

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE DE BLIDA 01

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT GENIE CIVIL

Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de MASTER 2

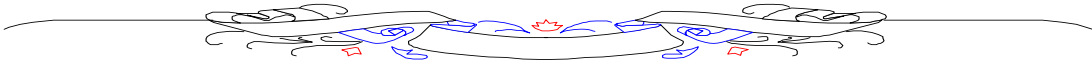
Filière : Génie Civil

Option : Géotechnique

Thème



DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES CHAUSSEES SOUPLES



Présenté par :

DJOUDI Asma

Encadré par :

Dr. FEDGHOUCHE Ferhat

Promotion 2017 /2018

REMERCIEMENTS

En premier lieu je remercie Allah le tout puissant qui m' a donné le courage, la patience et la volonté pour mener à bien ce modeste travail.

J'adresse mes vifs remerciements à mon encadreur Dr. FEDGHOUCHE Ferhat pour l'aide qu'il m'a apporté et pour m'avoir encadrés et accompagnés tout au long de ce travail.

Je souhaite exprimer notre gratitude à mes parents, pour leur soutien très précieux de tous les instants.

Mes remerciements vont également aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer mon modeste travail.

En fin nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la bonne réalisation de ce travail.

Dédicace

Je remercie Allah qui m'a donné la force de faire ce travail.

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents qui m'ont donnés leurs encouragements, conseils et renforcements.

A mon époux SAIDI Ahcene qui m'a aidé.

Mes sœurs, mes frères et mon petit fils Daniel.

A ma très chère amie BOUMAHREZ Nada.

A tous les personnes qui m'ont aidé.

ملخص

في هذا العمل قدمنا منهجية التصميم الأمثل للقواعد الأساسية للطرق المرنة كما هو مطلوب, مع مراعاة القواعد المشتركة لحسن التنفيذ. وتمت مقارنة النتائج مع الأساليب التقليدية الكلاسيكية للتصميم من قبل مكاتب الدراسات المعتمدة في الجزائر و قد حققت مكاسب في تكاليف مواد البناء.

النموذج المطور بسيط تطبيقي و اقتصادي.

كلمات البحث: الطرق, الطرق المرنة, تصميم, بنية الرصيف, أسلوب الأمثل, التقليل, خوارزمية, البسيط.

Résumé :

Dans ce travail, on a présenté une méthodologie de dimensionnement optimal des chaussées souples conformément aux exigences et prescription réglementaire, respectant les règles courantes de bonne exécution.

Les résultats obtenus ont été comparés à ceux obtenus par les méthodes de dimensionnement classique adoptés par les B.E.T en Algérie , Un gain a été réalisé sur les couts des matériaux de construction.

Ce modèle développé est simple, pratique et économique.

Mots clefs: routes, Chaussée souple, dimensionnement, corps de chaussée, méthode CBR, optimisation, minimisation, algorithme du simplexe.

Abstract

In this work, we presented an optimal design methodology of flexible pavements as required, observing common rules of good execution.

The results we recompared with conventional sizing methods adopted by the Technical studies office. A gain was realized on the costs of building materials.

The model developed is simple, convenient and economical.

Key words: *optimization, Flexible pavement, design methods, data of roads, minimization, Simplexe, method of CBR.*

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

1- Définition de la chaussée	13
2. Constitution des structures de chaussées.....	13
3-Dimensionnement de la chaussée	14
3.1 .Duré de vie d'une chaussée	14
3 .2 Les sollicitations.....	14
4. Différents types de structures de chaussées	15
4.1. Les chaussées souples	16
4.2. Chaussée rigide	23
4.3. Chaussée semi-rigide.....	23
5-Principales dégradations de chaussées souples.....	23
5-1- Présentation des défauts courants.....	23
5.2-Dégradations structurelles.....	24
5.3-Dégradations superficielles.....	24
6-Mode de dégradation.....	25
7-Identification des perturbations routières présentes	25

Chapitre II : METHODES DE DIMENSIONNEMENT CLASSIQUE DES CHAUSSEES SOUPLES

Introduction.....	30
1.1. L'approche théorique.....	30
1.2. L'approche empirique.....	30
2. Principales méthodes de dimensionnement.....	31
2.1. La méthode française de dimensionnement [LCPC – SETRA].....	31
2.2. La méthode anglaise de dimensionnement [DMRB].....	32
2.3. Méthode C.B.R (California – Bearing – Ratio).....	33
2.4. Méthode du catalogue Algérien de dimensionnement des chaussées.....	34

2.4.1. Détermination de la classe de trafic et du type du réseau principal.....	35
2.4.2. Le trafic cumulé de poids lourd (TCi).....	36
2.4.3- Le trafic cumulé équivalent (TCEi).....	36
2.4.4- La durée de vie.....	37
2.4.5- Les données climatiques.....	37
2.4.6- Le risque de calcul	38
2.4.7- Sol-support.....	39
3- Exemple de dimensionnement de chaussées souples par la méthode CBR.....	41

Chapitre III : OPTIMISATION DES STRUCTURES DE TRAVAUX PUBLICS

1- Introduction	45
2- Concepts et formulation générale d'un problème d'optimisation.....	46
2.1- Introduction.....	46
2.2- Rôle de l'optimisation.....	47
3- Éléments d'optimisation.....	47
3.1- Formulation générale du problème.....	49
3.2- Variables de décision.....	49
3.3- Contraintes.....	49
3.4- Fonction objectif.....	50
4- Type des problèmes d'optimisation.....	50
5- Méthode et formulation générale d'un problème d'optimisation déterministe.....	51
5.2 Espace de conception.....	52
5.3 Fonction objectif.....	53
5.4 Formulation dans l'espace des variables de conception.....	54

Chapitre IV : DIMENSIONNEMENT OPTIMAL D'UN CORPS DE CHAUSSEE

1- Formulation du problème de dimensionnement d'un corps de chaussée	56
2- Présentation de la méthode du simplexe et résolution des systèmes linéaire.....	58
a- Présentation et Histoire.....	58
b- Principe de la méthode de simplexe	60

c-Etape de l'algorithme de simplexe	60
d-Optimisation du programme linéaire.....	61
e-Programme utiliser.....	61
f-Les étapes de résolution du programme linéaire par la méthode de simplexe (OUTIL WORKPLACE).....	61
3- Résolution du problème par la méthode de simplex et estimation des couts de réalisation	62
4-Le Cout de chaussée dimensionnée par la méthode CBR classique.....	64
5-Comparaison des résultats.....	64
CONCLUSION GENERALE.....	66

Liste des tableaux

Tableau I.1: Synthèse des perturbations rencontrées sur les chaussées.....	26
Tableau II.1 : Coefficients d'équivalence des matériaux constituant un corps de chaussée.....	34
Tableau II.2 : Valeur de coefficient d'agressivité A (fascicule N° 2) . [7].....	37
Tableau II.3 : choix de structure selon le réseau principal. [7].....	37
Tableau II.4 : Choix des températures équivalentes (fascicule N° 2).....	38
Tableau II.5 : Risques adoptés pour le réseau RP1.....	39
Tableau II.6 : Risques adoptés pour le réseau RP2.....	39
Tableau II.7 : classe de portance du sol.....	39
Tableau II.8 : sur classement avec couche de forme en matériau non traité [7].....	41
Tableau II.9 : Sur classement avec couche de forme en sols fins traités à la chaux.....	41
Tableau II.10 : Quelques valeurs de $t=f(r\%)$. [7].....	43
Tableau II.11 : données et résultats de l'épaisseur totale d'un corps de chaussée calculée par la méthode CBR établie par programme Excel.....	42
Tableau II.12: Récapitulatif des résultats selon la méthode C.B.R.....	43
Tableau IV.1 : (BPU) Bordereau des prix unitaire des fournitures et mise en œuvre de chaque couches de corps de chaussée.....	56
Tableau IV.2: Structure du corps de chaussée selon la méthode C.B.R.....	57
Tableau IV.3 : comparaison entre la méthode classique et la méthode optimale.....	64

Liste des figures

Figure I.1. Coupe transversale d'une chaussée.....	14
Figure I.2 : Compositions structurelles des divers types de chaussées.....	15
Figure I.3: Déformations prises en compte pour le dimensionnement des chaussées souples.....	16
Figure I.4. : Diffèrent couches des Chaussées souples [3].....	17
Figure I.5: Différents couches des chaussées rigides[3].....	22
Figure I.6 : Vue de quelques dégradations sur les chaussées.....	28
Figure II.1: La Démarche de Catalogue. [7].....	35
Figure II.2: les classe TPLi en fonction de PL/j/sens. [7].....	36
Figure II.3: Position du projet dans la carte climatique de l'Algérie (fascicule N° 1) . [7].....	38
Figure II.4 : représente l'organigramme d'évolution de la méthode de simplexe.....	40
Figure II.5: Structure du corps de chaussée selon la méthode C.B.R.....	43
Figure IV.1 : représente l'organigramme d'évolution de la méthode de simplexe.....	60
Figure IV.2: représente la résolution du programme linéaire par la méthode de simplexe sur Scientificwork place.....	63
Figure IV.3 : représente les résultats obtenues par le programme scientificwork place.....	63
Figure IV.4 : représente les résultats du cout de réalisation obtenues par le programme scientificwork place.....	65
Figure IV.5 : représente un zoom sur les résultats du cout de réalisation obtenue par le programme scientificwork place.....	65

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La route est un mode important du transport par voie terrestre des personnes et des biens,

Elle intervient en amont et en aval des activités, agricoles, industrielles, touristiques etc.

Le développement d'un pays, d'une province ou ville est basé sur la quantité et la qualité de ces infrastructures en particulier les infrastructures routières qui réhabilitées et entretenues permanant en fin d'assurer la libre circulation des personnes et de leurs biens.

Les structures de chaussées routières sont soumises, en service, à des sollicitations très complexes. La circulation automobile et le climat ont une influence importante sur le comportement des matériaux de chaussées.

A l'instant de nombreux réseaux routiers dans le monde, le réseau Algérien est constitué principalement de structures de chaussées souples comportant des assises de fondation granulaires de qualités diverses reposant sur des sols-supports de portances différentes présentant souvent d'importantes variations de rigidité en profondeur. Par ailleurs, un dimensionnement adéquat d'une structure de chaussée souple ou, en d'autres termes, la détermination optimale des épaisseurs des couches constitutives du corps de chaussée passe inévitablement par une bonne connaissance des caractéristiques réelles des plates-formes de sols-supports et notamment du comportement mécanique non-linéaire des matériaux utilisés dans les assises de fondation.

Les infrastructures de transport, parmi lesquelles se distinguent les routes, sont conçues et mises en œuvre selon des critères techniques et économiques assez précis. En sus de son rôle social, une route doit satisfaire ses objectifs techniques tout en étant la moins coûteuse possible.

Les pays en voie de développement souffrent de contraintes budgétaires, surtout l'Algérie avec l'austérité et font face à des crises aiguës notamment dans la prise en charge alimentaire des populations qui se fait au détriment d'investissement de nouveaux projets.

L'investissement routier est de plus en plus lourd, mais reste une incitation au développement des régions et à l'exploration des richesses du pays. Ainsi l'Algérie étant un pays très vaste, ne peut couvrir et doter toutes les régions et infrastructures routières.

Nous nous sommes alors intéressés à une partie de la route très importante pour son économie c'est « la structure de chaussée et son dimensionnement ».

Ce travail se situe dans le contexte du dimensionnement des chaussées routières et autoroutières en Algérie. Le dimensionnement concerne les chaussées souples.

L'objectif de la présente étude sera de choisir une méthode de dimensionnement de corps de chaussée. Nous commençons à trouver la fonction objectif , passant à la minimisation du coût et en gardant les caractéristiques mécaniques de la chaussée.

CHAPITRE I

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

1- Définition de la chaussée

Une chaussée peut être définie comme une structure plane, conçue et dimensionnée pour garantir l'écoulement du trafic dans de bonnes conditions de sécurité et de confort et d'assurer le bon fonctionnement pour une période de service.

Dimensionner une chaussée c'est optimiser le choix et les épaisseurs des couches de matériaux en tenant compte de toutes les contraintes.

2- Constitution des structures de chaussées

Une chaussée routière se présente comme une structure composite réalisée par empilements successifs de couches de matériaux granulaires, le tout reposant sur un sol support. Vis-à-vis de la description adoptée par la méthode de dimensionnement française, établie par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) et le Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA), on associe à chacune des couches une fonction.

2.1- Le sol support : est généralement surmonté d'une **couche de forme** pour former un ensemble appelé **plate-forme support de chaussée**. Cette dernière sert, comme son nom l'indique, de support au corps de chaussée. Pendant la phase de travaux, la couche de forme a pour rôle d'assurer une qualité de nivellement permettant la circulation des engins pour la réalisation du corps de chaussée. Vis-à-vis du fonctionnement mécanique de la chaussée, la couche de forme permet d'augmenter la capacité portante de la plate-forme support de chaussée.

2.2- Les couches d'assises : sont généralement constituées d'une **couche de fondation** surmontée d'une **couche de base**. Elles apportent à la structure de chaussée l'essentiel de sa rigidité et répartissent (par diffusion latérale) les sollicitations, induites par le trafic, sur la plate-forme support afin de maintenir les déformations à ce niveau dans les limites admissibles.

2.3- La couche de surface : est formée d'une **couche de roulement** surmontant éventuellement une **couche de liaison** intermédiaire. La couche de roulement assure la fonction d'étanchéité des couches d'assise vis-à-vis des infiltrations d'eau; et à travers ses caractéristiques de surface, elle garantit la sécurité et le confort des usagers .

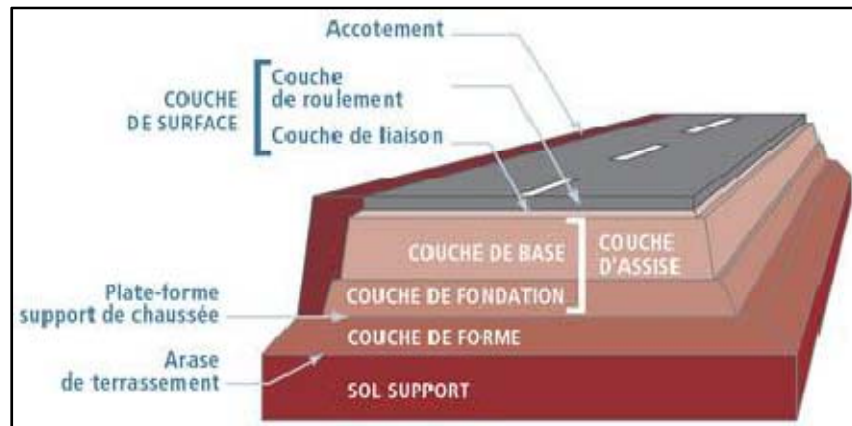


Figure I.1. Coupe transversale d'une chaussée

3-Dimensionnement de la chaussée

Une étude routière ne se limite pas en un bon tracé en plan et d'un bon profil en long, en effet, une fois réalisée, elle devra résister aux agressions des agents extérieurs et à la surcharge d'exploitation : action des essieux des véhicules lourds, effets des gradients thermiques pluie, neige, verglas,....

Etc. Pour cela il faudra non seulement assurer à la route de bonne caractéristique géométrique mais aussi de bonne caractéristique mécanique lui permettant de résister à toutes ces charges pendant sa durée de vie. [1]

3.1-Durée de vie d'une chaussée

La durée de vie d'une chaussée varie selon qu'il s'agisse d'une autoroute ou voie express et d'une route nationale ou d'un chemin de wilaya.

- Les autoroutes et voies express ont une durée de vie initiale de 30ans.
- Les Routes nationales ou chemins de wilaya sont dimensionnés pour une durée de vie de 15 à 20ans.

Cette distinction a été adoptée pour limiter les interventions d'entretien structurel sur les routes à fort trafic, réduire la gêne de l'utilisateur et limiter les contraintes liées à l'exploitation de la route. [2]

3.2- Les sollicitations

La chaussée est soumise aux sollicitations dues au trafic, aux intempéries, ainsi qu'à l'influence de la durée des diverses sollicitations. [2]

a - Les effets du trafic :

Le trafic constitue un élément essentiel dans la sollicitation de la chaussée. A travers les pneumatiques, les véhicules transmettent une pression à la structure dépendant du poids des

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

véhicules. Ces efforts verticaux se diffusent dans le sol. Elles se caractérisent par différents types de dégradation (usure, fluage) ou rupture par fatigue. [2]

b -Les effets du climat sont traduits par :

- l'eau qui diminue les facultés d'adhésivité passive du bitume (c.-à-d. les liaisons entre bitumes et granulats), elle contribue donc au dés enrobage des enrobés bitumineux.
- l'air qui contribue à l'évaporation des solvants et par conséquent à l'oxydation du bitume.
- la température qui influe sur les propriétés mécaniques du bitume en particulier les variations de température peuvent conduire à fissurer la couche de roulement. [2]

4- Différents types de structures de chaussées

Il existe une grande diversité de chaussées. Ainsi, le choix d'un type de chaussée peut être fonction de la durée de vie de la route, des sollicitations aux quelles la dite chaussée sera soumise après mise en service, et/ou coût de réalisation. Il paraît utile de faire la distinction entre les différentes natures des structures de chaussées que l'on peut classer en deux principaux groupes :

- Les assises non traitées constituées de matériaux à granulométrie continue appelés graves.
- Les assises traitées pour lesquelles la granulométrie des matériaux est également continue mais dans les quelles pour améliorer la stabilité et la résistance mécanique, on ajoute un liant soit hydraulique, soit hydrocarboné.

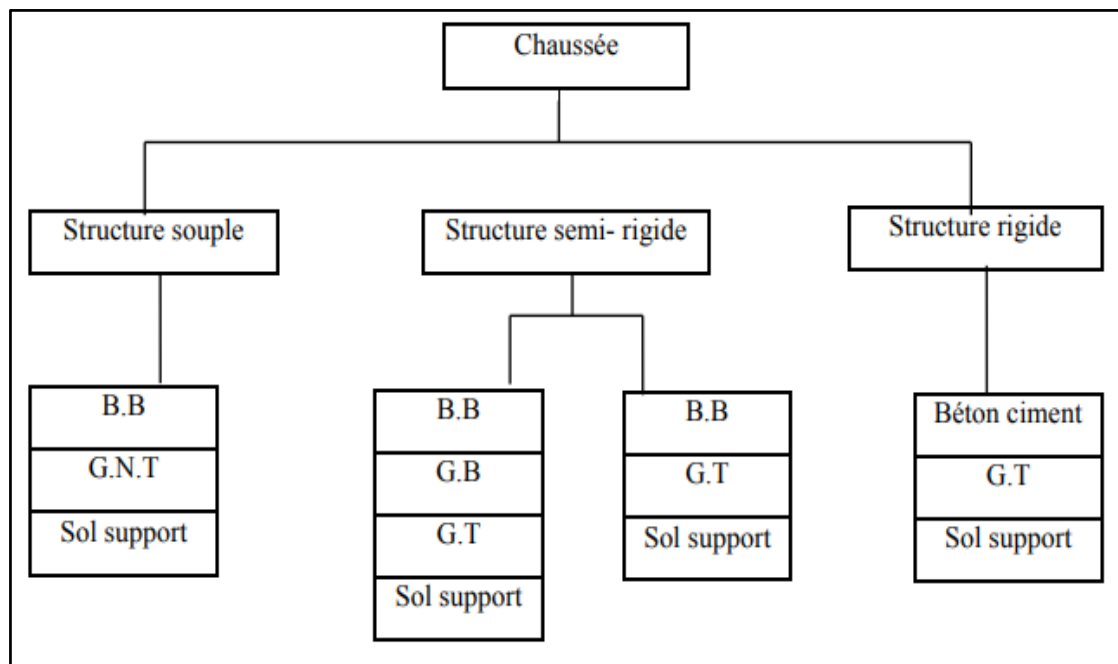


Figure I. 2 : Compositions structurales des divers types de chaussées

Légende

BB: béton bitumineux - **GB:** grave bitume - **GT:** grave traité - **GNT:** grave non traitée

-On distingue en général trois types de chaussées :

4.1- Les chaussées souples

Elles constituent l'immense majorité des routes actuelles. Elles sont composées D'une fondation constituée d'un matériau non traité mais stabilisé mécaniquement(Compact), d'une couverture bitumineuse mince (couche de roulement) moins De 15 cm.[2]

- Les structures de chaussée souples, destinées à des trafics faibles à moyens (moins de 200 poids lourds par jour). La figure schématise la coupe d'une structure de chaussée souple sous le passage d'une charge roulante.

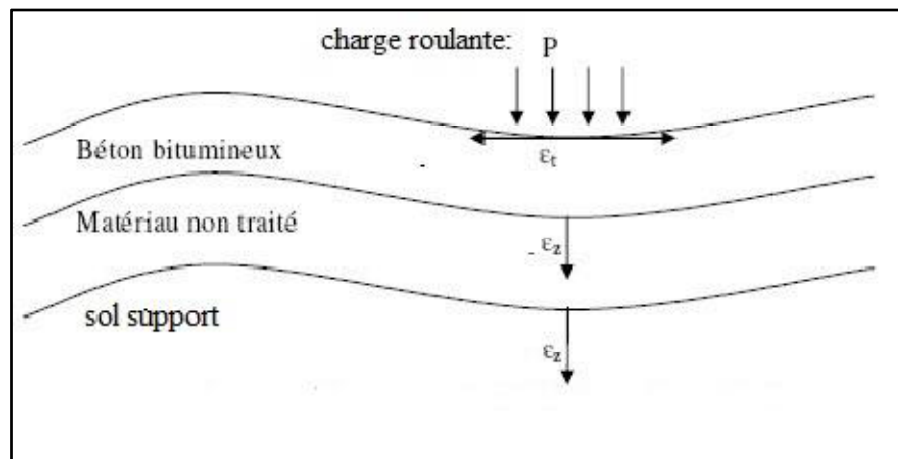


Figure I.3: Déformations prises en compte pour le dimensionnement des chaussées souples

Par ailleurs, les chaussées routières sont classées par rapport au trafic dont elles sont amenées à supporter durant leur vie de service. Les chaussées souples sont définies pour un trafic T_i inférieur ou égal à T_2 . En effet, leur faible rigidité structurale ne leur permet de résister qu'aux faibles trafics. A titre indicatif, pour un trafic $T_2 = 200 \text{ PL/J}$, la chaussée est appelée à supporter $1,46 \times 10^6$ poids lourds sur une durée de vie de 20 ans. Le nombre élevé de répétitions du chargement nécessite une attention particulière au phénomène de fatigue et à l'évolution des déformations permanentes. Le trafic est donc un facteur indispensable pour le dimensionnement des chaussées ;

Du fait de l'absence de cohésion dans les couches de l'assise des chaussées souples et de la faible épaisseur de la couche de roulement, celles-ci sont flexibles. Sous l'action d'une charge roulante, la couche de roulement subit à sa base des efforts répétés de traction par flexion ce qui conduit à la dégradation par fatigue de la couverture bitumineuse avec l'apparition de fissures isolées.

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

La faible rigidité de l'assise conduit à une transmission des efforts verticaux au sol support avec une diffusion latérale relativement faible. Ceci provoque l'apparition des déformations plastiques dont le cumul augmente avec le trafic conduisant ainsi, à l'apparition d'ornières en surface qui détériorent la qualité du profil en long de la chaussée. Selon les travaux réalisés par [Larsen (1997)], les déformations irréversibles - cause majeure de l'apparition de l'orniérage - se concentrent principalement dans le sol support et/ou l'assise de la chaussée.

4.1.1- Compositions structurelles des Chaussée souple :

Elle est constituée par la superposition d'un certain nombre de couche.

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

La couche de surface (couche de liaison + couche de roulement).

Couche d'assise (couche de base + couche de fondation). [3]



Figure I.4 : Différent couches des Chaussées souples[3]

Ci-dessous nous allons définir les différentes couches mentionnées dans la figure 2

a-La couche de surface :

C'est la couche supérieure de la chaussée, qui subit directement les efforts des véhicules et les facteurs naturels, d'où ses deux rôles principaux :

- ✓ d'une part, elle doit absorber les efforts horizontaux tangentiels (cisaillement) importants et de transmettre les charges verticales.
- ✓ d'autre part, elle doit offrir à l'utilisateur une surface de roulement compatible avec les exigences de l'automobiliste moderne.

Outre, cette couche assure la qualité superficielle de la chaussée et protège les couches inférieures, donc elle doit être toujours en bon état.

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Dans le cas où la circulation est intense, cette couche est composée de:

a.1- La couche de roulement :

- En matière de sécurité, elle doit avoir une bonne rugosité (adhérence) indispensable pour assurer aux véhicules des possibilités de freinage convenable et une bonne stabilité transversale.
- En matière de confort, elle doit présenter un bon uni afin que l'utilisateur ne ressente pas dans son véhicule de secousses brutales ou de vibrations excessives.
- En matière de pérennité, elle doit assurer une bonne imperméabilité.

a.2- La couche de liaison :

La couche de liaison a pour rôle essentiel, d'assurer une transition (liaison) entre la couche de base et celle de roulement. [3]

b-Le corps de chaussée :

Sous la couche de surface, vient le corps de chaussée, dont le rôle essentiel est de résister aux charges et de répartir les pressions qui résultent de telle sorte que le terrain ne soit plus sollicité qu'avec les contraintes compatibles avec sa portance. Il comporte de haut en bas :

b.1.La couche de base :

Constituée de matériaux résistants (Pierres concassées, graviers bitumineux), son rôle est de transmettre les charges à la couche de fondation provenant de la circulation. (Résister aux charges verticales de La circulation).

b.2- La couche de fondation :

Son rôle est d'assurer la transmission convenable des charges verticales (contraintes), apportées par la couche de base sur le terrassement. Elle doit aussi assurer un bon drainage.

4.1.2- Caractéristiques des chaussées souples

La principale caractéristique des chaussées souples est leur aptitude à travailler en grande déformation. Au passage des charges roulantes en un point de la chaussée, la flèche au voisinage de la charge étant relativement importante, ceci a pour effet de localiser les pressions sur le sol support dans un faible rayon autour de l'axe de la charge. Ainsi, pour diffuser ces pressions et les réduire, on augmente l'épaisseur de la chaussée. Ceci constitue la base de toutes les méthodes de calcul des chaussées souples, méthodes qui relient l'épaisseur requise à la pression maximale admissible sur le sol support. Selon l'importance de la route, le revêtement hydrocarboné peut être un simple enduit superficiel de 1,5 à 2cm, ou un béton bitumineux de 4 à 10cm d'épaisseur. Dans le premier cas le revêtement ne joue qu'un rôle de tapis d'usure et d'étanchéité, tandis que dans le second lorsqu'il est épais, assure une répartition importante des charges, sous réserve que sa rigidité et sa résistance soit suffisante pour qu'il ne se fissure pas.

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Le corps de chaussée diffuse très largement les pressions verticales imposées par les charges roulantes et c'est de lui que dépendra essentiellement la valeur maximale de pression sur le sol de fondation. D'autre part les matériaux pris en compte doivent être aptes à résister aux efforts qui les sollicitent.[5]

4.1.3- Critères de dimensionnement des chaussées souples

a-Hypothèse d'élasticité

Les premières méthodes de dimensionnement des chaussées étaient d'interprétation rationnelle peu élaborée, les autres portaient de l'hypothèse élasto-plastique, la plasticité semble jouer un rôle très important dans la vie de la chaussée. Au fur et à mesure que le trafic s'accrut et que les chaussées durent être construites de manière plus élaborée, l'hypothèse de la plasticité perdit de son importance.

A l'heure actuelle on admet en général l'hypothèse du fonctionnement quasi réversible d'une chaussée pendant la plus grande partie de sa vie.[5]

b- Fatigue des matériaux

En ce qui concerne les matériaux enrobés, il semble que la fatigue ne soit en fonction que de la déformation quels que soient le mode de sollicitations. Par contre pour les matériaux granulaires, la fatigue se traduit en général par une attrition qui provoque la naissance des fines et augmente considérablement la sensibilité à l'eau (chute de rigidité) des couches granulaires.

Dans le cas des sols fins et des sols de fondation les phénomènes de fatigue se traduisent soit par des ruptures plastiques soit par des tassements. D'après les constatations précédentes, on peut retenir les critères suivants :

- Pour les sols support ; une pression verticale limite admissible à la surface sur l'axe de la charge (car on fait l'hypothèse que sur la face supérieure du sol le tenseur des contraintes dépend uniquement de la pression verticale qui doit être limitée).
- Pour les matériaux enrobés : la déformation radiale dans l'axe de la charge sur la face inférieure du matériau où la déformation est la plus forte.[5]

4.1.4-Paramètre de dimensionnement des chaussées souples

La durée de vie d'une chaussée est liée à la fatigue des matériaux qui la composent. Pour le béton bitumineux, la fatigue ne semble être liée qu'à la déformation qu'il subit. Pour les sols supports, mis à part l'aspect de rupture plastique, la fatigue se traduit par des tassements.

Enfin pour les matériaux granulaires, la fatigue reste très sensible à leur état hydrique qui provoque une chute de rigidité notable. Le dimensionnement des chaussées souples est basé sur les paramètres suivants :

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

-La déformation radiale à la base de la couche de béton bitumineux qui doit être limitée pour empêcher sa rupture par fatigue (fissuration).

-La déformation verticale à la surface du sol support qui doit être limitée pour cause d'orniérage.

4.1.4.1- Matériaux de chaussée souple

Les différents matériaux constitutifs des couches d'une chaussée souple doivent présenter des caractéristiques mécaniques leur permettant de résister aux différentes sollicitations que subit la chaussée durant sa vie de service,[5]

a-Les Graves Non Traitées (G.N.T)

Sont des mélanges granulaires composés uniquement de granulats et d'eau (aucun liant hydraulique ou hydrocarboné n'entre dans leur composition). Leur granulométrie est continue avec un diamètre maximal de grains compris entre 14 et 31,5 mm On distingue deux catégories de GNT :

-Les GNT A : obtenues en une seule fraction, sans ajout d'eau, dont l'homogénéité de la granularité est codifiée.

-Les GNT B : recomposées de plusieurs fractions granulaires distinctes, dans des proportions définies et qui sont malaxées et humidifiées en centrale (appellation traditionnelle GRH : grave reconstituée humidifiée).

Ils sont largement utilisés dans les chaussées à faible et moyen trafic (chaussées souples) pour la réalisation des couches d'assise et des couches de forme. Les performances mécaniques des GNT sont habituellement estimées à partir des caractéristiques suivantes :

- dureté des granulats (déterminée par les essais Los Angeles et micro-Deval, réalisés sur la fraction 10/14),

- propreté des gravillons,

- angularité des granulats (indice de concassage, coefficient d'aplatissement).

b- Le béton bitumineux

Le béton bitumineux est un mélange, parfaitement contrôlé et de haute qualité, réalisé à chaud. Il est constitué de granulats de bonne qualité et bien calibré provenant exclusivement de roches massives et de bitume pur tenant à la fois d'éléments mouillant et agglutinant. Il doit être bien compacté en une masse uniforme et dense.

Les bétons représentent à l'heure actuelle l'une des solutions techniques les plus avancées pour la réalisation des couches de roulement des chaussées revêtues. Par rapport aux autres mélanges bitumineux (sand-asphalt, enrobé dense...) le béton bitumineux présente les avantages suivants:

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

- une meilleure homogénéité d'ensemble
- une meilleure étanchéité une grande stabilité
- une meilleure résistance au glissement

c- Le sol support

La démarche logique de la connaissance d'un sol-support de chaussée comporte trois étapes distinguées :

- Une identification géotechnique qui permet de rattacher le comportement prévisible de ce sol au comportement général d'une famille connue. Cette étape s'appuie sur une classification des sols.
- Une étude des paramètres d'état, car pour une famille de sols donnée, il existe des paramètres caractéristiques de leurs comportement et il est important d'en situer la valeur par rapport à une valeur de référence. On s'appuie ici sur la courbe Proctor-CBR.
- Une évaluation de la portance : contenu de la valeur des paramètres d'état (par exemple de la teneur en eau), on cherche ici à obtenir une évaluation chiffrée de la capacité portance, on utilise par exemple l'essai de plaque ou l'essai CBR (Californie bearing ratio) qui est utilisé pour évaluer la portance des sols sensible à l'eau.

D'autres éléments que les seuls éléments géotechniques sont néanmoins nécessaires pour effectuer l'analyse des contraintes et des déformations dans une structure de chaussées, ces autres éléments sont issus d'étude générale de laboratoire et de l'observation des comportements des chaussées.

4.1.4.2- Le trafic

Le trafic est notamment le poids lourd, est l'un des paramètres prépondérants du dimensionnement des chaussées ; il est nécessaire de l'analyser en terme d'agressivité vis-à-vis des chaussées sur lesquelles il circule.

a-Agressivité de trafic

Le passage d'une charge lourde sur une chaussée provoque des dommages de différentes natures :Le support de la chaussée, sol-support ou couche de forme en matériaux non traités, enregistre à chaque passage d'une charge, une déformation permanente en fonction de la contrainte verticale qui lui est appliquée. L'accumulation de ces déformations permanentes se traduit à la surface de la chaussée par des déformations du profil, du moins en ce qui concerne les chaussées traditionnelles. Sous les assises traitées aux liants hydrauliques ou hydrocarbonés, les contraintes verticales sur le support sont suffisamment faibles pour que les déformations permanentes restent modérées.

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Les structures des chaussées qui comportent des couches liées fléchissent à chaque passage de la charge. Ce fléchissement donne lieu, à la base de la chaussée, à des contraintes de traction par flexion, la répartition de ces contraintes de traction conduit à une accumulation des dommages de fatigue qui provoquera à terme la ruine de la chaussée (fissuration).

Le passage de charges peut aussi entraîner d'autres dommages dans la couche de surface de la chaussée. Le revêtement peut s'user jusqu'à devenir glissant (effort tangentiel), la répétition de contraintes verticales peut conduire, sur certains revêtement, à un orniérage notable (fluage).

b-Prise en compte du trafic dans le dimensionnement

Rappelons que le dimensionnement des chaussées est un dimensionnement à la fatigue, les Matériaux de chaussée étant choisis par ailleurs pour répondre à d'autres exigences telles que la résistance au fluage et les caractéristiques antidérapantes.

4.2-Chaussée rigide

Comportant des dalles en béton (correspondant aux couche de base de chaussée souple) qui fléchissant élastiquement sous les charges transmettent les efforts à distance et les répartissent ainsi sur une couche de fondation qui peut être une grave stabilisé mécaniquement

La structure d'une chaussée rigide est beaucoup plus simple que celle d'une chaussée souple, elle comprend :

- ✓ une couche de surface rigide.
- ✓ une couche de fondation, qui repose sur le sol naturel.



Figure I.5: Différents couches des chaussées rigides[3]

4.2.1- La couche de surface :

Elle est constituée par une dalle en béton. Cette dalle de béton correspond à la fois à la couche de base et à la couche de surface d'une chaussée souple. Elle repose soit directement sur le terrain, soit sur une couche de fondation.

Elle a pour objet d'absorber les efforts tangentiels horizontaux, mais aussi de transmettre, en les répartissant, les charges verticales à la couche de fondation. [3]

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

4.2.2- La couche de fondation :

Est la transmission et la répartition des charges verticales au sol naturel, mais son rôle principal est d'établir un contact continu et durable avec la dalle de béton, de façon que celle-ci repose également sur toute sa surface.

4.3- Chaussée semi-rigide

Les chaussées comportant une couche de base (quelques fois une couche de fondation) traitée au liant hydraulique (ciment, granulat,...).

Dans cette famille se distingue: Les chaussées comportant une couche de base (et quelquefois une couche de fondation) traitée au liant hydraulique (ciment, laitier granulé...). La couche de roulement est en enrobé hydrocarboné et repose quelque fois par intermédiaire d'une couche de liaison également en enrobé hydrocarboné. Ce type de chaussée n'existe actuellement plus en Algérie. les chaussées comportant une couche de base et/ou une couche de fondation en sable gypseux. Celles-ci sont fréquemment rencontrées dans les zones arides.[6]

Remarque: Le critère de choix entre chaussée souple et chaussée rigide, est l'analyse économique pour chaque projet, mais en règles générales :

- si le trafic est faible les bétons bitumineux son plus économique.
- si le trafic est lourd (abond des villes) l'avantage du béton de ciment.
- si les mouvements de terrain sont à craindre, utilisation du béton bitumineux.[3]

5-Principales dégradations de chaussées souples

5.1- Présentation des défauts courants

Ce sont les efforts de cisaillement développés qui se manifestent au contact des pneumatiques et dont la résultante équilibre les forces de traction qui parfois entraînent les pertes de matériaux des couches non revêtues et le polissage des granulats des tapis superficiels hydrocarbonés. Cette usure de la couche superficielle est aussi fonction croissante de la vitesse des véhicules et se trouve aggravée parla présence de remorques (effet de poids) .

La répétition des contacts inter granulaires entraine les effets d'attrition, la production de fines et l'augmentation de la plasticité de la chaussée. Celle-ci devient moins rigide, les déformations sous charge augmentent, deviennent irréversibles et il en résulte une destruction plus ou moins rapide de la couche déroulement. Noter que la fatigue des couches inférieures résulte de la transmission des efforts verticaux à la fondation. (Voir l'effet de la fatigue des couches inférieures sur la couche déroulement).. En effet, au terme de leur évolution normale, les dégradations entrent dans une phase de déformations plastiques importantes; les revêtements, trop sollicités, arrivent à perdre leurs qualités essentielles de perméabilité et des phénomènes secondaires encore plus rapides ne tardent pas à se manifester et à aboutir à leur ruine totale.

Les dégradations les plus couramment rencontrées se classent en deux grandes familles : les dégradations structurelles et les dégradations superficielles. Les premières apparaissent au

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

sein de la structure de chaussée ou de son support et mettent en cause le patrimoine. Les secondes prennent naissance dans la couche de surface de la chaussées affectent d'abord ses qualités superficielles.

Les principales dégradations de ces deux familles et leurs causes sont structurelles ou superficielles.

5.2-Dégradations structurelles

Fissuration de fatigue des assises de chaussée ou de la couche de roulement due à la répétition des efforts de traction par flexion au passage des charges. Cette dégradation apparaît dans les bandes de roulement parallèlement à l'axe de la chaussée ; elle évolue vers un faïençage à mailles de plus en plus fines pouvant prendre l'aspect, sur certaines structures, d'une fissuration en dalles. Déformations structurelles dues à un sol support peu portant et insuffisamment protégé par la chaussée, ou à des matériaux de chaussée de mauvaise qualité. Il peut s'agir d'ornièrre à grand rayon, d'affaissements de rive ou de flache suivant la localisation et l'extension des déformations.

5.3-Dégradations superficielles

Remontées de liant en excès à la surface de la couche déroulement lors de périodes chaudes.

Usure de la couche de roulement se traduisant par le polissage des gravillons, leur arrachement ou celui du mortier sous l'effet du frottement des pneumatiques et des efforts tangentiels exercés par les charges roulantes.

Ornièrre par fluage dit 2 petits rayons de la couche de roulement ou de son support bitumineux sous l'effet du trafic lourd.

Fissuration de la couche de roulement liée à une mauvaise exécution des joints de construction, au vieillissement du liant ou à une sensibilité du bitume aux contraintes thermiques.

Certaines dégradations ne sont observées en France que sur quelques types de structures. Il s'agit en particulier des fissures transversales de retrait sur les structures comportant une assise traitée aux liants hydrauliques. On trouve également des dégradations spécifiques aux chaussées en béton comme l'écaillage lié aux chocs thermiques ou à une mauvaise mise en œuvre, ou les cassures d'angles consécutives à la fatigue des dalles.

Pour chaque type de structure, la nature, l'origine et l'évolution des dégradations ont des spécificités qui sont présentées dans les fiches de dégradations et résumées ci-après.

Étant donné la faible épaisseur de matériaux traités, ces structures de chaussées transmettent les contraintes engendrées par la circulation en ne les atténuant que faiblement.

Dans ces conditions, la répétition de ces contraintes va entraîner une déformation plastique de l'assise granulaire ou du sol et se traduire par des déformations permanentes en surface.

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

En période pluvieuse ou de dégel on peut observer une élévation de la teneur en eau du support localisée sur les bords de chaussée dans le premier cas, généralisée dans le second.

La faible rigidité de ces chaussées les rend sensibles à la réduction de portance due à l'élévation de la teneur en eau du support qui en résulte. La couverture bitumineuse reposant sur un support peu rigide est sollicitée à sa base par des efforts de traction flexion.

Leur répétition peut conduire à sa rupture.

6-Mode de dégradation

L'évolution caractéristique des chaussées souples traditionnelles comporte donc :

- I 'apparition de déformations permanentes (flaches, affaissements de rive et ornière à grand rayon) qui croissent en gravité (amplitude verticale) et en étendue,

- I 'apparition d'une fissuration longitudinale dans les bandes de roulement, qui se ramifie, se dédouble et évolue vers un faïençage à mailles fines.

- La fissuration favorise les infiltrations d'eau qui amplifient la réduction de portance du support en période pluvieuse, donc aggravent les déformations permanentes ;ces infiltrations d'eau accélèrent également l'évolution de la fissuration en provoquant l'épaufrure des bords de fissure, des arrachements puis des nids de poule.

En période de dégel, l'augmentation très rapide des déformations permanentes peut conduire à la ruine de ce type de chaussée si des mesures de restriction du trafic poids lourds ne sont pas prises.

7-Identification des perturbations routières

Les perturbations diverses trouvent leurs origines de plusieurs facteurs combinés. Le tableau 1 présente les définitions et les causes des perturbations classées en quatre (04) catégories.

- Les déformations
- Les fissures
- Les arrachements
- Les remontées

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau I.1: Synthèse des perturbations rencontrées sur les chaussées.

CATEGORIES	TYPE	DEFINITIONS	CAUSES
déformations	Affaissements	Variation du niveau des profils	Epaisseur insuffisante de matériaux par endroit du corps de chaussée
			Pollution du corps de chaussée ou des rives par remontée d'argiles par manque de drainage ou souvent inexistant.
			Affleurement de la nappe phréatique
	FLACHES	Dépression des formes arrondies	Compactage insuffisant de la couche de roulement et de base en un point ponctuel
			Pollution du corps de chaussée et /ou drainage insuffisant
	Bourrelets	Renflement visible à la surface de la chaussée	Fluage de l'enrobé au voisinage d'une flanche
			Zone de décélération brutale
	Empreintes	Impression de différence de niveau de la couche de roulement	Prolongement et répétition de temps de station des véhicules poids lourds
	Ornières	Déformation sous passage des essieux	Couche de roulement mal compacté
			Sous dimensionnement de l'assise
			Granularité peu adaptée
			Niveau proche a la surface de la nappe phréatique
Fissures	Fissures	Lignes de ruptures	Portance du sol support douteuse
			Retrait de la couche de roulement
	faïençage	Fissuration maillée de la couche de roulement	Pas d'accrochage de la couche de roulement a la couche de base
			Sous dimensionnement des couches inferieures
			Fatigue des couches d'assises
			Insuffisance de la couche de roulement
Arrachements	Des enrobage	Décollement du liant enrobant les matériaux	Attaque du liant par l'argile
			Action des infiltrations répétées d'eau de pluie
	Nid de poules	Cavité de forme arrondie crée par arrachement de matériaux	Évolution d'une flache
			Rupture du liant sous effet mécanique
			Drainage inexistant
	pelages	Décollement de la couche de roulement à certains endroits	Contraintes trop élevées à la base de la couche de roulement
			Épaisseurs insuffisantes de la couche de roulement

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

		plus ou moins localisé	
	Plumages	Arrachement des gravillons du revêtement	Arrachement des gravillons mal accrochés au moment de l'émulsion
			Rupture de liant sous actions mécaniques
			Enrobé de mauvaise qualité
Remontées	Remontés de liant (ressuage)	Zone localisée ou un excès de liant apparait en surface	Surdosage en liant
			Bitumage trop mou
			Températures élevées dans le revêtement
	Remontée d'eau	Apparition de zone humide à la surface de la chaussée	Evaporations intenses
			Présence de nappe phréatique
	Remontée de mortier	Séparation du mortier et du granulat descendu plus bas dans les couches inférieures	Drainage insuffisant
			Excès de liant et de particules fines
			Températures trop élevées dans le revêtement

La synthèse des perturbations routières développées nous amène à considérer comme causes probables, le trafic, les conditions climatiques et environnementales, les techniques de dimensionnement des corps de chaussées ainsi que la qualité de mise en œuvre des matériaux.

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE



1-faïences 2-ornières Longitudinales



3-fissures en carrelage 4-fissures longitudinales



5-desenrobages et arrachements de revêtement 6-perte de revêtement

Figure I.6 : Vue de quelques dégradations sur les chaussées

CHAPITRE II

METHODES DE DIMENSIONNEMENT
CLASSIQUE DES CHAUSSEES
SOUPLES

1-Introduction

Sous l'effet des sollicitations externes (environnementales, conditions de chargements, etc.), les structures de chaussées sont soumises à des phénomènes complexes (mécaniques, thermiques, physiques et chimiques) qui apparaissent souvent de manière couplée.

Le but de dimensionnement des chaussées est de concevoir une structure capable de supporter un trafic pour une durée de vie fixée. Plusieurs approches ont été développées à cet effet, à savoir : l'approche empirique et l'approche théorique

Pour la détermination de l'épaisseur de corps de chaussée, il faut commencer par l'étude du sol. La méthode utilisée par les bureaux d'études qui sont empiriques et basées sur :

- La détermination de l'indice portant du sol.
- Appréciation du trafic composite.
- Utilisation d'abaque ou formule pour déterminer l'épaisseur de chaussée. [13]

1.1- L'approche théorique

L'approche théorique s'intéresse en premier lieu à établir un modèle de chaussée qui reproduit au mieux le fonctionnement mécanique et l'état de contrainte de la structure sous l'effet d'un chargement donné (trafic). Il s'agit d'une branche particulière de la mécanique des Milieux Continus, dite «mécanique des chaussées».

La première étape dans cette approche est d'établir expérimentalement, les lois de comportement des matériaux et d'en déduire leurs caractéristiques mécaniques qui seront utilisés dans la formulation mathématique du problème posé.

Une seconde étape du modèle mécanique a pour but de déterminer les contraintes et les déformations dans les matériaux de chaussées et le sol support, ces dernières sont alors comparées aux contraintes et déformations admissibles.

1.2- L'approche empirique

Devant la complexité des problèmes observés, les méthodes de dimensionnement développées sont basées sur des règles empiriques tirées de l'observation du comportement en service des structures de chaussée ou de sections expérimentales. Cette méthode présente des limites qui sont d'autant plus visibles que de nouveaux types de structures et des matériaux plus performants se développent et que le trafic est en constante augmentation. Un développement de méthodes de dimensionnement plus rationnelles apparaît donc nécessaire. Cette nécessité a conduit au développement et à l'application dès les années 1970 de la méthode rationnelle française, et plus récemment, le développement aux Etats-Unis dans le cadre du programme SHRP (Stratégie Highway Research Program 1988-1993, poursuivi après 1996), de la méthode «Super pave » et la mise en place du guide de dimensionnement AASHTO

2002. On présente ci-après les concepts des méthodes de dimensionnement des structures de chaussées adoptées en France, aux Etats-Unis et au Royaume-Uni.

Les principales sollicitations auxquelles sont soumises les structures routières sont liées aux contraintes imposées par le passage des véhicules et aux effets engendrés par les variations de température.

2- Principales méthodes de dimensionnement

Les méthodes qui ont marqué la science routière sont les suivantes

- ✓ Méthode L.C.P.C (Laboratoire central des ponts et chaussées)
- ✓ Méthode anglaise de dimensionnement [DMRB]
- ✓ Méthode C.B.R (California – Bearing – Ratio)
- ✓ Méthode du catalogue de dimensionnement Algérien

Pour la détermination de l'épaisseur de corps de chaussée, il faut commencer par l'étude du sol. La méthode utilisée par les bureaux d'études qui sont empiriques et basées sur :

- La détermination de l'indice portant du sol.
- Appréciation du trafic composite.
- Utilisation d'abaque ou formule pour déterminer l'épaisseur de chaussée

2.1- La méthode française de dimensionnement [LCPC – SETRA]

Les fondements de la méthode de dimensionnement des chaussées ont été dégagés dès le début des années 1970. Dans la démarche adoptée, la détermination des épaisseurs des différentes couches de chaussée ainsi que leurs caractéristiques mécaniques des matériaux relève, soit d'une approche expérimentale empirique, soit de calculs de vérification (méthode rationnelle). Par opposition aux modèles empiriques, ces méthodes rationnelles font appel à l'utilisation combinée de modèles mécaniques et de données expérimentales. C'est par le biais de modèles de calculs qu'est vérifié le dimensionnement de la structure vis-à-vis des critères de durabilité.

D'un point de vue mécanique, la démarche de la méthode française de dimensionnement peut être scindée en deux étapes. Dans une première étape, il convient de calculer, sous l'effet de l'essieu standard de référence de 130 KN, la réponse d'une structure de chaussée choisie à priori (type de structure, matériaux et épaisseurs des couches constitutives). Ce calcul repose sur l'évaluation, sous l'effet d'une charge circulaire appliquée à la surface d'un massif multicouche, les champs de contraintes maximales dans les couches de matériaux et de sol. Dans ce calcul, la charge appliquée symbolise l'action de l'essieu de référence, et le modèle semi-analytique de Burmister, développé aux Etats-Unis à 1943, est utilisé pour obtenir la réponse mécanique. Dans une seconde étape, il s'agit de calculer les valeurs de sollicitations admissibles des matériaux de la structure, en fonction de leur localisation dans la structure, de leurs modes de dégradation (rupture par fatigue des couches en matériaux liés et orniérage du sol et des couches en matériaux non liés), et du trafic cumulé (nombre de poids lourds) devant circuler sur la chaussée pendant sa durée de vie sur une plate-forme donnée. La structure

CHAPITRE II : METHODES DE DIMENSIONNEMENT CLASSIQUE DES CHAUSSEES SOUPLES

convient si les sollicitations induites par le passage de l'essieu de référence restent inférieures ou égales aux sollicitations admissibles pour chaque couche. Le choix de la structure finale se fait par calculs itératifs. Le calcul des valeurs admissibles s'appuie sur le comportement en fatigue des matériaux liés, traduisant la rupture d'une éprouvette en laboratoire pour l'application d'un grand nombre de cycles de sollicitations, et sur le caractère plastique des matériaux non liés, expliquant l'apparition de déformation permanente.

La méthode du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) tient compte du trafic équivalent. Elle est donnée par l'expression:

$$T_{eq} = (TJMA * a ((1+Z)^n - 1) * 0.75 * P * 365) / ((1+Z) - 1)$$

T_{eq} : trafic équivalent par essieu de 13 tonnes

TJMA : trafic à l'année de mise de service de la route (v/j)

a: coefficient qui dépend du nombre de voies (voire le calcul de la capacité du trafic).

Z : taux d'accroissement annuel géométrique (pris égale à 0.04 dans le calcul de dimensionnement. Ce taux de 4% résulte d'une enquête nationale de trafic réalisée dans le cadre de l'étude du schéma directeur routier national.

n : durée de vie de la route.

p : pourcentage de poids lourds.

Une fois la valeur du trafic équivalent est déterminée, on cherche la valeur de l'épaisseur équivalente e (en fonction de T_{eq} , ICBR) à partir de l'abaque L.C.P.C.

L'abaque L.C.P.C est découpé en un certain nombre de zones pour lesquelles, il est recommandé en fonction de la nature et la qualité de la couche de base.

2.2-La méthode anglaise de dimensionnement [DMRB]

La méthode anglaise de dimensionnement est essentiellement empirique. Elle est basée sur l'interprétation du comportement de sections tests de chaussée. Au fil des années, les principes de la méthode de dimensionnement ont été remis à jour à travers des rapports de recherche du TRRL

(«Transport and Road Research Laboratory » actuel TRRL, « Transport and Research Laboratory») pour prendre en compte l'augmentation de l'agressivité des véhicules et du trafic. Ces rapports ont servi de base à l'établissement du catalogue de dimensionnement des routes et des ponts DMRB (Design Manual for Roads and bridges). Le DMRB synthétise les résultats de recherche du TRRL et permet de dimensionner facilement une structure à l'aide de graphes. Dans cette méthode, le traitement des données du trafic ne prend en compte que le nombre de véhicules commerciaux, et chaque catégorie de véhicules est ramenée à un nombre d'essieux standards équivalent. Le dimensionnement de la plateforme support de chaussée [16,17] s'appuie sur la valeur de CBR (Californian Bearing Ratio), un minimum de 15% est requis sous la structure de chaussée, et en dessous de cette valeur, une couche en

matériaux granulaire est ajoutée. Le dimensionnement proprement parlé est traité dans le deuxième chapitre. Les structures envisagées sont flexibles, semi-rigides ou rigides. Pour chaque type de structure, la lecture d'un graphe donne directement l'épaisseur des couches en fonction du trafic (exprimé en million d'essieux équivalent) et du type de matériaux.

Cependant, même si la méthode anglaise de dimensionnement est très simple d'utilisation, elle ne permet pas le dimensionnement de cas non standard faisant intervenir de nouveaux matériaux ou conditions particulières. Achim Atos fait remarquer que dans la méthode anglaise, le comportement en fatigue des couches liées n'est pas considéré comme le critère dimensionnant car la méthode considère que la ruine des chaussées en matériaux bitumineux est due à la fissuration par le haut.

D'un point de vue mécanique, on remarque que la méthode anglaise DMRB n'aborde pas, de manière explicite, la modélisation du plan de contact entre deux couches de matériaux. La méthode fait l'hypothèse qu'un collage parfait se développe à l'interface de deux couches bitumineuses. [5]

2.3- Méthode C.B.R (CALIFORNIA – BEARING – RATIO):

C'est une méthode semi empirique qui se base sur un essai de poinçonnement sur un échantillon du sol support en compactant les éprouvettes de (90° à 100°) de l'optimum Proctor modifié. La détermination de l'**épaisseur totale** du corps de chaussée à mettre en œuvre s'obtient par l'application de la formule présentée ci-après:

Pour un trafic en voiture particulière : $TMJA \times 365 \times 1.5t < 100000 \text{ t/ans}$

$$e = \frac{100 + 150\sqrt{P}}{I_{CBR} + 5} \text{ (cm)}$$

Pour un trafic en voiture particulière: $TMJA \times 365 \times 1.5t \geq 100000 \text{ t/ans}$

Avec:
$$e = \frac{100 + \sqrt{p(75 + 50 \log \frac{N}{10})}}{I_{CBR} + 5} \text{ (cm)}$$

e: épaisseur équivalente

I_{CBR}: indice CBR (sol support)

N : désigne le nombre journalier de camion de plus 1500 kg à vide

P: charge par route P = 6.5 t (essieu 13 t)

Log: logarithme décimal

La notion d'épaisseur équivalente est introduite pour tenir compte des différentes qualités mécaniques des couches. L'épaisseur équivalente d'une couche est égale à son épaisseur réelle multipliée par un coefficient numérique (a) appelé coefficient d'équivalence.

L'épaisseur équivalente de la chaussée est égale à la somme des épaisseurs équivalentes des couches:

L'épaisseur équivalente est donnée par la relation suivante:

CHAPITRE II : METHODES DE DIMENSIONNEMENT CLASSIQUE DES CHAUSSEES SOUPLES

$$e_{eq} = \sum e_{réelle} * a_i = a_1 e_1 + a_2 e_2 + a_3 e_3$$

Selon les matériaux utilisés, les valeurs usuelles du coefficient d'équivalence sont comme indiqués dans le tableau.1.

Tableau II.1 : Coefficients d'équivalence des matériaux constituant un corps de chaussée

Matériaux utilisés	Coefficients d'équivalence (a_i)
Béton bitumineux ou enrobe dense	2.00
Grave ciment	1.50
Grave bitume	1.50 à 1.70
Grave concassée ou gravier	1.00
Grave roulée- grave sableuse TVO	0.75
Sable ciment	1.00 à 1.20
sable	0.50
Tuf	0.60

Avec

$a_1 \times e_1$: couche de roulement

$a_2 \times e_2$: couche de base

$a_3 \times e_3$: couche de fondation

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.

2.4- Méthode du catalogue Algérien de dimensionnement des chaussées

La Méthode du catalogue de dimensionnement des chaussées neuves est une méthode rationnelles qui se base sur deux approches :

-Approche théorique.

-Approche empirique.

L'utilisation du catalogue de dimensionnement fait appel aux mêmes paramètres utilisés dans les autres méthodes de dimensionnement de chaussées.

Ces paramètres constituent souvent des données d'entrée pour le dimensionnement, en fonction de cela on aboutit au choix d'une structure de chaussée donnée. Les données de bases pour le dimensionnement de chaussée sont :

-Le trafic

-La durée de vie

CHAPITRE II : METHODES DE DIMENSIONNEMENT CLASSIQUE DES CHAUSSEES SOUPLES

- Les données climatiques
- Le sol support de la chaussée
- Le risque de calcul considéré
- Les caractéristiques des matériaux

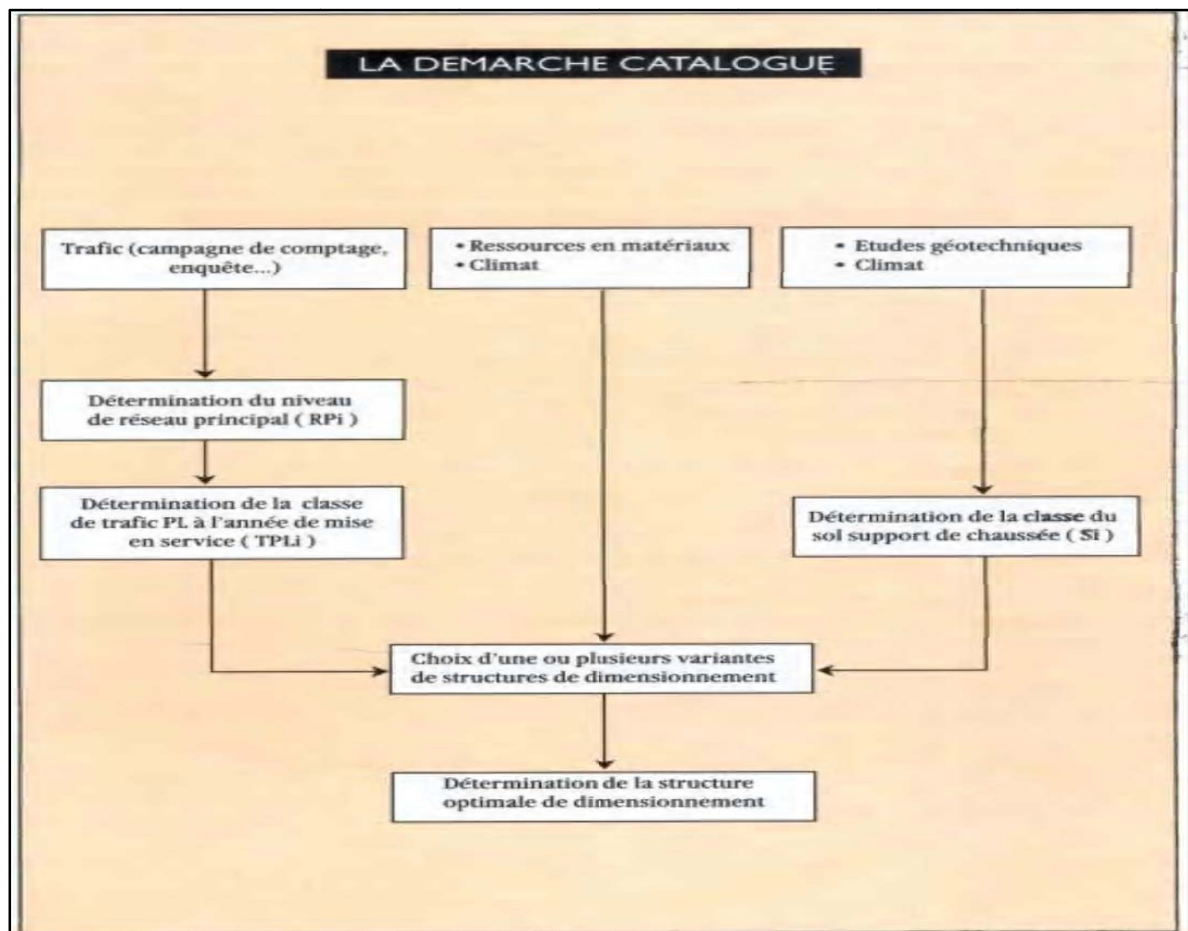


Figure II.1: La Démarche de Catalogue. [7]

2.4.1-Détermination de la classe de trafic et du type du réseau principal

Le trafic sera calculé et classifié avec les recommandations de «catalogue algérien du dimensionnement des chaussées neuves (version2001) » .

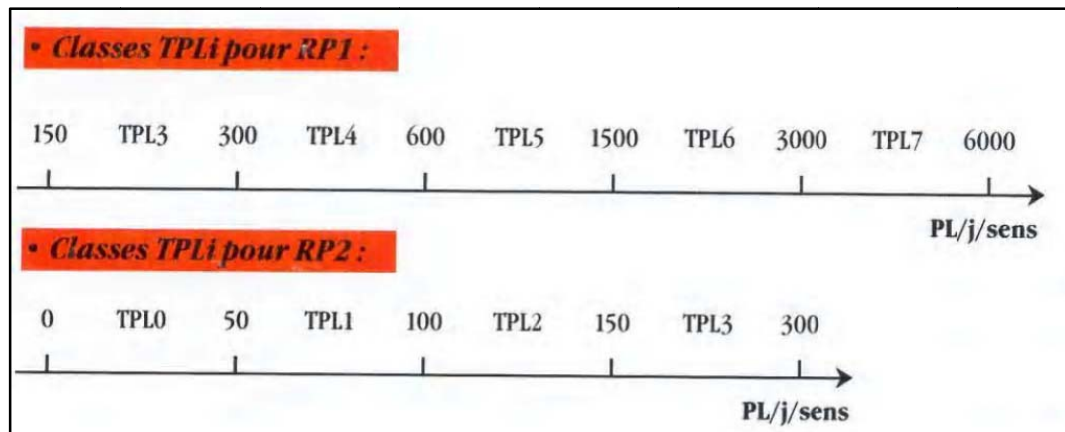


Figure II.2: les classe TPLi en fonction de PL/j/sens. [7]

2.4.2-Le trafic cumule de poids lourd (TCI)

Le TCi est le trafic de PL sur la période considérée pour le dimensionnement (durée de vie) est donnée par la formule suivante :

$$TCi = TPLi \left(\frac{(1 + i)^n - 1}{i} \right) * 365$$

Où :

-i = taux d'accroissement géométrique, (presque égal à 0,04 dans le calcul de dimensionnement), ce taux de 4% résulte d'une enquête nationale de trafic réalisée dans le cadre de l'étude du schéma directeur routier national).

-n= durée de vie considérée

-TPLi= classe de trafic

2.4.3-Le trafic cumulé équivalent (TCEj)

Il correspond au nombre cumulé d'essieux équivalents de 13 tonnes sur la durée de vie considérée.

-TCEj=TCjxA

A:coefficient d'agressivité de poids lourd par rapport à l'essieu de référence de13 tonnes.

En fonction de réseau principal RPj.

Tableau II.2: Valeur de coefficient d'agressivité A (fascicule N°2). [7]

Niveau de réseau principal (RPi)	Types de matériaux et structures	Valeurs de A
RP1	Chaussées à matériaux traités au bitume : GB/GB , GB/Tuf , GB/SG...	0,6
	Chaussées à matériaux traités aux liants hydrauliques : 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 $\epsilon_{z,ad}$)	0,6

2.4.4-La durée de vie

La durée de vie est en étroite relation avec la stratégie d'investissement retenue par le maître de l'ouvrage. Elle correspond à un investissement initial moyen à élevé et des durées de vie allant de 15 à 25 ans en fonction du niveau de réseau principal considéré.

Les durées de vie fixées par niveau de réseau principal (RP1, RP2) et par matériau types sont synthétisées dans le Tableau 3 ci-dessous :

Tableau II.3 :choix de structure selon le réseau principal. [7]

Niveau de réseau principal (RPi)	Matériaux types	Structures types	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

2.4.5- Les données climatiques

Le dimensionnement de corps de chaussée s'effectue avec une température consistante, c'est-à-dire température équivalente Θ_{eq} , en tenant compte de cycle de variation de température de chaque année.

La température équivalente est généralement déterminée selon le zonage climatique du site D'après le «**catalogue de dimensionnement des chaussées neuves (2001 CCTP)**»,le site de projet est classé en zone II.

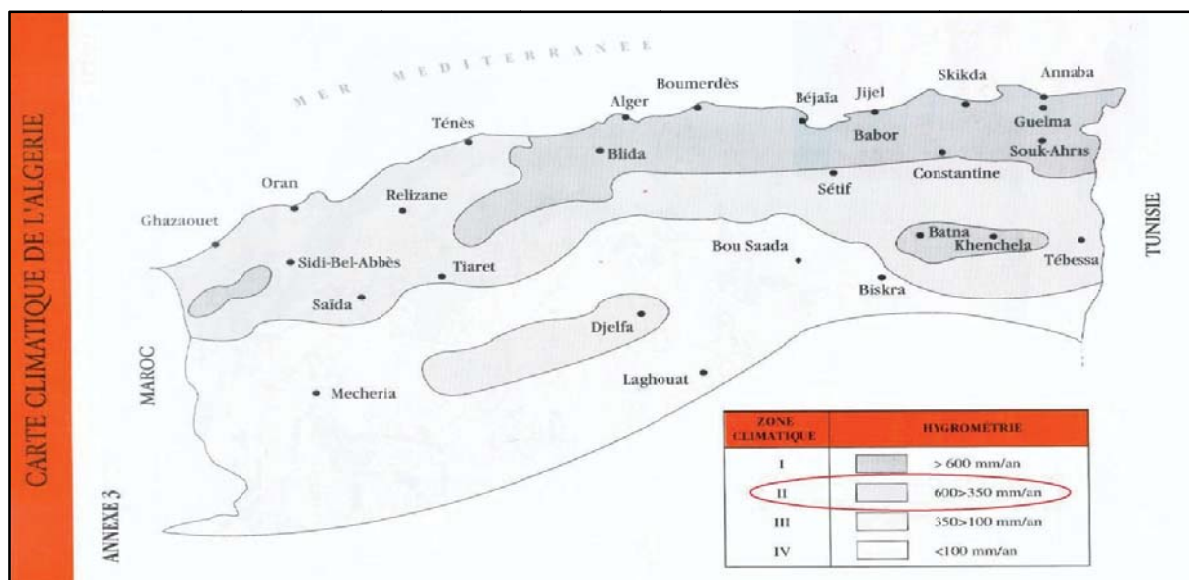


Figure II.3:Position du projet dans la carte climatique de l'Algérie (fasciculeN°1). [7]

Tableau II.4:Choix des températures équivalentes (fasciculeN°2)

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

2.4.6-Le risque de calcul

Un risque $r\%$ sur une période de x années pris pour le dimensionnement de la chaussée, est la probabilité pour qu'apparaissent au cours de ces x années des dégradations structurelles qui impliqueraient des travaux de renforcement de la chaussée. Les niveaux de risque choisis sont en fait en étroite relation avec les options retenues par le maître de l'ouvrage en matière de niveau de service et de stratégie d'investissement et d'entretien. Les risques de calcul ($r\%$) adoptés dans le dimensionnement des structures, qui sont fonction du trafic et du niveau de réseau principal, sont donnés dans les Tableaux ci-dessous.

Tableau II.5: Risques adoptés pour le réseau RP1

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

Tableau II.6 : Risques adoptés 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	

2.4.7-Sol-support

a-Classes de sols support retenues :

Le sol support de chaussées est assimilé à un massif semi-infini élastique, homogène et isotrope. Les caractéristiques mécaniques nécessaires pour la modélisation sont le module de Young (E) et le coefficient de Poisson (ν).

1. Le coefficient de poisson(ν) pour les sols est en général pris égal à 0,35.
2. Le module du sol support (E) appelé également module de Young est donné ci-dessous dans le Tableau:

Tableau II.7 : classe de portance

Classe de la portance (si)	S4	S3	S2	S1	S0
MODULE(MPA)	15	25	50	125	200

b-Classes de sols support par niveau de réseau principal (RPi)

Il existe une relation entre la qualité du sol support de chaussée et le bon comportement des chaussées. Pour cette raison, et pour chaque niveau de réseau principal (RP1 et RP2), les classes de sol support considérées sont les suivantes :

- ✓ Pour le réseau principal RP1 : S0, S1, S2
- ✓ Pour le réseau principal RP2 : S0, S1, S2, S3

Remarque :

Lorsque des cas de sols de faible portance ($< S4$ en RP2, $< S4$ et $S3$ en RP1) sont rencontrés, le recours à une couche de forme devient nécessaire pour permettre la réalisation des couches de chaussées dans des conditions acceptables.

c-Sur classement de portance des sols terrassés

L'utilisation d'une couche de forme en matériaux (naturels sélectionnés ou traités) permet un sur classement de portance du sol terrassé

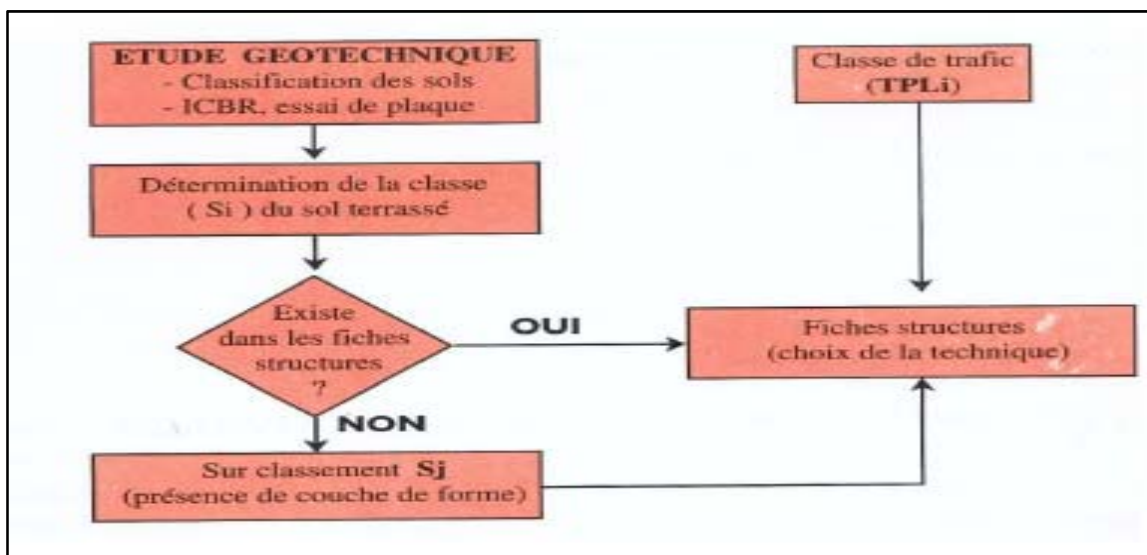


Figure II.4: organigramme de dimensionnement de corps de chaussé par la méthode de catalogue (fascicule N°1). [7]

Selon les cas de chantiers (trafic, nature des sols, zones climatiques) la couche de forme sera de différents types. Elle peut être en une ou plusieurs couches suivant le cas de portance du sol terrassé (Si) et la classe de sol-support visée (Sj).

Les Tableaux ci-dessous donnent des indications permettant de guider le choix de la couche de forme à réaliser.

Tableau II.8 : sur classement avec couche de forme en matériau non traité.[7]

Classe de portance de sols tassés (Si)	Matériau de couche de forme	Epaisseur de matériau de couche de forme	Classe de portance de sol-support visée (Sj)
<S4	Matériaux non traités (*)	50cm (en 2 couches)	S3
S4	Matériaux non traités (*)	35cm	S3
S4	Matériaux non traités (*)	60cm (en 2 couches)	S2
S3	Matériaux non traités (*)	40cm (en 2 couches)	S2
S3	Matériaux non traités (*)	70cm (en 2 couches)	S1

Les matériaux non traités : grave naturelle propre, matériau locaux. Il est recommandé de faire une étude de ces matériaux quant à leur utilisation ou non en couche de forme

Tableau II.9 : Sur classement avec couche de forme en sols fins traités à la chaux.[7]

Classe de portance de sols tassés (Si)	Matériau de couche de forme	Epaisseur de matériau de couche de forme	Classe de portance de sol-support visée (Sj)
<S4	Sols fins traités	35cm	S3
S4	Sols fins traités	25cm	S3
S3	Sols fins traités	30cm	S2
S3	Sols fins traités	60cm (en 2 couches)	S1

NB : Une étude spécifique au laboratoire est à faire pour déterminer le type de sol à traiter ainsi que le dosage optimal en chaux à utiliser

Remarque :

Dans le cas où il n'y a pas nécessité d'une couche de forme, il faudra prévoir une couche de réglage du sol support pour les chaussées de niveau de réseau principal RP1.

d- Choix de la couche de roulement

Le choix de la couche de roulement est fait en fonction du niveau de réseau principal :

1. RP1 : couche de roulement en béton bitumineux (BB), les épaisseurs sont modulées en fonction du trafic (TPLi) :

- ✓ 6BB à 8BB pour les structures traitées au bitume (GB/GB, GB/GNT,...)
- ✓ 6BB à 10BB pour la structure GL/GL

2. RP2 : couche de roulement en enduit superficiel (ES) ou enrober à froid (EF) en fonction du matériau choisi et de la zone climatique, correspondante.

e-Détermination des déformations admissibles verticales et horizontale

✓ La déformation verticale ε_z calculée par le modèle (élément finis et ALIZE III), devra être limitée à une valeur admissible $\varepsilon_{z,ad}$ qui est donnée par une relation empirique déduite à partir d'une étude statistique de comportement des chaussées Algériennes. Cette formule est de la forme suivante :

$$-\varepsilon_{z,ad} = 22.10^{-3} \cdot (TCEi)^{-0,235}$$

-Pour chaque classe de trafic (TCEi), il correspond une valeur de $\varepsilon_{z,ad}$

✓ La déformation horizontale admissible

$$\varepsilon_{t,ad} = \varepsilon_6(10^\circ, 25HR) kne \cdot K\theta \cdot Kr \cdot kc$$

Ou

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

-kne : facteur lié au nombre cumulé d'essieux équivalents supporté par la chaussée

-k θ : facteur lié à la température ;

-kr : facteur lié au risque et aux dispersions ;

-kc :facteur lié au calage des résultats du modèle de calcul avec le comportement observé sur la chaussées .

Avec :

$$kne = \left(\frac{10^6}{TCEi} \right)^b, \quad k\theta = \sqrt{\frac{E(10^\circ C)}{E(\theta_{eq})}}, \quad kr = 10^{-tb\delta}$$

D'où:

$$\varepsilon_{t,ad} = \varepsilon_z(10^\circ, 25Hz) * \left(\frac{10^6}{TCEi} \right)^b * \sqrt{\frac{E(10^\circ C)}{E(\theta_{eq})}} 10^{-tb\delta} * kc$$

Avec :

-TCEi : Trafic en nombre cumulé d'essieux équivalents de 13 tonnes sur la durée de vie considérée .

-E(10°C) :Module complexe du matériau bitumineux a $10^\circ C$

-E(θ_{eq}) : Module complexe du matériau bitumineux à la température équivalente qui est fonction de la zone climatique considérée

$$\delta: f(\text{dispersion}), \quad \delta = \sqrt{(SN)^2 + \left(\frac{C}{B} Sh\right)^2}$$

avec

CHAPITRE II : METHODES DE DIMENSIONNEMENT CLASSIQUE DES CHAUSSEES SOUPLES

SN dispersion sur les épaisseurs (en cm)

S_h : dispersion sur les épaisseurs (en cm)

C : coefficient égale 0,02

b : pente de la droite de fatigue ($b < 0$)

t : fractile de la loi normale qui est en fonction du risque adopté (r %). voir tableau

Tableau II.10 : Quelques valeurs de $t=f(r\%)$. [7]

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	40
t	-0,842	-0,739	-0,674	-0,524	-0,385	-0,253	0

f-Vérification en fatigue des structures et de la déformation du sol support Vérification par Alizée

La vérification $\epsilon_z < \epsilon_{z,ad}$ sera surtout à faire dans le cas des chaussées à matériaux non traités, car c'est le critère prépondérant dans le calcul de dimensionnement. Dans le cas des chaussées traitées au bitume et aux liants hydrauliques, la pression sur le sol support sera tellement faible que le critère $\epsilon_z < \epsilon_{z,ad}$ sera pratiquement toujours vérifié.

3-Exemple de dimensionnement de chaussées souples par la méthode CBR

Nota : Les données de ce projet sont réutilisées dans le chapitre de l'optimisation afin de comparer les deux résultats et citer la méthode la plus économique dans

Données de l'étude :

Année de comptage : 2011.

Année de mise en service : 2014.

TMJA2011 = 25737 v/j.

Mise en service : 2014.

Durée de vie : 20 ans

Taux d'accroissement : $\tau = 4 \%$

Pourcentage de poids lourds : $Z = 50 \%$

Zone climatique II=20°

Répartition de trafic :

TJMA2011 = 25737 (V/j).

TJMA2014 = 28950 (V/j)

TJMA2014 = 14475 (V/j/sens)

TPL2014 = $0,50 \times 14475 = 7237$ PL /j/sens

TPL2034 = $(1+0,04)^{20} \cdot TPL2014 = (1+0,04)^{20} \times 7237 \approx 15858$ (PL/j/sens)

TPL2034 (80% de la voie droite la plus chargée) = $TPL2034 \cdot 0,8 \approx 12686$ (PL/j/sens)

La valeur de l'indice CBR, d'après les résultats obtenus lors des essais effectués sur les échantillons de puits de reconnaissances est : $I_{CBR}=5$

$TMJA \times 365 \times 1,5t \geq 100000$ t/ans = $25737 \times 365 \times 1,5 = 14091007$ (t/ans) > 100000 (t/ans)

$$\text{Donc : } e = \frac{100 + \sqrt{p(75 + 50 \log \frac{N}{10})}}{I_{CBR} + 5} \text{ (cm)}$$

$$\text{Alors } e = \frac{100 + \sqrt{6,5(75 + 50 \log \frac{12686}{10})}}{5 + 5} = 69 \text{ (cm)}$$

e: épaisseur équivalente

I_{CBR} : indice CBR (sol support)

N: désigne le nombre journalier de camion de plus 1500 kg à vide

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

CHAPITRE II : METHODES DE DIMENSIONNEMENT CLASSIQUE DES CHAUSSEES SOUPLES

Durant notre étude nous avons programmé une feuille sur Excel afin de dimensionner le corps de chaussée, il suffit juste d'introduire les données initiales, après le programme calcul l'épaisseur équivalent du corps de chaussée.

Le tableau ci-dessous représente l'interface de cette feuille de calcul sur Excel, en jaune c'est les données et sur le reste c'est les résultats obtenus.

Tableau II.11 : données et résultats de l'épaisseur totale d'un corps de chaussée calculée par la méthode CBR établie par un programme Excel

ANNEE DE REFERENCE	2011			
ANNEE DE MISE EN SERVICE	2014			
Indice CBR	5			
P essieux de 13 tonne	6,5			
POURCENTAGE POID LOURD %	50			
nombre de sens	2			
TMJA DE REFERENCE V/J	25737			
DUREE DE VIE (ans)	20			
TAUX DE CROISSANCE %	4	2011	2014	2034
TJMA V/J		25 737,00	28 950,62	63 434,38
TJMA V/J/SENS		12 868,50	14 475,31	31 717,19
TJMA PL/J		12 868,50	14 475,31	31 717,19
TJMA PL/J/SENS (TPL)		6 434,25	7 237,66	15 858,60
TJMA FILE DROITE 80%		5 147,40	5 790,12	12 686,88
TJMA0 *365*1,5 (en tonne)		14 091 007,50		
Epaisseur de la couche (loi CBR) en cm		68.68		

L'épaisseur totale : $e = 69$ cm.

-Epaisseur équivalente :

$$e_{\text{equivalente}} = a_1 \times e_1 + a_2 \times e_2 + a_3 \times e_3.$$

Où:

a_1, a_2, a_3 : coefficients d'équivalence.

e_1, e_2, e_3 : épaisseurs réelles des couches.

Pour proposer le dimensionnement de la structure de notre chaussée, il nous faut résoudre

l'équation suivante : $a_1 \times e_1 + a_2 \times e_2 + a_3 \times e_3 = 69$ cm.

Pour résoudre l'équation précédente, on fixe 2 épaisseurs et on calcule la 3^{ème}. Nous choisissons la structure suivante pour chaque matériaux selon le tableau 1 cité dans le chapitre 1 .

$$a_1(\text{BB}) = 2 \quad a_2(\text{GB}) = 1.5 \quad a_3(\text{GNT}) = 1$$

-Couche de roulement en béton bitumineux (BB) : $a_1 \times e_1 = 6 \times 2 = 12$ cm.

-Couche de base en grave bitume (GB) : $a_2 \times e_2 = 18 \times 1.5 = 27$ cm.

CHAPITRE II : METHODES DE DIMENSIONNEMENT CLASSIQUE DES CHAUSSEES SOUPLES

-Donc L'épaisseur de la couche fondation e_3 en (GNT) est de :

$$-e_{\text{équivalent}} = a_1 \times e_1 + a_2 \times e_2 + a_3 \times e_3 = (8 \times 2) + (20 \times 1.7) + (1 \times e_3) = 69 \text{ cm.}$$

$$-e_3 = 69 - [(6 \times 2) + (18 \times 1.5)]$$

$$-e_3 = 30 \text{ cm}$$

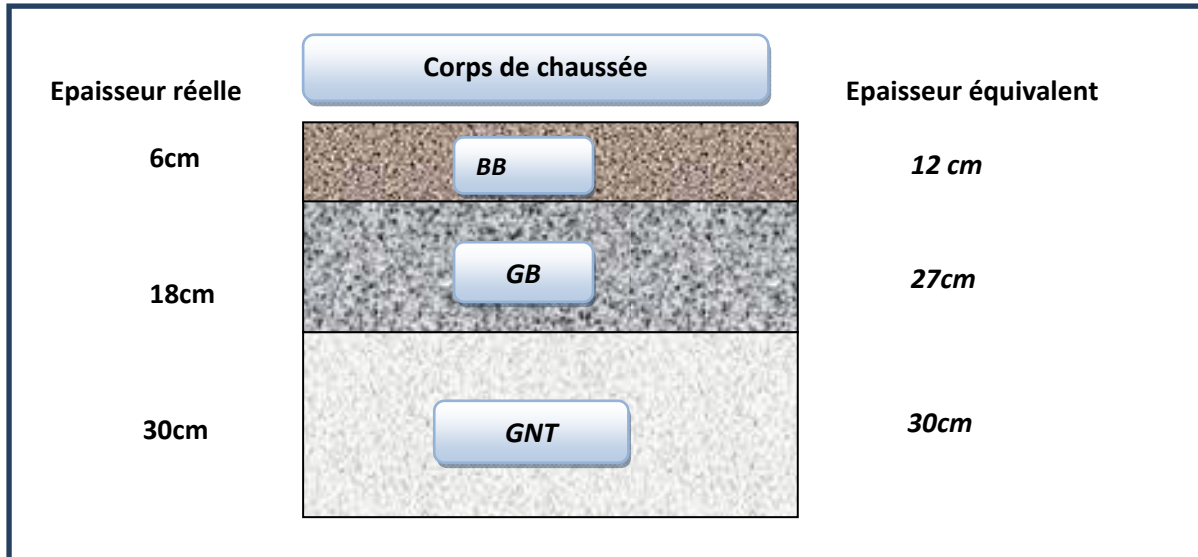


Figure II.5: Structure du corps de chaussée selon la méthode C.B.R

Tableau II.12: Récapitulatif des résultats selon la méthode C.B.R

Couches	Epaisseur réelle (cm)	Coefficient d'équivalence (ci)	Epaisseur équivalente (cm)
BB	6	2	12
GB	18	1,5	27
GNT	30	1	30
TOTALE	54		69

CHAPITRE III
OPTIMISATION DES STRUCTURES DE
TRAVAUX PUBLICS

1- Introduction

Dans la littérature technique de la construction, on trouve des certaines d'ouvrages de caractère théorique ,sur le calcul des structures, mais très peu sur les conditions des différents types, sur les raisons fondamentales qui les détermine, sur les bases qui doivent orienter leur choix et sur les idées essentielles qui guident le projeteur au début de son travail , suivant des principes qu'il a assimilés peu à peu , mais auxquels il réfléchit rarement.

Le calcul n'est pas autre chose qu'un outil qui permet de vérifier que les formes et les dimensions d'une construction encore à l'état de projet ou déjà réalisée sont capables de supporter les efforts auxquels doit être soumise.

Dans tous les problèmes, on se propose d'obtenir un certain résultat en satisfaisant a des conditions dont les unes sont essentielles et dont les autres sont accessoires.

Tout d'abord, les matériaux doivent être résistants dans la mesure où la résistance représente l'aptitude à supporter les sollicitations mécanique auxquelles ils doivent être soumis en chaque point. Pour cela ,il est nécessaire de connaitre ces sollicitations. [14]

Leurs détermination, a partir d'un ensemble de charges ou de forces extérieures, prise comme donnée du problème, et des caractères mécaniques (élastique, plastique,etc ...) du matériau .

Il y a un autre aspect du problème, que tout le monde reconnait : c'est celui de l'économie.

Toutes choses étant égales, par ailleurs, un ouvrage doit être aussi économique que possible.

Certainement, il y a des constructions somptueuses –les raisons humaines et sociales du luxe sont mal connues ; ses excès sont blâmables ; mais il existe dans le fond même de la nature humaine. Le problème, comme toujours est de lui assigner des limites raisonnables, qui varient beaucoup d'un cas à l'autre. En dehors de quelques exceptions, il y a toujours des limites de prix au-delà desquelles l'ouvrage n'est plus réalisable. En général on peut dire que, à efficacité égale la conditions du prix minimum est toujours valable et doit être prise en considération. [14]

Cependant, la solution n'est presque jamais si claire et si précise. Le prix agit sur l'augmentation ou la diminution de la sécurité, sur la durabilité, sur l'apparence esthétique,...etc. et si le cout est mathématiquement calculable, les avantages ou les inconvénients que ses variations impliquent dans les domaines si divers, sont généralement impossibles à évaluer. C'est pourquoi les opinions sur un projet, qui sont nécessairement subjectives, sont souvent contradictoires et donnent lieu à des discussions.

Toutefois, comme dans beaucoup de ces problèmes, la logique et même les mathématiques peuvent apporter un secours efficace au service du bon sens et de la pondération qui doivent toujours régler les jugements de l'homme. [14]

Et ,si l'on reste dans le domaine économique , il faut considérer aussi les frais d'entretien qui peuvent varier d'un matériau a l'autre ,ou d'un type de construction a un autre , ou même

CHAPITRE III : OPTIMISATION DES STRUCTURES DE TRAVAUX PUBLICS

varier avec les dimensions ,d'autre part ,le prix doit être examiné en tenant compte des bénéfices directs ou indirects, mesurables ou non ,que l'on attend de l'opération.

En définitive, le problème comporte quatre données fondamentales, l'usage, la résistance (y compris la stabilité), les exigences esthétiques, les conditions économiques.

L'idéal que cherchent à atteindre tous ceux qui sont associés à l'acte de construire est de réaliser l'ouvrage qui donnera les meilleurs garanties de service dans des conditions requises de sécurité, au meilleur prix .Cette dernière condition prend une importance de plus en plus grande car les besoins en équipement de toutes natures se développent à un rythme tel qu'ils nécessitent une étude approfondie des investissements nécessaires . Elles se traduisent par la recherche systématique de l'excellence à donner, dans un cadre de référence déterminé, le meilleur usage des ressources disponibles .on peut dire que l'émergence des méthodes d'optimisation et leur développement servent à rendre explicite la recherche, l'évaluation et le classement des options, ce qui jusque-là avaient été accompli de façon implicite.

Il n'existe pas, de nos jours, un modèle d'optimisation (ou une théorie générale d'optimisation) pour la totalité des opérations de conceptions et de réalisations qui s'appliquent aux systèmes de génie civil les plus importants .la théorie et les méthode d'optimisation élaborées par des chercheurs de divers pays se sont limitées jusqu'ici a des exemple très particuliers d'élément de construction et manquent ,tout en moins dans l'état actuelle ,de la qualification nécessaire pour une application générale.

Durant les cinquante dernières années, les méthodes d'optimisation ont été utilisées dans de nombreux secteurs notamment celui de l'industrie aérospatiale.

Les méthodes graphiques ont été les plus fréquemment utilisées durant les cinq premières décennies. Pendant les six dernières décennies, beaucoup de progrès a été réalisé dans le domaine de l'optimisation numérique. Malgré l'apparence diversité des thèmes abordés, la prise de conscience progressive d'une affinité profonde, tant du point de vue des structures que des méthodes, entre les différentes classes de problèmes, amène rapidement à les intégrer au sein d'une nouvelle discipline, plus vaste, la programmation mathématique, et marque l'annonce d'un vaste mouvement unificateur qui semble encore loin actuellement d'avoir atteint son terme; c'est ainsi quel 'histoire de cette discipline se trouve jalonnée par une intense activité de recherche et d'un volume considérable de publications ainsi qu'un certain nombre des travaux de synthèse remarquables. [14]

2-Concepts et formulation générale d'un problème d'optimisation

2.1-Introduction

L'optimisation peut être regardée comme une recherche systématique de l'excellence tendant à donner, dans un cadre de référence prédéterminé le meilleur usage des ressources disponibles bien que le choix de référence (objectifs réalistes, contraintes pertinentes, modèle mathématiques corrects, paramètres des charges et de sécurité adéquats) ait un effet

CHAPITRE III : OPTIMISATION DES STRUCTURES DE TRAVAUX PUBLICS

fondamental sur les résultats de l'optimisation, sa discussion comporte une étude spéciale et approfondie.

Le mot optimisation en mathématique désigne la recherche des conditions moyennant pour lesquelles une fonction donnée atteint un optimum, qui se présente le plus souvent comme un extremum. L'optimum impose qu'une certaine fonction de mérite (fonction objectif, fonction économique) soit maximale ou minimale.

C'est la recherche de la meilleure solution, évaluée selon certains critères avec prise en compte des conditions nécessaires. On voit immédiatement à quelle point ce genre de problème peut répondre à des préoccupations de tout ordre physique, mécanique, technique, économique,...etc.

Historiquement, le problème de maximiser ou de minimiser une fonction sous des conditions d'égalité est un problème mathématique bien classique (c'est un problème d'optimisation qui remonte à Lagrange après un premier intérêt porté par MONGE en 1776 à un problème de ce genre. Le fait d'étendre le théorème de Lagrange et de ses multiplicateurs ou cas où il y a aussi des contraintes d'égalité est relativement nouveau et les premiers résultats que depuis 1948 c'est à dire à l'arrivée du monde informatique

L'objectif dans l'optimisation des éléments en béton armé est de trouver les dimensions optimales et le coût minimum correspondant des matériaux mis en œuvre. En général, le nombre de variables de conception indépendantes est relativement petit et les contraintes sont données par des expressions explicites. [15]

2.2-Rôle de l'optimisation

Le rôle de l'optimisation dans la construction est capital elle permet de déterminer la meilleure solution d'un problème est d'aboutir à des coûts minimaux. Le développement des méthodes d'optimisations n'a servi qu'à rendre explicite la recherche, l'évolution et le classement des options. Les tendances faites pour développer ces méthodes en eu pour effets bénéfiques d'affiner notre compréhension du projet et d'identifier les applications valables de la sous optimisation et de restructurer un grand nombre des processus partiels qu'intègre l'étude du projet. [15]

3-Éléments d'optimisation

La programmation mathématique se propose pour objet l'étude théorique des problèmes d'optimisation ainsi que la conception et la mise en œuvre des algorithmes de résolutions.

La présence du terme "programmation" dans le nom donné à cette discipline peut s'expliquer historiquement par le fait que les premières recherches et les premières applications se sont développées dans le contexte de l'économie et de la recherche opérationnelle.

Très naturellement, la terminologie employée alors reflète l'étroite relation existant entre l'activité d'analyse mathématique d'un problème et son interprétation économique (la recherche d'un programme économique optimal).

CHAPITRE III : OPTIMISATION DES STRUCTURES DE TRAVAUX PUBLICS

C'est ainsi que G.B. Dantzig propose en 1949 le terme de programmation linéaire pour l'étude des problèmes théoriques et algorithmiques liés à l'optimisation de fonction linéaires sous contraintes linéaires. Dans le même sens, W. Kuhn and A. W. Tucker proposent en 1951 le nom de programmation non-linéaire pour l'étude des problèmes d'optimisation non-linéaires avec ou sans contraintes.

La programmation en nombres entières est suggérée par Gomory en 1958 pour les problèmes d'optimisation où les variables sont astreintes à ne prendre que les valeurs entières, tandis que le terme de programmation dynamique est employé par R.Bellman en 1957 pour une méthode générale d'optimisation des systèmes dynamiques (c'est à dire évoluant au cours du temps).

Cependant, malgré l'apparente diversité des thèmes abordés entre les années 1945 et 1960, la prise de conscience progressive d'une affinité profonde, tant du point de vue des structures que des méthodes, entre les différentes classes de problèmes, amené rapidement à les intégrer au sein d'une nouvelle discipline, plus vaste, la programmation mathématique, et marque l'annonce d'un vaste mouvement unificateur qui semble encore loin actuellement d'avoir atteint son terme. [15]

La programmation mathématique est aujourd'hui une branche particulièrement active des mathématiques appliquées, et il y a, à cela, de nombreuses raisons. La première est peut-être le nombre, la variété, et l'importance de ses applications que ce soit dans la science de l'ingénieur, ou dans d'autres domaines des mathématiques appliquées.

Sans prétendre être exhaustif, on peut citer :

En recherche opérationnelle : optimisation de systèmes technico-économiques (planification, économétrie), problèmes de transport, d'ordonnancement, de gestion de stocks, etc.

En analyse numérique : approximation, régression, résolution de systèmes linéaires et non linéaires, méthodes numériques liées à la mise en œuvre des méthodes d'éléments finis, etc.

En automatique : identification des systèmes, commande optimale des systèmes, filtrage, ordonnancement d'atelier, commande de robots, etc.

En ingénierie : dimensionnement et optimisation de structures, conception optimale de systèmes techniques complexes tels que systèmes informatiques, réseaux d'ordinateurs, réseaux de transport, de télécommunications, etc.

En économie mathématique : résolution de grands modèles macro-économiques (type modèle de Leontiev et dérivés), modèles micro-économiques ou modèles d'entreprise, théorie de la décision et théorie des jeux.

Mais l'importance de la programmation mathématique vient aussi du fait qu'elle fournit un cadre conceptuel adéquat pour l'analyse et la résolution de nombreux problèmes de mathématiques appliquées. Ceci explique sans aucun doute que la programmation mathématique ait donné lieu, depuis 30 ans, à une intense activité de recherche et à un volume de publications considérable. Mais, au lieu de ce foisonnement, l'élaboration des concepts

CHAPITRE III : OPTIMISATION DES STRUCTURES DE TRAVAUX PUBLICS

fondamentaux et la tendance à l'unification ont été constamment au centre des préoccupations, et c'est ainsi que l'histoire de cette discipline se trouve jalonnée par un certain nombre de travaux de synthèse remarquables, qui ont souvent été à l'origine de courants de recherche nouveaux et féconds. [15]

3.1-Formulation générale du problème

D'une façon générale, un problème de programmation mathématique non-linéaire peut être énoncé comme suit :

Trouver le vecteur $\{X\}$ de variables de décision (appelées aussi variables de conception) tel que :

$$Z = F(\{X\}) \text{Min}$$

$$g_i(\{X\}) \leq 0 \quad i = 1, \dots, m.$$

$$h_j(\{X\}) = 0 \quad j = 1, \dots, k.$$

Z est la fonction objectif du problème désignée également par (fonction critère ou fonction mérite). Les fonctions g_i et h_j sont appelées contraintes d'inégalité et contraintes d'égalité respectivement.

Les contraintes d'égalité peuvent souvent être éliminées et la recherche optimale peut être effectuée dans l'espace des solutions admissibles défini par les contraintes d'inégalité. A ce jour il n'existe pas une méthode de programmation mathématique non linéaire que l'on peut qualifier de façon systématique comme la plus efficace et de nombreux algorithmes ont été proposés dans la littérature spécialisée. [15]

3.2-Variables de décision

Les variables de conception ou de décision ou variables de calcul sont constituées par des sections ou par les dimensions (épaisseur, longueur, largeur,...) de la structure ou à d'autres paramètres. Dans les structures à deux ou trois dimensions ceux qui définissent la géométrie sont particulièrement intéressantes à déterminer afin de minimiser la qualité des matériaux mis en œuvre.

Le calcul consiste à définir les valeurs des composantes du vecteur $X : x_1, x_2, \dots, x_n$ qui représentent les inconnues du problème (on appelle ces composantes les variables de décision). [15]

3.3-Contraintes

La structure calculée doit satisfaire aux exigences fonctionnelles concernant la résistance, l'utilisation, ... etc. Ces exigences qu'on appelle conditions sont les limitations ou les contraintes du problème. Il convient de répartir les contraintes en deux classes ; celles qui doivent être satisfaites comme des égalités strictes et celles qui sont régies par des inégalités.

3.4-Fonction objectif

Parmi les facteurs caractéristiques d'une structure, il y a toujours un dont l'importance prédomine. C'est ce facteur qui constitue le critère d'optimisation et qui est représenté sous la forme d'une fonction objective $Z = F(\{X\})$ on dit aussi parfois : fonction économique, fonction critère ou fonction mérite.

En outre, le critère de mérite n'exige pas d'être déterministe et peut s'exprimer en terme de probabilité.

En optimisation des structures, on utilise souvent un volume minimale comme critère plutôt qu'un coût minimal pour la raison que les coefficients de coût sont trop difficile à déterminer.

4-Type des problèmes d'optimisation

Ils existent deux problèmes liées à l'optimisation :

- Problèmes probabilistes.
- Problèmes déterministes.

4.1-Problèmes probabilistes

En général le problème de dimensionnement probabiliste optimal peut être énoncé comme suit :

Pour une structure à configuration, charges probables et variations des résistances connues.

Trouver les résistances moyennes des éléments:

Telles que des niveaux de confiance spécifiés et des conditions d'économie déterminées soient satisfaits.

La confiance à ruine est définie comme la probabilité requise pour qu'une structure n'atteigne pas sa ruine plastique ; la confiance à plasticité est la probabilité nécessaire pour qu'une section de la structure ne soit pas la première à développer une rotule plastique.

4.2-Problèmes déterministes

Soit une structure dont les charges, géométrie et dimensions des sections en béton sont fixées. Le problème de dimensionnement optimal consiste à déterminer les variables x_i ($i = 1, 2, \dots, n$.) qui optimisent une certaine fonction de mérite et satisfaisant également aux contraintes.

Par conséquent, le dimensionnement optimal est équivalent à un problème d'optimisation d'une fonction non-linéaire sous des contraintes non ou linéaires. Ceci constitue un problème typique de programmation non-linéaire pouvant être résolu par les techniques de programmation mathématique. [15]

5-Méthode et formulation générale d'un problème d'optimisation déterministe

5.1-Contraintes

Chaque groupe de valeur pour les variables de décision (ou de conception) représente une conception de la structure. Clairement, quelques conceptions sont des solutions utiles pour l'optimisation du problème, mais d'autres peuvent être inadéquates en terme de fonctions, comportement ou autre considération. Si une conception satisfait toutes l'exigence ou condition imposées, elle sera dite " solution admissible " (ou solution faisable).

Les conditions (ou restrictions) qui doivent être satisfaites afin d'obtenir une conception sont dites les contraintes. Du point de vue physique on peut identifier deux sortes de contraintes :

- Les contraintes imposées sur les variables de conception et qui limitent leur champs pour des raisons que des considérations sont appelées contraintes de conception où contrainte de bonne côté. [15]

Les contraintes qui sont explicitées en forme peuvent provenir de différente considération telle que la fonctionnalité, la fabrication ou l'esthétique. De cette façon une contrainte de conception est une limitation spécifique ou imposé sur une variable conception.

- Les contraintes qui dérivent des exigences sur le comportement sont appelées les contraintes de comportement. Les limitations sur les contraintes maximales, déplacement flambement sont des exemples typiques de contraintes de comportement.

Des contraintes de comportement explicites ou implicites sont toutes deux rencontrées dans la conception pratique.

Les contraintes de comportement explicites sont souvent données par des formules présentées dans des cadres de conception ou des spécifications. Cependant, les contraintes de comportement sont généralement implicites.

D'un point de vue mathématique, les contraintes de conception et de comportement peuvent être usuellement exprimées comme un groupe d'inégalités.

$$g_j(\{x\}) \leq 0 ; \quad j = 1, \dots, m.$$

où m est le nombre de constraints d'inégalité et X le vecteur des variables qui peut comprendre les variables de décision et de comportement. Souvent dans un problème de conception des structures, on a aussi à considérer d'égalité de la forme générale :

$$h_j \{(X)\} = 0 ; \quad j = 1, \dots, k.$$

Où k est le nombre d'égalité.

Dans la plupart des cas, les contraintes d'égalité peuvent être utilisées pour éliminer des variables des processus d'optimisation en réduisant leur nombre.

CHAPITRE III : OPTIMISATION DES STRUCTURES DE TRAVAUX PUBLICS

En général, les équations d'analyse d'un problème sous condition peuvent être exprimées en termes de variable de la forme de l'équation. Cependant, si nous choisissons les variables comme indépendante alors ces équations peuvent calculées les variables de comportement pour chacun des conceptions données.

Cette procédure est avantageuse dans plusieurs cas, puisque nous avons à trouver les valeurs optimale d'un nombre moindre de variable, et le problème aider avoir une dimension plus base.

L'égalité peut présenter aussi différente considération de conception telle qu'un rapport désiré entre la longueur de section transversale et son épaisseur de telle simple et explicite contrainte peuvent facilement utilisé pour réduire le nombre de variables indépendante.

Cependant, dans certains cas la procédure de d'élimination peut être complexe et consomme de temps et quelques contraintes d'égalité doivent être considérées. [15]

5.2-Espace de conception

Nous pouvant voir chaque variable de décision comme une dimension dans un espace de conception, et chaque groupe particulier de ces variables comme un point de cette espace. Dans le cas de deux variables, l'espace de conception se ramène à un plan.

Dans le cas général de n variable nous avons un hyperplan de dimension n . Une conception qui satisfait toute ces contraintes $g_j(\{X\}) \leq 0$ est une conception faisable. Le groupe des valeurs variable de conception qui satisfait l'équation $g_j(\{X\}) = 0$ forme une surface dans l'espace de conception c'est une surface dans le sens qu'elle coupe l'espace en deux régions, une où $g_j > 0$ et l'autre $g_j < 0$.

Le groupe de toutes les conceptions faisables forme la région faisable. Les parties des surfaces de contraintes respectives qui limitent la région faisable forment la surface de contraintes composées.

Les points à l'intérieur de la région faisable ($g_j < 0 ; i = 1, \dots, m$). Sont appelés points, libres, ou conception sans contrainte.

Les points sur la surface sont appelées ($g_j = 0$) points limites.

Il est possible que la région faisable soit composée de deux ou plus de sous régions disjointes, mais ceci est rare dans les problèmes de conception ou les éléments ne peuvent pas éliminés.

Le sous espace où deux ou plusieurs contraintes $g_j(\{X\})$ est appelé une intersection. Dans l'espace à deux dimensions, l'intersection de deux contraintes est un point.

La $j^{\text{ème}}$ contrainte est dite être active en un point de conception si $g_j(\{X\}) = 0$ et elle est dite passive si $g_i(\{X\}) < 0$. Si $g_i(\{X\})$ □ 0, la con
correspondante est infaisable.

Les contraintes d'égalité :

$$h_j(\{X\}) = 0 \quad j = 1, \dots, k.$$

Introduisent un couplage entre les variables ils peuvent être vues comme des surfaces dans l'espace de conception à n dimensions.

Les points de conception faisable doivent être localisés à l'intersection de ses surfaces.

Le nombre de contrainte d'égalité, k doit satisfaire $k \leq T$, où T est le nombre total des variables.

Dans le cas où $k = T$, les variables peuvent en principe être déterminées comme solutions des équations : $h_j(\{X\}) = 0$ et il n'y a pas de problème d'optimisations au sens propre. [15]

5.3-Fonction objectif

Il existe habituellement un nombre infini de conception faisable. Pour obtenir le meilleur, il est nécessaire de former une fonction de variable à utiliser pour la comparaison des conceptions faisables.

La fonction objectif appelé aussi coût, critère, ou fonction de mérite et la fonction à partir de laquelle la petite valeur est recherché dans un problème d'optimisation. C'est une fonction de variable X et elle peut représenter le poids, le coût de la structure ou n'importe quel autre critère à partir duquel une conception possible est préférée aux autres.

Nous supposons toujours que la fonction objectif $Z = F(\{X\})$ doit être minimiser ceci n'implique aucune diminution de la généralisation puisque le minimum de $-F(\{X\})$ est obtenue lorsque $F(\{X\})$ est maximum, c'est-à-dire $\text{Max}(F\{X\}) = -\text{Min}(-F\{X\})$.

Le choix d'une fonction objectif peut être une des plus importantes décisions dans la procédure d'une conception optimale.

La formulation mathématique de la fonction objectif peut être une tâche très difficile, par exemple lorsque des valeurs esthétiques importantes sont influencés par les variables de décision. En général, la fonction objectif représente la propriété simple la plus importante d'une conception mais elle peut représenter aussi la résultante d'un certain nombre de propriétés. Des précautions doivent être prises pour optimiser par rapport à la fonction objective qui reflète au mieux, le véritable but des problèmes d'optimisation.

Le poids est la fonction objectif la plus habituellement utilisées dû au fait qu'il est facilement quantifiable bien que la plupart des méthodes d'optimisation ne se limitent pas à la minimisation du poids. Le poids de la structure est souvent d'une importance critique, mais la minimisation du poids n'est pas toujours la plus facile.

Le coût est d'une importance pratique plus grande que celle du poids, mais il est souvent difficile d'obtenir suffisamment de données pour la construction d'une fonction réelle du coût. Une fonction du coût général doit inclure le coût des matériaux, de la fabrication, du

transport, ...etc. En plus du coût engendré par construction et la conception d'autres facteurs tels que mise en service, maintenance, réparation, assurance ...etc. doivent être considérés. Cependant, il n'est pas toujours désirable de considérer une fonction aussi large que possible.

D'un point de vue pratique, il est demandé d'introduire une fonction objective qui est à la fois sensible aux variations des variables de décision et à la composante la plus importante du coût. En général, la fonction objective est une fonction non linéaire des variables de décision.

5.4-Formulation dans l'espace des variables de conception

Le problème général de conception de la structure optimale peut être formulé comme étant le choix d'une conception et des variables de comportement correspondantes soumises aux contraintes relatives à la conception et au comportement de la structure, de telle sorte que la fonction objectif soit minimale.

Si le comportement de la structure peut être facilement calculé pour n'importe quelle valeur donnée des variables de conception, les équations d'analyse peuvent être extraites de la formulation mathématique. Dans de tels cas, nous utilisons les équations d'analyse pour évaluer les contraintes qui sont données de façon implicite. Une formulation explicites de ces contraintes est possibles seulement pour des structures déterminées ou simples.

Supposons que toutes les contraintes d'égalité peuvent être éliminées, le problème de conception optimale peut être formulé mathématiquement comme étant une façon de choisir le vecteur des variables de décision $\{X\}$ de telle sorte :

$$g_i(x) \leq 0 \quad i=1, \dots, m.$$

$$Z = F(\{X\}) \longrightarrow \text{Min.}$$

L'équation signifie que

$F(\{X\})$ donne un minimum.

Ce problème est dit formulé dans l'espace de conception puisque les variables de décision sont les seules indépendantes. Les deux équations ci-dessus représentent une forme de problème appelé programmation mathématique. [15]

CHAPITRE IV
DIMENSIONNEMENT OPTIMAL D'UN
CORPS DE CHAUSSEE

1-Formulation du problème de dimensionnement d'un corps de chaussée

1.1-Fonction objectif :

La fonction objectif est une fonction cout de un mètre carré de chaussée, contient le cout du chaque couche, couche de roulement couche de base couche de fondation.

Fonction cout =prix unitaire *poids

a-bordereau des prix unitaires

Tableau IV.1 : (BPU) Bordereau des prix unitaire des fournitures et mise en œuvre de chaque couches de corps de chaussée

Désignation des travaux	Unité	Prix unitaire (DA)	Observation
Fourniture et mise en œuvre d'une couche de fondation en GNT	t	2800,00	BPU d'après les entreprise de réalisation des TP en Algérie. D'après service marché de la DTP
Fourniture et mise en œuvre d'une couche de base en GB	t	6000,00	
Fourniture et mise en œuvre d'une couche de roulement en BB	t	7000,00	

b-la densité :

On sait que le poids est égale la masse volumique fois le volume, les masses volumique des matériaux :

$$\rho_{BB} = 2.3 \text{ t/m}^3$$

$$\rho_{GB} = 2.1 \text{ t/m}^3$$

$$\rho_{GNT} = 1.5 \text{ t/m}^3$$

c – fonction cout C

La fonction cout est exprimé comme suit:

$$C = \sum_i^3 pr_i * P_i \text{ avec } p = \rho * v \text{ (p: Masse)}$$

$$C = pr_{BB} * P_{BB} + pr_{GB} * P_{GB} + pr_{GNT} * P_{GNT}$$

$$C = pr_{BB} * \rho_{BB} * V_{BB} + pr_{GB} * \rho_{GB} * V_{GB} + pr_{GNT} * \rho_{GNT} * V_{GNT}$$

$$C = pr_{BB} * \rho_{BB} * h_{BB} * S + pr_{GB} * \rho_{GB} * h_{GB} * S + pr_{GNT} * \rho_{GNT} * h_{GNT} * S$$

$$\text{On prend : } S = 1 \text{ m}^2$$

$$C = pr_{BB} * \rho_{BB} * h_{BB} + pr_{GB} * \rho_{GB} * h_{GB} + pr_{GNT} * \rho_{GNT} * h_{GNT}$$

$$C = 7000 * 2.3 * h_{BB} + 6000 * 2.1 * h_{GB} + 2800 * 1.5 * h_{GNT}$$

$$C = 16100 * h_{BB} + 12600 * h_{GB} + 4200 * h_{GNT}$$

1.2 Définitions des contraintes

a-Contraintes liées aux différentes épaisseurs

-Couche de roulement : l'épaisseur de couche de roulement en béton bitumineux « BB » est comprise entre $5\text{cm} \leq h_{BB} \leq 8\text{cm}$

-Couche de base : l'épaisseur de la couche de base en grave bitumineuse « GB » est comprise entre $10\text{cm} \leq h_{GB} \leq 20\text{cm}$

-Couche de fondation : l'épaisseur de la couche de fondation en grave non traité GNT est comprise entre $20 \leq h_{GNT} \leq 35\text{cm}$

b-contraintes liée à l'application de la méthode CBR :

Nous avons choisi la structure quelle a été calculé par la méthode CBR auparavant dans l'Exemple de dimensionnement de chaussées souples traité par la méthode CBR qu'on va l'optimiser

Tableau IV.2: Structure du corps de chaussée selon la méthode C.B.R

Structure	BB	GB	GNT	Total
e_{réelle}(cm)	6	18	30	54
e_{équivalente} (cm)	12	27	30	69

-L'épaisseur équivalente :
 $2 h_{BB} + 1.5 h_{GB} + 1 h_{GNT} > 69 \text{ cm}$

c-règle courante de bonne pratique

$$h_{BB} \leq h_{GB} \leq h_{GNT}$$

d – contrainte de non négativité des variables :

$$h_{BB}, h_{GB}, h_{GNT} > 0$$

La résolution du problème d'optimisation est de trouver les différentes épaisseurs des couches h_{bb} , h_{GB} , h_{GNT} tel que le coût de réalisation C est minimum.

Trouver :

$$C(h_{BB}, h_{GB}, h_{GNT}) \longrightarrow \text{Min.}$$

$$\text{Min } C(h_{BB}, h_{GB}, h_{GNT}) = \text{Min } (16100 \times h_{BB} + 12600 \times h_{GB} + 4200 \times h_{GNT})$$

CHAPITRE IV: DIMENSIONNEMENT OPTIMAL D'UN CORPS DE CHAUSSEE

Tel que la fonction cout $C(h_{BB}, h_{GB}, h_{GNT})$ est soumise aux contraintes suivantes :

$$1-h_{BB} > 5 \text{ cm}$$

$$2-h_{BB} < 8 \text{ cm}$$

$$3-h_{GB} > 10 \text{ cm}$$

$$4-h_{GB} < 20 \text{ cm}$$

$$5-h_{GNT} > 20 \text{ cm}$$

$$6-h_{GNT} < 35 \text{ cm}$$

$$7-2h_{bb}+1.5h_{GB}+h_{GNT} \geq 69$$

La résolution de ce système d'équation et d'inéquation consiste à utiliser la méthode de simplexe. Il s'agit d'un système mathématique linéaire.

2-Présentation de la méthode du simplexe et résolution des systèmes linéaire

A-Présentation et histoire

Pierre-Simon de Laplace (1749-1827), mathématicien, astronome, physicien et homme politique français, ainsi que Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830), mathématicien et physicien français, ont été les premiers mathématiciens à s'occuper sur ce qu'on ne nommait pas encore à l'époque « programmes linéaires » mais simplement « problèmes ». Fourier a proposé une méthode d'élimination pour traiter des systèmes d'inéquations linéaires et a défini une méthode géométrique pour atteindre le point le plus bas d'un solide délimité par des facettes planes (un « polyèdre »), idée très voisine de celle qui préside à l'algorithme dit « du simplexe ». Fourier est certes plus connu pour ses séries trigonométriques ou encore en physique pour sa résolution de l'équation de la chaleur, mais l'importance économique de la programmation linéaire n'était pas évidente à cette époque, et alors, ses travaux sont tombés dans l'oubli. [9]

Charles-Jean de La Vallée Poussin (1866-1962), mathématicien belge, a subi le même sort vers 1911. En effet, il s'est vu confier par des astronomes un problème d'approximation minimale qui revenait à résoudre un problème de programmation linéaire, qu'il a résolu par une méthode de changement de base (comme le simplexe). Malgré cela, il était encore trop tôt pour qu'elle soit utilisée en économie et sa méthode n'avait été diffusée que dans le cercle des astronomes. Elle est donc restée totalement inconnue des chercheurs opérationnels jusqu'à une date bien postérieure de l'invention de l'algorithme du simplexe. [9]

Ce n'est qu'à l'époque de la Seconde Guerre Mondiale qu'on commence à modéliser et résoudre des problèmes de logistique qui se formulaient en tant que problèmes linéaires. Ainsi, Leonid Vitalievitch Kantorovitch (1912-1986), mathématicien et économiste russe, a

CHAPITRE IV: DIMENSIONNEMENT OPTIMAL D'UN CORPS DE CHAUSSEE

imaginé en 1930 une méthode inspirée des multiplicateurs de La Grange, classiques en mécanique, pour résoudre des « programmes de transport » : Il invente la programmation linéaire. Les théories de Kantorovitch ne sont publiées qu'après l'ère stalinienne. Entre 1938 et 1948, il échappe par deux fois à l'emprisonnement en raison de son implication dans le programme nucléaire soviétique. Ses théories trouvent des applications dans la libéralisation de l'économie soviétique. Un des apports de Kantorovitch est d'avoir incité à une meilleure prise en compte la productivité marginale de l'investissement, afin de résoudre les difficultés liées à l'allocation des ressources au sein d'une économie socialiste. En 1971, Kantorovitch dirige un centre de recherche d'économie mathématique créé spécialement pour lui à Moscou. Quatre ans plus tard, il partage le « prix Nobel » d'économie avec Tjalling Koopmans (1910-1985), spécialiste de l'économie mathématique, en reconnaissance de ses « contributions à la théorie de l'allocation des ressources ». [9]

La contribution décisive a été l'invention de l'algorithme du Simplexe, développé à partir de 1947 notamment par Georges Dantzig (1914-2005), mathématicien américain, et John Von Neumann (1903-1957), mathématicien et physicien américano-hongrois. Cet algorithme a ensuite été implémenté sur les premiers ordinateurs et perfectionné (« méthode révisée du simplexe ») pour accroître la précision des résultats et diminuer le volume de mémoire nécessaire à la résolution. [9]

Vers 1975-1979, Leonid Khachiyan, mathématicien soviétique, met au point la méthode de l'ellipsoïde, méthode itérative utilisée pour minimiser des fonctions convexes. En informatique théorique, cette méthode est connue comme étant le premier algorithme de complexité polynomiale découvert pour résoudre les problèmes d'optimisation linéaire. [9]

Au milieu des années 80, Narendra Karmarkar, mathématicien indien, a proposé une nouvelle méthode créée aux Bell Laboratoires qui permettait de résoudre de très gros problèmes linéaires, par une démarche « intérieure » au polyèdre des solutions admissibles. L'algorithme de Karmarkar est une méthode du point intérieur : la solution candidate courante ne suit pas les bornes de l'espace faisable comme dans l'algorithme du simplexe, mais approche par l'intérieur de l'espace faisable et atteint la solution optimale de manière asymptotique. Vues les immenses répercussions économiques et les implications financières de cette découverte, la méthode n'avait été publiée que partiellement : toutefois la communauté scientifique internationale a confirmé désormais la validité de l'approche de Karmarkar. [9]

Notons toutefois que sur les problèmes linéaires de taille petite et moyenne, le Simplexe garde souvent l'avantage. Depuis de nombreuses « méthodes intérieures » ont vu le jour.

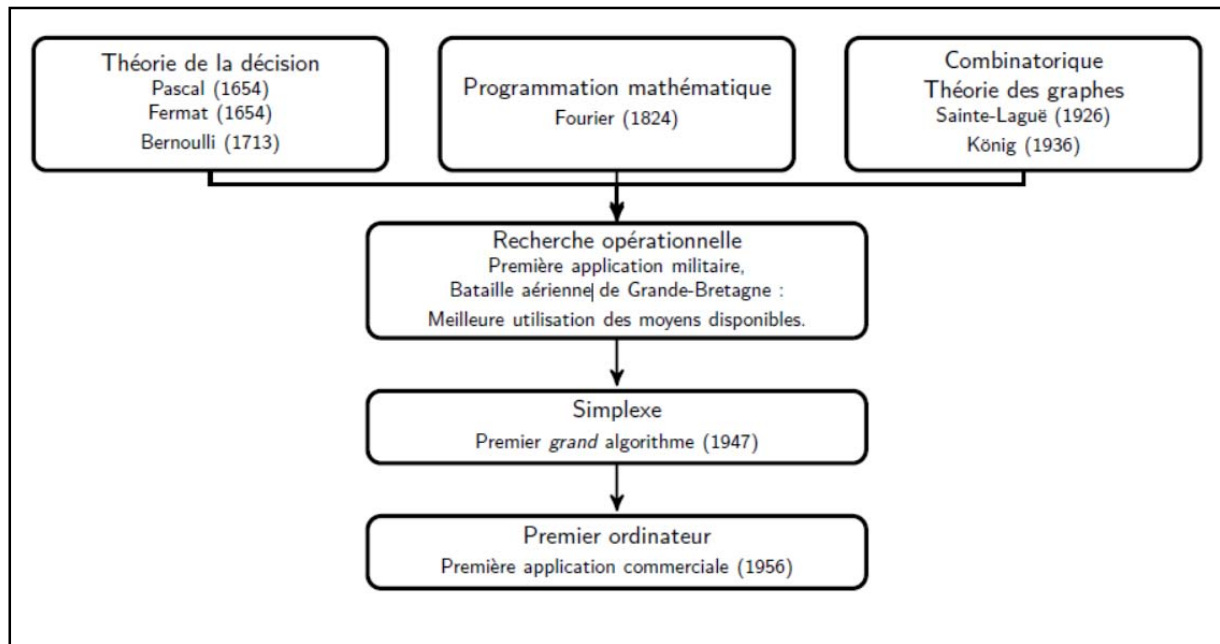


Figure IV.1 : représente l'organigramme d'évolution de la méthode de simplexe [10]

b-Principe de la méthode de simplexe

L'algorithme procède de la façon suivante :

1. on recherche un sommet de départ ;
2. on teste si ce sommet est l'optimum ou si la fonction objectif n'est pas bornée inférieurement ; dans ce cas le problème n'a pas de solution finie ;
3. si le sommet que l'on vient d'examiner n'est pas optimal, on se déplace sur un sommet voisin pour lequel la fonction économique diminue et on repasse à l'étape précédente.

Le nombre de sommets étant fini et tout minimum local étant absolu, le sommet optimal est atteint lorsqu'aucun des sommets voisin ne permet plus de diminution du critère.

c-Etape de l'algorithme de simplexe

La résolution par l'algorithme du simplexe se déroule selon 8 étapes.

-1 ère étape : Écrire le système sous forme standard Il s'agit de convertir le programme établi sous forme canonique (système d'inéquation) sous la forme standard (système d'équation avec variable d'écarts). Les variables d'écart introduites au cours de cette transformation représentent les contraintes techniques et commerciales disponibles qu'il convient de saturer.

-2 ème étape : Construire le premier tableau correspondant à la forme standard

-3 ème étape : Choisir les variables à introduire dans la base. Pour cela choisir le coefficient le plus fort de la fonction économique

-4 ème étape : Choisir la variable à enlever de la base (rapport : second membres / coefficient de la variable choisie). Retenir le plus faible.

-5 ème étape : Encadrer le pivot.

-6 ème étape : Multiplier la ligne du pivot par le rapport : $1 / \text{valeur du pivot}$ (ou diviser la ligne du pivot par le pivot)

-7ème étape : Calculer les valeurs des autres lignes

CHAPITRE IV: DIMENSIONNEMENT OPTIMAL D'UN CORPS DE CHAUSSEE

-8 ème étape : Les coefficients de la fonction économique sont-ils tous nuls ou négatifs ? (si oui nous sommes à l'optimum, sinon nous effectuons un nouveau passage) [11]

d-Optimisation du programme lineaire

Le but est d'analyser et de résoudre analytiquement ou numériquement les problèmes qui consistent à déterminer le meilleur élément d'un ensemble, au sens d'un critère quantitatif donné.

Le système étant représenté par un modèle mathématique décrivant son état ou son contrôle à l'aide de variables (inconnues et liées par des équations), le problème consiste à trouver des solutions satisfaisant un objectif quantitatif tout en respectant d'éventuelles contraintes.

e-Programme utiliser

Nous avons choisi le programme SCIENTIFIC WORKPLACE 5.50 BUILD 2953 , par ce que c'est le programme le plus utilisé à l'échelle internationale pour l'optimisation dans le domaine de la recherche notamment dans le calcul et l'optimisation des corps de chaussée. C'est pour ces raisons que nous avons pris cet outil.

Scientific WorkPlace (souvent abrégé en SWP) est un progiciel de traitement de texte scientifique sous Microsoft Windows et OS X. Bien qu'il soit annoncé comme un traitement de texte basé sur WYSIWYG LaTeX, il s'agit en fait d'une interface graphique permettant d'éditer des fichiers source LaTeX avec la même facilité d'utilisation d'un traitement de texte, tout en conservant une vue d'écran ressemblant, mais non identique, à celle éventuelle. sortie que LaTeX produit. Par exemple, son affichage montre un texte enveloppé dans la largeur de l'écran plutôt que dans la largeur éventuelle de la page, et des équations colorées plutôt que dans le rendu noir et blanc que LaTeX produirait normalement. Il comprend également un système de calcul algébrique intégré .

Scientific WorkPlace étant basé sur LaTeX, il peut être utilisé pour produire des fichiers dans le style maison de toute revue scientifique utilisant également LaTeX , et le logiciel facilite la modification du style général d'un document en une seule opération. Il est livré avec de nombreux styles prédéfinis, mais l'installation d'un nouveau style peut être un peu compliquée. [12]

L'ensemble du programme fonctionne de la façon suivante. On commence par demander à l'utilisateur de saisir le nombre de variables présentes dans la fonction économique puis on les lui fait saisir. Après on demande à l'utilisateur de saisir le nombre de contrainte et le nombre maximum de variable pour les contraintes. Une fois les paramètres initialisés, l'utilisateur doit saisir les variables de chaque contrainte ligne à ligne et ensuite l'algorithme s'applique à la saisie effectuée par l'utilisateur qui sera mise sous forme de matrice pour gérer le traitement. [13]

f-Les étapes de résolution du programme linéaire par la méthode de simplexe (OUTIL WORKPLACE)

-SQUARE BRAKETS:

Cette icône permet de créer des crochets afin de rentrer l'équation de coût Z et les différentes contraintes liées aux épaisseurs des couches constituant notre corps de chaussée,

-MATRIX:

Permet la gestion et la structuration du simplexe introduction du nombre de colonnes et lignes de la matrice de simplexe, cette classe permet notamment de faire saisir à l'utilisateur la fonction économique et les contraintes et elle s'occupera de mettre le problème en forme de matrice et également d'afficher les différents éléments tels que les lignes ou un ensemble de lignes

-COMPUTE :

Cette classe a pour but de résoudre une équation linéaire par la méthode du simplexe, elle est constituée de la classe « COMPUTE-SIMPLEXE-MINIMIZE or MAXIMIZE » et elle dispose d'une seule fonction qui est « simplex » qui s'occupera de toutes les étapes de calcul afin de donner des résultats optimaux (Min ou MAX)

3- Résolution du problème par la méthode de simplex et estimation des couts de réalisation

-Le cout de chaussée dimensionnée par l'optimisation de la méthode CBR (résolution du programme linéaire par SIMPLEX)

Après la résolution de la fonction $\text{Min } C(h_{BB}, h_{GB}, h_{GNT}) = \text{Min } (16100 \times h_{BB} + 12600 \times h_{GB} + 4200 \times h_{GNT})$ en utilisant la méthode de simplexe par l'outil numérique SCIENTIFIC WORK PLACE nous avons trouvé la solution optimale suivantes:

$$h_{BB} = 8 \text{ cm}$$

$$h_{GB} = 12 \text{ cm}$$

$$h_{GNT} = 35 \text{ cm}$$

L'utilisation de ces épaisseurs donne un cout de réalisation comme suit:

Le cout d'un mètre carré de chaussée constituée de 8BB+12GB+35GNT est estimé à la valeur de : $16100 \times 0.08 + 12600 \times 0.12 + 4200 \times 0.35 = 4270.00 \text{ DA/m}^2$

Pour une chaussée d'une largeur de 7 m et une longueur de 1 km soit 1000 m, nous avons une surface $S = 1000 \times 7 = 7000 \text{ m}^2$

Le cout de réalisation de ce tronçon avec les différentes couches en matériaux mentionnés ci-dessus est estimé aux prix suivants: $\text{Prix} = 4270.00 \text{ DA/m}^2 \times 7000 \text{ m}^2 = 29\,890\,000.00 \text{ DA}$ soit en lettre : vingt-neuf millions huit cent quatre-vingt-dix mille dinars

CHAPITRE IV: DIMENSIONNEMENT OPTIMAL D'UN CORPS DE CHAUSSEE

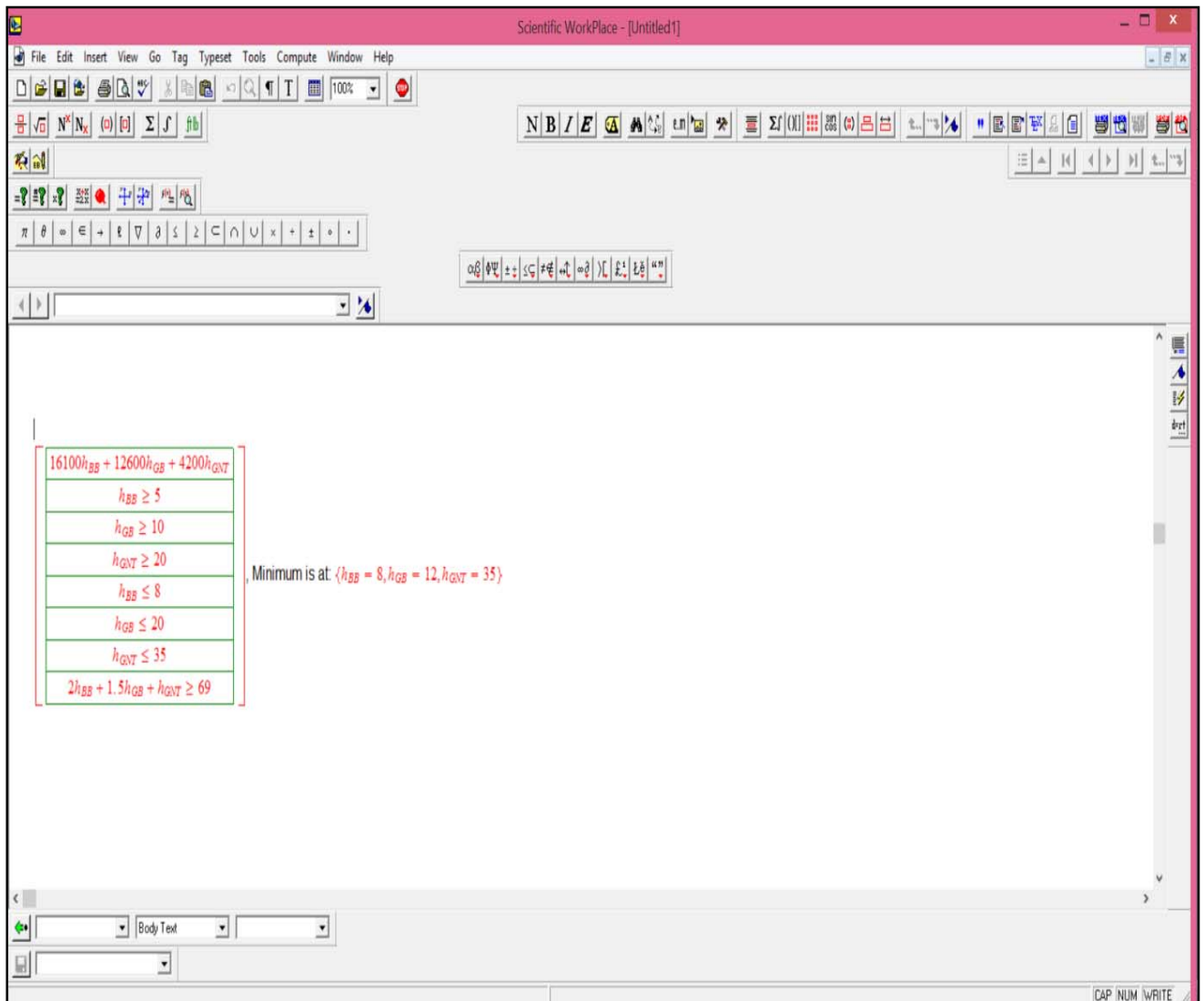


Figure IV.2 : représente la résolution du programme linéaire par la méthode de simplexe sur SCIENTIFICWORK PLACE

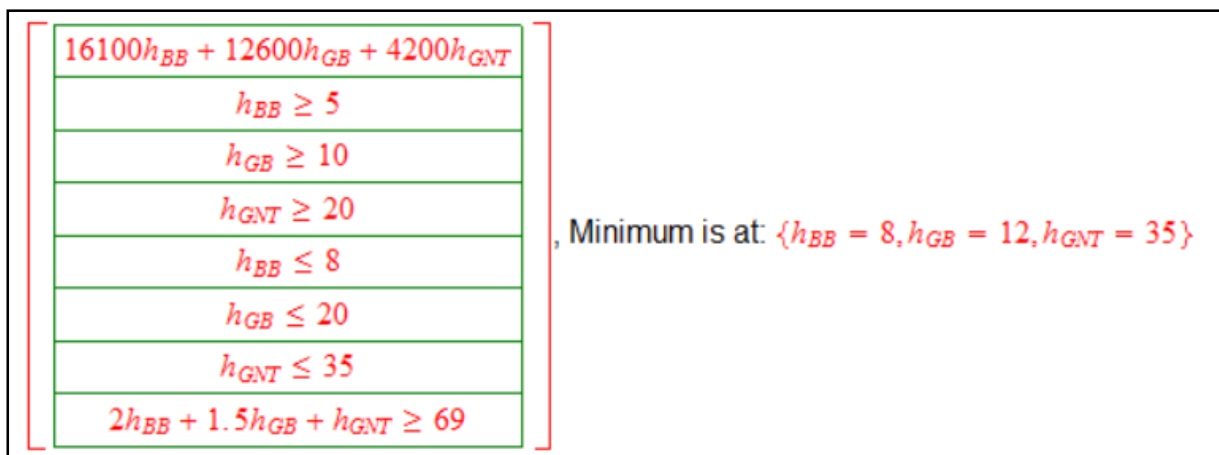


Figure IV.3 : représente un zoom sur les résultats obtenus par le programme SCIENTIFICWORKPLACE

4-Le Cout de chaussée dimensionnée par la méthode CBR classique

Le cout d'un mètre carré de chaussée constituée de 6BB+18GB+30GNT est estimé a la valeur de : $16100 \times 0.06 + 12600 \times 0.18 + 4200 \times 0.30 = 4494.00 \text{ DA/m}^2$

Pour une chaussée d'une largeur de 7 m et une longueur de 1 km soit 1000 ml, nous avons une surface $S = 1000 \times 7 = 7000 \text{ m}^2$

Le cout de réalisation de ce tronçon avec les différentes couches en matériaux mentionné ci-dessus est estimé aux prix suivant: $\text{Prix} = 4494.00 \text{ DA/m}^2 \times 7000 \text{ m}^2 = 31\,458\,000.00 \text{ DA}$ soit en lettre : vingt-neuf millions huit ce quatre-vingt-dix mille dinars .

5-Comparaison des résultats

Nous avons trouvé deux résultats différentes pour les mêmes donnés fixé auparavant, pour cela nous avons remarqué que les résultats obtenues par l'optimisation de la méthode CBR (RESOLU PAR LE PROGRAMME LINEAIRE DE SIMPLEX) sont avantageuses par rapport aux résultats obtenue par la méthode CBR classique.

Tableau IV.3 : comparaison entre la méthode classique et la méthode optimale

	Solution classique	solution optimale
Epaisseurs des différentes couches	6BB+18GB+30GNT	8BB+12GB+35GNT
Le cout /M²	4 494.00 DA/m ²	4270.00 DA/m ²
Le prix de 1000 ml x 7ml =7000m²	31 458 000.00DA	29 890 000.00
Economie	1 568 000,00 DA/KM/7ml	
Le gain en %	5 %	

CHAPITRE IV: DIMENSIONNEMENT OPTIMAL D'UN CORPS DE CHAUSSEE

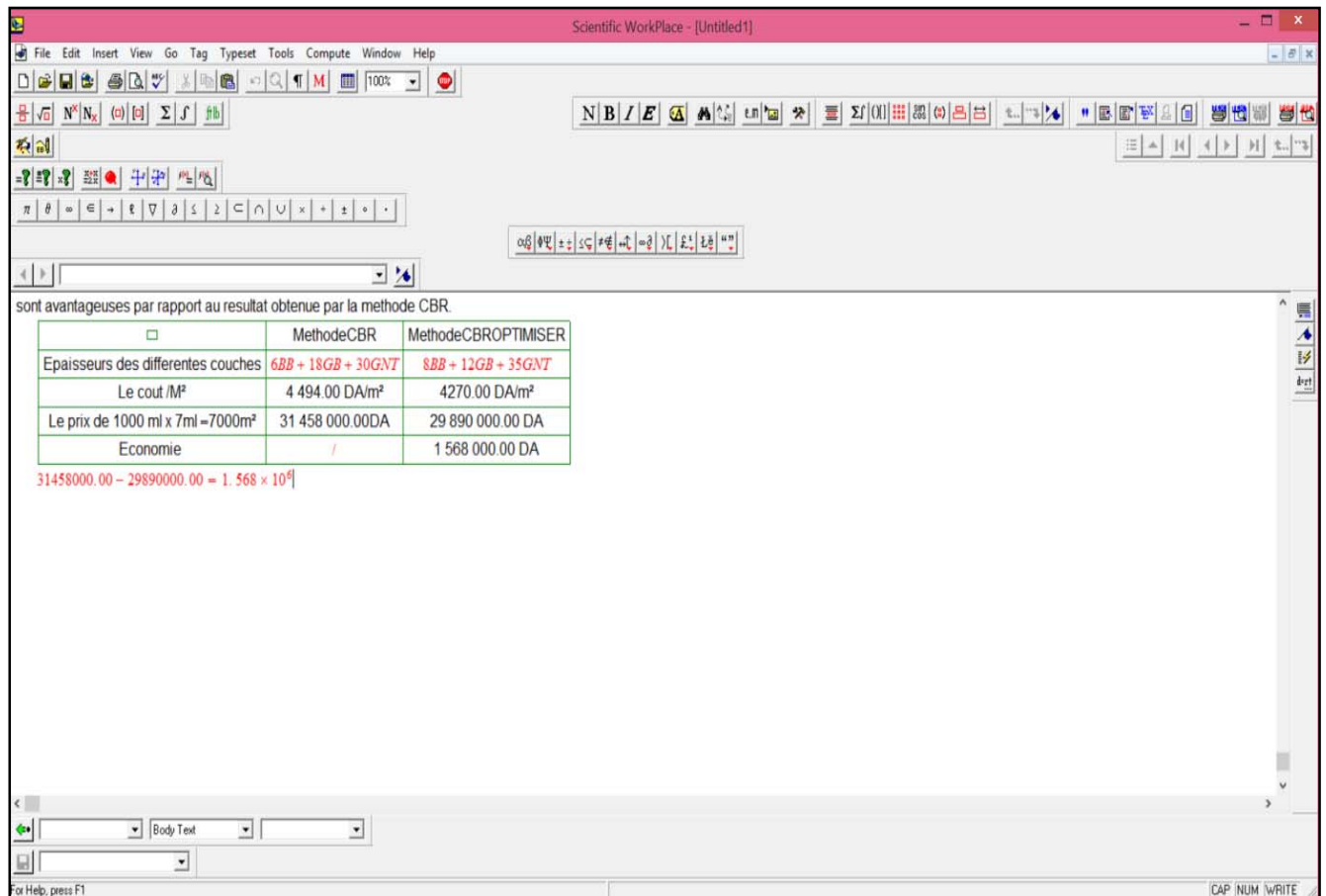


Figure IV.4 : représente les résultats du cout de réalisation obtenue par le programme SCIENTIFICWORK PLACE

	Methode CBR	Methode CBR OPTIMISER
Epaisseurs des differentes couches	6BB + 18GB + 30GNT	8BB + 12GB + 35GNT
Le cout /M²	4 494.00 DA/m²	4270.00 DA/m²
Le prix de 1000 ml x 7ml =7000m²	31 458 000.00DA	29 890 000.00 DA
Economie	/	1 568 000.00 DA

Figure IV.5 : représente un zoom sur les résultats du cout de réalisation obtenue par le programme SCIENTIFICWORK PLACE

-Le bénéfice obtenu

$$B = C_{\text{classique}} - C_{\text{optimal}} = 1\,568\,000.00 \text{ DA}$$

Les résultats obtenues à partir de dimensionnement optimal du corps de chaussée permettent de réduire les couts de réalisation d'un gain de 5% et un bénéfice de 1 568 000.00 DA

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le travail que nous avons effectuée nous a permis de connaître les méthodes de dimensionnement des corps de chaussées souples pour la réalisation des projets de travaux publics.

Pour le bon déroulement des étapes de notre travail, nous avons dû apprendre à établir la méthode et la formulation générale d'un problème d'optimisation à savoir les contraintes et la fonction objectif qui définit le cout générale.

La résolution des problèmes linéaires qui se posent dans l'optimisation des structures de travaux publics nécessite la détermination d'un algorithme du simplex qui nous permettra par la suite de minimiser les couts de réalisations des routes tout en gardant les caractéristiques mécaniques des corps de chaussées optimisées.

Les résultats obtenus par la méthode optimale permettent de réduire les couts de réalisations d'un kilomètre de chaussée d'environ de 5% par rapport à la méthode classique, avec un bénéfice évalué à environ **1 568 000.00 DA**.

Nos résultats de dimensionnement du corps de chaussé obtenus par méthode du simplexe sont plus simple, faciles à interpréter et pratique du point de vue économique.

Sachant que le modèle développé suite à notre travail a été négligé auparavant dans ce domaine, nous espérons avoir apporté notre modeste contribution envers les générations à venir en vue de la recherche scientifique dans la réalisation des projets routiers.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [1]DJELTI, Abdelkader Zakaria ; HATTOU, Mohammed. Etude de la réhabilitation du cheminde wilaya CW54.mémoire d'ingénieur. Tlemcen : juillet 2009.
- [2] : LCPC ; SETRA. Réalisation des remblais et des couches de forme ; Guide techniquefascicule 1et2. 2éme édition. Paris: Bagneux, juillet 2000.
- [3] : LCPC ; SETRA. Catalogue des structures types de chaussées neuves. Paris : ministres deL'équipement des transports et du logement ; Bagneux, 1998.297p.
- [4] : G, JOEFFROY ; R, SAUTEREY. Dimensionnement des chaussées. Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées ,1991. p244.
- [5] : KHIREDINE Zakaria ; Mr KHASNADJIMounir.Dimensionnement d'une structure De chaussée en utilisant les matériaux locaux .Université M'hamedBouguerraBoumerdes , 2015
- [6] :HAMANA Halima ; KOUININI Naima. Memoire de master. Recherche de l'équivalent sable-cellule en substitution d'une chaussée en tuf compacté. UniversiteKasdiMerbah Ouargla ,2015
- [7] :CTTP, Catalogue de dimensionnement des chaussées neuves (fascicule 1,2 et 3) Nov.2001.
- [8] :N.K.HarrisA.GonzalezE.J.OBrienP.McGetrick /Characterisation of pavement profile heights using accelerometer readings and a combinatorial optimisation technique (<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2009.09.035>)
- [9] SCHUIMER JORDAN & GRILL DYLAN . Article M4202C. université de LORRAINE. DUT Informatique – IUT de Saint-Dié-des-Vosges – 2015/2016
- [10] les cours d'E. Fromont(Universit'e Jean Monnet) , M. Bierlaire (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) et C. Jard (Ecole Nationale Sup'erieure de Cachan)
- [11] bernard auge, Alexandre vernhet, leçon 06030C la programation linéaire 2.
- [12] Andreas Karlsson, Journal of Statistical Software. October 2006, Volume 17, Software Review 1. <http://www.jstatsoft.org/>.Uppsala University
- [13] Dr Christopher, Computation using Scientific WorkPlace v6 <https://www.sciword.co.uk/manuals.htm>

[14] Dr Ferhat Fedghouche, Minimum cost plastic design of steel beams using Eurocode 3.ENSTP. 04/2017

[15] Dr Ferhat Fedghouche, Cost optimization of reinforced high strength concrete T-sections in flexure.ENSTP. 01/2014

Nocedal, J. and Wright, S. J., Numerical optimization, Second edition, New York, Springer Verlag, 2006.

Boggs P. T. and Tolle J. W., Sequential quadratic programming, ActaNumerica, Cambridge UniversityPress, Cambridge, p. 1-51, 1995.

Fletcher R., Pratical methods of optimization, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Chichester, 1987.

J. C. OPPENLANDER S. S. HEJAL L. D. BURNS/Optimization of the structural design of asphalt pavements (september 1971 - number 18) /purdue university and indiana state highway commission

Hejal, S. S., S. R. Yoder, and J. C. Oppenlander, "Optimal Design of Flexible Pavement Section," Highway Research Record, Highway Research Board, Number 337, TWIT.

Hicks, L. D. , "Structural Design of Flexible Pavements in North Carolina," Proceedings , International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, August 1962.

KHALED A. ABAZAa,* and SAMEER A. ABU-EISHEHb/An Optimum Design Approach for Flexible Pavements,/Department of Civil Engineering, Birzeit University

Khaled A. Abaza/Optimum Flexible Pavement Life-Cycle Analysis Model /, P.E.1

AnNAN A. BASMA AND Anu H. AL-BALBissr/Probabilistic Design of Flexible and Rigid Pavements Using AASHTO Equations

Ali Reza Ghanizadeh and Mansour Fakhri /A Mixed-integer Programming Model to Determine the Optimum Design of Flexible Pavement Structure/ Department of Civil Engineering, Eng. Faculty of Sirjan, ShahidBahonar university, Kerman, Iran/ 1 School of Civil Engineering, K. N. Toosi university and technology , Tehran, Iran

Fakhri, M., A.R. Ghanizadeh, 2004. Optimization of Pavement Design in AASHTO Method by Means of a Linear Programming Model, Journal of Transportation Research, 1(1): 77-89. in Persian.

Danny Y. Lu, Robert L. Lytton, and Chester H. Michalak /Optimal Flexible Pavement Cross-Section Design Using Quantity-Discount Cost Model by center for highway research/ the university of texas at austintexas transportation institute/texasa&m university

N. M. Roupail, “Minimum-cost design of flexible pavements,” *Journal of Transportation Engineering*, vol. 111, no. 3, pp. 196–207, 1985

M. S. Mamlouk, J. P. Zaniewski, and W. He, “Analysis and design optimization of flexible pavement,” *Journal of Transportation Engineering*, vol. 126, no. 2, pp. 161–167, 2000.

J. Santos and A. Ferreira, “Pavement design optimization considering costs and M&R interventions,” *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, vol. 53, pp. 1182–1191, 2012.