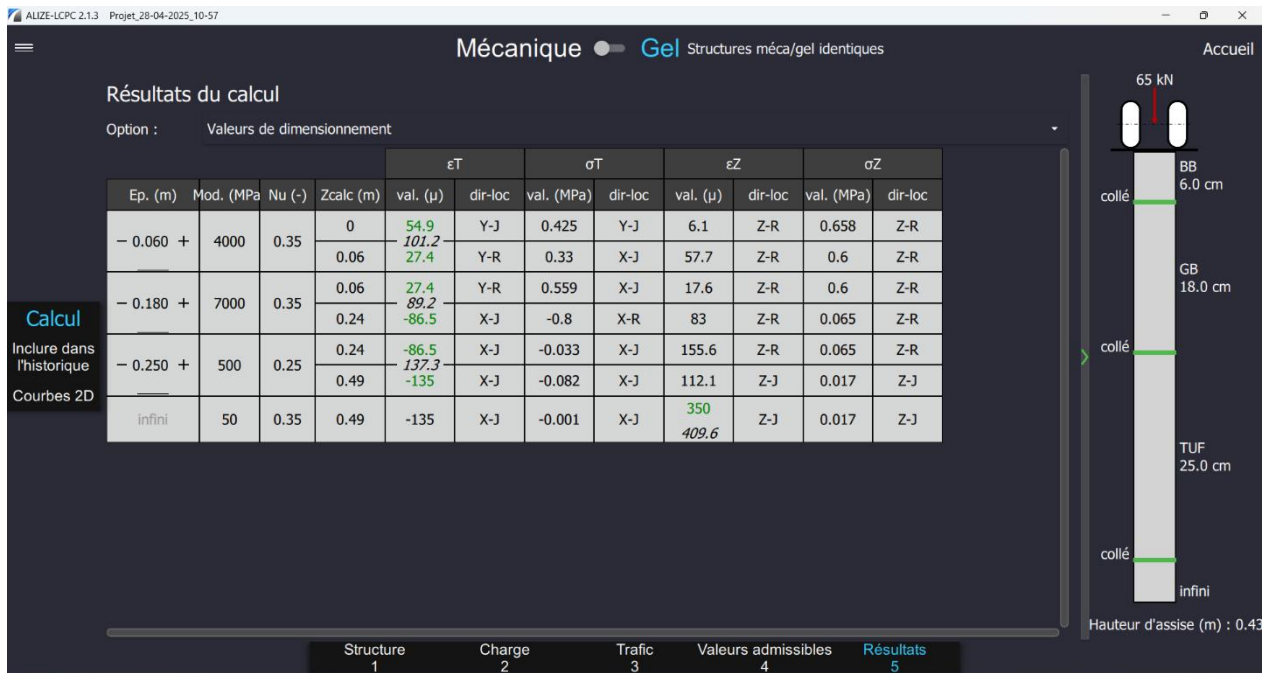


Figure IV.5: résultat de la structure 1 modifiée

Structure 2 :

La structure présentée dans la figure IV.6 ne satisfait pas aux critères de déformation admissible du sol support, comme le montre la simulation effectuée sur le logiciel Alize.

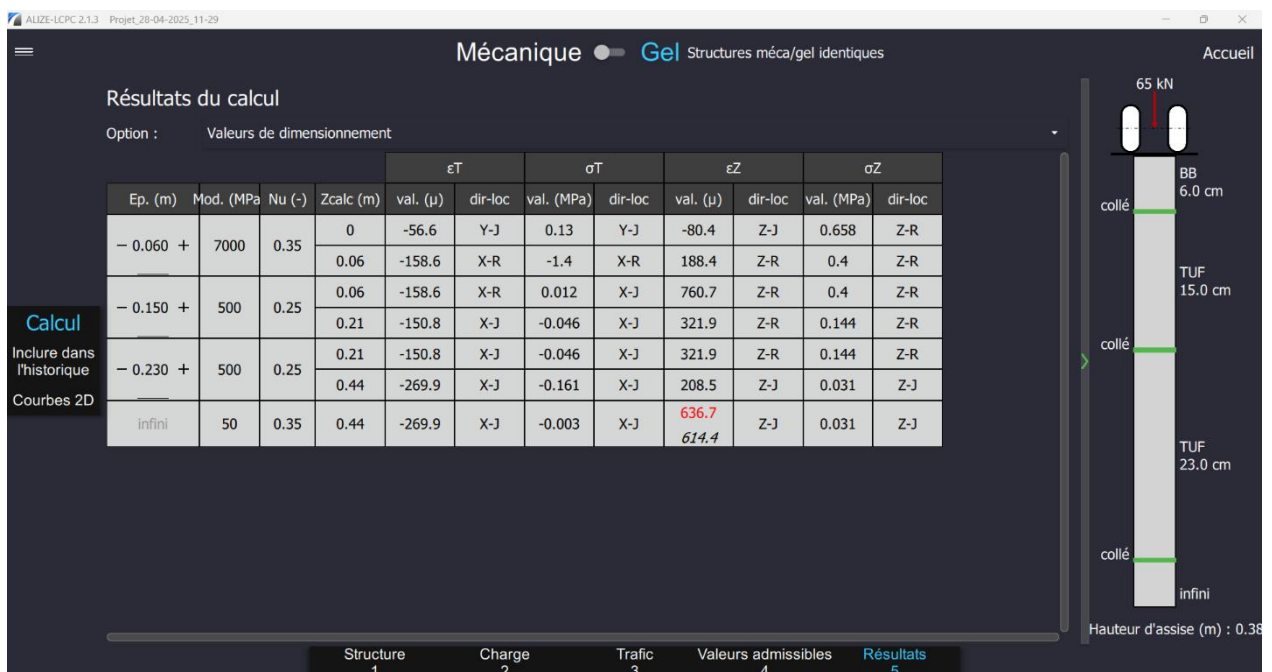


Figure IV.6: résultat de la vérification de la structure 2 obtenue par le logiciel alize

Pour remédier à cette non-conformité, j'ai procédé à une légère augmentation de l'épaisseur de la couche de base afin d'assurer la vérification des critères mécaniques. (Voir figure IV.7)

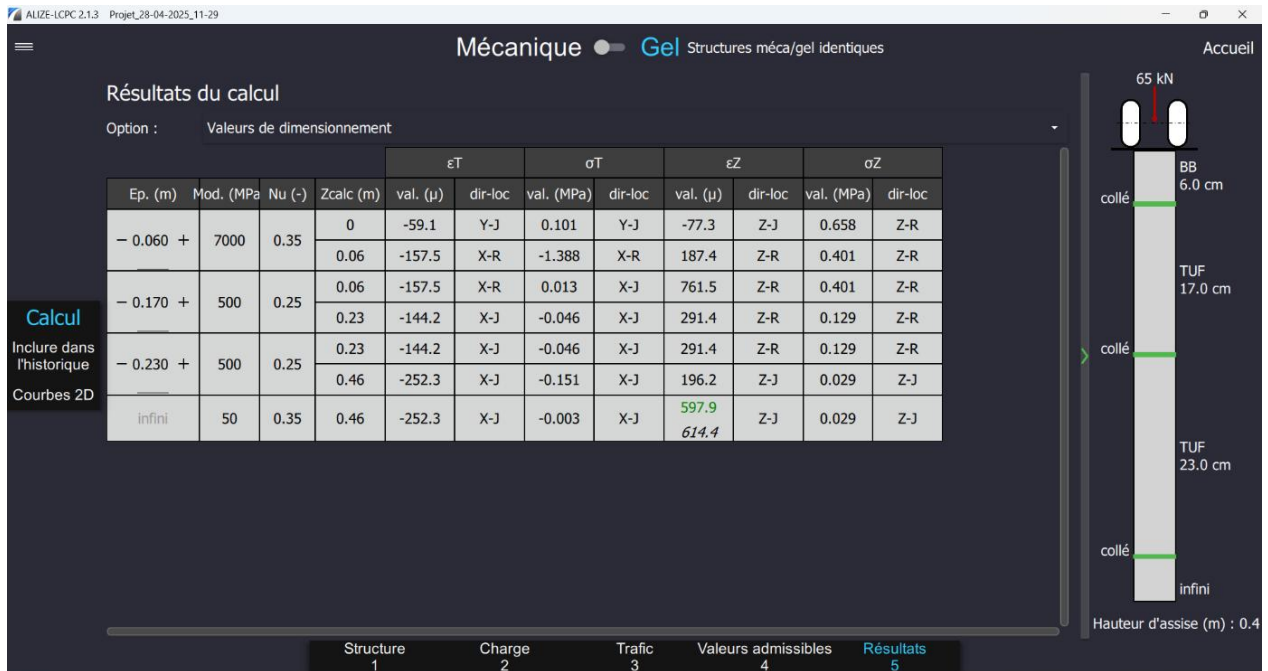


Figure IV.7: résultat de la structure 2 modifiée

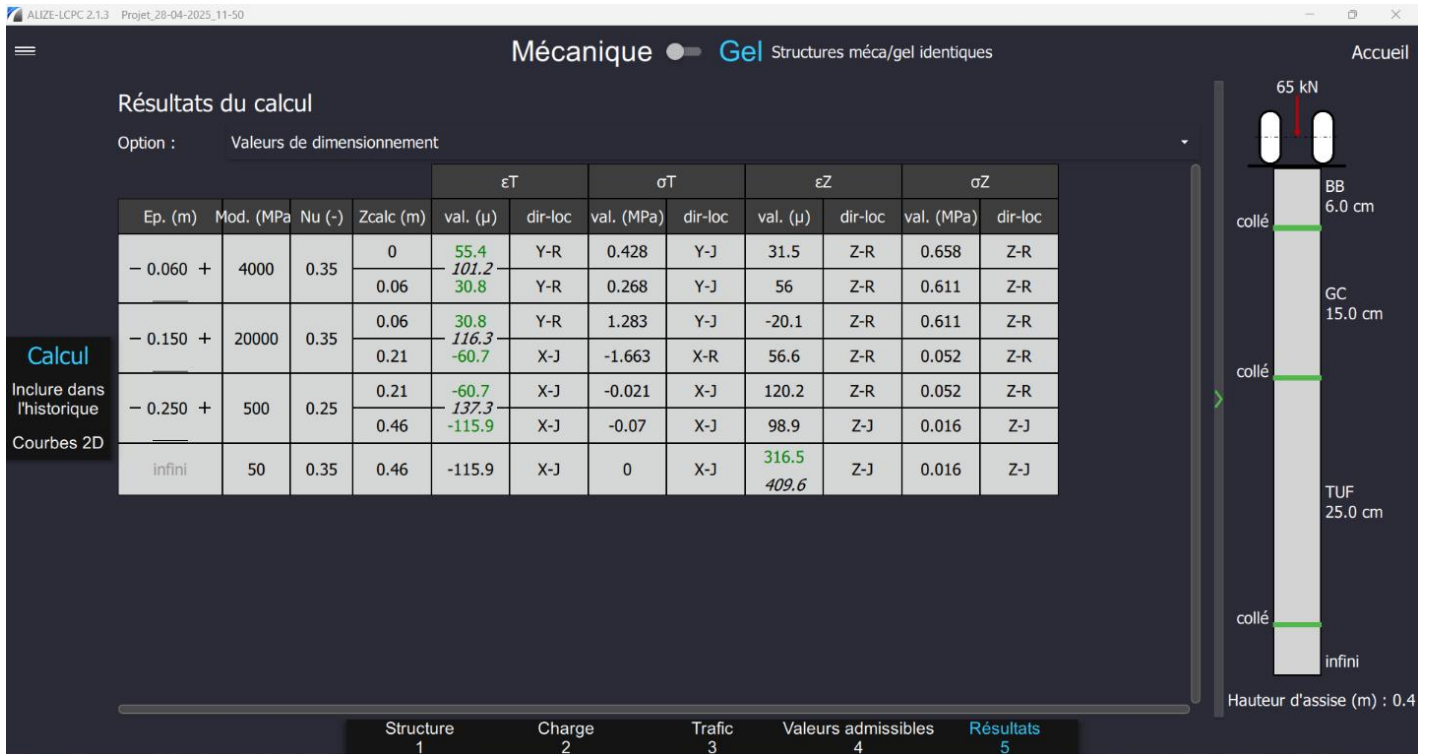
Structure 3 :

Cette structure aussi ne vérifiait pas les critères de performance lors de la simulation sur le logiciel Alize-LCPC, notamment en termes de déformations admissibles et de contraintes, comme indiqué dans la figure IV.8.



Figure IV.8: résultat de la vérification de la structure 3 obtenue par le logiciel alize

Alors, j'ai redimensionné la structure pour vérifier qu'elle respecte les conditions, comme



montré dans la figure IV.9 ci-dessus :

Figure IV.9: résultat de la structure 3 modifiée

Structure 4 :

Cette structure a bien été vérifiée par rapport aux conditions de déformation et de contrainte.

Comme montré dans la figure IV.10 ci-dessus :

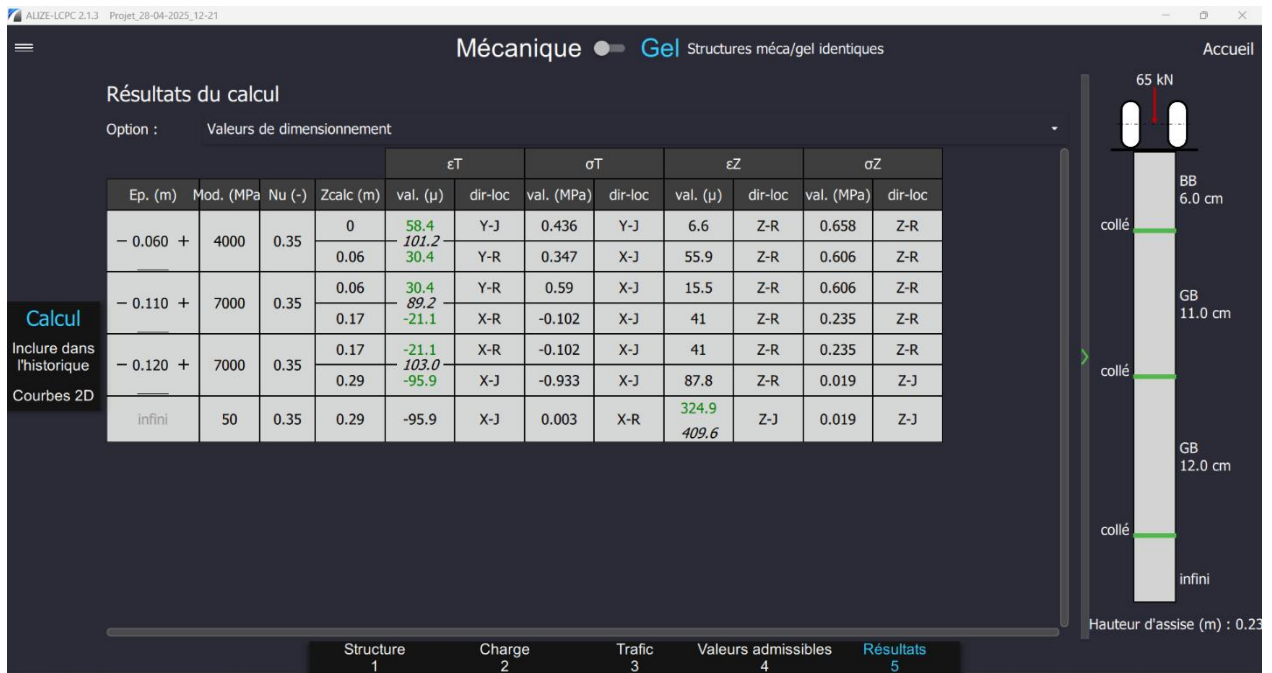


Figure IV.10: résultat de la vérification de la structure 4 obtenue par le logiciel alize

Structure 5 :

La figure IV.11 ci-dessus indique que la structure respectait bien les conditions de déformation et de contrainte, mais j'ai réduit les épaisseurs pour optimiser le coût, tout en maintenant la vérification des conditions de déformation et de contrainte. (Voir figure IV.12)

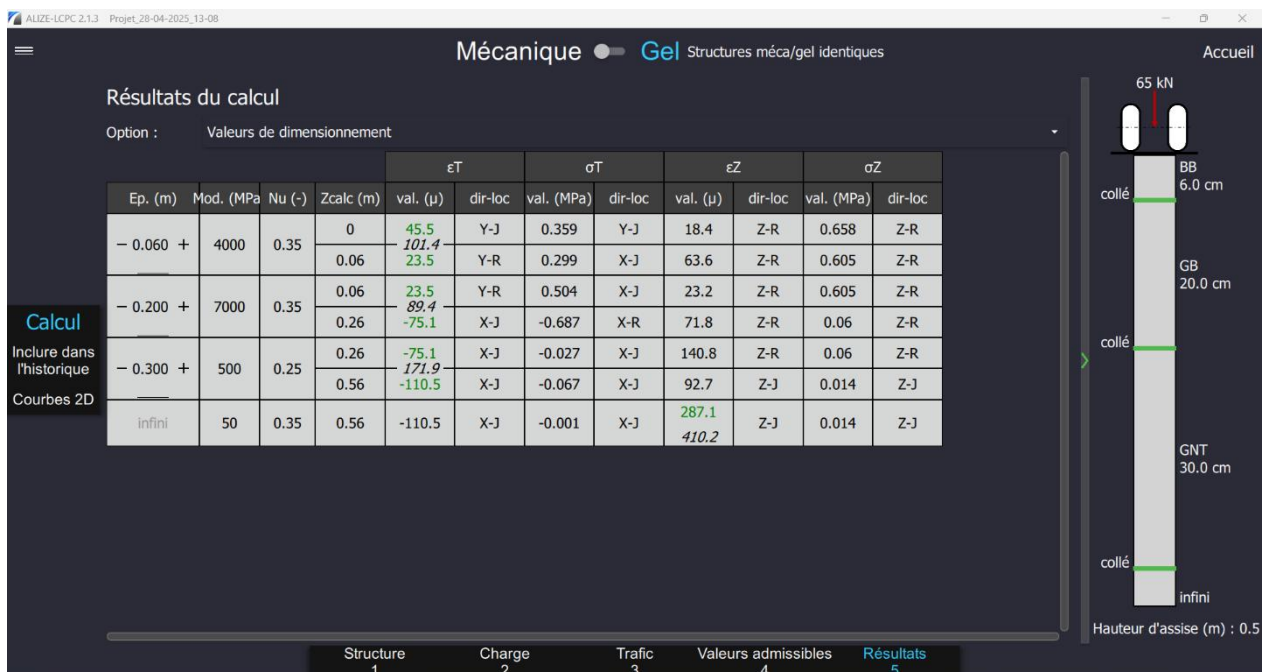


Figure IV.11: résultat de la vérification de la structure obtenue par le logiciel alize

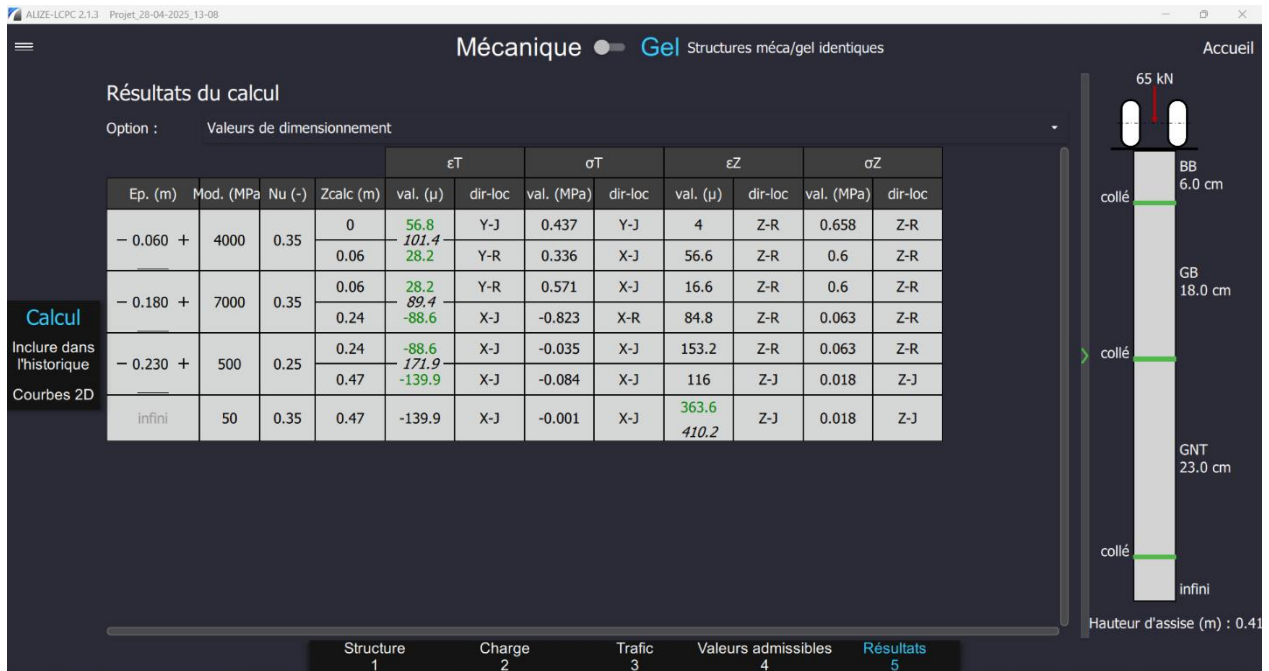


Figure IV.12: résultat de la structure 5 modifiée

Alors les structures définitives sont :

6BB	6BB	6BB	6BB	6BB
18GB	17TUF	15GC	11GB	18GB
25TUF	23TUF	25TUF	12GB	23GNT

IV.3 Conclusion :

Le dimensionnement et la vérification mécanique des structures de chaussée représentent une étape cruciale dans la conception d'un projet routier. Cette phase conditionne non seulement la performance structurelle de la chaussée, mais aussi sa durabilité et sa rentabilité à long terme. Toutefois, dans un contexte marqué par la complexité des exigences techniques, la variabilité des conditions d'exploitation et les contraintes économiques et environnementales, le processus décisionnel ne peut se limiter à des calculs normatifs ou à des approches déterministes classiques.

C'est pourquoi l'intégration d'une analyse multicritère, fondée sur des méthodes floues telles que **Fuzzy AHP**, **Fuzzy TOPSIS** et **Fuzzy VIKOR**, s'avère particulièrement pertinente. Ces approches permettent de comparer objectivement plusieurs alternatives de structures en tenant compte de critères multiples — parfois contradictoires — tout en intégrant les incertitudes

liées aux données techniques et aux jugements d'experts. En adoptant cette démarche, il devient possible d'identifier des solutions optimales qui répondent simultanément aux impératifs de performance mécanique, de maîtrise des coûts et de respect de l'environnement.

Ainsi, le recours aux méthodes multicritères floues constitue une avancée méthodologique notable pour le dimensionnement des chaussées, en offrant une vision plus globale, plus réaliste et mieux adaptée aux exigences actuelles du développement durable et de la gestion rationnelle des infrastructures routières. Le chapitre suivant présentera l'application concrète de cette approche dans le cadre d'un projet routier situé dans la wilaya de Mostaganem.

**Chapitre V : évaluation multicritère
floue et sélection optimale de la
structure de chaussée**

V.1 Introduction :

Le choix d'une structure de chaussée est une décision stratégique essentielle pour garantir la sécurité, la durabilité et l'efficacité d'un réseau routier. Dans un contexte de développement durable et de gestion des infrastructures, cette décision doit prendre en compte une multitude de critères techniques, économiques et environnementaux. Cependant, ces critères sont souvent conflictuels et comportent un degré d'incertitude, notamment en ce qui concerne les coûts, les performances mécaniques et l'impact environnemental des différentes alternatives.

Dans ce contexte, les méthodes multicritères floues sont particulièrement adaptées, car elles permettent de gérer l'incertitude et la subjectivité qui caractérisent souvent les jugements humains. Parmi ces méthodes, Fuzzy VIKOR, Fuzzy AHP et Fuzzy TOPSIS se distinguent par leur capacité à traiter simultanément plusieurs critères de décision, tout en prenant en compte des informations floues et imprécises.

Pour chaque projet routier, il est donc nécessaire de procéder à une analyse multicritère détaillée et comparative des diverses solutions afin d'établir les atouts de chacune d'entre elles.

V.2 Présentation des critères :

Le choix de la meilleure structure de chaussée repose sur une évaluation multicritère rigoureuse. En effet chaque structure peut présenter des avantages et des inconvénients selon plusieurs aspects, notamment économique, géométriques et mécaniques. Afin de garantir une comparaison cohérente et objective entre les différentes alternatives, il est essentiel d'identifier les critères de décision pertinents et de comprendre leur impact sur les performances globales de la chaussée.

Dans cette étude, quatre critères principaux ont été retenus pour l'analyse multicritère, en se basant sur la littérature technique, les normes de dimensionnement et les objectifs du projet. Ces critères sont :

V.2.1. Le coût de la structure

Le coût de la structure représente l'ensemble des dépenses engagées pour la réalisation d'une chaussée, incluant l'achat des matériaux, la main-d'œuvre, le transport et la mise en œuvre sur le terrain. Ce critère est fondamental car il conditionne la **faisabilité financière** du projet. L'objectif est de parvenir à un **compromis optimal** entre **efficacité technique** et **maîtrise budgétaire**, en tenant compte des **ressources disponibles** et du contexte économique du maître d'ouvrage. Dans le cadre d'une évaluation multicritère, il est essentiel d'intégrer ce critère pour comparer les variantes de manière **rationnelle et équilibrée**.

V.2.2. L'épaisseur totale

L'épaisseur totale de la structure de chaussée représente la somme des hauteurs des différentes couches constitutives. Une épaisseur excessive peut rendre le compactage difficile, en particulier en profondeur, compromettant ainsi la densité finale des matériaux. Un compactage insuffisant engendre des vides résiduels, à l'origine de déformations telles que les

tassements, les fissures ou les ornières. L'objectif est donc de minimiser l'épaisseur totale, tout en assurant une répartition judicieuse entre les couches, afin de garantir une performance mécanique optimale et une durabilité accrue de la chaussée.

V.2.3 La déflexion :

La déflexion représente la déformation verticale de la chaussée sous l'effet d'une charge roulante, mesurée en surface. Elle constitue un indicateur essentiel de la rigidité et de la capacité portante de la structure. Une déflexion trop élevée peut révéler une insuffisance de portance ou une fatigue prématurée des couches, tandis qu'une déflexion trop faible peut entraîner un surdimensionnement coûteux.

Selon les recommandations techniques (ex. : CTTT, AASHTO), la valeur admissible de la déflexion varie selon la classe de trafic et le type de structure ; à titre indicatif, elle est souvent de l'ordre de 1.0 mm (soit 100/100 mm) pour les structures destinées à un trafic modéré à lourd.

Ainsi, le contrôle de la déflexion permet d'assurer un équilibre entre performance, sécurité et économie, ce qui en fait un critère incontournable dans l'évaluation multicritère des structures de chaussée. [19]

V.2.4. Rayon de courbure

Le rayon de courbure est un paramètre mécanique dérivé des modules d'élasticité des différentes couches de la chaussée. Il reflète la capacité de la structure à répartir les efforts verticaux et à absorber les déformations sous l'effet des charges répétées. Un rayon élevé traduit une bonne flexibilité et une résistance accrue à la fissuration. Ce critère permet donc d'évaluer la performance mécanique de la chaussée. L'objectif est de maximiser le rayon de courbure afin d'augmenter la résilience et la longévité de la structure. [19]

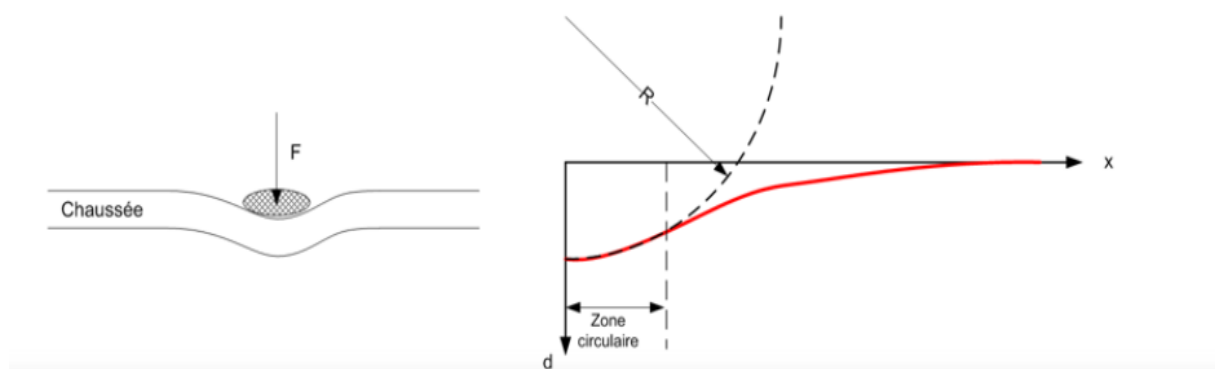


Figure V.1 : Bassin de déflexion et rayon de courbure

V.3 Présentation des alternatives :

Les structures de chaussée retenues comme alternatives dans le cadre de cette étude correspondent aux solutions déjà dimensionnées au chapitre IV à l'aide des méthodes CBR et CTTT. Ces cinq structures seront soumises à une évaluation comparative en s'appuyant sur

des méthodes d'aide à la décision multicritère en environnement flou, à savoir le Fuzzy AHP, le Fuzzy TOPSIS et le Fuzzy VIKOR. L'objectif est d'identifier, à partir d'un ensemble de critères de performance, la structure la plus appropriée aux conditions du projet. Les alternatives sont ainsi définies et illustrées dans le tableau V.1 ci-après :

- **Structure 1** → Alternative 1
- **Structure 2** → Alternative 2
- **Structure 3** → Alternative 3
- **Structure 4** → Alternative 4
- **Structure 5** → Alternative 5

Tableau V.1 : Présentation des alternatives de structure de chaussée

Alternative	Méthode de dimensionnement	Structure de chaussée (de haut en bas)	Vérification	Particularités
Alternative 1	CBR	6 cm BB 18 cm GB 25 cm TUF	Conforme (ALIZE)	Structure équilibrée, bonne portance, solution classique
Alternative 2	CBR	6 cm BB 17 cm TUF 23 cm TUF	Conforme (ALIZE)	Structure homogène, bonne répartition des contraintes
Alternative 3	CBR	6 cm BB 15 cm GC 23 cm TUF	Conforme (ALIZE)	Haute rigidité, bon comportement en fatigue
Alternative 4	CTTP	6 cm BB 11 cm GB 12 cm GB	Limite (ALIZE)	Épaisseur totale réduite, plus économique mais risquée
Alternative 5	CTTP	6 cm BB 18 cm GB 23 cm GNT	Conforme (ALIZE)	Compromis coût/performance, meilleure constructibilité

V.3.1 Évaluation technique et économique des alternatives :

V.3.1.1 Coût global de chaque structure :

✓ Prix unitaire des matériaux utilisés :

Les prix indiqués dans le tableau V.2 sont des estimations basées sur les coûts moyens du marché local. Ils serviront au calcul du coût total de chaque structure de chaussée proposée.

Tableau V.2 : prix unitaire de chaque matériau

Matériaux	Unité	Prix unitaire
Béton bitumineux (BB)	t	7500.00
Grave Bitume (GB)	t	6500.00
TUF	m^3	1000.00
Grave non traité (GNT)	m^3	1200.00
Grave Concassé (GC)	m^3	1600.00

✓ Le coût de chaque structure sera estimé pour une section de chaussée de 1000 mètres de longueur et 7.2 mètres de largeur.

Dans le cadre de l'estimation du coût global des matériaux utilisés dans le projet, certaines quantités sont exprimées en tonnes (T) tandis que d'autres le sont en mètres cubes (m^3). Afin de permettre une comparaison cohérente et une agrégation fiable des coûts, il est nécessaire de ramener toutes les quantités à une unité homogène, généralement le mètre cube, en utilisant la masse volumique (densité) propre à chaque matériau. Cette conversion permet de calculer le prix total de chaque matériau, indépendamment de son unité initiale, puis de les additionner pour obtenir un coût global précis. Pour cela, les densités moyennes des matériaux ont été prises en compte, selon les valeurs généralement admises dans la littérature technique.

On a :

$$\text{Volume } (m^3) = \frac{\text{Masse } (t)}{\text{Densité } (t/m^3)} \quad \text{V.1}$$

Avec la densité moyenne d'un matériau bitumineux est $2.4 t/m^3$

Donc : **1t égale à 0.416 m^3**

Alors :

- **Pour le béton bitumineux**

$$7500 \text{ DA/t} = 7500 \times 0.416 = 3120 \text{ DA/m}^3$$

- Pour le grave bitumineux

$$6500 \text{ DA/t} = 6500 \times 0.416 = 2704 \text{ DA/m}^3$$

Tableau V.3: coût global des différentes structures

Structures	Coût par couche (DA)		Coût global (DA)
Structure 1 6BB+10GB+22TUF	CR	$0.06 \times 7.2 \times 1000 \times 3120 = 1\ 347\ 840$	6 652 224
	CB	$0.18 \times 7.2 \times 1000 \times 2704 = 3\ 504\ 384$	
	CF	$0.25 \times 7.2 \times 1000 \times 1000 = 1\ 800\ 000$	
Structure 2 6BB+15TUF+23TUF	CR	$0.06 \times 7.2 \times 1000 \times 3120 = 1\ 347\ 840$	4 227 840
	CB	$0.17 \times 7.2 \times 1000 \times 1000 = 1\ 224\ 000$	
	CF	$0.23 \times 7.2 \times 1000 \times 1000 = 1\ 656\ 000$	
Structure 3 6BB+12GC+22TUF	CR	$0.06 \times 7.2 \times 1000 \times 3120 = 1\ 347\ 840$	4 875 840
	CB	$0.15 \times 7.2 \times 1000 \times 1600 = 1\ 728\ 000$	
	CF	$0.25 \times 7.2 \times 1000 \times 1000 = 1\ 800\ 000$	
Structure 4 6BB+10GB+12GB	CR	$0.06 \times 7.2 \times 1000 \times 3120 = 1\ 347\ 840$	5 825 664
	CB	$0.11 \times 7.2 \times 1000 \times 2704 = 2\ 141\ 568$	
	CF	$0.12 \times 7.2 \times 1000 \times 2704 = 2\ 336\ 256$	
Structure 5 6BB+20GB+30GNT	CR	$0.06 \times 7.2 \times 1000 \times 3120 = 1\ 347\ 840$	6 839 424
	CB	$0.18 \times 7.2 \times 1000 \times 2704 = 3\ 504\ 384$	
	CF	$0.23 \times 7.2 \times 1000 \times 1200 = 1\ 987\ 200$	

✓ **Analyse :**

Structure 2 est la plus économique, avec un coût de 4,2 millions DA, ce qui constitue un avantage notable dans un contexte de maîtrise des dépenses.

Structure 3 offre également un bon rapport cout-performance, avec un coût modéré de 4,87 millions DA.

Structure 4 présente un coût intermédiaire de 5,82 millions DA malgré son faible volume, car la nature des matériaux utilisés.

Structure 1 et **5** sont les plus coûteuses, dépassant les 6,6 millions, ce qui peut réduire leur attractivité si la performance technique n'est pas significativement supérieure.

V.3.1.2 L'épaisseur totale des structures :

L'épaisseur totale des structures influence directement la stabilité mécanique, mais aussi les coûts et la qualité du compactage couche par couche.

Les épaisseurs pour chaque structure sont :

- Structure 1 :49 cm
- Structure 2 :46 cm
- Structure 3 :46 cm
- Structure 4 :29 cm
- Structure 5 :47 cm

✓ Analyse :

Structure 1 est la plus épaisse (49 cm), ce qui peut offrir une bonne rigidité, mais il faut prendre en compte les contraintes liées au compactage en plusieurs couches, pouvant entraîner des tassements si la mise en œuvre n'est pas bien contrôlée.

Structure 2, 3 et 5 ont une épaisseur modérée (46-47 cm) ce qui est en général un bon compromis entre performance et facilité de compactage.

Structure 4 présente une épaisseur totale très faible (29 cm), ce qui pourrait être un avantage en termes de réduction des coûts et de facilité de compactage, elle a été pénalisée dans l'analyse multicritère.

En effet, selon les recommandations basées sur la méthode CBR, l'épaisseur équivalente pour un sol donné est d'environ 40 cm. Or, la structure 4 ne satisfait pas à cette exigence, ce qui pourrait compromettre sa capacité portante et sa durabilité face au trafic à long terme.

Par conséquent, malgré sa finesse, cette structure a reçu un poids faible dans l'évaluation multicritère, car elle ne respecte pas les exigences minimales de dimensionnement.

V.3.1.3 Résultat mécaniques relatifs à la déflexion et au rayon de courbure :

Les résultats mécaniques obtenus à l'aide du logiciel ALIZÉ concernent la déflexion maximale et le rayon de courbure, calculés dans un milieu de jumelage afin de mieux représenter les conditions réelles de portance du sol et l'interaction entre les différentes couches de la chaussée.

Structure 1 :

Comme le montre la figure V.2 la structure 1 présente un rayon de courbure de 800 m et une déflexion de 50.1 mm.

✓ Analyse :

Cette structure présente une rigidité moyenne. La déflexion est modérée et le rayon de courbure est acceptable. Elle offre un bon compromis, mais peut être améliorée pour plus de performance.

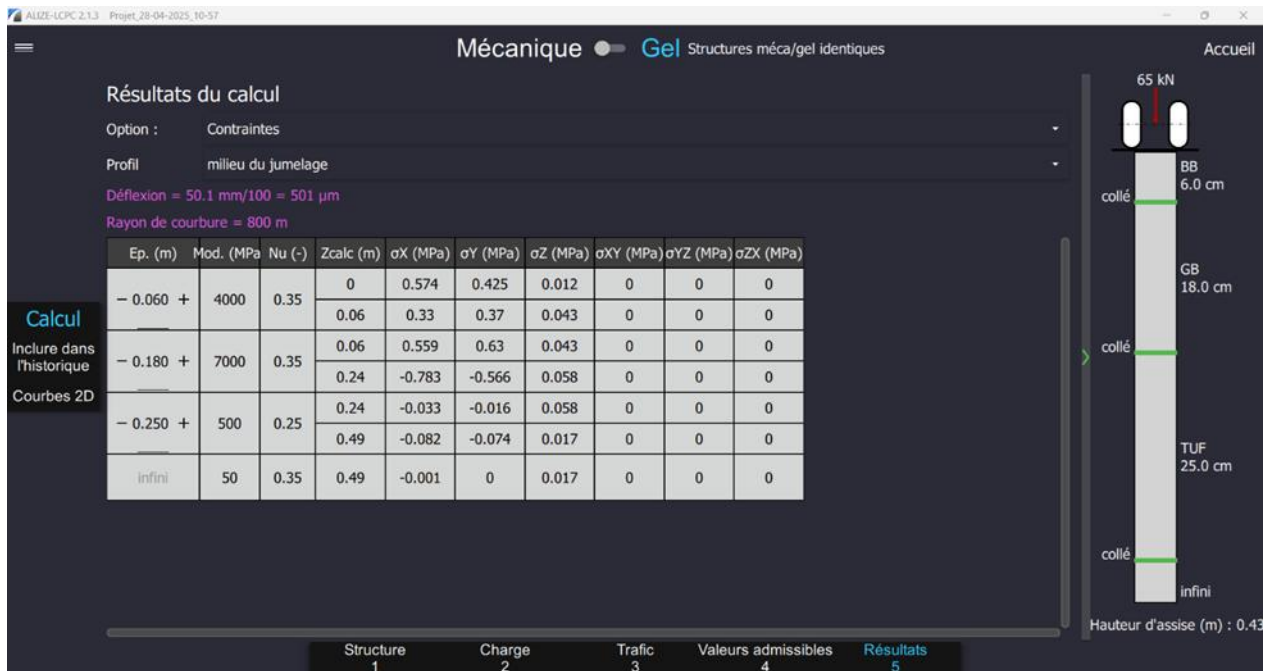


Figure V.2 : résultat mécaniques simulés par Alize-structure 1

Structure 2 :

Comme le montre la figure 2, la structure 2 affiche un rayon de courbure relativement faible de 172 m et une déflexion élevée de 67,9 mm. Ce qui indique une rigidité insuffisante. Elle risque de se tasser rapidement sous le trafic.

✓ Analyse :

C'est la structure la moins performante. Le faible rayon de courbure et la déflexion élevée indiquent une déformabilité importante et une rigidité insuffisante, elle risque de se tasser rapidement sous le trafic.



Figure V.3 : résultat mécaniques simulés par Alize-structure 2

Structure 3 :

Comme illustré dans la figure 3, la structure 3 se distingue par un rayon de courbure élevé de 1137 m et une faible déflexion de 49 mm.

✓ **Analyse :**

Il s'agit de la structure la plus rigide. Le rayon de courbure élevé et la faible déflexion montrent une très bonne résistance mécanique. Elle est bien adaptée pour supporter des charges élevées de manière durable.



Figure V.4 : résultat mécaniques simulés par Alize-structure 3

Structure 4 :

La figure 4 montre que la structure 4 possède un rayon de courbure de 880 m et une déflexion modérée de 52,1 mm, ce qui indique une bonne performance mécanique.

✓ Analyse :

Cette structure montre un bon niveau de performance. Elle est rigide et la déflexion reste modérée, ce qui suggère une stabilité satisfaisante sous trafic.

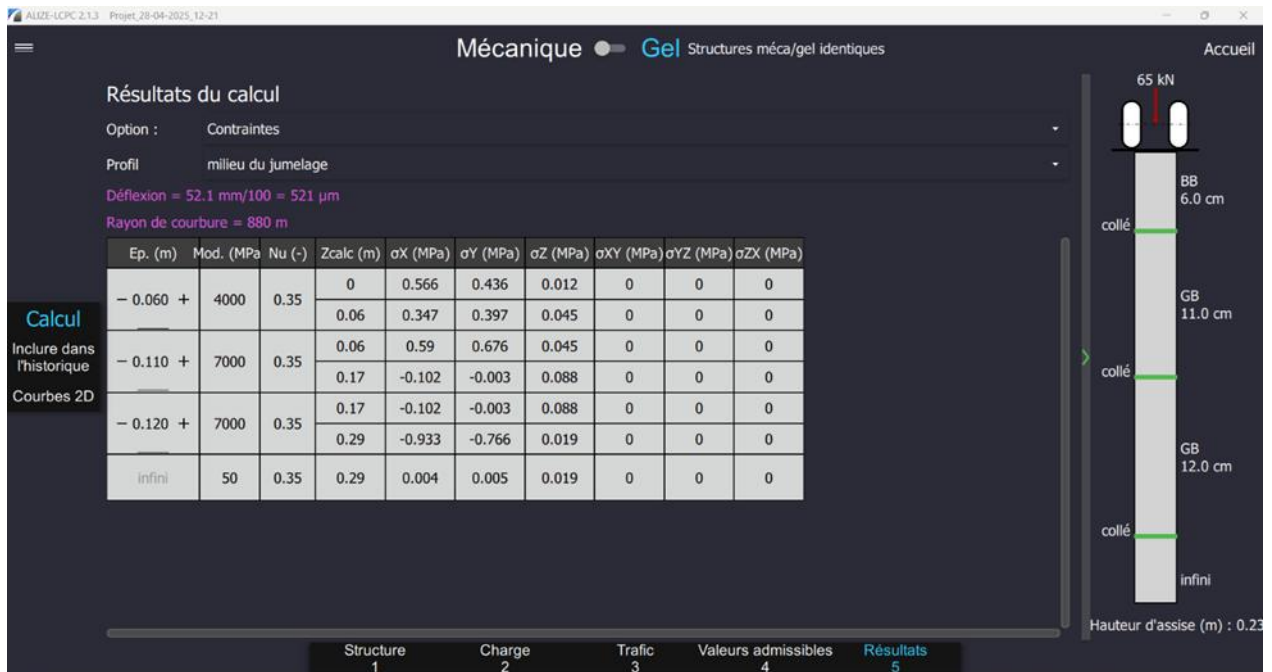


Figure V.5 : résultat mécaniques simulés par Alize-structure 4

Structure 5 :

D'après la figure 5, la structure 5 présente un rayon de courbure de 788 m et une déflexion de 51,1 mm, des valeurs qui traduisent un comportement intermédiaire en termes de rigidité.

✓ Analyse :

La rigidité est correcte, avec une déflexion dans les limites acceptables. Cependant, elle reste légèrement inférieure à celle des structures 3 et 4 en termes de performance globale.

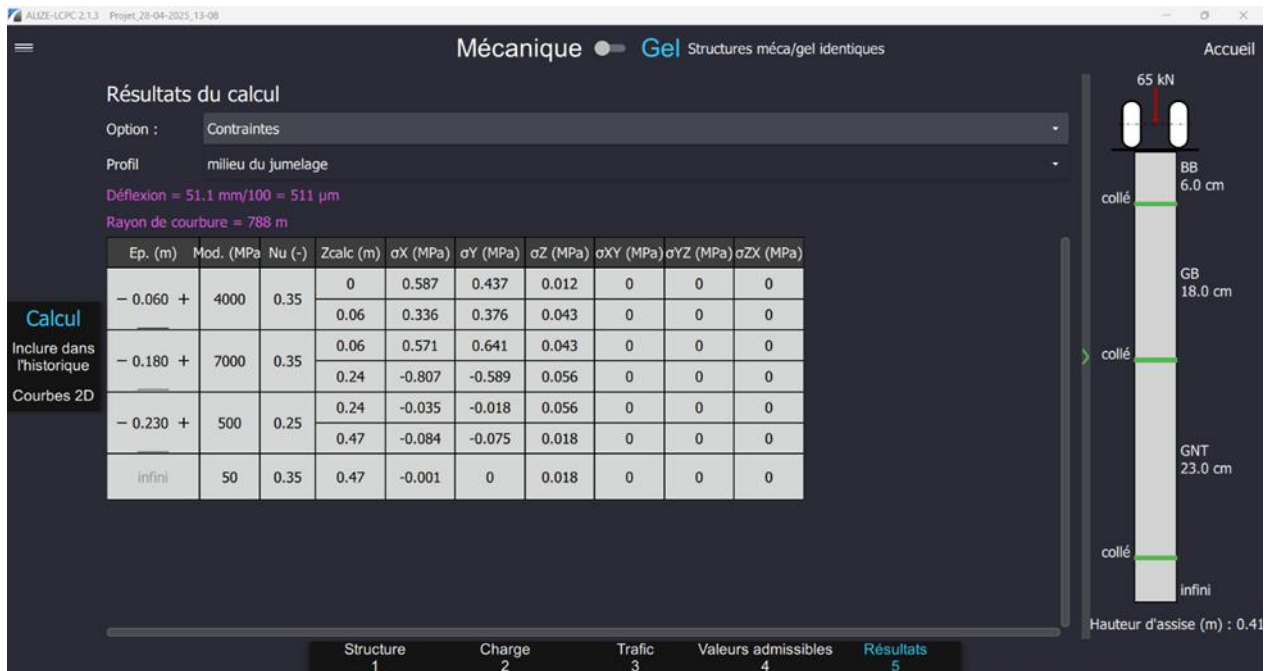


Figure V.6 : résultat mécanique simulés par Alize-structure 5

V.4 Application des méthodes multicritères :

V.4.1 La méthode AHP flou :

Etape 1 : analyse hiérarchique

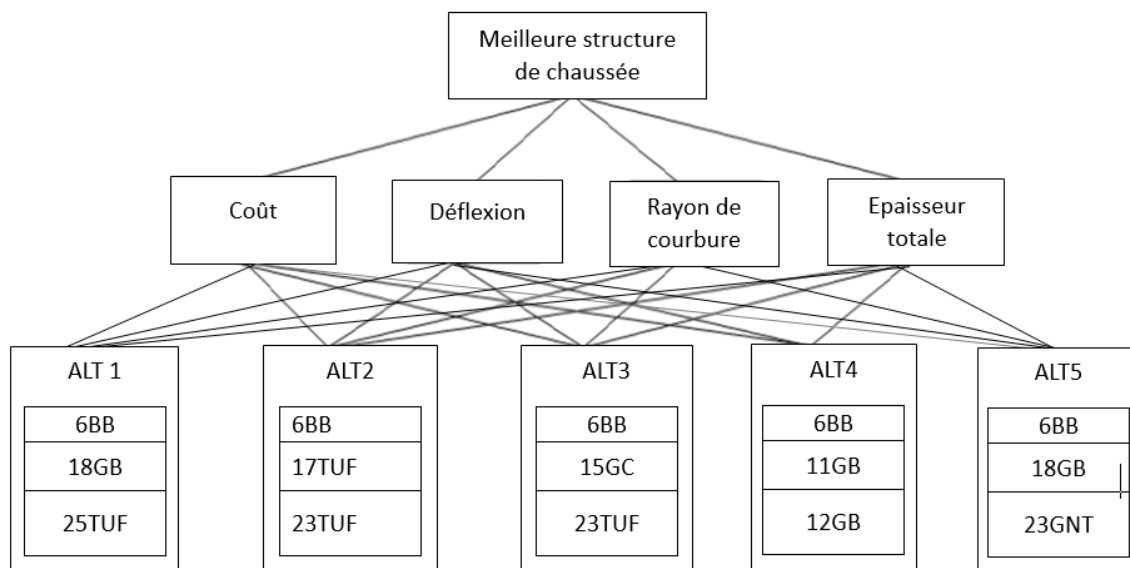


Figure V.7 : Structure de la hiérarchie AHP

Etape 2 : comparaison des alternatives par paires avec flou

Dans cette étape on utilise le tableau V.4

Tableau V.4 : comparaison des critères par paires

(A.Imp)	(F.Imp)	(T.Imp)	(Fb.Imp)	Critères	(Imp.ég)	Critères	(Fb.Imp)	(T.Imp)	(F.Imp)	(A.Imp)
(9,9,9)	(6,7,8)	(4,5,6)	(2,3,4)		(1,1,1)		(2,3,4)	(4,5,6)	(6,7,8)	(9,9,9)
x				Coût		Ep totale				
		x		Coût		Déflexion				
	x			Coût		Rayon de courbure				
				Ep totale		Déflexion			x	
				Ep totale		Rayon de courbure		x		
		x		Déflexion		Rayon de courbure				

Tableau V.5 : matrice de contribution par paire

Critères	Coût	Ep totale	Déflexion	Rayon de courbure
Coût	(1,1,1)	(9,9,9)	(4,5,6)	(6,7,8)
Ep totale	(1/9,1/9,1/9)	(1,1,1)	(1/8,1/7,1/6)	(1/6,1/5,1/4)
Déflexion	(1/6,1/5,1/4)	(6,7,8)	(1,1,1)	(4,5,6)
Rayon de courbure	(1/8,1/7,1/6)	(4,5,6)	(1/6,1/5,1/4)	(1,1,1)

Etape 6 : Calcul des moyennes géométriques à partir de l'équation III.13 et des poids flous à partir de l'équation III.14

Tableau V.6 : les moyennes géométriques

Critères	r_i
Coût	(3.834, 4.213, 4.559)
Ep totale	(0.219, 0.237, 0.216)
Déflexion	(1.414, 1.627, 1.861)
Rayon de courbure	(0.537, 0.615, 0707)
Totale	(6.005, 6.692, 7.388)
Inverse	(0.167, 0.149, 0.135)
Classement	(0.135, 0.149, 0.167)

Tableau V.7 : les poids flous

Critères	w_i
Coût	(0.519, 0.630, 0.759)
Ep totale	(0.030, 0.035, 0.043)
Déflexion	(0.191, 0.243, 0.310)
Rayon de courbure	(0.073, 0.092, 0.118)

Etape 7 : Défuzzification des poids flous à partir de l'équation III.15 et normalisation de ces poids à partir de l'équation III.16

Tableau V.8 : Défuzzification et normalisation des poids flous

Critères	M_i	N_i
Coût	0.636	0.627
Ep total	0.036	0.036
Déflexion	0.248	0.245
Rayon de	0.094	0.093
	1.014	1

Etape 8 : comparaison des critères par paires avec flou

a. Coût :

Tableau V.9: comparaison des alternatives par rapport au critère coût

(A.Imp) (9,9,9)	(F.Imp) (6,7,8)	(T.Imp) (4,5,6)	(Fb.Imp) (2,3,4)	Critères	(Imp.eg) (1,1,1)	Critères	(Fb. Imp) (2,3,4)	(T.Imp) (4,5,6)	(F.Imp) (6,7,8)	(A.Imp) (9,9,9)
				ALT1		ALT2			x	
				ALT1		ALT3			x	
				ALT1		ALT4				x
			x	ALT1		ALT5				
		x		ALT2		ALT3				
				ALT2		ALT4				
	x			ALT2		ALT5				
				ALT3		ALT4			x	
	x			ALT3		ALT5				
X				ALT4		ALT5				

Tableau V.10: matrice de contribution par paire

Alternatives	ALT1	ALT2	ALT3	ALT4	ALT5
ALT1	(1,1,1)	(1/8,1/7,1/6)	(1/8,1/7,1/6)	(1/9,1/9,1/9)	(2, 3,4)
ALT2	(6,7,8)	(1,1,1)	(4,5,6)	(1/6,1/5,1/4)	(6,7,8)
ALT3	(6,7,8)	(1/6,1/5,1/4)	(1,1,1)	(1/8,1/7,1/6)	(6,7,8)
ALT4	(9,9,9)	(4,5,6)	(6,7,8)	(1,1,1)	(9,9,9)
ALT5	(1/4,1/3,1/2)	(1/8,1/7,1/6)	(1/8,1/7,1/6)	(1/9,1/9,1/9)	(1,1,1)

Tableau V.11 : les moyennes géométriques

ALTERNATIVES	r_i
A1	(0.322, 0.369, 0.415)
A2	(1.888, 2.178, 2.491)
A3	(0.944, 1.070, 1.217)
A4	(4.547, 4.904, 5.223)
A5	(0.213, 0.238, 0.274)
Total	(7.914, 8.757, 9.621)
Inverse	(0.126, 0.114, 0.104)
Classement	(0.104, 0.114, 0.126)

Tableau V.12 : les poids flous

ALT	w_i
ALT1	(0.033, 0.042, 0.052)
ALT2	(0.196, 0.249, 0.315)
ALT3	(0.098, 0.122, 0.154)
ALT4	(0.473, 0.560, 0.660)
ALT5	(0.022, 0.027, 0.035)

Tableau V.13 : Défuzzification et normalisation des poids flous

ALT	M_i	N_i
ALT1	0.043	0.042
ALT2	0.253	0.250
ALT3	0.125	0.123
ALT4	0.564	0.557
ALT5	0.028	0.028
	1.013	1

b. Epaisseur totale :

Tableau V.13: comparaison des alternatives par rapport au critère épaisseur totale

(A.Imp) (9,9,9)	(F.Imp) (6,7,8)	(T.Imp) (4,5,6)	(Fb.Imp) (2,3,4)	Critères	(Imp.eg) (1,1,1)	Critères	(Fb.Imp) (2,3,4)	(T.Imp) (4,5,6)	(F.Imp) (6,7,8)	(A.Imp) (9,9,9)
			x	ALT1		ALT2				
			x	ALT1		ALT3				
		x		ALT1		ALT4				
			x	ALT1		ALT5				
				ALT2	x	ALT3				
	x			ALT2		ALT4				
				ALT2		ALT5	x			
	x			ALT3		ALT4				
				ALT3		ALT5	x			
				ALT4		ALT5				

Tableau V.14: matrice de contribution par paire

Alternatives	ALT1	ALT2	ALT3	ALT4	ALT5
ALT1	(1,1,1)	(2, 3,4)	(2, 3,4)	(4,5,6)	(2, 3,4)
ALT2	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	(1,1,1)	(6,7,8)	(1/4,1/3,1/2)
ALT3	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	(1,1,1)	(6,7,8)	(1/4,1/3,1/2)
ALT4	(1/6,1/5,1/4)	(1/8,1/7,1/6)	(1/8,1/7,1/6)	(1,1,1)	(1/8,1/7,1/6)
ALT5	(1/4,1/3,1/2)	(2, 3,4)	(2, 3,4)	(6,7,8)	(1,1,1)

Tableau V.15 : les moyennes géométriques

ALTERNATIVES	r_i
ALT1	(2, 2.667, 3.288)
ALT2	(0.822, 0.951, 1.149)
ALT3	(0.822, 0.951, 1.149)
ALT4	(0.201, 0.226, 0.259)
ALT5	(1.431, 1.838, 2.297)
Total	(5.275, 6.633, 8.141)
Inverse	(0.190, 0.151, 0.123)
Classement	(0.123, 0.151, 0.190)

Tableau V.16 : les poids flous

ALT	w_i
ALT1	(0.246, 0.402, 0.623)
ALT2	(0.101, 0.143, 0.218)
ALT3	(0.101, 0.143, 0.218)
ALT4	(0.025, 0.034, 0.049)
ALT5	(0.176, 0.277, 0.435)

Tableau V.17 : Défuzzification et normalisation des poids flous

ALT	M_i	N_i
ALT1	0.424	0.398
ALT2	0.154	0.145
ALT3	0.154	0.145
ALT4	0.036	0.034
ALT5	0.296	0.278
	1.064	1

c. Déflexion :

Tableau V.18: comparaison des alternatives par rapport au critère déflexion

(A.Imp) (9,9,9)	(F.Imp) (6,7,8)	(T.Imp) (4,5,6)	(Fb.Imp) (2,3,4)	Critères	(Imp.eg) (1,1,1)	Critères	(Fb.Imp) (2,3,4)	(T.Imp) (4,5,6)	(F.Imp) (6,7,8)	(A.Imp) (9,9,9)
	x			ALT1		ALT2				
				ALT1		ALT3		x		
		x		ALT1		ALT4				
				ALT1		ALT5	x			
				ALT2		ALT3			x	
				ALT2		ALT4		x		
				ALT2		ALT5		x		
	x			ALT3		ALT4				
		x		ALT3		ALT5				
				ALT4		ALT5	x			

Tableau V.19: matrice de contribution par paire

Alternatives	ALT1	ALT2	ALT3	ALT4	ALT5
ALT1	(1,1,1)	(6,7,8)	(1/6,1/5,1/4)	(4,5,6)	(1/4,1/3,1/2)
ALT2	(1/8,1/7,1/6)	(1,1,1)	(1/8,1/7,1/6)	(1/6,1/5,1/4)	(1/6,1/5,1/4)
ALT3	(6,7,8)	(6,7,8)	(1,1,1)	(6,7,8)	(4,5,6)
ALT4	(1/6,1/5,1/4)	(1/6,1/5,1/4)	(1/8,1/7,1/6)	(1,1,1)	(1/4,1/3,1/2)
ALT5	(2, 3,4)	(4,5,6)	(1/6,1/5,1/4)	(2, 3,4)	(1,1,1)

Tableau V.20 : les moyennes géométriques

ALTERNATIVES	r_i
ALT1	(1, 1.185, 1.431)
ALT2	(0.213, 0.241, 0.280)
ALT3	(3.866, 4.435, 4.983)
ALT4	(0.244, 0.286, 0.349)
ALT5	(1.217, 1.552, 2.888)
Total	(6.540, 7.698, 8.932)
Inverse	(0.153, 0.130, 0.112)
Classement	(0.112, 0.130, 0.153)

Tableau V.21: les poids flous

ALT	w_i
ALT1	(0.112, 0.154, 0.219)
ALT2	(0 .024,0.031, 0.043)
ALT3	(0 .433,0.576, 0.762)
ALT4	(0.027, 0.034, 0.053)
ALT5	(0.136, 0.202, 0.289)

Tableau V.22 : Défuzzification et normalisation des poids flous

ALT	M_i	N_i
ALT1	0.162	0.156
ALT2	0.033	0.032
ALT3	0.590	0.572
ALT4	0.039	0.038
ALT5	0.209	0.202
	1.033	1

d. Rayon de courbure :

Tableau V.23: comparaison des alternatives par rapport au critère rayon de courbure

(A.Imp) (9,9,9)	(f.Imp) (6,7,8)	(T.Imp) (4,5,6)	(A.Imp) (2,3,4)	Critères	(A.Imp) (1,1,1)	Critères	(A.Imp) (2,3,4)	(A.Imp) (4,5,6)	(A.Imp) (6,7,8)	(A.Imp) (9,9,9)
		x		ALT1		ALT2				
				ALT1		ALT3			x	
				ALT1	x	ALT4				
				ALT1		ALT5	x			
				ALT2		ALT3			x	
				ALT2		ALT4		x		
				ALT2		ALT5		x		
		x		ALT3		ALT4				
	x			ALT3		ALT5				
		x		ALT4		ALT5				

Tableau V.24: matrice de contribution par paire

Alternatives	ALT1	ALT2	ALT3	ALT4	ALT5
ALT1	(1,1,1)	(4,5,6)	(1/8,1/7,1/6)	(1,1,1)	(1/4,1/3,1/2)
ALT2	(1/6,1/5,1/4)	(1,1,1)	(1/8,1/7,1/6)	(1/6,1/5,1/4)	(1/6,1/5,1/4)
ALT3	(6,7,8)	(6,7,8)	(1,1,1)	(1/6,1/5,1/4)	(6,7,8)
ALT4	(1,1,1)	(4,5,6)	(1/6,1/5,1/4)	(1,1,1)	(4,5,6)
ALT5	(2, 3,4)	(4,5,6)	(1/8,1/7,1/6)	(1/6,1/5,1/4)	(1,1,1)

Tableau V.25: les moyennes géométriques

ALTERNATIVES	r_i
ALT1	(0.660, 0.750, 0.871)
ALT2	(0.225, 0.258, 0.304)
ALT3	(3.866, 4.435, 4.983)
ALT4	(1.217, 1.380, 1.552)
ALT5	(0.699, 0.844, 1)
Total	(6.667, 7.667, 8.710)
Inverse	(0.150, 0.130, 0.115)
Classement	(0.115, 0.130, 0.150)

Tableau V.26: les poids flous

ALT	w_i
ALT1	(0.076, 0.098, 0.131)
ALT2	(0.026, 0.034, 0.046)
ALT3	(0.444, 0.578, 0.747)
ALT4	(0.140, 0.180, 0.233)
ALT5	(0.080, 0.110, 0.150)

Tableau V.27: Défuzzification et normalisation des poids flous

ALT	M_i	N_i
ALT1	0.101	0.099
ALT2	0.035	0.034
ALT3	0.590	0.576
ALT4	0.184	0.180
ALT5	0.113	0.111
	1.024	1

Tableau V.28 : résultats finals du poids de chaque alternative

Critères	Poids	Alternatives				
		A1	A2	A3	A4	A5
Coût	0.627	0.042	0.250	0.123	0.557	0.028
Ep totale	0.036	0.398	0.145	0.145	0.034	0.278
Déflexion	0.245	0.156	0.032	0.572	0.038	0.202
R courbure	0.093	0.099	0.034	0.576	0.180	0.111
Total	1	0.695	0.461	1.416	0.809	0.619
	Moyenne	0.174	0.115	0.354	0.202	0.155

V.4.2 La méthode TOPSIS Flou :

Etape 1 : d'après le tableau III.2 de l'échelle d'importance, on attribue un degré d'importance à chaque critère par rapport à l'alternative, ce qui nous permet d'obtenir le tableau V.29.

Tableau V.29: Matrice de décision floue des alternatives

Critères	A1	A2	A3	A4	A5
Coût	F	F	F	VG	VP
Ep total	P	G	G	VP	G
Déflexion	G	P	VG	F	F
Rayon de courbure	P	VP	VG	F	P

Ensuite, nous procédons à la substitution numérique, ce qui conduit au tableau V.30

Tableau V.30: Application numérique de la matrice de décision floue

Critères	A1	A2	A3	A4	A5
Coût	(3,5,7)	(3,5,7)	(3,5,7)	(7,9,9)	(1,1,3)
Ep total	(1,3,5)	(5,7,9)	(5,7,9)	(1,1,3)	(5,7,9)
Déflexion	(5,7,9)	(1,3,5)	(7,9,9)	(3,5,7)	(3,5,7)
Rayon de courbure	(1,3,5)	(1,1,3)	(7,9,9)	(3,5,7)	(1,3,5)

Ensuite, nous attribuons des poids aux critères afin de quantifier leur importance relative dans la prise de décision comme illustré dans le tableau V.31

Tableau V.31: Matrice de décision floue des critères

Critères	Poids
Coût	VH
Ep total	L
Déflexion	H
Rayon de courbure	M

Après l'application numérique selon l'échelle d'importance présenté dans le tableau III.2 ; on a obtenu le tableau V.32.

Tableau V.32: Application numérique de la matrice de décision floue

Critères	Poids
Coût	(7,9,9)
Ep total	(1,3,5)
Déflexion	(5,7,9)
Rayon de courbure	(3,5,7)

Étape 2 : dans cette étape, nous allons calculer la moyenne géométrique floue \tilde{r}_{ij} .

Avant de procéder au calcul de la moyenne géométrique floue, il est indispensable de distinguer entre les critères bénéfiques et les critères de coût.

Les critères de coût à minimiser sont : $\left\{ \begin{array}{l} \text{le coût} \\ \text{l'épaisseur totale} \\ \text{la déflexion} \end{array} \right.$

Les critères de bénéfiques à maximiser sont : le rayon de courbure.

Alors, les moyennes géométriques calculées par les équations III.21 et III.22, présentées dans le tableau V.33.

Tableau V.33 : Les géométriques \tilde{r}_{ij}

Critères	A1	A2	A3	A4	A5
Coût	(0.143, 0.200, 0.333)	(0.143, 0.200, 0.333)	(0.143, 0.200, 0.333)	(0.111, 0.111, 0.143)	(0.333, 1, 1)
Ep total	(0.200, 0.333, 1)	(0.111, 0.143, 0.200)	(0.111, 0.429, 1)	(0.333, 1, 1)	(0.111, 0.143, 0.2)
Déflexion	(0.556, 0.778, 1)	(0.111, 0.333, 0.556)	(0.778, 1, 1)	(0.333, 0.556, 0.778)	(0.333, 0.556, 0.778)
Rayon de courbure	(0.111, 0.333, 0.556)	(0.111, 0.111, 0.333)	(0.778, 1, 1)	(0.333, 0.556, 0.778)	(0.111, 0.333, 0.556)

Etape 3 : Construction de la matrice de décision floue normalisée pondérée à l'aide de l'équation III.21, présentée dans le tableau V.34.

Tableau V.34: la matrice de décision floue normalisée pondérée

Critères	A1	A2	A3	A4	A5
Coût	(1, 1.800, 3)	(1, 1.800, 3)	(1, 1.800, 3)	(0.778, 1, 1.286)	(2.333, 9, 9)
Ep total	(0.200,1, 5)	(0.111, 0.429,1)	(0.111, 0.429,1)	(0.333, 3, 5)	(0.111, 0.429, 1)
Déflexion	(2.778, 5.444, 9)	(0.556, 2.333, 5)	(3.889, 7, 9)	(1 .667, 3.889, 7)	(1 .667, 3.889, 7)
Rayon de courbure	(0.333, 1.667, 3.889)	(0.333, 0.556, 2.333)	(2.333, 5, 7)	(1, 2.778, 5.444)	(0.333, 1.667, 3.889)

Etape 4 : Calculer le FPIS (Fuzzy Positive Idéale Solution) et le FNIS (Fuzzy Negative Idéale Solution) les relations utilisées III.24, III.25, III.26 et III.27 :

Tableau V.35: les valeurs de A^+ et A^-

	$P1^+$	$P2^+$	$P3^+$	$P4^+$
A^+	(9, 9, 9)	(5, 5, 5)	(9, 9, 9)	(7, 7, 7)
A^-	(0.778, 0.778, 0.778)	(0.111, 0.111, 0.111)	(0.556, 0.556, 0.556)	(0.333, 0.333, 0.333)

Tableau V.36 : Le FBIS et le FNIS

FPIS(A1)	FPIS(A2)	FPIS(A3)	FPIS(A4)	FPIS(A5)	FNIS(A1)	FNIS(A2)	FNIS(A3)	FNIS(A4)	FNIS(A5)
7.114	7.114	7.114	7.982	3.849	1.418	1.418	1.418	0.320	6.773
3.607	6.022	4.502	2.391	4.502	2.869	0.545	0.545	3.281	0.545
4.138	6.627	3.169	5.288	5.288	5.778	2.764	6.428	4.238	4.238
5.246	5.993	2.931	4.330	5.246	2.192	1.162	4.838	3.294	2.192
20.105	25.757	17.716	20.531	18.885	12.258	5.888	13.229	11.133	13.748

Les résultats obtenus par la méthode TOPSIS Floue illustré dans le tableau V.37

Tableau V.37 : résultat TOPSIS floue

A1	0.379
A2	0.186
A3	0.427
A4	0.352
A5	0.421

V.4.3 Fuzzy VIKOR :

Etape 1 : d'après le tableau III. 3 de l'échelle d'importance, on attribue un degré d'importance à chaque critère par rapport à l'alternative, ce qui nous permet d'obtenir le tableau V.38.

Tableau V.38 : Matrice de décision floue des critères

Critères	Poids
Coût	VH
Ep total	L
Déflexion	H
Rayon de courbure	M

Tableau V.39 : application numérique de la matrice de décision floue des critères

Critères	Poids
Coût	(0.6, 0.8, 1)
Ep total	(0.1, 0.3, 0.5)
Déflexion	(0.5, 0.7, 0.9)
Rayon de courbure	(0.3, 0.5, 0.7)

Tableau V.40 : Matrice de décision floue des alternatives

Critères	A1	A2	A3	A4	A5
Coût	F	F	F	VG	VP
Ep total	P	G	G	VP	G
Déflexion	G	P	VG	F	F
Rayon de courbure	P	VP	VG	F	P

Tableau V.41 : application numérique de la matrice de décision floue des alternatives

Critères	A1	A2	A3	A4	A5
Coût	(0.2, 0.4, 0.6)	(0.2, 0.4, 0.6)	(0.2, 0.4, 0.6)	(0.6, 0.8, 1)	(0, 0, 0.2)
Ep total	(0, 0.2, 0.4)	(0.4, 0.6, 0.8)	(0.4, 0.6, 0.8)	(0, 0, 0.2)	(0.4, 0.6, 0.8)
Déflexion	(0.4, 0.6, 0.8)	(0, 0.2, 0.4)	(0.6, 0.8, 1)	(0, 0.2, 0.4)	(0, 0.2, 0.4)
Rayon de courbure	(0, 0.2, 0.4)	(0, 0, 0.2)	(0.6, 0.8, 1)	(0, 0.2, 0.4)	(0, 0.2, 0.4)

Etape 2 : meilleure valeur floue f_i^* et pire valeur floue f_i^- illustrée dans le tableau V.42

Tableau V.42 : application numérique de la matrice de décision floue des alternatives

Critères	f_i^*	f_i^-
Coût	(0, 0, 0.2)	(0.6, 0.8, 1)
Ep total	(0, 0, 0.2)	(0.4, 0.6, 0.8)
Déflexion	(0, 0.2, 0.4)	(0.6, 0.8, 1)
Rayon de courbure	(0.6, 0.8, 1)	(0, 0, 0.2)

Etape 3 : détermination la distance floue \tilde{d}_{ij} par l'équation III. 35 et III. 36 illustrée dans le tableau V.43

Tableau V.43 : la distance floue \tilde{d}_{ij}

Critères	A1	A2	A3	A4	A5
Coût	(0, 0.4, 0.6)	(0, 0.4, 0.6)	(0, 0.4, 0.6)	(0.4, 0.8, 1)	(-0.2, 0, 0.2)
Ep total	(-0.25, 0.25, 0.5)	(0.25, 0.75, 1)	(0.25, 0.25, 1)	(-0.25, 0, 0.25)	(0.25, 0.75, 1)
Déflexion	(4, 2, 0)	(2, 0, -2)	(5, 3, 1)	(3, 1, -1)	(3, 0.4, -1)
R de courbure	(0.2, 0.6, 1)	(0.4, 0.8, 1)	(-0.4, 0, 0.4)	(0, 0.4, 0.8)	(0.2, 0.6, 1)

Etape 4 : calculs des mesures de séparation \tilde{S}_j par l'équation III. 37 et \tilde{R}_j par l'équation III. 38, ces mesures de séparation illustrée dans le Tableau V.44

Tableau V.44 : mesures de séparation \tilde{S}_j et \tilde{R}_j

Critères	A1	A2	A3	A4	A5
Coût	(0, 0.32, 0.6)	(0, 0.32, 0.6)	(0, 0.32, 0.6)	(0.24, 0.64, 1)	(-0.12, 0, 0.2)
Ep total	(-0.025, 0.075, 0.25)	(0.025, 0.225, 0.5)	(0.025, 0.075, 0.5)	(-0.025, 0, 0.125)	(0.025, 0.225, 0.5)
Déflexion	(0, 1.4, 2)	(-1.8, 0, 1)	(0.9, 2.1, 2.5)	(-0.9, 0.7, 1.5)	(-0.9, 0.28, 1.5)
R de courbure	(0.06, 0.3, 0.7)	(0.12, 0.4, 0.7)	(-0.12, 0, 0.28)	(0, 0.2, 0.56)	(0.06, 0.3, 0.7)
\tilde{S}_j	(0.035, 2.095, 3.55)	(-1.655, 0.945, 2.8)	(0.805, 2.495, 3.88)	(-0.685, 1.54, 3.18)	(-0.935, 0.805, 2.9)
\tilde{R}_j	(0, 1.4, 2)	(0.12, 0.4, 0.7)	(0.9, 2.1, 2.5)	(0.24, 0.64, 1)	(0.06, 0.3, 0.7)

D'après le tableau V.44 on a :

$$\tilde{S}^* = (-1.655, 0.945, 2.8)$$

$$\tilde{R}^* = (0.06, 0.3, 0.7)$$

$$S^{-u} = 5.535$$

$$R^{-u} = 2.44$$

$$v = 0.5 \text{ [16]}$$

Etape 5 : D'après l'expression III. 39 on calcule la valeur \tilde{Q}_j

Tableau V.45 : Les valeurs Q

Critères	A1	A2	A3	A4	A5
Q	(-0.803, 0.281, 0.747)	(-0.686, 0.314, 0.809)	(-0.745, 0.125, 0.703)	(-0.499, 0.119, 0.660)	(0.194, 0.657, 0.667)
déffuzification	0.075	0.145	0.027	0.093	0.377

V.5 Interprétation des résultats :

Les méthodes multicritères flous (F AHP, F TOPSIS et F VIKOR) ont permis de classer les cinq structures proposées selon leurs performances globales, en tenant compte de plusieurs critères (coût, épaisseur totale, déflexion et rayon de courbure). Les classements obtenus sont illustrés dans le tableau V.45 suivant :

Tableau V.46 : Rangement final des alternatifs par les trois méthodes

	AHP flou	TOPSIS flou	VIKOR flou
1	A3	A3	A3
2	A4	A5	A1
3	A1	A1	A4
4	A5	A4	A2
5	A2	A2	A5

V.6 Interprétation des résultats – Synthèse finale

L'application conjointe des trois méthodes multicritères floues **Fuzzy AHP**, **Fuzzy TOPSIS** et **Fuzzy VIKOR** a permis d'évaluer rigoureusement les cinq structures de chaussée proposées, selon des critères clés intégrant les dimensions **économique** (coût), **mécanique** (déflexion, rayon de courbure) et **constructive** (épaisseur totale).

Malgré quelques variations dans les classements intermédiaires, une **convergence notable** apparaît :

- La structure A3 est systématiquement classée au premier rang, ce qui atteste de son excellente performance globale. Elle présente un équilibre optimal entre un faible coût, une bonne portance (rayon de courbure élevé), une déflexion minimale, et une épaisseur maîtrisée. Cette cohérence entre les méthodes confirme la robustesse de l'alternative A3, indépendamment des techniques d'analyse utilisées.
- À l'opposé, l'alternative A2 est classée dernière dans deux méthodes sur trois, indiquant des insuffisances notables, probablement liées à une combinaison défavorable entre coût, performance mécanique et dimensionnement. Cela justifie son rejet en tant qu'option viable pour le projet.
- Quant aux alternatives A1, A4 et A5, elles présentent des positions fluctuantes selon la méthode appliquée. Ces écarts traduisent la sensibilité des résultats aux poids relatifs des critères ainsi qu'aux procédures de normalisation propres à chaque méthode multicritère. Cela souligne l'importance d'un choix méthodologique réfléchi dans les processus de décision complexes.

V.7 Conclusion

L'analyse comparative par méthodes multicritères floues a permis de dégager une hiérarchie cohérente des solutions proposées. L'alternative A3 émerge clairement comme l'option optimale, bénéficiant d'un consensus entre les trois approches utilisées. Sa position dominante dans tous les classements valide la pertinence de cette structure pour les conditions et les exigences du projet étudié. Cette étude confirme l'intérêt des approches multicritères floues pour la prise de décision en ingénierie routière, notamment dans des contextes caractérisés par l'incertitude et la subjectivité des jugements. Elle démontre également qu'un recoupement entre plusieurs méthodes permet de renforcer la fiabilité des décisions.

Conclusion Générale

Ce travail s'est inscrit dans une démarche d'**optimisation du choix d'une structure de chaussée**, en s'appuyant sur une approche multicritère intégrant les dimensions techniques, économiques et mécaniques. Dans un contexte décisionnel marqué par l'incertitude des données, la subjectivité des jugements et la complexité des critères, le recours aux **méthodes multicritères floues** s'est révélé particulièrement pertinent.

La première étape a consisté à identifier les **critères déterminants** pour l'évaluation des variantes : le coût de construction, l'épaisseur totale, la déflexion et le rayon de courbure. Cinq alternatives de structures de chaussée ont été analysées à l'aide de trois méthodes distinctes basées sur la logique floue : **Fuzzy AHP**, **Fuzzy TOPSIS** et **Fuzzy VIKOR**.

Les résultats ont permis d'établir un **classement global des solutions**. Une convergence nette a été observée : l'alternative **A3** a occupé systématiquement la première position, traduisant sa robustesse et son équilibre optimal entre performance mécanique, coût maîtrisé et dimensionnement adapté. À l'inverse, l'alternative **A2** a été écartée en dernière position dans deux méthodes sur trois, confirmant son inadéquation.

Au terme de cette étude, il apparaît clairement que les **méthodes multicritères floues** :

- Offrent un cadre d'analyse structuré, rigoureux et adapté à la complexité des décisions en ingénierie routière ;
- Permettent de modéliser l'incertitude ayant une relation avec les jugements humains ;
- Facilitent l'évaluation globale de solutions hétérogènes en intégrant des critères quantitatifs et qualitatifs.

En somme, ce PFE a permis de proposer une méthodologie **fiable, reproductible et opérationnelle**, contribuant à une prise de décision plus objective et éclairée dans le domaine des infrastructures routières.

Afin de prolonger et d'enrichir ce travail, plusieurs perspectives peuvent être envisagées :

- **Intégration de critères environnementaux**,
- **Extension à d'autres contextes routiers** : application de la méthode à différents types de chaussées (rigides, semi rigides) ou à d'autres zones géographiques,
- **Approche multi-acteurs** : intégrer les préférences de différents intervenants (ingénieurs, maîtres d'ouvrage, environnementalistes) pour une décision plus participative.

Références bibliographiques

- [1] AYADI Sabrina, (2018), mémoire : Etude comparative de la méthode algérienne et la méthode française de dimensionnement des chaussées souples, Université Larbi tébessi – Tébessa.
- [2] <https://fr.scribd.com/document/630812588/Generalites-sur-les-Chaussees> (consulté le 15/03/2025)
- [3] « CHAPITRE VIII DIMENSIONNEMENT DU CORPS DE CHAUSSEE », p.54. Disponible sur <https://fr.scribd.com/document/263290835/Chapitre-8-Dimensionnement-Des-Structures-de-Chaussees> (consulté le 29/03/2025).
- [4] HAME Alio et MAMOUDA, (2020), dimensionnement d'une chaussée souple : étude comparative de la méthode du catalogue algérien et les pays subsahariens, projet de fin d'étude, Master, Centre Universitaire BELHADJ Bouchaib Ain Témouchent, département de Génie Civil.
- [5] « CHAPITRE IX DIMENSIONNEMENT DU CORPS DE CHAUSSEE », p.71. Disponible sur [http://dspace.univ-djelfa.dz/xmlui/bitstream/handle/123456789/1132/CHAPITRE 9 Dimensionnement du CC R EDDINE.pdf?sequence=10&isAllowed=y](http://dspace.univ-djelfa.dz/xmlui/bitstream/handle/123456789/1132/CHAPITRE_9_Dimensionnement_du_CC_R_EDDINE.pdf?sequence=10&isAllowed=y) (consulté le 5/04/2025).
- [6] BEN AOUN et YAGOUB, (2023), Dimensionnement d'un corps de chaussée à base du sable rougeâtre par trois méthodes (théorique, empirique et numérique), projet de fin d'étude, Master, Université KASDI Merbah Ouargla, département de Génie Civil.
- [7] TAREK AGAL, (2005), développement d'un catalogue de dimensionnement structural des chaussées pour la ville de Montréal, maîtrise en génie de la construction, école de technologie supérieure, université du Québec.
- [8] BOULAHLIB, (2012), Géométrie des tracés, conception et entretien des chaussées, cours M1 ITL, Université Mentouri Constantine, Département Génie des Transports.
- [9] Adel NEHAOUA, (2001) Catalogue de dimensionnement des chaussées neuves (C.T.T.P), fascicule 2, p.21. Disponible sur <https://fr.slideshare.net/slideshow/catalogue-de-dimensionnement-des-chaussees-neuves-fascicule2> (consulté le 27/04/2025).
- [10] « ALIZE2 LCPC »(2021), Disponible sur <https://fr.scribd.com/document/740668430/Doc-Alize2-v2-1> (consulté le 30/04/2025).
- [11] BOUBAKEUR Rachid, (2017), Analyse multicritère d'aide à la décision, projet de fin d'étude, Master Université Abdelhamid Ibn Badis – Mostaganem, Département de Mathématiques et d'Informatique.
- [12] EL DHIMNI et al, (2024), développement d'une solution intégré AHP-TOPSIS et FUZZY AHP TOPSIS pour la prise de décision multicritère, projet de fin d'étude, Université Chouaib Doukkali, Maroc.

- [13] AICHOUCHE, FRADI, (2021), Sur la Programmation Linéaire Intuitionniste Floue, projet de fin d'étude, Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Département de Mathématique.
- [14] AYHAN, (2013), A Fuzzy AHP approach for supplier selection problem: a case study in a gearmotor company, article, International Journal of Managing Value and Supply Chains Vol 4, No. 3, P.13. Department of Industrial Engineering, Marmara University, Istanbul, TURKEY.
- [15] Neelima, et al (2017), A Simplified Description of FUZZY TOPSIS Method for Multi-Criteria Decision Making, article, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Vol. 4, No. 3, P.13.
- [16] Eric, et al (2014), Fuzzy VIKOR approach: evaluating quality of internet health information, article, Computer Science and Information Systems, pp. 183–190, Vol. 2.
- [17] Adel NEHAOUA, (2001) Catalogue de dimensionnement des chaussées neuves (C.T.T.P), fascicule 2, p.21.Disponible sur <https://fr.slideshare.net/slideshow/catalogue-de-dimensionnement-des-chaussees-neuves-fascicule3> consulté le (03/05/2025).
- [18] BOUSBA, KHALEF, (2023), Application de la technologie BIM dans le domaine des infrastructures linéaire : cas d'un projet routier, projet de fin d'étude, Master, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, Faculté des Sciences et de la Technologie, Département de Génie Civil et Architecture.
- [19] Donatien de Lesquen et al. (2023), Déflexion des couches de roulement : état de l'art et approche théorique, Thème de rattachement, Projet National DVDC – Durée de Vie Des Chaussées.