

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE DE BLIDA 1

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 RIGIDES



Présenté par :

BOUMEHRAZ Nada

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 ma famille, 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.

DEDICACE :

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

Je dédie ce modeste travail à :

Ma chère Maman qui m'a donné l'encouragement, le soutien et le renforcement.

Mes chères sœurs et mon cher petit frère

A ma très chère amie DJOUDI Asma

A mes chères collègues Imane, Amina et Mahdia pour leur soutiens et leur aides

Tous les personnes qui m'aidée.

« Je dédie cette thèse à l'esprit de mon cher Père

Qui a été mon principal soutien dans toutes mes décisions et qui a le plus grand crédit pour tous mes succès

Que Dieu, fais du paradis son lieu de repos »

ملخص:

يقدم هذا البحث منهجية للتصميم الأمثل للطرق المعبدة بالخرسانة الاسمنتية (الطرق الصلبة) باستخدام طريقة PCA (Portland Cement Association). تم وضع معادلة التكلفة والتي تخضع للمتطلبات والاجهاد الميكانيكي وحسن التنفيذ. تصميم كلاسيكي تمت معالجته وتم تفصيل مثال توضيحي وتم حل مشكلة المثالية التي تمت صياغتها في هذه الأطروحة.

Résumé :

Ce travail de recherche présente une méthodologie de dimensionnement optimal des chaussées rigides selon la méthode PCA (Portland Cement Association). La fonction coût définit et soumise aux exigences et aux contraintes mécaniques et de bonne exécution. Un dimensionnement classique a été effectué et un exemple d'illustration a été détaillé. Le problème d'optimisation a été formulé et résolu dans le cadre de ce mémoire de Master.

Abstract:

This research work presents a methodology for optimal design of rigid pavements using the PCA method (Portland Cement Association). The cost function defines and is subject to mechanical and performance requirements and constraints. A conventional design has been carried out and an illustrative example has been detailed. The optimization problem has been formulated and solved in this Master's thesis.

SOMMAIRE

CHAPITRE I

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Introduction générale.....	1
1.2 Classification des chaussées routières.....	2
1.3 Les Atouts des chaussées rigides.....	5
1.3.1 Atouts Techniques	5
1.3.2 Atouts Economiques	6
1.3.3 Atouts Ecologiques	7
1.3.4 Atouts Esthétiques	8
1.4 Les dégradations et les inconvénients des chaussées rigides.....	9
1.4.1 Dégradations De Structure	9
1.4.2 Dégradations De Structure	15
1.4.3 Autre Dégradations : Dépôt De Gomme	17

CHAPITRE II

PRÉSENTATION DES MÉTHODES CLASSIQUES DE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES RIGIDES

2.1 Dimensionnement des structures routières.....	18
2.2 Méthodes de dimensionnement des chaussées.....	18
2.2.1 Approche empirique	18
2.2.2 Approche théorique	18
2.2.3 Méthodes pratiques de dimensionnement	19
2.2.4 Méthodes AASHTO	19
2.3 Méthode de PCA (ciment portland association).....	21
2.4 Exemple d'un dimensionnement par PCA.....	27
2.4.1 Dimensionnement par la Méthode PCA	27
2.4.2 Calcul du Trafic pour la Chaussée Rigide.....	27
2.4.3 Hypothèse de calcul	33
2.4.4 Le dimensionnement des chaussées rigides par la méthode PCA	34
2.4.5 Vérification de la contrainte équivalente selon PCA	40
2.5 Calcul du coût classique d'une bonde unitaire d'une chaussée rigide	42

CHAPITRE III
CONCEPTS ET FORMULATION GÉNÉRALE D'UN PROBLÈME
D'OPTIMISATION

3.1 Introduction	43
3.2 Rôle de l'optimisation.....	43
3.3 Éléments d'optimisation	44
3.3.1 Formulation générale du problème.....	45
3.3.2 Variables de décision	46
3.3.3 Contraintes.....	46
3.3.4 Fonction objectif.....	46
3.4 Type de problèmes d'optimisation.....	47
3.4.1 Problèmes probabilistes.....	47
3.4.2 Problèmes déterministes	47
3.5 Méthode et formulation générale d'un problème d'optimisation déterministe ...	47
3.5.1 Contraintes	47
3.5.2 Espace de conception.....	49
3.5.3 Fonction objectif	50
3.5.4 Formulation dans l'espace des variables de conception.....	51

CHAPITRE VI
FORMULATION ET RESOLUTION D'UN PROBLEME DE DIMENSIONNEMENT
OPTIMAL DES CHAUSSEES RIGIDES

4.1 Choix de la fonction objectif (fonction cible) Fonction coût	53
4.2 Formule mathématique du problème d'optimisation	53
4.3 Résolution du problème de l'optimisation par MATHCAD	56
4.4 Calcul du Coût optimal d'une bonde unitaire d'une chaussée rigide	60
4.5 Calcul du Gain réalisé	60

CONCLUSION GÉNÉRALE

5 Conclusion Générale	61
-----------------------------	----

Table des Figures:

Figure 1.1	Les différentes couches de chaussée.....	1
Figure 1.2	Classification des chaussées routières.....	2
Figure 1.3	Les différentes couches de la chaussée souple.....	3
Figure 1.4	Les différentes couches de la chaussée semi-rigide.....	3
Figure 1.5	Les différentes couches de la chaussée rigide.....	4
Figure 1.6	Les fissures des chaussées rigides.....	11
Figure 1.7	Les cassures d'angle dans les chaussées rigides.....	12
Figure 1.8	Les fractures dans les chaussées rigides.....	13
Figure 1.9	Pompage dans les chaussées rigides.....	14
Figure 1.10	L'épaufre dans les chaussées rigides.....	16
Figure 1.11	Le faïençage et l'écaillage dans les chaussées rigides.....	17
Figure 1.12	Le dépôt de gomme.....	17
Figure 2.1	L'Organigramme pour le dimensionnement de la chaussée rigide par la Méthode PCA (Portland Ciment Association)	24
Figure 2.2	Graphe d'analyse de la fatigue PCA (PCA (Portland Ciment Association), 1984)	25
Figure 2.3	Graphe pour déterminer charge répétition admissible par Érosion (Portland Ciment Association)	26
Figure 2.4	Chaussée en béton jointée sans accotements.....	34

Table des Tableaux :

Tableau 2.1	Les données du trafic par type d'essieu.....	24
Tableau 2.2	Résumé du trafic	25
Tableau 2.3	Coefficient cumulatif du trafic GF.....	26
Tableau 2.4	Les différents types d'essieu.....	26
Tableau 2.5	Les différentes charges par types d'essieu.....	27
Tableau 2.6	Facteur de distribution des voies.....	27
Tableau 2.7	Le trafic cumulé par groupe des essieux.....	28
Tableau 2.8	La répétition du trafic prévu par type d'essieu.....	30
Tableau 2.9	La contrainte équivalente et le Facteur d'érosion pour les chaussées rigides sans accotements.....	32
Tableau 2.10	Dimensionnement des chaussées rigides selon la méthode PCA (Portland Cement Association)	35

Table des indices :

b : La largeur de la chaussée

C_{ag} : Nombre cumulé du groupe des essieux des véhicules.

C_d : Nombre initial de groupes d'essieu des véhicules utilitaires par jour.

C_T : Le coût total

C_b : Le coût de béton

C_c : Le coût du coffrage

C_{bu} : Prix unitaire de béton (pour 1 m³)

C_{cu} : Prix unitaire du coffrage (pour 1 m²)

D_F : Dommages par Fatigue

D_E : Dommages par Erosion

E : Module d'élasticité du béton

f'_c : Résistance à la Compression du béton

F_1 : Facteur d'ajustement de la charge

F_2 : Facteur d'ajustement de l'effet du bord de la dalle

F_3 : Facteur d'érosion

f_1 : Facteur d'ajustement pour l'effet de la charge d'essieu et la roue

f_2 : Facteur d'ajustement de la dalle sans accotement en béton

f_3 : Facteur d'ajustement pour l'effet de positionnement des camions sur la contrainte du bord

f_4 : Facteur d'ajustement pour tenir compte de l'augmentation de la résistance du béton

GF : le Facteur Cumulatif

h : L'épaisseur de la dalle du béton

h_{opt} : L'épaisseur optimale de la dalle du béton

k : Module de réaction de sol plateforme

l : Rayon de rigidité de la dalle

LDF : Facteur de distribution des voies

LSF : Facteur de Sécurité

m : Nombre total des groupes des essieux

ni : Répétition prévue par groupe des essieux pour chaque catégorie de charge donnée.

Ni : Répétition admissible de groupe des essieux pour chaque catégorie de charge donnée.

P_i : Charge de l'essieu

r : Taux de croissance du trafic en % par an

S_c : Résistance à la Flexion du béton :

SAL : Charge d'un essieu isolé à roue jumelée

SD : Essieu isolé roues jumelées

SS : Essieu isolé roues simples

TAD : Essieu monté en Tandem

TAL : Charge d'un essieu monté en tandem

TRD : Essieu monté en Tridem

σ_{eq} : Contrainte équivalente

μ : Coefficient de poisson

CHAPITRE I

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Introduction générale

Les chaussées (routières, ferroviaires, aéroportuaires, de tramway, industrielles, etc.) sont des structures composites, multicouches, souvent complexes, conçues pour résister sur une durée de vie relativement longue aux multiples sollicitations mécaniques (liées principalement au passage de charges lourdes) et climatiques (cycles de température, pluie, gel, UV, etc.), dégradent imperceptiblement les performances initiales des matériaux et de leurs interfaces.

La construction d'une route passe par les étapes de choix de tracé, terrassement (préparation du terrain, comblement des trous, rognage des bosses, planéité de l'arase de terrassement), mise en œuvre **d'une couche de forme** (elle participe au fonctionnement mécanique de la chaussée), puis **d'une couche d'assise** (elle apporte la résistance mécanique aux charges), puis **d'une couche d'accrochage** (liaison entre couche d'assise et couche de roulement, elle est réalisée avec une émulsion de bitume), et enfin **d'une couche de roulement**.

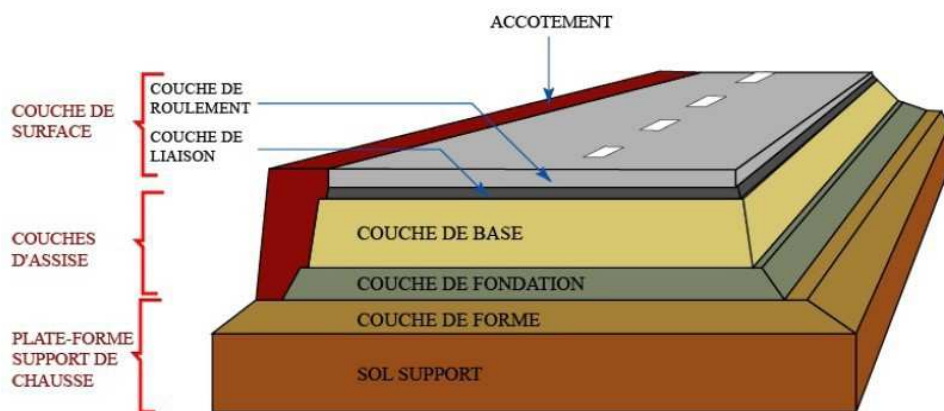


Figure 1.1 Les différentes couches de chaussée

Une chaussée est composée de plusieurs couches successives de matériaux, qui doivent répondre à des critères de qualités de plus en plus exigeants, en partant de la PST pour remonter jusqu'aux couches de roulements.

Le but étant de permettre au sol support de pouvoir résister aux contraintes liées à la circulation des véhicules, en fonction de sa portance et des charges auxquelles on va le soumettre. Chaque couche doit être capable de supporter les charges des couches supérieures, et être suffisamment compactée pour permettre un effet d'enclume lors du compactage.

Chaque couche constituant la chaussée doit répondre à une qualité de mise en œuvre qui comprend :

- Le respect des épaisseurs de couches ;
- Le respect de la géométrie de l'ouvrage (Profils en long et en travers) ;
- Les tolérances de réglage de matériaux ;

- Le respect des objectifs de compactage et de densification des couches. [Jean-Michel Carsuzaa]

1.2 Classification des chaussées routières

En vue de faire une classification correcte des chaussées routières, il faut connaître les matériaux qui peuvent être utilisés dans les couches routières par leur caractéristiques intervenant dans les méthodes de dimensionnement adoptées, et leur comportement en exploitation, qui peut conduire, par des études de longue durée malheureusement, à des conclusions intéressantes destinées à influencer les étapes de calcul de dimensionnement, les technologies d'exécution, l'implémentation de nouvelles solutions, etc. [Paul Teodor MARC]

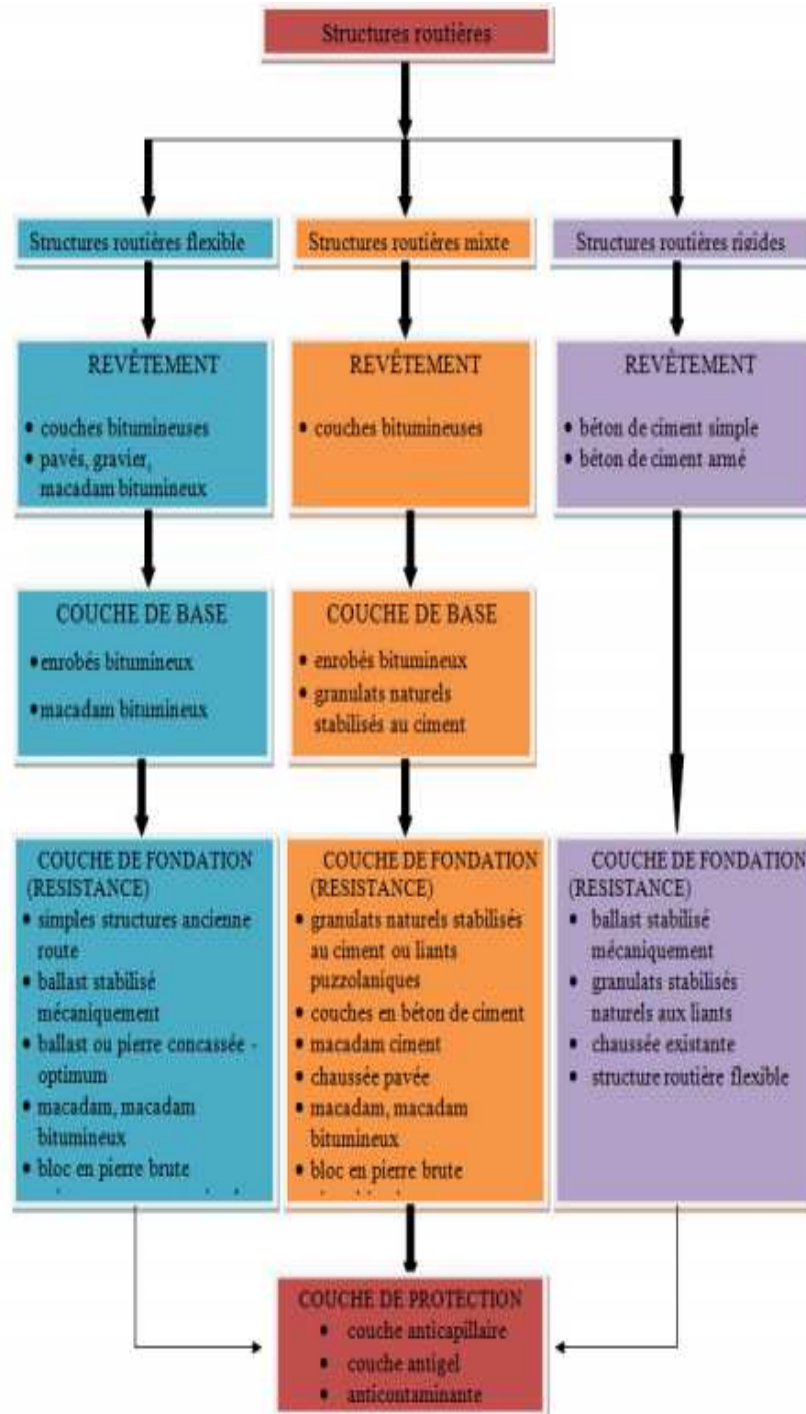


Figure 1.2 Classification des chaussées routières

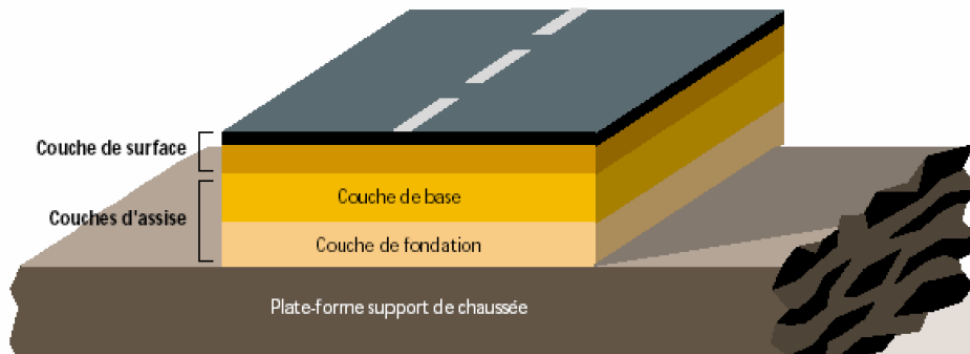
Structures souples :

Figure 1.3 Les différentes couches de la chaussée souple

Elles sont composées d'un revêtement bitumineux relativement mince (< à 15 cm) réduit parfois à un enduit dans le cas de chaussée à très faible trafic. L'assise est réalisée d'une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités (GNT). L'épaisseur d'ensemble de la structure est en générale comprise entre 30 et 60 cm.

- **Structures semi-rigides :**

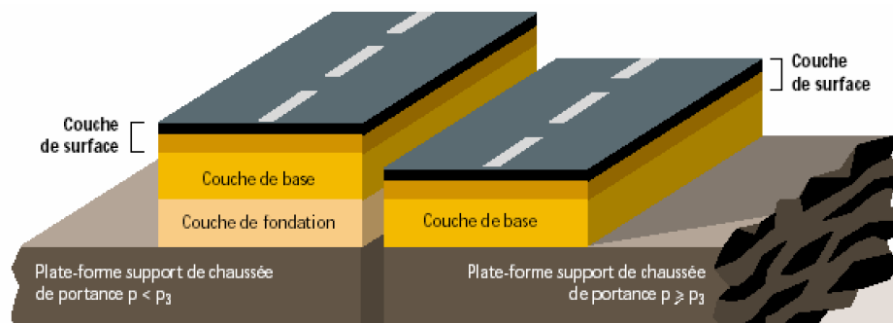


Figure 1.4 Les différentes couches de la chaussée semi-rigide

- Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques.

Elles sont aussi appelées chaussées semi-rigides. La couche de roulement est composée d'un revêtement bitumineux, elle repose sur une assise traitée aux liants hydrauliques dont l'épaisseur totale est d'environ 20 à 50 cm. Ce type de chaussée présente un fort risque de retrait qui fait apparaître, dans la couche de base, des fissures remontant rapidement dans la couche de surface.

- Les chaussées à structure mixte.

La couche de roulement et la couche de base (10 à 20 cm) sont en matériaux bitumineux. La couche de fondation est en matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm). L'épaisseur de matériaux bitumineux doit être de la moitié de l'épaisseur totale de la chaussée. Ce type de chaussée empêche la remontée de fissures entre la couche traitée aux liants hydrauliques (retrait) et la couche de grave bitume.

- Les chaussées à structure inverse

Cette structure est composée d'une couche de surface en matériaux bitumineux d'environ 15 cm d'épaisseur; d'une couche de base en matériaux granulaires non traités, environ 12 cm; d'une fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques. L'épaisseur totale de la structure est de l'ordre de 60 à 80 cm.

- Structures rigides :

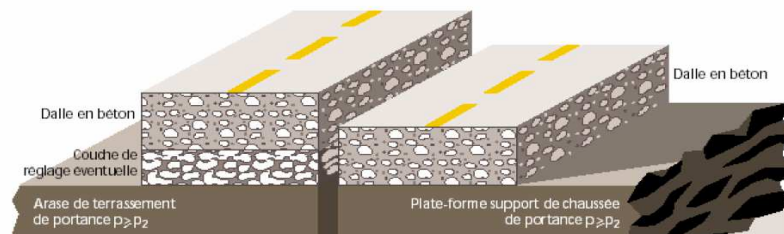


Figure 1.5 Les différentes couches de la chaussée rigide

On rencontre les 4 modèles suivants :

- Dalles non goujonnées avec fondation :

Elles sont constituées de dalles de béton de ciment de 20 à 28 cm sans armature, reposant sur une fondation en béton maigre (12 à 18 cm), ou en matériaux traités aux liants hydrauliques (15 à 20 cm) au choix.

- Dalles goujonnées avec fondation :

Elles sont constituées de dalles béton de ciment de 17 à 23 cm (avec armatures de liaison entre les dalles), reposant sur une fondation en béton maigre (14 à 22 cm) au choix.

- Dalles sans fondation :

Elles sont constituées de dalles de béton de ciment de 28 à 39 cm qui reposent sur une couche drainante en matériaux granulaires ou sur un géotextile.

- Béton armé continu (avec aciers filants sur toute la longueur de voirie) :

Type A: Dalle de béton de ciment (16 à 24 cm), reposant sur une fondation en béton maigre de 12 à 14 cm au choix.

Type B : Dalle de béton de ciment (18 à 24 cm) reposant sur une assise en matériaux bitumineux de 5cm et une fondation en sable traité aux liants hydrauliques (50 à 60 cm).

D'autres structures sont aussi utilisées telles les structures mixtes, les structures inverses, les structures composites BAC/enrobés, BAC/GB, etc.

1.3 Les atouts des chaussées rigides

Le béton constitue une excellente solution dans le cadre de revêtements routiers et autoroutiers ou encore d'aménagements urbains. La route en béton utilise efficacement les ressources naturelles pendant l'entièreté de son cycle de vie. Elle contribue à l'amélioration des conditions de déplacement et rend des services à l'ensemble de la société en termes de mobilité, de sécurité et de confort. De plus, de par l'absence d'entretien, elle est économique.

La chaussée rigide est une solution de revêtement routier, autoroutier et d'aménagement de voiries urbaines adaptée au trafic spécial et au trafic lourd ; Son succès est dû à la satisfaction qu'elle apporte aux usagers comme aux responsables techniques et aux représentants des collectivités locales pour des atouts techniques, économiques, écologiques et esthétiques :

1.3.1 Atouts techniques

L'un des avantages prépondérants de la route en béton est bien sa longue durée de vie et son entretien extrêmement réduit, lorsqu'elle est bien conçue et correctement mise en œuvre. En particulier, le revêtement en béton résiste aux effets dus au gel/dégel ; on cite quelques avantages techniques :

- Mise en service rapide : il ne faut pas attendre 28 jours de durcissement, avant de rétablir la circulation. Lorsque le béton a atteint 70 % de sa résistance finale, la route peut être mise en service : soit, dans des conditions normales de température, après 4 jours s'il s'agit d'un béton traditionnel, et après 36 à 48 heures pour un béton à prise rapide ;
- Résistance au dérapage : Généralement les chaussées rigides ont une très bonne résistance au dérapage adéquate sous circulation dense pendant plus longtemps que les revêtements bitumineux ;
- Une grande rigidité : Les chaussées rigides assurent une bonne répartition des charges sur le support de la chaussée et permettent une excellente adaptation aux sols de faible portance ;
- Absence de fondation complexe ;
- Une épaisseur réduite de la structure et des terrassements ;
- Une économie en matériaux (structure moins épaisse, à performances mécaniques égales) ;

- Une simplicité de mise en œuvre (structure monocouche et matériel de mise en œuvre facilement disponible et d'utilisation simple) ;
- Une bonne tenue à la fatigue : Un revêtement en béton, bien conçu et bien dimensionné, peut résister très long temps à la répétition des charges, donc à un trafic cumulé important ;
- Une grande durabilité (40 à 60 ans) ;
- Un entretien quasi nul sur la période de service ;
- Une solidité à toute épreuve ;
- La chaussée rigide offre un ensemble de qualités de résistance:
 - Aux charges et au poinçonnement (grâce aux caractéristiques mécaniques du béton)
 - A la chaleur (elle demeure rigide et stable par temps chaud sans déformation niorniérage)
 - Au froid (elle est insensible au gel et aux sels grâce à la présence dans le béton de microbulles d'air)
 - Aux hydrocarbures
 - A l'érosion et aux inondations (absence d'érodabilité des bords du revêtement)
 - A l'usure de surface (sous l'effet du trafic et des conditions climatiques)
 - Au dégel: par sa rigidité, le revêtement répartit les charges.
- Un entretien quasi nul ;
- La durabilité de la structure et des caractéristiques de surface est assurée quelles que soient l'intensité du trafic et les conditions climatiques, l'uni est inaltérable ;
- Sécurité accrue: l'adhérence permanente des véhicules en tout temps et en particulier par temps de pluie et l'absence d'orniérage constituent des qualités essentielles en termes de sécurité des usagers.

1.3.2 Atouts économiques

Bien que la chaussée rigide soit chère mais nécessite moins d'entretien et une bonne période de conception. La partie économique est réalisée pour la conception de la chaussée d'une section en utilisant le résultat obtenu par la méthode de conception et l'épaisseur correspondante de la couche de composant. Cela peut être fait en établissant des comparaisons avec la méthode standard et pratique. On cite quelques qualités économiques des chaussées rigides:

- Une technique à l'échelle locale : elle peut être du ressort des entreprises locales, formées à la mise en œuvre des bétons d'environnement et de voirie ; elle utilise des granulats

de la région, disponibles sur place ou à faible distance, qu'ils soient d'origines alluvionnaires ou de roches massives, roulées ou concassées.

- Au stade de la construction la solution béton est naturellement très compétitive par rapport aux autres matériaux. Mais il faut en plus, tenir compte, au moment de l'évaluation des coûts de construction, de certains éléments financiers qui jouent en faveur des structures en béton et qui peuvent se cumuler:

- Economie d'énergie importée: on consomme moins d'énergie pour 1 m² de route en béton que pour 1 m² de route en bitume

- Une économie des matériaux, en quantité et en qualité: le béton consomme moins de matériaux pour des performances mécaniques égales et utilise des granulats locaux

- Une économie de bordures, de caniveaux et de fossés : gains sur les travaux d'assainissement l'eau de ruissellement peut être canalisée par le profil de la route (écoulement latéral ou écoulement central).

- Le béton ne nécessite pratiquement aucun entretien sur la période de service prévue, d'où un niveau élevé de service à l'utilisateur.

- En considérant le coût global (coût de construction et coûts d'entretien actualisés), la solution béton est la solution la plus économique à long terme (sur une période de 30 ans).

1.3.3 Atouts écologiques

Les chaussées en béton sont généralement mieux à même de faire face à des charges imprévues et déversements de carburant dans les zones industrielles et les zones de service. Si un nouveau logement ou zone industrielle est en construction et il est nécessaire que les routes soient construites d'abord pour qu'ils puissent être utilisés à la fois par le trafic de construction et de la circulation générale par la suite, le béton est considéré comme un avantage écologique évident.

Le béton est un matériau obtenu à froid, par mélange de plusieurs constituants naturels. Il est de ce fait, un matériau écologique, obtenu sans dégagement de substances polluantes dans l'atmosphère.

Recyclable : en fin de vie, les revêtements en béton démantelés sont envoyés vers des centres de concassage et les granulats de béton concassés sont ensuite réutilisés dans les couches de sous-fondation et de fondation ou comme gravillons pour des applications plus nobles.

Intégration paysagère : la teinte claire et le coloris discret du revêtement en béton confèrent à la route des qualités naturelles d'intégration au contexte environnant, aussi varié soit-il.

L'énergie grise (l'énergie consommée pour l'extraction, la production, le transport et le traitement en fin de vie) du béton pris sur l'ensemble de son cycle de vie est très faible au regard d'autres matériaux.

Il participe à la gestion d'une ressource rare: les granulats. La solution béton requiert moins de granulats. [Fédération de l'Industrie Cimentière Belge]

1.3.4 Atouts esthétiques

Ils sont dus essentiellement aux possibilités, offertes par le béton, au niveau des formes, des couleurs et des textures.

Confortable et peu bruyant : la conception actuelle des routes en béton permet d'obtenir un uni de surface conforme aux aspirations des usagers. De plus, grâce à la technique du dénudage chimique, le bruit de roulement est fortement réduit. Il est en effet équivalent à celui d'un revêtement hydrocarboné. Le manque de confort des routes anciennes est dû au mode de construction de l'époque. De par leur longévité, ces chaussées sont toujours en service et donnent à l'utilisateur une image médiocre du confort de roulement.

Les formes Étant un matériau moulable : le béton peut adopter toutes les formes possibles. Dès lors, les surfaces bétonnées peuvent être conçues en trois dimensions (retraits, saillies, creux, reliefs, arrondis, etc.).

Les couleurs Gris ou blanc : le ciment, mélangé aux éléments les plus fins du sable donnent au béton brut sa teinte de fond qui peut être modifiée par l'ajout de colorants. Dans le cas des bétons désactivés, c'est la couleur des granulats qui influencera la teinte du béton.

Les textures : Elles vont des surfaces lisses aux surfaces rugueuses (lavées, désactivées, grenailées, bouchardées, imprimées, etc.).

Suivant la nature du traitement choisi, le relief obtenu à la surface du béton sera plus ou moins accentué et l'esthétique de surface dépendra directement de la qualité de la texture minérale du béton.

Le matériau béton permet d'obtenir des formes, des couleurs et des textures extrêmement variées dans des conditions économiques très compétitives.

Leur combinaison, associée à la possibilité de réaliser de grandes superficies et des formes complexes, permet de répondre à toutes les exigences d'intégration aux sites, et de voisinage avec les Monuments Historiques. [Cimbéton , Cours voirie et aménagement en béton CH7]

1.4 Les dégradations des chaussées rigides

Sous l'action des charges de trafic, des conditions climatiques et du vieillissement des matériaux, les chaussées routières se dégradent. Ces dégradations peuvent être de différents ordres et sont la conséquence de problèmes d'origines diverses. C'est pourquoi il est primordial de définir précisément les causes des dégradations pour définir la solution adéquate de maintenance et de renforcement.

Le mode de classement des dégradations a fait l'objet d'une attention particulière. En effet, il était possible de les classer suivant plusieurs critères :

- leur nature (par exemple, famille des fissures, famille des déformations...);
- leur origine (insuffisance structurelle ou défaut de surface);
- l'objectif de l'entretien qui leur correspond (conservation des qualités structurelles, intégrité de la surface, sécurité...);

Pour les chaussées rigides d'interprétation plus aisée, les dégradations sont classées par origine :

- dégradations de structure ;
- dégradations de surface ;
- dégradations de joints.

1.4.1 Dégradation de structure

Elles caractérisent un état structurel de la chaussée, soit lié à l'ensemble des couches et du sol, soit seulement lié à la couche de surface. Ce sont des dégradations issues d'une insuffisance de capacité structurelle de la chaussée. On y trouve essentiellement les déformations et les fissurations par fatigue [Catalogue des dégradations]

- *Les Fissures*

La fissure est une discontinuité brutale apparue ou apparaissant dans un matériau sous l'effet de contraintes internes ou externes, où la matière est séparée sur une certaine surface.

- *Les Fissures Transversales :*

Sont des fissures sensiblement perpendiculaires à l'axe de la chaussée, isolées ou périodiques, d'espacement variable, intéressant tout ou partie de la largeur de la dalle.

- *Les Fissures Longitudinales :*

Sont des fissures sensiblement parallèles à l'axe de la chaussée, non limités à la bande de roulement.

- *Les Fissures Obliques :*

Sont des cassures de dalle rejoignant deux côtés adjacentes et située à plus de 50 cm du coin de dalle.

- *les causes probables :*

- portance insuffisante (épaisseur trop faible de la dalle, résistance insuffisante du béton à la traction...);
- dégradation des conditions d'appui de la dalle (tassement ou érosion du sol de fondation);
- sciage trop tardif des joints à la mise en œuvre (fissure transversale);
- saignée pour balisage axial favorisant l'effet d'entaille sous fortes sollicitations, telles celles exercées par le B747 (fissure longitudinale);
- dimensions excessives de la dalle par rapport à son épaisseur donnant lieu à des contraintes thermiques importantes;
- Retrait hydrique. Gel;
- Mauvais drainage;
- Fatigue de la structure.

- *Relevé qualitatif (niveaux de gravité) :*

Les niveaux de gravité sont fonction de :

- l'ouverture de la fissure;
- la présence ou non d'épaufrures;
- l'existence ou non de départ de matériaux.
 - Niveau léger: fissure non épaufrée d'ouverture inférieure ou égale à 2 mm ou fissure bien réparée.
 - Niveau moyen: fissure non épaufrée d'ouverture supérieure à 2 mm ou fissure épaufrée sans départ de matériaux.
 - Niveau élevé: fissure avec départ de matériaux.

Le dépistage de cette dégradation se trouve facilité après une averse.

- *Relevé quantitatif*

L'unité de relevé est la dalle. Une dalle est comptée fissurée même si la fissure ne concerne pas toute la longueur(ou largeur) de la dalle.

- *Conséquences et évolution*

- infiltration d'eau dans le corps de chaussée;
- modification des conditions de fonctionnement de la dalle (perte de portance);
- altération de l'uni (fissure transversale);

- départ de matériaux ;
- fracture.

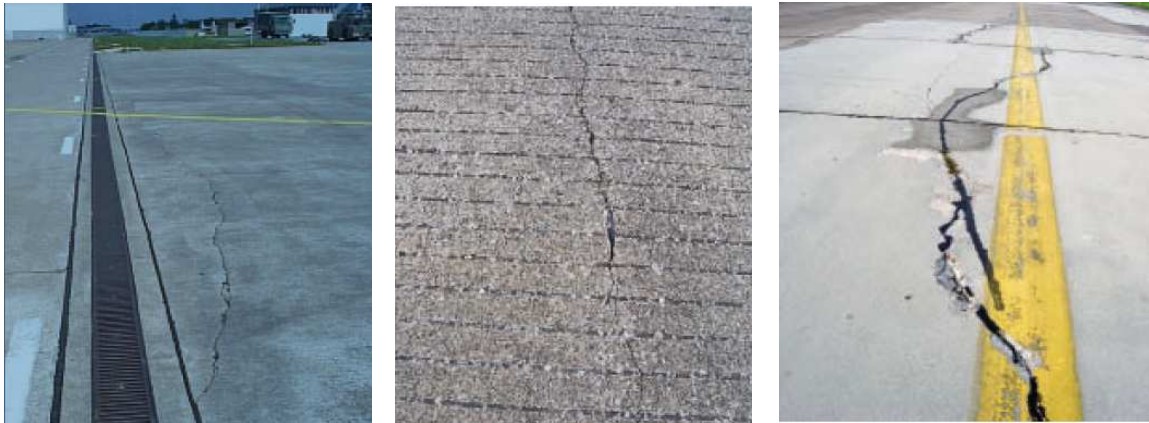


Figure 1.6

Les fissures des chaussées rigides

- *Fissure en coin / Cassure d'angle*

Les Fissures en coin ou Cassures d'angle sont des ruptures de la dalle en deux morceaux, les intersections des fissures avec les bords de la dalle étant situées dans le quart de la dalle adjacente au coin considéré.

- *Causes Probables :*
 - Mauvaises conditions d'appui de la dalle et de transfert de charge combinées à la répétition des charges ;
 - Piège à eau en bordure de dalle résultant d'un battement de joint transversal ;
 - Sciage tardif.
- *Relevé qualitatif (niveaux de gravité)*

Les niveaux de gravité sont fonction de :

- l'ouverture de la fissure ;
- la présence ou non d'épaufrures ;
- l'existence ou non de départ de matériaux.

Niveau léger: fissure non épaufrée d'ouverture inférieure ou égale à 2 mm ou fissure bien réparée

Niveau moyen: fissure non épaufrée d'ouverture supérieure à 2 mm ou fissure épaufrée sans départ de matériaux

Niveau élevé: fissure avec départ de matériaux ; Le dépistage de cette dégradation se trouve facilité après une averse.

- *Relevé quantitatif :*

L'unité de relevé est la dalle.

Une dalle qui présente à la fois une fissure (longitudinale, transversale ou oblique) ou même plusieurs fissures (voir « fracture ») et une ou plusieurs cassures en coin, sont comptées à la fois en dalle fissurée ou fracturée et en dalle cassée en coin.

- *Conséquences et évolution :*

- infiltration d'eau dans le corps de chaussée ;
- modification des conditions de fonctionnement de la dalle (transfert de charge) ;
- affaissement localisé, d'où altération de l'uni et de l'adhérence (rétention d'eau) ;
- départ de matériaux.



Figure 1.7 Les cassures d'angle dans les chaussées rigides

- *Les Fractures*

La fracture est la rupture de la dalle en plus de deux morceaux, les fissures étant longitudinales, transversales ou obliques. Les cassures d'angle ne sont pas à prendre en compte dans le dénombrement des morceaux de dalle.

- *Causes Probables :*

- portance insuffisante (épaisseur trop faible de la dalle, résistance insuffisante du béton à la traction...);
- dégradation des conditions d'appui de la dalle (tassement ou érosion du sol de fondation).

- *Relevé qualitatif (niveaux de gravité)*

Les niveaux de gravité sont fonction à la fois du degré de fragmentation de la dalle et du niveau de gravité le plus élevé rencontré pour les fissures à la surface de celle-ci.

Ils sont déterminés de la façon suivante :

Le dénombrement des morceaux de dalle doit être effectué en faisant abstraction de la fragmentation due aux fissures en coin.

Nombre de morceaux de la dalle n	Niveaux de gravité des fissures		
	Léger	Moyen	Elevé
n = 3	L	M	E
n > 3	M	E	E

- *Relevé quantitatif :*

L'unité de relevé est la dalle.

- *Conséquences et évolution :*

- infiltration d'eau dans le corps de chaussée ;
- modification des conditions de fonctionnement de la dalle (transfert de charge) ;
- affaissement localisé, d'où altération de l'uni et de l'adhérence (rétention d'eau) ;
- départ de matériaux.



Figure 1.8 Les fractures dans les chaussées rigides

- *Pompage*

Le passage des véhicules lourds au niveau des fissures ou des joints cause la remontée d'eau accompagnée éventuellement de fines à travers (les joints ou les fissures).

- *Causes Probables :*

- Pénétration de l'eau dans le corps de chaussée.
- Manque de cohésion et sensibilité à l'eau du support.
- dégradation des conditions d'appui de la dalle en présence d'eau due aux sollicitations dynamiques (les battements de dalles sous charge génèrent des mouvements d'eau sous pression aux interfaces dalles fondation qui provoquent des remontées d'eau et de fines à travers les joints ou les fissures).
- *Relevé qualitatif (niveaux de gravité)*

Le niveau de gravité est fonction du nombre de dalles affectées par la dégradation rapportée au nombre total de dalles par maille de relevé. Il sera apprécié lors de l'exploitation du relevé.

- *Relevé quantitatif :*

L'unité de relevé est la dalle.

Les dalles sont comptées comme suit : pompage au niveau d'un joint entre deux dalles, compter deux dalles.

Dans le cas où les deux dalles précédemment concernées possèdent d'autres joints affectés par le phénomène de pompage, ajouter une dalle par joint déficient supplémentaire.

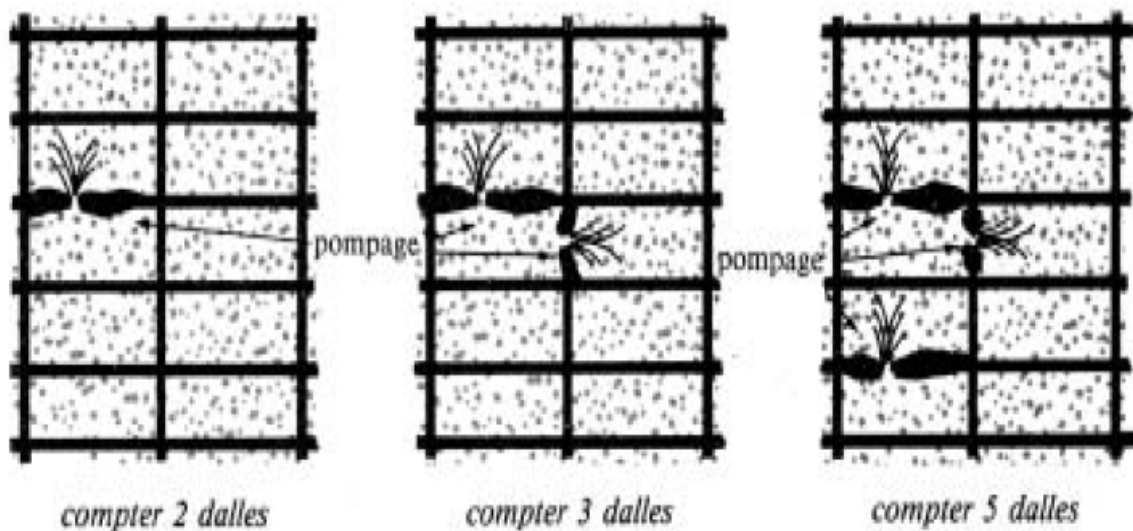


Figure 1.9 **Pompage dans les chaussées rigides**

- *Conséquences et évolution :*

- chute de portance ;
- formation de cavités dans la couche de fondation ;
- altération de l'adhérence ;
- mise en marche d'escalier.

1.4.2 Dégradation de surface

- *Epaufrure*

Bris du bord de la dalle en coin ou en partie courante à moins de 30 cm du joint ; généralement cette dégradation affecte simplement une partie de l'épaisseur de la dalle.

- *Causes Probables :*
 - présence de matériaux incompressibles dans les joints (défaut d'entretien des joints) ;
 - faiblesse du béton face aux sollicitations dynamiques amplifiée par le sciage du joint (effet d'entaille) ;
 - résistance à la compression du béton insuffisante ;
 - détérioration locale du béton par un sciage prématuré.
- *Relevé qualitatif (niveaux de gravité)*

Les niveaux de gravité sont fonction à la fois de la longueur de la dégradation, de son degré de fragmentation et de l'existence ou non de départ de matériaux.

Ils sont déterminés de la façon suivante :

n: nombre de morceaux composant la dégradation

Longueur de la dégradation l	Sans départ des matériaux		Avec départ de matériaux
	n < 3	n > 3	
l ≤ 60 cm	L	L	E
l > 60 cm	L	M	E

- *Relevé quantitatif :*

L'unité de relevé est la dalle. Une dalle « épaufrée » est comptée avec le niveau de gravité le plus élevé de ses épaufrures.

Ex: une dalle présentant deux épaufrures de niveaux L et une épaufrure de niveau E est relevée « dalle épaufrée de niveau E ». Si elle comporte également des fissures, elle est comptée comme dalle « fissurée » (ou « fracturée ») et dalle « épaufrée ».

- *Conséquences et évolution :*
 - infiltration d'eau dans le corps de chaussée ;
 - départ de matériaux.



Figure 1.10

L'épauvre dans les chaussées rigides

- *Faïençage et Écaillage*

Le faïençage est l'ensemble de petites fissures formant un maillage serré affectant la surface de la dalle pouvant évoluer vers l'écaillage.

L'écaillage est le départ par petites plaques (écailles) de la pellicule de laitance en surface de la dalle.

- *Causes Probables :*
 - défaut de mise en œuvre (remontées de laitance) ;
 - effets thermiques (variation de température, gel dégel) ;
 - chocs thermiques (thermo soufflante, réacteurs) ;
 - produits déverglaçant.
- *Relevé qualitatif (niveaux de gravité)*

Niveau léger: faïençage

Niveau moyen: écaillage sur une surface totale inférieure ou égale à 1 m²

Niveau élevé: écaillage sur une surface totale supérieure à 1 m²

- *Relevé quantitatif :*

L'unité de relevé est la dalle.

Dans le cas où la dalle comporte plusieurs zones « faïencées » ou « écaillées » de niveaux de gravité différents, celle-ci est comptée une seule fois avec le niveau de gravité le plus élevé d'entre eux.

- *Conséquences et évolution :*
 - porosité du béton néfaste dans les régions soumises au gel ;
 - altération de l'uni ;
 - départ de matériaux.



Figure 1.11 Le faïençage et l'écaillage dans les chaussées rigides

1.4.3 Autre dégradations : Dépôt de gomme

Le dépôt de gomme est le dépôt de caoutchouc localisé dans la zone de toucher des roues.

- *Causes Probables :*

Usure des pneumatiques des avions lors de la mise en rotation des roues aux atterrissages.

- *Relevé qualitatif (niveaux de gravité)*

Le niveau de gravité est fonction du nombre de dalles affectées par la dégradation rapportée au nombre total de dalles par maille de relevé. Il sera apprécié lors de l'exploitation du relevé.

- *Relevé quantitatif :*

L'unité de relevé est la dalle. L'unité de relevé est la dalle. La dalle est comptée si elle est recouverte sur au moins 1 m².

- *Conséquences et évolution :*

- altération de l'adhérence ;
- altération de la visibilité du balisage diurne et nocturne.



Figure 1.12 Le dépôt de gomme

CHAPITRE II

PRÉSENTATION DES MÉTHODES CLASSIQUES DE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES RIGIDES

2.1 Dimensionnement des structures routières

Grace au fait que l'approche générale du dimensionnement d'une chaussée routière n'est pas fondamentalement différente du dimensionnement des structures du génie civil (en ce qui concerne l'examen de la détermination des contraintes de matériaux et leur comparaison avec les déformations admissibles), le dimensionnement des chaussées présente de nombreuses particularités que cette approche pourrait accentuer

2.2 Méthodes de dimensionnement des chaussées

Les méthodes de dimensionnement des chaussées dépendent du type de la structure de chaussée en prenant en considération le corps de chaussée c-à-dire la profondeur de transmission de la sollicitation du trafic et la zone active du terrassement qui dépend de la nature du sol et du poids des véhicules.

2.2.1 Approche empirique

Dans cette approche on peut utiliser les données expérimentales pour observer le comportement réel du carrossable sous trafic. Cette méthode empirique consiste premièrement en déterminer les critères pour définir la fin de la durée de vie de la route et des secteurs suivis.

Cette méthode purement empirique présente un nombre inconnu de désavantages :

- pour connaître pour un tel tracé l'influence de plusieurs paramètres, comme l'épaisseur différente des couches routières et les propriétés mécaniques des matériaux, il faut réaliser un très grand nombre de secteurs expérimentaux, ce qui emmène des coûts élevés;
- le temps de réponse est très long car il n'y a aucun effet d'accélération du trafic, et le risque est grand pendant l'exploitation;
- enfin, les résultats obtenus de cette manière, par analyse de régression statistique, s'appliquent seulement pour un matériau considéré dans le milieu d'expérimentation.

2.2.2 Approche théorique

Dans cette méthode il faut établir un modèle qui reproduit le mieux le fonctionnement mécanique de la chaussée. En utilisant ce modèle on détermine les sollicitations supportées par les matériaux de la structure routière et le corps de la chaussée sous le trafic. Ces sollicitations sont puis comparées avec les sollicitations admissibles. C'est donc une approche qui utilise une certaine branche de la mécanique des milieux continus, nommée aussi mécanique des chaussées.

2.2.3 Méthodes pratiques de dimensionnement

Les méthodes de dimensionnement de la chaussée routière déterminées ne sont pas seulement de méthodes de vérification. Il y a donc une phase essentielle, c'est-à-dire celle de conception de la structure. Dans cette phase il faut déterminer le meilleur arrangement possible des différentes méthodes disponibles, en prenant en considération leur résistance aux sollicitations du trafic et de l'environnement, tout comme les particularités de leur application.

Pour cette phase préliminaire de conception, les méthodes de dimensionnement ne seront pas très utiles, à l'exception du dégagement de certaines tendances nouvelles, car il est à peu près impossible de vérifier toutes les conceptions ou les méthodes existantes, en plus, certains des problèmes mentionnés peuvent être abordés par calcul et d'autres plus importants peuvent être choisis comme politique de route.

2.2.4 Méthodes AASHTO

La méthode américaine de dimensionnement des chaussées AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) est basée sur une analyse empirique des résultats des essais de l'AASHTO Road test réalisés à la fin des années 1950 sur plus de 500 sections tests de chaussées. A l'heure actuelle, la dernière version du guide de dimensionnement date de fin 2002, mais la version de 1993 reste encore la plus utilisée.

Dans cette version de 1993, aussi bien pour les chaussées souples que rigides, le dimensionnement se fait à l'aide d'équations de régression traduites sous forme d'abaques et de formules (Tableau 1.3) permettant de choisir l'épaisseur de la chaussée en fonction du trafic cumulé considéré et la dégradation de la qualité d'usage de la route. La notion de qualité d'usage de la route est définie par l'indice PSI (Present Service ability Index) qui varie de zéro (chaussée impossible à circuler) à six (chaussée en parfait état). Cette échelle a été déterminée sur la base des dégradations de la chaussée et de leurs effets perçus par les usagers.

Les données de trafic sont converties en nombre cumulé d'essieu standards W18. Enfin, pour une structure de chaussée choisie, un nombre structurel SN (Structural Number) est calculé et comparé à sa valeur minimale. Cette valeur minimale correspond à la somme pondérée des épaisseurs des différentes couches, et tient compte de la nature des matériaux et des conditions de drainage de chaque couche.

D'un point de vue mécanique, on remarque que la méthode américaine de dimensionnement AASHTO n'aborde pas, de manière explicite, la modélisation du plan de contact entre deux couches de matériaux. On peut cependant comprendre que dans cette méthode, le fait de pouvoir déterminer une épaisseur globale des couches

bitumineuses sous-entend l'hypothèse qu'un collage parfait se développe à l'interface des couches en contact. En effet, l'épaisseur globale de ces couches dépend en partie de la rigidité globale de cet ensemble. Celle-ci est plus grande lorsque les couches sont parfaitement collées entre elles. Cependant, si cette hypothèse de collage parfait n'est pas satisfaite sur chantier, le fonctionnement mécanique de la chaussée est modifié.

2.2.5 Modèles de la mécanique des chaussées routières

Le domaine de la mécanique des chaussées routières est limité par deux ambitions : la compréhension du mode de fonctionnement des différents types de chaussées et la définition des règles de dimensionnement. Pour pouvoir rester réalistes, ces modèles ont évolué avec le développement des chaussées routières, leur évolution étant naturelle, car les modèles utilisés doivent être représentatifs pour le fonctionnement des chaussées étudiées.

- Le modèle de Boussinesq

La pression q (d'environ 0.2 – 0.7 MPa), exercée par les pneus ne peut pas être soutenue en totalité par la couche support en sol naturel. Le rôle de la chaussée routière est de répartir cette pression sur une surface adéquate pour que la pression exercée puisse être portée à un niveau compatible à celle soutenue par la couche en terre.

On peut assimiler l'épaisseur H à l'épaisseur de la chaussée routière en faisant une correspondance entre elles $H' < H$ par un règle simple, en tenant compte du module d'élasticité E_1 pour les couches granulaires et le module E_2 pour la couche support (le corps de la chaussée).

- Les modèles Bicouche

Quand les efforts verticaux sur la couche support (sol) sont limités à une valeur très réduite (1/10 ou 1/20, de la pression exercée sur la surface), il est coûteux de réaliser la distribution de la pression par des couches granulaires (l'épaisseur H étant trop grande). Pour diminuer cette épaisseur, les sollicitations sur la couche support en terre sont constantes, raison pour augmenter le rapport de module entre la couche de la chaussée routière E_1 et la couche support en terre E_2 . Ce résultat peut être obtenu à l'aide des liants hydrauliques (ciment, laitier de haut fourneau, etc.) ou hydrocarbonés.

- Le modèle de Hogg

La chaussée routière représentée selon l'hypothèse de Navier, est traitée comme une dalle placée sur un solide infini de type Boussinesq (E_2, ν_2). Dans cette situation on ne

discute pas la méthode de résoudre les problèmes du point de vue mathématique, qui indique seulement le principe, mais on prend en considération le fait que le problème présente deux inconnues qui sont : le déplacement vertical de la dalle et σ_z , l'effort vertical sur la surface solide. L'équation de La grange prévoit une relation entre ces deux inconnues. Il y a aussi un deuxième aspect d'égalisation des déplacements verticaux de l'axe neutre de la dalle avec les mouvements verticaux du solide, liés de la pression sur le solide par les formules de Boussinesq.

- Les modèles Multicouche (Burmister)

Burmister a traité le problème général de n couches, en formulant les hypothèses suivantes :

- toutes les couches sont assimilées aux solides élastique-linéaires, homogènes, isotropes, caractérisés par un module d'élasticité E_i et un coefficient de Poisson μ_i , de dimensions infinis en plan et d'épaisseur h_i ;
- les interfaces entre les couches sont soit collées, soit glissantes, et la même structure peut avoir des interfaces avec ou sans frottement;
- les cas de charges multiples (couplées, essieux doubles ou triples, remorques) peuvent être traités en supplémentant les effets des charges élémentaires.

- Le modèle de Westergaard

En supposant que l'hypothèse de Boussinesq pour la couche support de la chaussée routière n'a pas été en aucun cas une hypothèse simplifiée (le comportement réel du sol de fondation est infini), Westergaard a adopté pour le sol de fondation une autre hypothèse simplifiant, qui a pour but de faciliter le calcul [78].

En dehors de l'hypothèse de la dalle mince pour la couche routière, le modèle Westergaard inclue les hypothèses suivantes pour la couche support : elle est assimilée à un ensemble ressort dont le déplacement vertical dans un point w est proportionnel avec la pression verticale v dans ce point.

2.3 Méthode CPA (Portland Cement Association)

La méthode PCA 1984 consiste à analyser l'érosion et la fatigue de la chaussée. La méthodologie du dimensionnement selon la PCA (Portland Cement Association) est basée sur la fonction de déformation verticale maximale et les contraintes maximales créent par la charge roulante sur la chaussée. Pour une analyse de la fatigue, le rapport de contrainte de traction maximale de la chaussée sous une charge de trafics répétitifs et le module de rupture du béton sont utilisés. Le concept de dommage cumulatif (CDF) est utilisé pour

l'analyse de fatigue et l'érosion, si ce coefficient CDF est supérieur à 1.00, on suppose que l'épaisseur du revêtement est insuffisante.

Dans l'équation (1) de dommage (voire section 2.4.1, page 27) D_r est le rapport de dommages cumulatifs qui sera fait tout au long de la durée de vie de sa conception se référant à tous les groupes de charge, n_i la répétition prévue du trafic par groupe des essieux et N_i la répétition admissible par groupe des essieux.

L'analyse de la fatigue qui est basée sur le chargement de bord, est la situation de chargement le plus important en termes de contrainte. Les contraintes maximales qui se produisent pour chaque groupe des essieux et le module de rupture du béton sont comparés.

- **Considérations sur la conception**

Les facteurs de base considérés dans la méthode de conception PCA sont :

- Résistance de flexion du béton de la dalle
- Le sol support de la plate-forme
- Charge de Trafic

- **Résistance de flexion du béton de la dalle:**

La résistance de flexion du béton à utiliser dans cette procédure est donnée en termes de module de rupture obtenu. La moyenne des résultats des tests de 28 jours est utilisée comme entrée par le concepteur.

- **Charge de Trafic**

La charge de trafic est calculée en fonction du nombre cumulé d'essieu de différentes charges projetées pour la durée de vie de la chaussée. Les informations requises pour déterminer les nombres cumulés sont le trafic journalier moyen (ADT), le trafic journalier moyen des camions (ADTT) et la répartition de la charge par essieu du trafic des camions.

Les valeurs recommandées pour le facteur de sécurité de charge (LSF) à utiliser durant la conception de la chaussée sont:

- 1,2 pour les projets interétatiques et multivoie avec un flux de trafic interrompu et volumes élevés de camions.
- 1,1 pour les autoroutes et les artères avec un volume de camion modéré.
- 1,0 pour les routes et les routes résidentielles avec un volume de camion très faible

Le LSF peut être augmenté à 1.3 si l'objectif est de maintenir un niveau de service de chaussée supérieur à la normale tout au long de la durée de vie de cette chaussée.

- Conception de la chaussée rigide

La procédure est basée sur une analyse par la méthode d'éléments finis des Contraintes et déflexion de la chaussée aux bords et joints. Il considère les facteurs tels que les dimensions des dalles finies, la position de la charge par essieu, le transfert de charge aux joints transversaux ou les fissures et le transfert de charge dans les chaussées et les joints d'étanchéité en béton. Les caractéristiques de transfert de charge sont modélisées en utilisant le diamètre et le module d'élasticité. La procédure de calcul se compose de deux parties : Analyse de fatigue et Analyse de Erosion:

Analyse de fatigue : l'objectif analyse de fatigue est la détermination de l'épaisseur minimale du béton nécessaire pour contrôler la fissuration par fatigue. Cela se fait en comparant les répétitions d'essieu attendues avec les répétitions admissibles pour chaque charge d'essieu et en veillant à ce que les répétitions cumulatives soient inférieures à celles autorisées. Les répétitions admissibles des essieux sont basées sur le facteur ratio de la contrainte (Stress Ratio Factor), qui est le ratio de la contrainte équivalente de la chaussée au module de rupture du béton.

Analyse d'Erosion : l'objectif analyse d'Erosion est la détermination de l'épaisseur minimale nécessaire de la dalle pour contrôler la fondation et l'érosion, le pompage et la fissure.

Le critère d'érosion repose principalement sur le taux de travail dépensé par une charge d'essieu lors de la déformation d'une dalle, comme il a été déterminé qu'il existe une corrélation entre la performance de la chaussée et le produit de déflexion et pression interface de la couche de fondation.

Il est suggéré que l'ingénieur utilise le critère de l'érosion principalement comme guide et le modifie en fonction de l'expérience avec les conditions locales de climat et de drainage. L'épaisseur minimale qui satisfait les deux analyses est l'épaisseur de la conception. Les calculs des épaisseurs pour la dalle goujonnée en béton armé, il est généralement basé sur une analyse de la fatigue, Mais pour les dalles non goujonnées en béton armé, il est généralement basé sur l'analyse de l'érosion.

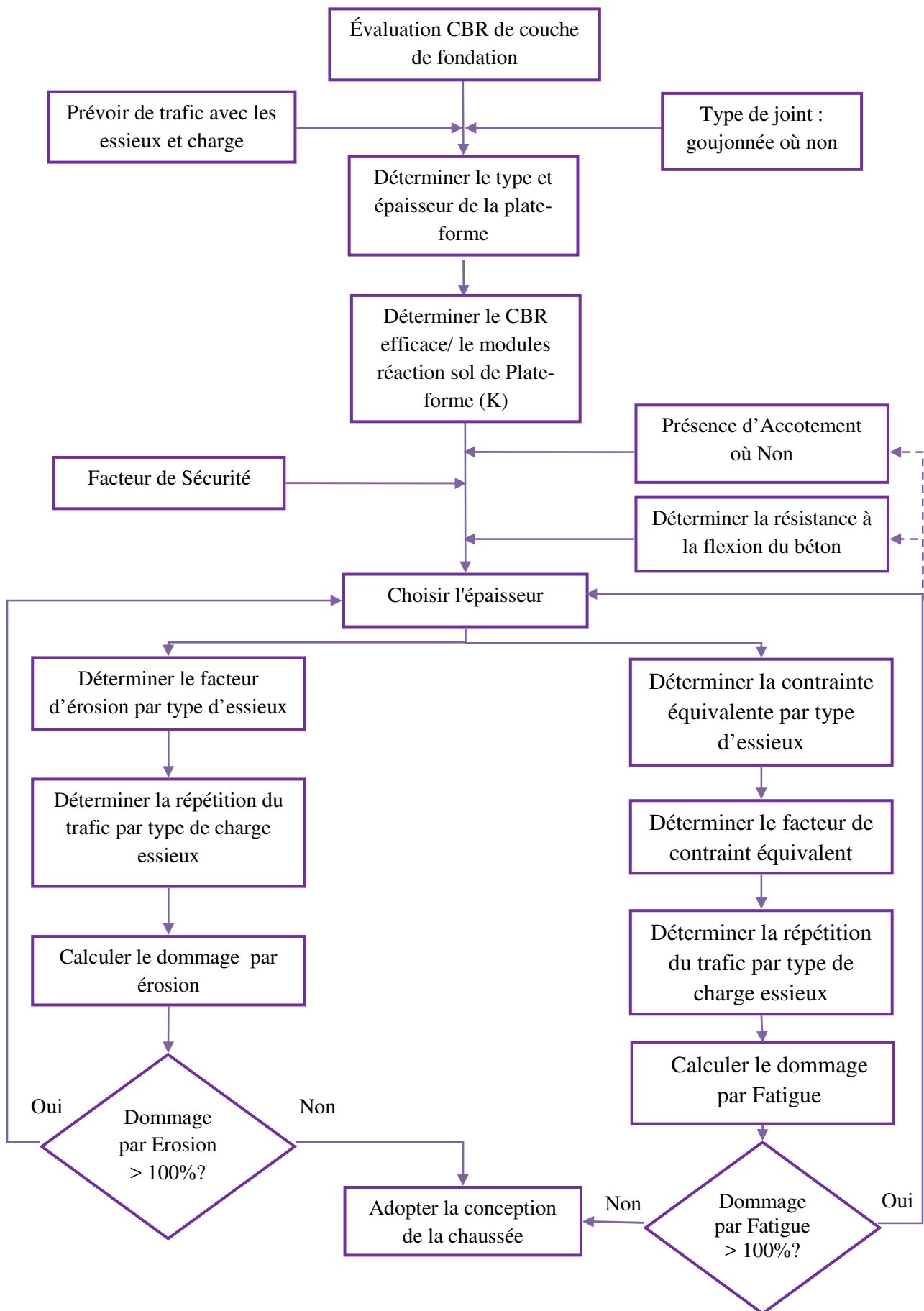


Figure 2.1 L'Organigramme pour le dimensionnement de la chaussée rigide par la Méthode PCA (Portland Ciment Association)

Le chargement au bord de la chaussée (Edge of the road) est le cas le plus critique de la charge en fonction de la déformation qui se produit dans le sens vertical. Pour cette raison, la déformation qui se produit dans la situation de chargement du bord, est utilisé pour l'analyse de l'érosion. De plus dans les tableaux présentés dans PCA (Portland Ciment Association) 1984 ont été préparés en tenant compte des goujons et des accotements.

« La méthode PCA est basée sur des tableaux et des graphes »

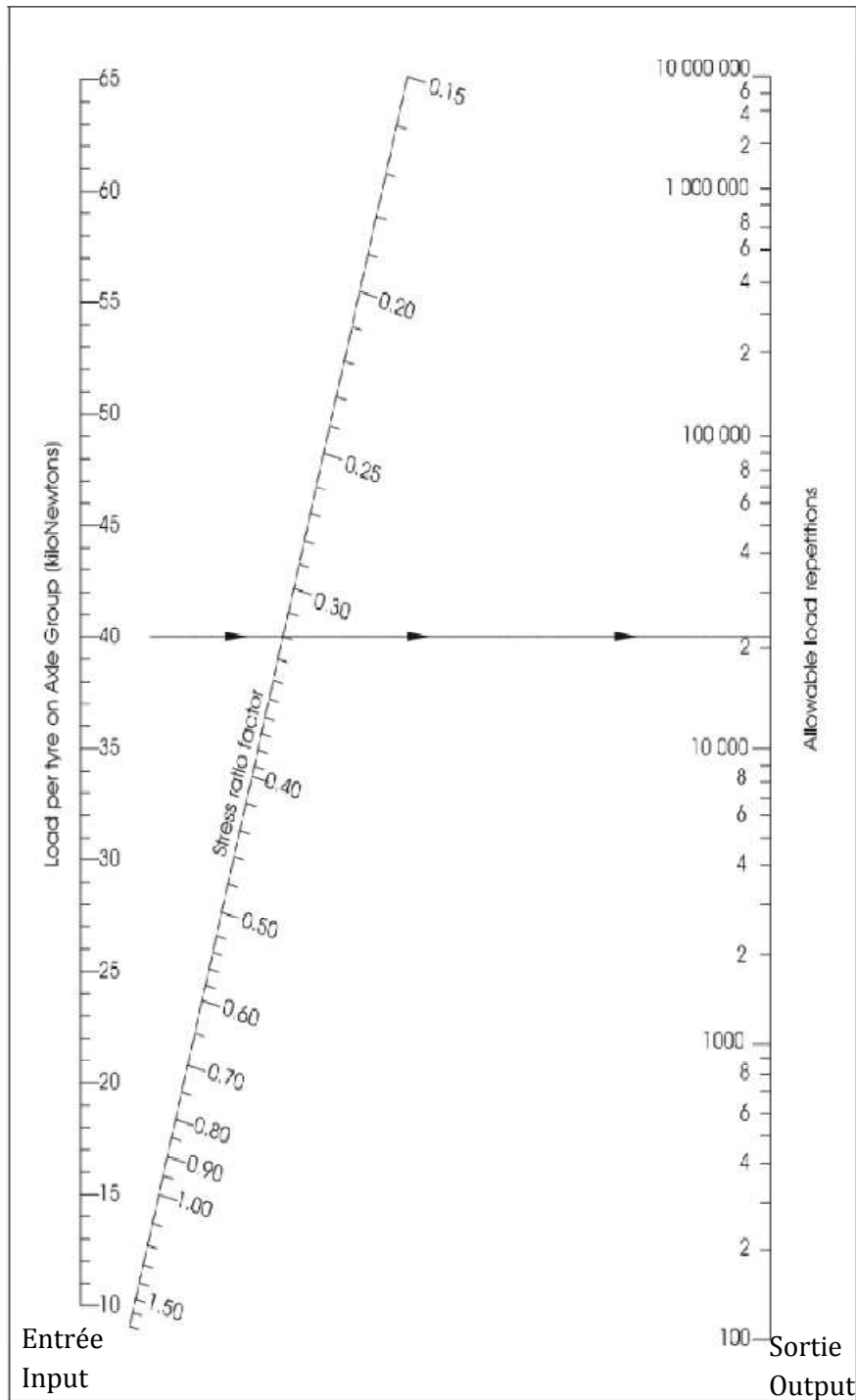


Figure 2.2 Graphe d'analyse de la fatigue PCA (PCA (Portland Ciment Association), 1984)

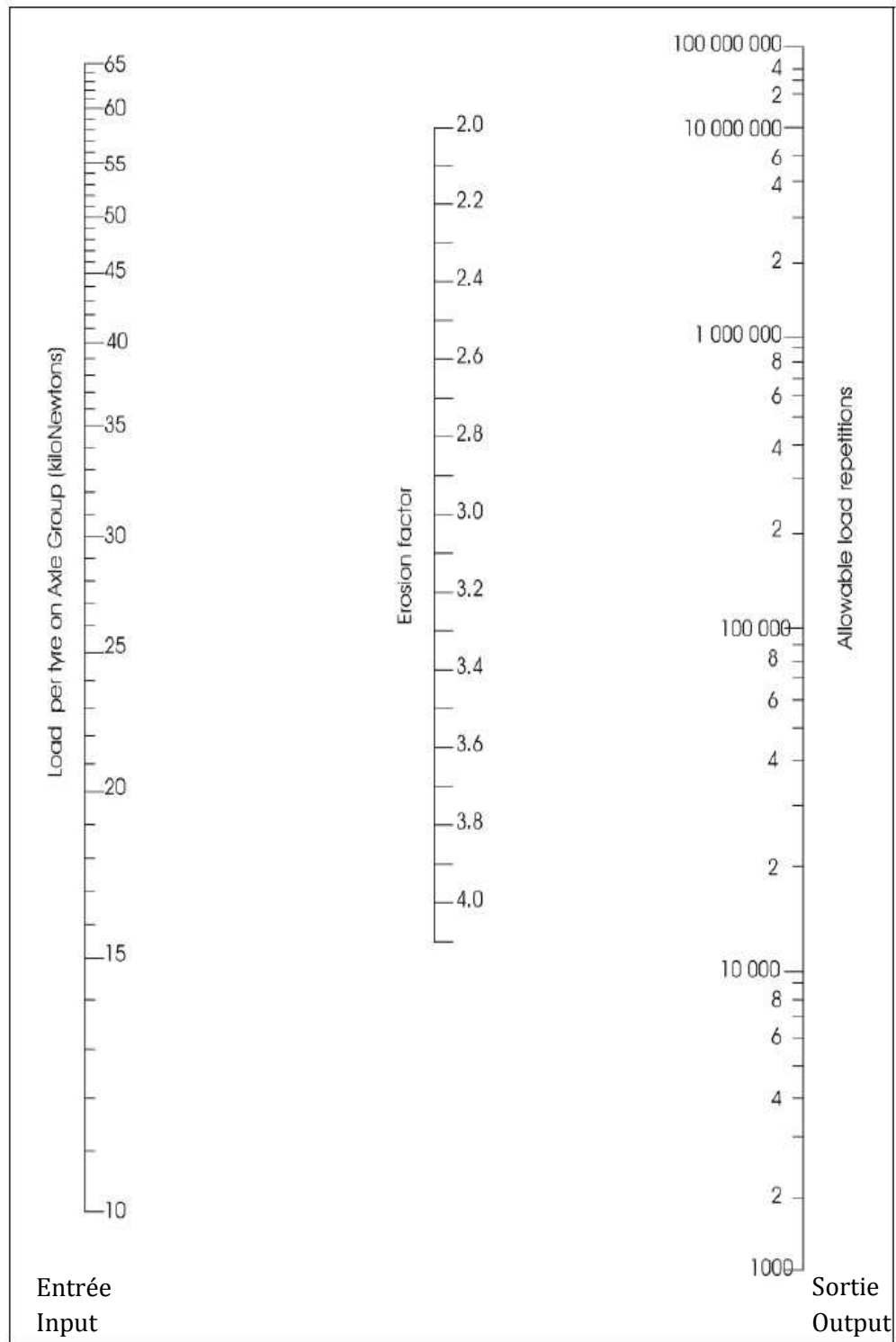


Figure 2.3 Graphe pour déterminer charge répétition admissible par Érosion (Portland Ciment Association)

2.4 Exemple d'un dimensionnement par la méthode PCA

2.4.1 Dimensionnement par la Méthode PCA (Portland Cement Association)

Pour calculer l'épaisseur de la chaussée rigide, nous suivons la procédure de la méthode PCA basée sur l'analyse de la condition du dommage, des matériaux et environnement.

On utilise le facteur de dommage pour vérification du calcul :

$$D_r = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} < 1 \text{ où } 100 \quad (1)$$

Où m : Nombre total des groupes des essieux

n_i : Répétition prévue par groupe des essieux pour chaque catégorie de charge donnée.

N_i : Répétition admissible de groupe des essieux pour chaque catégorie de charge donnée.

2.4.2 Calcul du Trafic pour la Chaussée Rigide

Le trafic de conception se caractérise par le nombre cumulatif des groupes des essieux de véhicules commerciaux prévus pendant la durée de vie de la chaussée. Avec les proportions de chaque type de groupe des essieux et la répartition de la charge sur chaque type de groupe des essieux. Le nombre cumulé du groupe des essieux des véhicules utilitaires pendant la durée de vie de la chaussée est donné par :

$$C_{ag} = C_d \times 365 \times GF$$

C_{ag} : Nombre cumulé du groupe des essieux des véhicules.













C_d : Nombre initial de groupes d'essieu des véhicules utilitaires par jour.

GF : le Facteur Cumulatif (Growth Factor).

Remarque : Pour les données de trafic, on considère les deux directions de circulation.

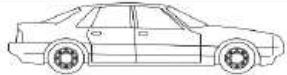
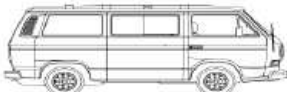
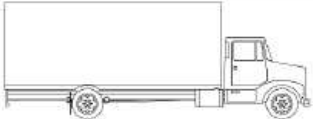
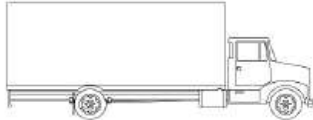
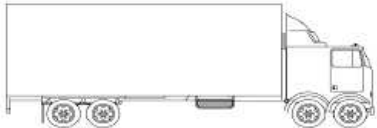
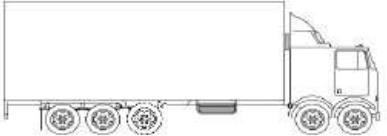
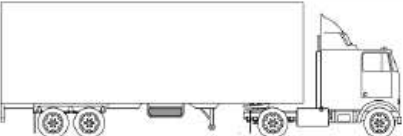
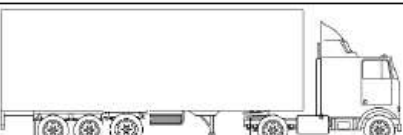
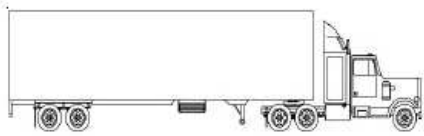
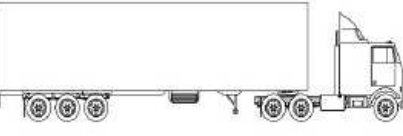
- *Les données du trafic :* Selon les données du trafic de l'année 2005 pour un tronçon routier à deux voies bidirectionnelle sur Alger.

Tableau 2.1 Les données du trafic par type d'essieu

	Nombre de véhicule/jour											
	véhicule de passagers	Minibus 8-16 sièges	Bus 16+ sièges	Lourds								
				Moyen 2 Essieux rigides	Lourd 3 Essieux rigides	Lourd 4 Essieux rigides	Lourd 5 Essieux rigides	Lourd remorque 4 Essieux rigides	Lourd remorque 5 Essieux isolés, tridem	Lourd remorque 5 Essieux isolés tandem	Lourd remorque 6 Essieux isolés	
24H /24H												
Total	279	83	37	312	199	141	186	89	108	287	81	
Total par voie	140	42	19	156	100	71	93	45	54	144	41	

Le tableau suivant résume le trafic pour le dimensionnement de la chaussée rigide par PCA :

Tableau 2.2 **Résumé du trafic**

Type de véhicule	Nombre de véhicule/ jour	Remarque
Véhicule de passagers	279	
Minibus 8-16 sièges	83	
Camion léger et Bus	349	
Camion lourd monté en tandem	199	
Camion lourd monté en tandem 4 essieux rigides (type 1)	141	
Camion lourd monté en tridem 5 essieux rigides (type 2)	186	
Camion lourd monté en tandem remorque 4 essieux (type 3)	89	
Camion lourd monté en tandem remorque 5 essieux (type 4)	108	
Camion lourd monté en tandem remorque 5 essieux (type 5)	287	
Camion lourd monté en tridem remorque 6 essieux (type 6)	81	

- *Evolution du trafic :*

Le trafic total au cours de la période de conception est déterminé en multipliant le trafic total de l'année de mise en service par le facteur cumulatif en appliquant la formule ci-dessous :

$$GF = \frac{(1 + r)^y - 1}{r}$$

Où r : Taux de croissance du trafic en % par an

y : Nombre d'année de service


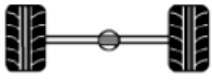
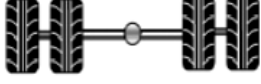
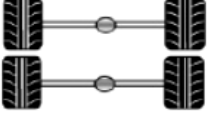
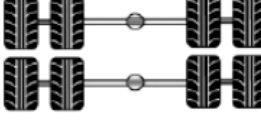
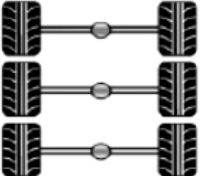
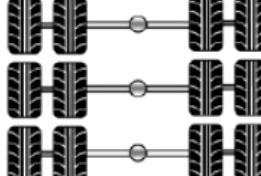
Tableau 2.3 Coefficient cumulatif du trafic GF

Année k	Taux de croissance (%)					
	0	2	4	6	8	10
5	5	5,2	5,4	5,6	5,9	6,1
10	10	10,9	12	13,2	14,5	15,9
15	15	17,3	20	23,3	27,2	31,8
20	20	24,3	29,8	36,8	45,8	57,8
25	25	32	41,6	54,9	73,1	98,3
30	30	40,6	56,1	79,1	113,3	164,5
35	35	50	73,7	111,4	172,3	271
40	40	60,4	95	154,8	259,1	442,6

- *Type des essieux*

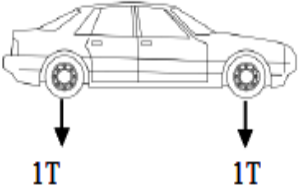
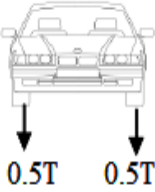
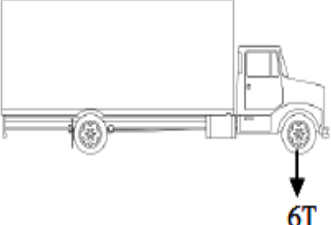
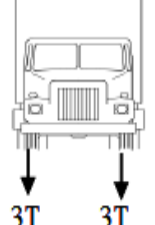
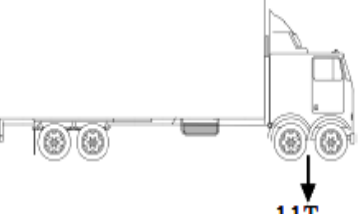

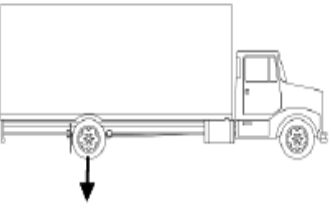
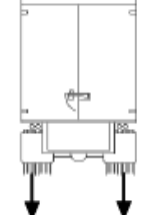
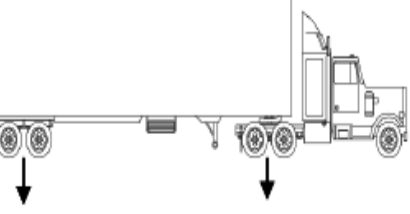
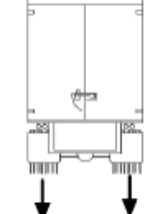

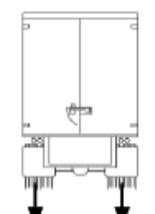
Le tableau suivant représente les différents types d'essieu :

Tableau 2.4 Les différents types d'essieu

Descriptions	Remarque	Descriptions	Remarque
Pilotage			
Essieu isolé à roues simples		Essieu isolé à roues jumelées	
Essieux en tandem à roues simples		Essieux en tandem à roues jumelées	
Essieux en tridem à roues simples		Essieux en tridem à roues jumelées	

- Les différentes charges des essieux :

Tableau 2.5 Les différentes charges par types d'essieu

		<p>Essieu isolé à roues simples qui pour la voiture de voyageurs le poids admissible est 1T</p>
		<p>Essieu isolé à roues simples qui a deux pneus à la direction (Steering) le poids admissible est 6T</p>
		<p>Essieux montés en tandem qui a quatre pneus (Tandem axle with 4 single tyres) à la direction (Steering) le poids admissible est 11T</p>
		<p>Essieux isolé à roues jumelées qui a quatre pneus (Single axle with 2 dual tyres) le poids admissible est 10T</p>
		<p>Essieux montés en tandem qui a huit pneus (Tandem axles with 4 dual tyres) le poids admissible est 19T</p>
		<p>Essieux montés en Tridem qui a douze pneus (Tridem axles with 6 dual tyres) le poids admissible est 24T</p>

Pour la conception selon la méthode PCA (Portland Ciment Association) on a besoin du facteur de distribution des voies pour le calcul de la répétition du trafic prévu selon le tableau au dessous on prend LDF = 0.8 soit 80% (chaussée à 2 voies) :

Tableau 2.6 Facteur de distribution des voies

Nombre de voie	% de 18-Kip ESAL
1	100
2	80-100
3	60-80
4 où plus	50-75

- *Calcul du trafic*

D'après les données du trafic précédentes on a un LDF = 0.8 (Tableau 2.6) et un GF = 29.8 avec un pourcentage du poids lourds de 50% = 0.5 ; le trafic cumulé C_{ag} par groupe des essieux est donné comme suit :

Tableau 2.7 Le trafic cumulé par groupe des essieux

type d'essieu	Nombre d'essieu	GF	Pourcentage du poids lourd	Répétitions du trafic par groupe des essieux
Essieu isolé à roue simple	1837	29,8	0,5	9990525
Essieu isolé à roue jumelée	327	29,8	0,5	1778390
Essieu isolé à roue jumelée	546	29,8	0,5	2969421
Essieu monté tendem	1084	29,8	0,5	5895334
Essieu monté tridem	375	29,8	0,5	2039438

Donc le calcul de la répétition du trafic prévue par groupe des essieux se fait selon le tableau suivant :

Tableau 2.8 La répétition du trafic prévu par type d'essieu

Charge de l'essieu (KN)	Charge par Pneu (KN)	Proportion de charge (% 100)	LDF	Trafic cumulé par groupe des essieux	Répétitions du trafic prévu
Essieu isolé à roue simple					
80	40	1,211	0,8	9990525	96788
70	35	5,653	0,8	9990525	451812
60	30	32,19	0,8	9990525	2572760
50	25	28,74	0,8	9990525	2297022
40	20	15,3	0,8	9990525	1222840
30	15	9,237	0,8	9990525	738260
20	10	6,738	0,8	9990525	538529

10	5	0,5034	0,8	9990525	40234
Essieu monté en tandem / roue simple					
130	32,5	0,6323	0,8	1778390	8996
120	30	17,876	0,8	1778390	254324
110	27,5	16,245	0,8	1778390	231120
100	25	17,356	0,8	1778390	246926
90	22,5	15,875	0,8	1778390	225856
80	20	16,274	0,8	1778390	231532
70	17,5	15,25	0,8	1778390	216964
Essieu isolé à roue jumelée					
20	30	5,2935	0,8	2969421	125749
110	27,5	4,13	0,8	2969421	98110
100	25	7,837	0,8	2969421	186171
90	22,5	11,17	0,8	2969421	265347
80	20	13,29	0,8	2969421	315709
70	17,5	13,58	0,8	2969421	322598
60	15	14,196	0,8	2969421	337231
50	12,5	10,23	0,8	2969421	243017
40	10	8,484	0,8	2969421	201541
Essieu monté en tandem					
230	28,75	0,0613	0,8	5895334	2891
220	27,5	0,1346	0,8	5895334	6348
210	26,25	0,2348	0,8	5895334	11074
200	25	0,4341	0,8	5895334	20473
190	23,75	5,1232	0,8	5895334	241624
180	22,5	1,598	0,8	5895334	75366
170	21,25	6,575	0,8	5895334	310095
160	20	3,767	0,8	5895334	177662
150	18,75	10,35	0,8	5895334	488134
140	17,5	12,92	0,8	5895334	609342
130	16,25	10,55	0,8	5895334	497566
120	15	9,173	0,8	5895334	432623
110	13,75	9,314	0,8	5895334	439273
100	12,5	6,244	0,8	5895334	294484
90	11,25	5,297	0,8	5895334	249821

80	10	4,846	0,8	5895334	228550
70	8,75	4,866	0,8	5895334	229494
60	7,5	5,173	0,8	5895334	243973
Essieu monté en tridem					
290	24,167	0,0441	0,8	2039438	720
280	23,33	0,0815	0,8	2039438	1330
270	22,5	0,1293	0,8	2039438	2110
260	21,667	0,2209	0,8	2039438	3604
250	20,833	0,3486	0,8	2039438	5688
240	20	0,6311	0,8	2039438	10297
230	19,167	1,138	0,8	2039438	18567
220	18,333	1,928	0,8	2039438	31456
210	17,5	2,83	0,8	2039438	46173
200	16,667	4,424	0,8	2039438	72180
190	15,833	4,981	0,8	2039438	81268
180	15	6,076	0,8	2039438	99133
170	14,167	7,379	0,8	2039438	120392
160	13,333	8,126	0,8	2039438	132580
150	12,5	8,357	0,8	2039438	136349
140	11,667	7,893	0,8	2039438	128778
130	10,833	6,69	0,8	2039438	109151
120	10	3,574	0,8	2039438	58312
110	9,167	4,116	0,8	2039438	67155
100	8,333	3,842	0,8	2039438	62684
90	7,5	3,79	0,8	2039438	61836
80	6,667	3,843	0,8	2039438	62700
70	5,833	4,078	0,8	2039438	66535
60	5	4,359	0,8	2039438	71119

2.4.3 Hypothèses de Calcul

On suppose dans notre exemple que le sol support et de grande portance donc la couche de base est confondu avec le sol support avec un CBR_{eff} de 75%.

La procédure de calcul selon la PCA dépend de la vérification du dommage par fatigue ou par érosion ou par les deux dans notre cas. On utilise le graphe de la Figure 2.2 pour l'analyse de la fatigue et le graphe de la Figure 2.3 pour l'analyse de l'érosion.

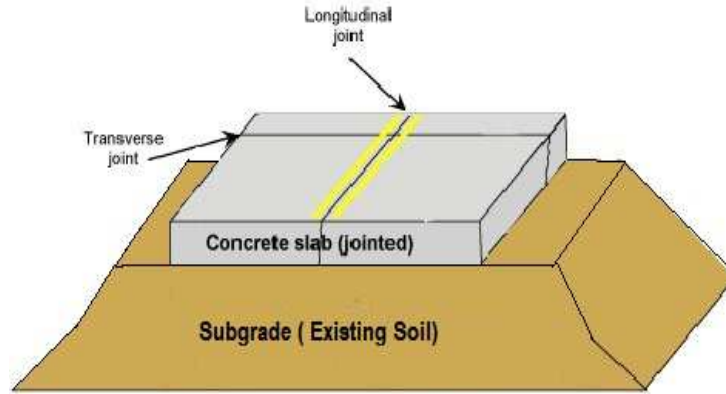


Figure 2.4 Chaussée en béton jointée sans accotements

Les hypothèses de calcul sont résumées comme suit:

Goujonnée ou Non Goujonnée : **Oui**

Avec accotements ou Sans : **Sans**

La période de conception : **20 ans**

Facteur de Sécurité : $LSF = 1.2$ (camions élevé)

Épaisseur Initiale : $h = 21.5\text{ cm}$

Résistance à la Compression du béton : $f'_c = 30\text{ MPa}$

Résistance à la Flexion du béton : $S_c = 0.75\sqrt{f'_c} = 4.11\text{ MPa}$

$CBR_{\text{eff}} : 75\%$

2.4.4 Le dimensionnement des chaussées rigides par la méthode PCA

On suppose une épaisseur $h = 21.5\text{ cm} = 215\text{ mm}$ de la dalle de béton et on la vérifie selon PCA, en utilisant les graphes (Figure 2.2 analyse de Fatigue, Figure 2.3 analyse d'érosion) et le Tableau 2.9 suivant :

Tableau 2.9 La contrainte équivalente et le Facteur d'érosion pour les chaussées rigides sans accotements

Slab Thickness (mm)	Effective CBR of Subgrade	Equivalent Stresses				Erosion Factors							
		SS	SD	TAD	TRD	Undowelled				Dowelled or CRC			
		SS	SD	TAD	TRD	SS	SD	TAD	TRD	SS	SD	TAD	TRD
150	5	1.70	2.72	2.25	1.68	2.80	3.40	3.50	3.55	2.60	3.21	3.30	3.37
150	10	1.62	2.56	2.09	1.58	2.79	3.39	3.46	3.50	2.59	3.20	3.28	3.32
150	15	1.59	2.48	2.01	1.53	2.78	3.38	3.44	3.47	2.59	3.20	3.27	3.30
150	20	1.56	2.43	1.97	1.51	2.77	3.37	3.43	3.46	2.59	3.19	3.26	3.29
150	25	1.54	2.37	1.92	1.48	2.77	3.37	3.42	3.44	2.59	3.19	3.25	3.28
150	35	1.49	2.26	1.82	1.43	2.76	3.36	3.39	3.40	2.58	3.18	3.23	3.25
150	50	1.43	2.15	1.73	1.40	2.74	3.34	3.36	3.37	2.57	3.17	3.21	3.22
150	75	1.38	2.02	1.64	1.36	2.72	3.32	3.33	3.32	2.56	3.16	3.19	3.19
160	5	1.54	2.49	2.08	1.55	2.72	3.32	3.43	3.47	2.52	3.12	3.22	3.30
160	10	1.47	2.34	1.92	1.44	2.71	3.31	3.39	3.43	2.51	3.11	3.20	3.26
160	15	1.44	2.26	1.84	1.39	2.70	3.30	3.37	3.41	2.51	3.11	3.19	3.24
160	20	1.41	2.22	1.80	1.37	2.69	3.29	3.36	3.40	2.50	3.10	3.18	3.23
160	25	1.39	2.17	1.76	1.34	2.69	3.29	3.35	3.38	2.50	3.10	3.17	3.21
160	35	1.34	2.07	1.67	1.29	2.68	3.28	3.32	3.34	2.49	3.09	3.15	3.18
160	50	1.30	1.96	1.58	1.25	2.66	3.26	3.28	3.30	2.49	3.09	3.13	3.15
160	75	1.24	1.85	1.49	1.23	2.64	3.24	3.26	3.25	2.48	3.08	3.12	3.12

Slab Thickness (mm)	Effective CBR of Subgrade	Equivalent Stresses				Erosion Factors							
		SS	SD	TAD	TRD	Undowelled				Dowelled or CRC			
						SS	SD	TAD	TRD	SS	SD	TAD	TRD
260	5	0.73	1.26	1.18	0.90	2.13	2.73	2.99	3.03	1.89	2.49	2.69	2.87
260	10	0.70	1.18	1.08	0.82	2.11	2.71	2.93	2.98	1.88	2.48	2.66	2.81
280	15	0.68	1.15	1.03	0.78	2.10	2.70	2.90	2.95	1.88	2.48	2.64	2.78
260	20	0.67	1.12	1.00	0.75	2.09	2.69	2.89	2.93	1.87	2.47	2.63	2.76
260	25	0.66	1.10	0.97	0.73	2.08	2.69	2.87	2.91	1.87	2.47	2.62	2.74
260	35	0.64	1.05	0.91	0.68	2.07	2.68	2.83	2.87	1.86	2.46	2.59	2.70
260	50	0.61	1.00	0.85	0.64	2.05	2.65	2.80	2.84	1.85	2.45	2.56	2.67
260	75	0.59	0.95	0.78	0.58	2.03	2.64	2.75	2.78	1.84	2.44	2.54	2.61
270	5	0.66	1.19	1.13	0.87	2.09	2.69	2.95	3.00	1.84	2.44	2.65	2.83
270	10	0.66	1.12	1.03	0.79	2.07	2.67	2.90	2.94	1.83	2.43	2.62	2.78
270	15	0.64	1.09	0.98	0.75	2.06	2.66	2.87	2.91	1.83	2.43	2.60	2.75
270	20	0.63	1.06	0.96	0.72	2.05	2.65	2.85	2.90	1.82	2.42	2.59	2.73
270	25	0.62	1.04	0.93	0.70	2.04	2.64	2.83	2.88	1.82	2.42	2.58	2.71
270	35	0.60	0.99	0.87	0.65	2.02	2.63	2.79	2.84	1.81	2.41	2.55	2.67
270	50	0.58	0.95	0.81	0.61	2.00	2.61	2.76	2.80	1.80	2.40	2.52	2.63
270	75	0.56	0.89	0.74	0.57	1.99	2.59	2.70	2.75	1.79	2.39	2.50	2.58
280	5	0.65	1.13	1.08	0.83	2.05	2.65	2.92	2.97	1.60	2.40	2.62	2.80
280	10	0.62	1.06	0.99	0.75	2.03	2.63	2.86	2.91	1.79	2.39	2.58	2.74
280	15	0.60	1.03	0.94	0.72	2.01	2.62	2.83	2.88	1.78	2.38	2.58	2.71
280	20	0.60	1.01	0.92	0.69	2.00	2.61	2.82	2.87	1.77	2.37	2.55	2.70
280	25	0.59	0.99	0.89	0.67	1.99	2.60	2.80	2.85	1.77	2.37	2.54	2.68
280	35	0.57	0.94	0.83	0.62	1.97	2.58	2.76	2.81	1.76	2.36	2.51	2.64
280	50	0.55	0.90	0.78	0.59	1.96	2.56	2.72	2.77	1.75	2.35	2.48	2.60
280	75	0.53	0.86	0.71	0.53	1.94	2.55	2.68	2.72	1.74	2.34	2.46	2.55

SS : Essieu isolé roues simples

TAD : Essieu monté en Tandem

SD : Essieu isolé roues jumelées

TRD : Essieu monté en Tridem

On aura le facteur d'érosion et la contrainte équivalente pour calculer le facteur de fatigue

Le facteur de fatigue $F_3 = \frac{\sigma_{eq}}{S_c}$ avec $S_c = 4.11 MPa$

S_c : Résistance à la Flexion du béton

σ_{eq} : Contrainte équivalente

Tableau 2.10 Dimensionnement des chaussées rigides selon la méthode PCA (Portland Ciment Association)

Poids de l'essieu P(KN)	Calcul Poids/Pneu p (KN)	Répétition du trafic prévu	Analyse de la Fatigue		Analyse de l'Erosion	
			Répétition Admissible	Fatigue (%)	Répétition Admissible	Erosion (%)
Essieu isolé / Roue simple						
Contrainte équivalente : 0,79 MPa (Tableau 2.9)						
Facteur de fatigue = 0,192						
Facteur d'érosion = 2,09						
80	48	96788	Illimitée		35000000	0,2765
70	42	451812	Illimitée		Illimitée	
60	36	2572760	Illimitée		Illimitée	
50	30	2297022	Illimitée		Illimitée	
40	24	1222840	Illimitée		Illimitée	

30	18	738260	Illimitée		Illimitée	
20	12	538529	Illimitée		Illimitée	
10	6	40234	Illimitée		Illimitée	
Essieu monté en tandem / Roues simples						
Contrainte équivalente : 0,79 MPa (Tableau 2.9)						
Facteur de fatigue = 0,192						
Facteur d'érosion = 2,09						
130	39	8996	Illimitée		Illimitée	
120	36	254324	Illimitée		Illimitée	
110	33	231119	Illimitée		Illimitée	
100	30	246926	Illimitée		Illimitée	
90	27	225855	Illimitée		Illimitée	
80	24	231538	Illimitée		Illimitée	
70	21	216938	Illimitée		Illimitée	
60	18	163327	Illimitée		Illimitée	
Essieu isolé à roues jumelées						
Contrainte équivalente : 1,23 MPa (Tableau 2.9)						
Facteur de fatigue = 0,3						
Facteur d'érosion = 2,69						
120	36	125749	500000	25,1498	600000	20,9582
110	33	98110	2100000	4,67189	1200000	8,176
100	30	186171	Illimitée		2300000	8,094
90	27	265347	Illimitée		4100000	6,4719
80	24	315709	Illimitée		21000000	1,50
70	21	322598	Illimitée		Illimitée	
60	18	337231	Illimitée		Illimitée	
Essieu monté en tandem / Roues jumelées						
Contrainte équivalente : 1 MPa (Tableau 2.9)						
Facteur de fatigue = 0,243						
Facteur d'érosion = 2,755						
230	34,5	2891	Illimitée		600000	0,4818453
220	33	6348	Illimitée		700000	0,90687081
210	31,5	11074	Illimitée		1100000	1,00670867
200	30	20473	Illimitée		1700000	1,2043127

190	28,5	241624	Illimitée		2100000	11,5058953
180	27	75366	Illimitée		2800000	2,69164107
170	25,5	310095	Illimitée		4000000	7,75236421
160	24	177662	Illimitée		8000000	2,22077232
150	22,5	488134	Illimitée		20000000	2,44066828
140	21	609342	Illimitée		90000000	0,67704636
130	19,5	497566	Illimitée		Illimitée	
120	18	432623	Illimitée		Illimitée	
110	16,5	439273	Illimitée		Illimitée	
100	15	294484	Illimitée		Illimitée	
90	13,5	249821	Illimitée		Illimitée	
80	12	228550	Illimitée		Illimitée	
70	10,5	229494	Illimitée		Illimitée	
60	9	243973	Illimitée		Illimitée	
Essieu monté en tridem / Roues jumelées						
Contrainte équivalente : 0,755 MPa (Tableau 2.9)						
Facteur de fatigue = 0,183						
Facteur d'érosion = 2,805						
290	29	720	Illimitée		1300000	0,05534721
280	28	1330	Illimitée		1800000	0,07387298
270	27	2110	Illimitée		2000000	0,10547973
260	26	3604	Illimitée		2500000	0,14416379
250	25	5688	Illimitée		3100000	0,18347047
240	24	10297	Illimitée		4000000	0,25741786
230	23	18567	Illimitée		6000000	0,30945073
220	22	31456	Illimitée		10000000	0,31456292
210	21	46173	Illimitée		20000000	0,23086438
200	20	72180	Illimitée		40000000	0,18044947
190	19	81268	Illimitée		Illimitée	
180	18	99133	Illimitée		Illimitée	
170	17	120392	Illimitée		Illimitée	
160	16	132580	Illimitée		Illimitée	
150	15	136349	Illimitée		Illimitée	
140	14	128778	Illimitée		Illimitée	

130	13	109151	Illimitée		Illimitée	
120	12	58312	Illimitée		Illimitée	
110	11	67155	Illimitée		Illimitée	
100	10	62684	Illimitée		Illimitée	
90	9	61836	Illimitée		Illimitée	
			Total Fatigue (%)	29,8217	Total Erosion (%)	78,2234
			Total Dommage (%)	54,02253341		

D'après les résultats donnés par le Tableau 2.10 on trouve que l'épaisseur de la dalle de béton $h = 21.5 \text{ cm}$ vérifie les conditions de la méthode de dimensionnement PCA $D_r < 100\%$ donc on adapte l'épaisseur de la chaussée en béton à $h = 21.5 \text{ cm}$.

2.4.5 Vérification de la contrainte équivalente selon PCA (Portland Cement Association)

- Calcul de la contrainte équivalente

La méthode PCA considère la contrainte équivalente de l'essieu à roues jumelées et l'essieu monté en tandem.

$$\sigma_{eq} = \frac{6 \times M_e}{h^2} \times f_1 \times f_2 \times f_3 \times f_4 \quad (2)$$

$$M_e = \begin{cases} -1600 + 2525 \times \log(l) + 24.42 \times l + 0.204 \times l^2 & \text{pour essieu isolé à roues jumelées} \\ 3029 - 2966.8 \times \log(l) + 133.69 \times l - 0.0632 \times l^2 & \text{pour essieu monté en Tandem} \end{cases}$$

$$f_1 = \begin{cases} \left(\frac{24}{SAL}\right)^{0.06} \times \left(\frac{SAL}{18}\right) & \text{pour essieu isolé à roues jumelées} \\ \left(\frac{48}{TAL}\right)^{0.06} \times \left(\frac{TAL}{36}\right) & \text{pour essieu monté en Tandem} \end{cases}$$

$$f_2 = 0.892 + \frac{h}{85.71} - \frac{h^2}{3000}$$

$$f_3 = 0.894$$

$$f_4 = \frac{1}{[1.235 \times (1 - \mu)]}$$

Ou σ_{eq} : contrainte équivalente (psi)

h : épaisseur de la dalle (in)

l : rayon de rigidité de la dalle (in), $l = \left(\frac{E \times h^3}{(12 \times (1 - \mu^2) \times k)}\right)^{0.25}$

E : module d'élasticité du béton (psi)

k : module de réaction de sol plateforme

μ : coefficient de poisson

f_1 : Facteur d'ajustement pour l'effet de la charge d'essieu et la roue

f_2 : Facteur d'ajustement de la dalle sans accotement en béton

f_3 : Facteur d'ajustement pour l'effet de positionnement des camions sur la contrainte du bord

f_4 : Facteur d'ajustement pour tenir compte de l'augmentation de la résistance du béton (dans la méthode PCA on suppose $\mu = 0.15$)

SAL : charge d'un essieu isolé à roue jumelée

TAL : charge d'un essieu monté en tandem

- *l'hypothèse de Calcul :*
 - $h = 215 \text{ mm} = 8.464 \text{ in}$
 - $E = 4 \times 10^6 \text{ psi}$
 - $\mu = 0.15$
 - $k = 680 \text{ psi}$ ($CBR_{eff} = 75\%$)
 - $SAL = 18 \text{ kip}$
 - $TAL = 36 \text{ kip}$

- *Contrainte équivalente pour essieux isolés à roues jumlées*

$$l = \left(\frac{E \times h^3}{(12 \times (1 - \mu^2)) \times k} \right)^{0.25} = \left(\frac{4 \times 10^6 \times 8.464^3}{12 \times (1 - 0.15^2) \times 680} \right)^{0.25} = 23.482 \text{ in}$$

$$f_1 = \left(\frac{24}{SAL} \right)^{0.06} \times \left(\frac{SAL}{18} \right) = \left(\frac{24}{18} \right)^{0.06} \times \left(\frac{18}{18} \right) = 1.017$$

$$f_2 = 0.892 + \frac{h}{85.71} - \frac{h^2}{3000} = 0.892 + \frac{8.464}{85.71} - \frac{8.464^2}{3000} = 0.967$$

$$f_3 = 0.894 \text{ (Pour Poids lourds 6% au bord de la dalle)}$$

$$f_4 = \frac{1}{[1.235 \times (1 - CV)]} = \frac{1}{[1.235 \times (1 - 0.15)]} = 0.953$$

$$M_e = -1600 + 2525 \times \log(l) + 24.42 \times l + 0.204 \times l^2$$

$$M_e = -1600 + 2525 \times \log(23.482) + 24.42 \times 23.482 + 0.204 \times 23.482^2 \\ = 2547.02$$

$$\sigma_{eq} = \frac{6M_e}{h^2} \times f_1 \times f_2 \times f_3 \times f_4 = \frac{6 \times 2547.02}{8.464^2} \times 1.017 \times 0.967 \times 0.894 \times 0.953 = \\ 179.26 \text{ psi} = 1.23 \text{ MPa} = \sigma_{eq \text{ tab}(SD)}$$

- *Contrainte équivalente pour essieux montés en Tandem*

$$f_1 = \left(\frac{48}{TAL} \right)^{0.06} \times \left(\frac{TAL}{36} \right) = \left(\frac{48}{36} \right)^{0.06} \times \left(\frac{36}{36} \right) = 1.017$$

$$M_e = 3029 - 2966.8 \times \log(l) + 133.69 \times l - 0.0632 \times l^2$$

$$M_e = 3029 - 2966.8 \times \log(23.482) + 133.69 \times 23.482 - 0.0632 \times 23.482^2 \\ = 2066.76$$

$$\sigma_{eq} = \frac{6M_e}{h^2} \times f_1 \times f_2 \times f_3 \times f_4 = \frac{6 \times 2066.76}{8.464^2} \times 1.017 \times 0.967 \times 0.894 \times 0.953 = \\ 145.46 \text{ psi} = 1 \text{ MPa} = \sigma_{eq \text{ tab}(TAD)}$$

Les résultats obtenus vérifie les conditions de la méthode PCA pour les deux types Essieu monté en Tandem et Essieu isolé à roue jumelée donc on maintient l'épaisseur de la chaussée $h = 21.5 \text{ cm}$.

2.5 Calcul du Coût classique d'une bande unitaire d'une chaussée rigide:

L'objectif de ce calcul est de déterminer le coût d'une bande unitaire d'une chaussée rigide pour cela, il est recommandé de faire les étapes suivantes :

La fonction coût est définie comme suit :

$$C_T = C_b + C_c$$

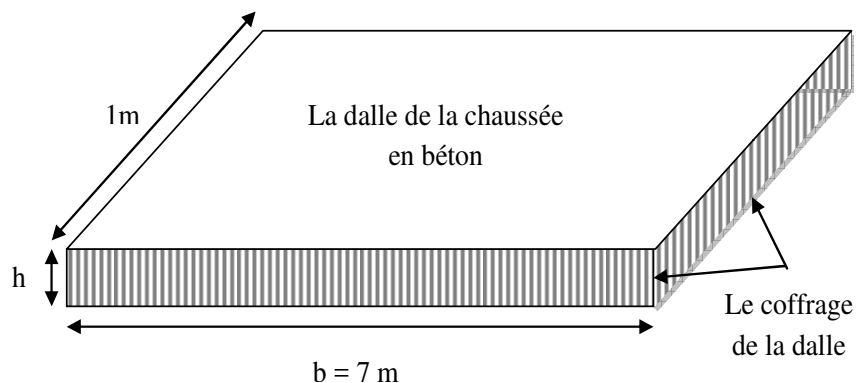
Avec :

C_T : Le coût total

C_b : Le coût de béton

C_c : Le coût du coffrage

Pour 1m on a :



$$C_b = V_b \times C_{bu} = h \times b \times 1(m) \times C_{bu}$$

$$C_c = S_c \times C_{cu} = (1(m) \times 2 + b) \times h \times C_{cu}$$

h : L'épaisseur de la dalle du béton calculée $h = 21.5 \text{ cm}$

C_{bu} : Prix unitaire de béton (pour 1 m^3)

C_{cu} : Prix unitaire du coffrage (pour 1 m^2)

b : La largeur de la chaussée $l = 7 \text{ m}$ (2 voies).

$$C_T = V_b \times C_{bu} + S_c \times C_{cu}$$

$$C_T = h \times b \times 1(m) \times C_{bu} + (1(m) \times 2 + b) \times h \times C_{cu}$$

$$C_T = 0.215 \times 7 \times 1(m) \times C_{bu} + (1(m) \times 2 + 7) \times 0.215 \times C_{cu}$$

Le rapport du coût de coffrage unitaire sur le coût de béton unitaire est estimé à 10% en Algérie :

$$C_{cu} = 0.1 \times C_{bu}$$

$$C_T = 0.215 \times 7 \times C_{bu} + 9 \times 0.1 \times 0.215 \times C_{bu}$$

$$C_T = 0.215 \times C_{bu} \times (7 + 0.9)$$

$$C_T = 1.7 \times C_{bu}$$

$$C = \frac{C_T}{C_{bu}} = \frac{1.7}{C_{bu}} \times C_{bu} = 1.7$$

Pour une valeur de $C_{bu} = 50000 \text{ DA}$ on trouve le $C_T = 1.7 \times C_{bu} = 1.7 \times 50000$

Alors $C_T = 85000 \text{ DA /m}$; Cette valeur sera comparé à la valeur optimal, dans le chapitre IV.

CHAPITRE III

CONCEPTS ET FORMULATION GÉNÉRALE D'UN PROBLÈME D'OPTIMISATION

3.1 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 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 les quelles 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 théorie de Lagrange et de ses multiplicateurs ou cas où il y a aussi des contraintes d'égalité et relativement nouveau et les premier 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.

3.2 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 bénéfique d'affiner notre compréhension du projet et d'identifier les applications valable de la

sous optimisation et de restructurer un grand nombre des processus partiels qu'intègre l'étude du projet.

3.3 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 développés 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).

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.

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 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.

3.3.1 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 :

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

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

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

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.

3.3.2 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 représente les inconnues du problème (on appelle ces composantes les variables de décision).

3.3.3 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.

3.3.4 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 termes 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.

3.4 Type des problèmes d'optimisation

- Problèmes probabilistes.
- Problèmes déterministes.

3.4.1 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.

3.4.2 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.

3.5 Méthode et formulation générale d'un problème d'optimisation déterministe

3.5.1 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.

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 contraintes 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.

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.

3.5.2 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 contrainte est violée et la conception 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 pas de problème d'optimisations au sens propre.

3.5.3 Fonction objectif

Il existe habituellement un nombre infini de conception faisable. Pour obtenir la 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 certains 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.

3.5.4 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 :

$$g_i(x) \leq 0 \quad i=1, \dots, m. \quad Z = F(\{X\}) \longrightarrow \text{Min.}$$

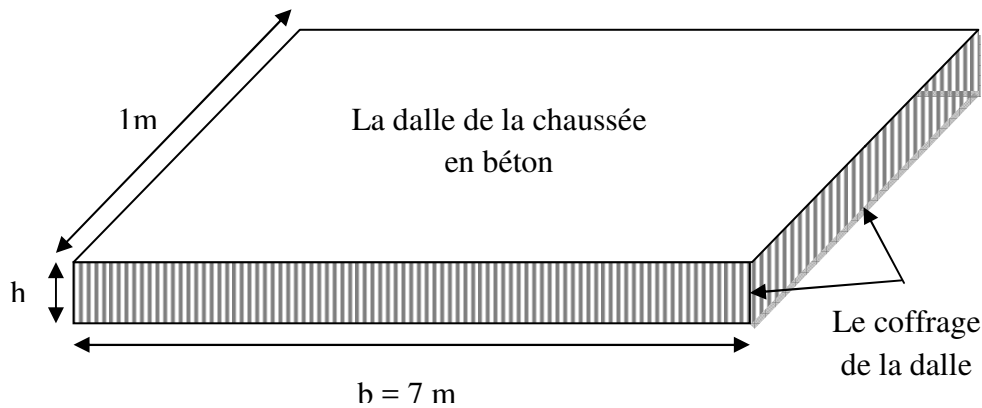
L'équation signifie que $F(\{X\})$ donne un minimum.

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. [Fedghouche F].

CHAPITRE IV

FORMULATION ET RESOLUTION D'UN PROBLEME DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES CHAUSSEES RIGIDES

4.1 Choix de la fonction objectif (fonction cible) Fonction Coût :



Le coût total d'une bande unitaire de la chaussée rigide est exprimé comme suit :

$$C_T = C_b + C_c \rightarrow \text{Min}$$

$$C_T = C_{bu} \times V_b + C_{cu} \times S_c \rightarrow \text{Min}$$

$$C_T = C_{bu} \times h \times b \times 1\text{m} + C_{cu} \times ((2 \times 1\text{m}) + b) \times h \rightarrow \text{Min}$$

$$C_T = h \times b \times C_{bu} + (2 + b) \times h \times C_{cu} \rightarrow \text{Min}$$

Avec: $C_{cu} = 0.1 C_{bu}$

$$C_T = h \times b \times C_{bu} + (2 + b) \times h \times 0.1 C_{bu} \rightarrow \text{Min}$$

$$C_T = (b + 0.1(2 + b)) \times C_{bu} \times h \rightarrow \text{Min}$$

On obtient la formule du coût en fonction de l'épaisseur « h » à optimiser.

$$C_T(h) = \underbrace{(b + 0.1(2 + b)) \times C_{bu}}_{\text{constante}} \times h \rightarrow \text{Minimum}$$

4.2 Formule mathématique du problème d'optimisation:

Dans le but de l'optimiser le dimensionnement par la méthode PCA, notre Formule du problème d'optimisation doit trouver un « h » optimisé tel que :

$$C_T(h) \rightarrow \text{Minimum}$$

Soumise aux contraintes suivantes :

- a) Contrainte de non négativité :

$$h > 0$$

- b) Domaine de choix de l'épaisseur de la dalle :

$$h_{min} \leq h \leq h_{max}$$

- c) Critère de rupture par fatigue :

$$0 \leq \text{Domage par Fatigue } D_F = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_{iF}} \leq 100\%$$

- d) Critère de rupture par érosion :

$$0 \leq \text{Domage par Erosion } D_E = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_{iE}} \leq 100\%$$

- e) Condition de vérification des contraintes :

$\sigma_{eq} \leq \sigma_{eq\ tab}$ pour les deux types d'essieu(isolé à roues jumelées et monté en Tandem)

Avec :

- La répétition de trafic prévu n_i donné par le tableau 2.8 page 30
- La répétition admissible par Fatigue :

$$N_{iF} : \begin{cases} S_r > 0.55 \rightarrow \log(N_{iF}) = \left[\frac{0.9718 - S_r}{0.0828} \right] \\ 0.45 \leq S_r \leq 0.55 \rightarrow N_{iF} = \left[\frac{4.2577}{S_r - 0.4325} \right]^{3.268} \\ S_r < 0.45 \rightarrow N_{iF} \quad \text{non défini} \end{cases}$$

$$S_r = \frac{\sigma_{eq}}{S_c} \left[\frac{P_i \times LSF}{4.45 \times F_1} \right]^{0.94}$$

σ_{eq} : La contrainte équivalente est donnée par le tableau 2.9 page 32

P_i : Charge d'essieu en KN

$$F_1 \text{ Facteur d'ajustement de la charge : } \begin{cases} 9 \rightarrow SS \\ 18 \rightarrow SD \\ 36 \rightarrow TAD \\ 54 \rightarrow TRD \end{cases}$$

LSF : facteur de sécurité = 1.2

- La répétition admissible par Erosion :

$$\log(F_2 N_{iE}) = 14.524 - 6.777 \left[\left(\frac{P_i \times LSF}{4.45 \times F_1} \right)^2 \frac{10^{F_3}}{41.35} - 9 \right]^{0.103}$$

F_2 : Le facteur d'ajustement de l'effet du bord de la dalle $F_2 = \begin{cases} 0.06 \rightarrow \text{Sans accotements} \\ 0.94 \rightarrow \text{Avec accotements} \end{cases}$

F_3 : Le facteur d'érosion est donné par le tableau 2.9 page 32

- La vérification de la contrainte équivalente :

$$\sigma_{eq} = \frac{6 \times M_e}{h^2} \times f_1 \times f_2 \times f_3 \times f_4 \leq \sigma_{eq\ tab}$$

$\sigma_{eq\ tab}$: La contrainte équivalente donnée par le tableau 2.9 page 32

$$M_e = \begin{cases} -1600 + 2525 \times \log(l) + 24.42 \times l + 0.204 \times l^2 \text{ pour essieu isolé à roues jumelées} \\ 3029 - 2966.8 \times \log(l) + 133.69 \times l - 0.0632 \times l^2 \text{ pour essieu monté en Tandem} \end{cases}$$

$$f_1 = \begin{cases} \left(\frac{24}{SAL} \right)^{0.06} \times \left(\frac{SAL}{18} \right) \text{ pour essieu isolé à roues jumelées} \\ \left(\frac{48}{TAL} \right)^{0.06} \times \left(\frac{TAL}{36} \right) \text{ pour essieu monté en Tandem} \end{cases}$$

$f_1 = 1.017$ pour les deux types d'essieu(isolé à roues jumelée et monté en Tandem)

$$f_2 = 0.892 + \frac{h}{85.71} - \frac{h^2}{3000}$$

$$f_3 = 0.894$$

$$f_4 = \frac{1}{[1.235 \times (1 - \mu)]} = 0.953$$

$$l = \left(\frac{E \times h^3}{(12 \times (1 - \mu^2)) \times k} \right)^{0.25} = \left(\frac{4 \times 10^6 \times h^3}{(12 \times (1 - 0.15^2)) \times 680} \right)^{0.25} = \frac{44.72}{9.45} (h^3)^{0.25} \text{ Donc } l = 4.73 h^{0.75}$$

- Pour essieux isolés à roues jumelées :

$$M_{eSD} = -1600 + 2525 \times \log(l) + 24.42 \times l + 0.204 \times l^2$$

$$M_{eSD} = -1600 + 2525 \times \log(4.73 \times h^{0.75}) + 24.42 \times 4.73 \times h^{0.75} + 0.204 \times (4.73 \times h^{0.75})^2$$

$$\sigma_{eqSD} = \frac{6 \times M_{eSD}}{h^2} \times f_1 \times f_2 \times f_3 \times f_4 \leq \sigma_{eqSD tab}$$

$$\frac{6 \times (-1600 + 2525 \times \log(4.73 \times h^{0.75}) + 24.42 \times 4.73 \times h^{0.75} + 0.204 \times (4.73 \times h^{0.75})^2)}{h^2} \times 1.017 \times \left(0.892 + \frac{h}{85.71} - \frac{h^2}{3000} \right) \times 0.894 \times$$

$$0.953 \leq \sigma_{eqSD tab}$$

$$\frac{(-1600 + 2525 \times \log(4.73 \times h^{0.75}) + 24.42 \times 4.73 \times h^{0.75} + 0.204 \times (4.73 \times h^{0.75})^2)}{h^2} \times \left(0.892 + \frac{h}{85.71} - \frac{h^2}{3000} \right)$$

$$\leq \frac{\sigma_{eqSD tab}}{6 \times 1.017 \times 0.894 \times 0.953}$$

$$\frac{(-1600 + 2525 \times \log(4.73 \times h^{0.75}) + 24.42 \times 4.73 \times h^{0.75} + 0.204 \times (4.73 \times h^{0.75})^2)}{h^2} \times \left(0.892 + \frac{h}{85.71} - \frac{h^2}{3000} \right) \leq \frac{\sigma_{eqSD tab}}{5.2}$$

- Pour essieux montés en tandem :

$$M_{eTAD} = 3029 - 2966.8 \times \log(l) + 133.69 \times l - 0.0632 \times l^2$$

$$M_{eTAD} = 3029 - 2966.8 \times \log(4.73 \times h^{0.75}) + 133.69 \times 4.73 \times h^{0.75} - 0.0632 \times (4.73 \times h^{0.75})^2$$

$$\sigma_{eqTAD} = \frac{6 \times M_{eTAD}}{h^2} \times f_1 \times f_2 \times f_3 \times f_4 \leq \sigma_{eqTAD tab}$$

$$\frac{6 \times (3029 - 2966.8 \times \log(4.73 \times h^{0.75}) + 133.69 \times 4.73 \times h^{0.75} - 0.0632 \times (4.73 \times h^{0.75})^2)}{h^2} \times 1.017 \times \left(0.892 + \frac{h}{85.71} - \frac{h^2}{3000} \right) \times$$

$$0.894 \times 0.953 \leq \sigma_{eqTAD tab}$$

$$\frac{(3029 - 2966.8 \times \log(4.73 \times h^{0.75}) + 133.69 \times 4.73 \times h^{0.75} - 0.0632 \times (4.73 \times h^{0.75})^2)}{h^2} \times \left(0.892 + \frac{h}{85.71} - \frac{h^2}{3000} \right)$$

$$\leq \frac{\sigma_{eqTAD tab}}{6 \times 1.017 \times 0.894 \times 0.953}$$

$$\frac{(3029 - 2966.8 \times \log(4.73 \times h^{0.75}) + 133.69 \times 4.73 \times h^{0.75} - 0.0632 \times (4.73 \times h^{0.75})^2)}{h^2} \times \left(0.892 + \frac{h}{85.71} - \frac{h^2}{3000} \right) \leq \frac{\sigma_{eqTAD tab}}{5.2}$$

4.3 Résolution du problème d'optimisation par MATHCAD :

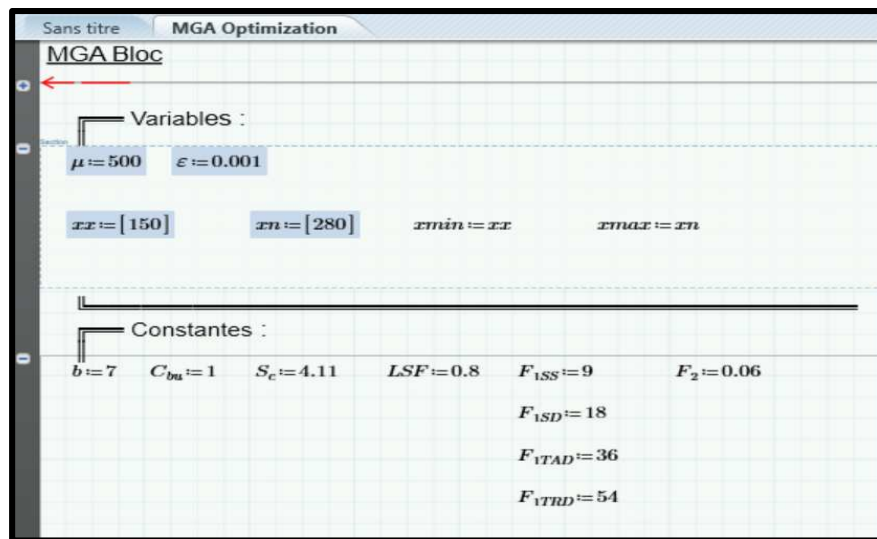
MATHCAD est un logiciel permettant de réaliser des calculs scientifiques. Son interface permet de réaliser des rapports, c'est-à-dire des documents formatés qui mêlent des calculs et des textes nécessaires à la compréhension d'un projet d'ingénierie. MATHCAD prend en charge .NET et le format XML natif.

Avec son interface bloc-notes unique, le logiciel intègre dans une même feuille de calcul les notations, textes et graphiques mathématiques standard. Il contient des fonctions de calcul numérique et de calcul formel.

PTC (Parametric Technology Corporation) a racheté MATHSOFT en avril 2006 ; MATHCAD est aujourd'hui la propriété de PTC.

- **Les étapes suivies dans la résolution par MATHCAD :**

1- *Entrée des données constantes et des Datas :*



```

table1(h) := data ← READEXCEL("..\Données.xlsx", "Feuil1!B4:J17")
for i ∈ 0..rows(data)
    if datai,0 < h < datai+1,0
        σSS ← (datai+1,1 - datai,1) ·  $\left( \frac{h - data_{i,0}}{data_{i+1,0} - data_{i,0}} \right)$  + datai,1
        σSD ← (datai+1,2 - datai,2) ·  $\left( \frac{h - data_{i,0}}{data_{i+1,0} - data_{i,0}} \right)$  + datai,2
        σTAD ← (datai+1,3 - datai,3) ·  $\left( \frac{h - data_{i,0}}{data_{i+1,0} - data_{i,0}} \right)$  + datai,3
        σTRD ← (datai+1,4 - datai,4) ·  $\left( \frac{h - data_{i,0}}{data_{i+1,0} - data_{i,0}} \right)$  + datai,4
        F3SS ← (datai+1,5 - datai,5) ·  $\left( \frac{h - data_{i,0}}{data_{i+1,0} - data_{i,0}} \right)$  + datai,5
        F3SD ← (datai+1,6 - datai,6) ·  $\left( \frac{h - data_{i,0}}{data_{i+1,0} - data_{i,0}} \right)$  + datai,6
        F3TAD ← (datai+1,7 - datai,7) ·  $\left( \frac{h - data_{i,0}}{data_{i+1,0} - data_{i,0}} \right)$  + datai,7
        F3TRD ← (datai+1,8 - datai,8) ·  $\left( \frac{h - data_{i,0}}{data_{i+1,0} - data_{i,0}} \right)$  + datai,8
    break
    
```

```

else if h = datai,0
  σSS ← datai,1
  σSD ← datai,2
  σTAD ← datai,3
  σTRD ← datai,4
  F3SS ← datai,5
  F3SD ← datai,6
  F3TAD ← datai,7
  F3TRD ← datai,8
break
[
σSS
σSD
σTAD
σTRD
F3SS
F3SD
F3TAD
F3TRD
]
    
```

2- Définition des contraintes de problématique :

```

Contraintes :
CG(xx) =
  cgg ← [
    0 ≤ DF ≤ 1
    0 ≤ DR ≤ 1
    hmin ≤ h ≤ hmax
    σeq ≤ σ
  ]
  cgr ← for j ∈ 0..length(xmin)-1
    [
    cgrj ← (xminj < xxj < xmaxj)
    ]
  cgr
  cg ← stack(cgg, cgr)
  s ← 0
  for i ∈ 0..length(cg)-1
    [
    s ← s + cgi
    ]
  if s = length(cg)
    [
    CG ← 1
    ]
  else
    [
    CG ← 0
    ]
  CG
    
```

3- Entrée les fonctions du calcul de l'optimisation :

```

Df(h) :=
dataSS ← READEXCEL(".\Données.xlsx", "Feuil1!N3:O17")
dataSD ← READEXCEL(".\Données.xlsx", "Feuil1!N18:O26")
dataTAD ← READEXCEL(".\Données.xlsx", "Feuil1!N27:O44")
dataTRD ← READEXCEL(".\Données.xlsx", "Feuil1!N45:O68")
[ DfSS
  DfSD
  DfTAD
  DfTRD ] ← [ 0
              0
              0
              0 ]
[ DfSS
  DfSD
  DfTAD
  DfTRD ] ← for i ∈ 0..rows(dataSS) - 1
              table1(h)0 · (dataSSi,0 · LSF)0.94
              SrSS ← Sc · (4.45 · F1SS)
              nSS ← dataSSi,1
              NfSS ← if SrSS > 0.55
                    || 10(0.9718 - SrSS) / 0.0828
                    || else if 0.45 ≤ SrSS ≤ 0.55
                    || (4.2577 / (SrSS - 0.4325))3.268
                    || else
                    || "ND"
              DfSS ← DfSS + if NfSS ≠ "ND"
                    || nSS / NfSS
                    || else
                    || 0
              for i ∈ 0..rows(dataSD) - 1
              table1(h)1 · (dataSDi,0 · LSF)0.94
              SrSD ← Sc · (4.45 · F1SD)
              nSD ← dataSDi,1
              NfSD ← if SrSD > 0.55
                    || 10(0.9718 - SrSD) / 0.0828
                    || else if 0.45 ≤ SrSD ≤ 0.55
                    || (4.2577 / (SrSD - 0.4325))3.268
                    || else
                    || "ND"
              DfSD ← DfSD + if NfSD ≠ "ND"
                    || nSD / NfSD
                    || else
                    || 0
              for i ∈ 0..rows(dataTAD) - 1
              table1(h)2 · (dataTADi,0 · LSF)0.94
              SrTAD ← Sc · (4.45 · F1TAD)
              nTAD ← dataTADi,1
              NfTAD ← if SrTAD > 0.55
                    || 10(0.9718 - SrTAD) / 0.0828
                    || else if 0.45 ≤ SrTAD ≤ 0.55
                    || (4.2577 / (SrTAD - 0.4325))3.268
                    || else
                    || "ND"
              DfTAD ← DfTAD + if NfTAD ≠ "ND"
                    || nTAD / NfTAD
                    || else
                    || 0
              for i ∈ 0..rows(dataTRD) - 1
              table1(h)3 · (dataTRDi,0 · LSF)0.94
              SrTRD ← Sc · (4.45 · F1TRD)
              nTRD ← dataTRDi,1
              NfTRD ← if SrTRD > 0.55
                    || 10(0.9718 - SrTRD) / 0.0828
                    || else if 0.45 ≤ SrTRD ≤ 0.55
                    || (4.2577 / (SrTRD - 0.4325))3.268
                    || else
                    || "ND"
              DfTRD ← DfTRD + if NfTRD ≠ "ND"
                    || nTRD / NfTRD
                    || else
                    || 0
              [ DfSS
                DfSD
                DfTAD
                DfTRD ]
Df ← DfSS + DfSD + DfTAD + DfTRD

```

4- Sortie du résultat h_{opt} obtenu par le MATHCAD :

The screenshot shows a MathCAD worksheet with the following content:

Fonction objectif :

$$f(x) = \begin{cases} h \leftarrow xx_0 \\ \text{if } (CG(x) = 1) \\ \left| \begin{array}{l} f \leftarrow (b + 0.1 \cdot (2 + b)) \cdot C_{ub} \cdot h \\ f \end{array} \right. \end{cases}$$

Résultats :

$$h = MGA(\mu, xx, xn, \varepsilon, f) \quad h = 207$$

Le résultat obtenu par la résolution du problème d'optimisation est $h_{opt} = 207 \text{ mm}$, par la suite on va calculer le coût d'une bande unitaire d'une chaussée rigide d'épaisseur de 207 mm .

4.4 Calcul du Coût optimal d'une bande unitaire d'une chaussée rigide:

La fonction du coût optimal est définie comme suit :

$$C_{T \text{ opt}} = C_{b \text{ opt}} + C_{c \text{ opt}}$$

$$C_{T \text{ opt}} = (b + 0.1(2 + b)) \times C_{bu} \times h_{opt}$$

$$C_{T \text{ opt}} = (7 + 0.1(2 + 7)) \times C_{bu} \times 0.207$$

$$C_{T \text{ opt}} = 1.63 \times C_{bu}$$

$$C_{opt} = \frac{C_{T \text{ opt}}}{C_{bu}} = \frac{1.63}{C_{bu}} \times C_{bu} = 1.63$$

$$C_{opt} = 1.63$$

Pour une valeur de $C_{bu} = 50000 \text{ DA}$ on trouve le $C_{T \text{ opt}} = 1.63 \times C_{bu} = 1.63 \times 50000$

Alors $C_{T \text{ opt}} = 81500 \text{ DA /m}$; on trouve que le coût optimal est inférieur au coût classique.

4.5 Calcul du gain réalisé :

Le gain est obtenu :

$$G = \frac{C_T - C_{T \text{ opt}}}{C_T} \times 100$$

$$G = \frac{[(b+0.1(2+b)) \times h \times C_{bu} - (b+0.1(2+b)) \times h_{opt} \times C_{bu}]}{(b+0.1(2+b)) \times h \times C_{bu}} \times 100$$

$$G = \frac{h - h_{opt}}{h} \times 100$$

$$G = \frac{0.215 - 0.207}{0.215} \times 100$$

$$G = 0.040 \times 100$$

$$G = 4.00\%$$

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le problème d'optimisation est formulé, comme un problème de programmation mathématique non linéaire et le processus d'optimisation est fondé sur l'utilisation et le choix d'un algorithme adéquat pour la résolution d'un système formulé pour le processus d'optimisation des coûts, le coût global des matériaux de construction comprend le coût du béton de la chaussée rigide est le coût du coffrage mobilisé.

Le coût qui représente la fonction objectif est soumis aux contraintes de comportement aux critères de rupture par érosion et rupture par fatigue et la contrainte de l'épaisseur minimale de la dalle. Après la résolution du problème de l'optimisation on a décroché un gain de **4%** qui reste un résultat très intéressant et représente une solution économique qui respecte les contraintes mécaniques et les règles courantes de bonne exécution conformément au PCA.

On estime, que la problématique posé dans ce travail est largement résolue par l'approche adoptée dans ce mémoire.

L'utilisateur (BET, Entreprise,) peut appliquer cette solution (optimale) pour le dimensionnement des chaussées rigides (pistes d'aérodromes, routes,).

Table des Figures:

Figure 1.1	Les différentes couches de chaussée.....	1
Figure 1.2	Classification des chaussées routières.....	2
Figure 1.3	Les différentes couches de la chaussée souple.....	3
Figure 1.4	Les différentes couches de la chaussée semi-rigide.....	3
Figure 1.5	Les différentes couches de la chaussée rigide.....	4
Figure 1.6	Les fissures des chaussées rigides.....	11
Figure 1.7	Les cassures d'angle dans les chaussées rigides.....	12
Figure 1.8	Les fractures dans les chaussées rigides.....	13
Figure 1.9	Pompage dans les chaussées rigides.....	14
Figure 1.10	L'épaufre dans les chaussées rigides.....	16
Figure 1.11	Le faïençage et l'écaillage dans les chaussées rigides.....	17
Figure 1.12	Le dépôt de gomme.....	17
Figure 2.1	L'Organigramme pour le dimensionnement de la chaussée rigide par la Méthode PCA (Portland Ciment Association)	24
Figure 2.2	Graphe d'analyse de la fatigue PCA (PCA (Portland Ciment Association), 1984)	25
Figure 2.3	Graphe pour déterminer charge répétition admissible par Érosion (Portland Ciment Association)	26
Figure 2.4	Chaussée en béton jointée sans accotements.....	34

Yeniay O., A comparative study on optimization methods for the constrained nonlinear programming problems, *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2, pp. 165 – 173, 2005.

Yokota T, Wada S, Taguchi T, Gen M., Ga-based method for a single reinforced concrete beam optimal T cross-section design problem using the ultimate strength., In : *Proceedings of the Fifth Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems APIMS*, 2004.