

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Blida 1



FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GENIE MÉCANIQUE

MEMOIRE

Pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Conception Mécanique

Par : Amani Abdelkader

Sujet

Modèles de chaussée routière

Promoteur : Pr A.Aiad

Année universitaire
2016-2017

Remerciements :

Je voudrais adresser tous mes remerciements aux personnes avec lesquelles j'ai pu échanger et qui m'ont aidé pour la rédaction de ce mémoire.

Je commence par remercier tout d'abord Monsieur **Aiad Abdelkrim**, encadreur de ce mémoire, pour son aide précieuse et pour le temps qu'il m'a consacré.

Je voudrais remercier aussi toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à mes recherches et à l'élaboration de ce mémoire.

RESUME

L'interaction entre les pneumatiques du véhicule et la chaussée représente une contribution importante dans la génération du bruit routier. La compréhension et le contrôle de ce phénomène nécessite le développement et l'amélioration des modélisations afin d'établir des relations quantitatives entre les caractéristiques de la chaussée et du pneumatique. L'influence des caractéristiques de la chaussée en termes de texture, rigidité et autres, est considérable et montre que la chaussée joue un rôle essentiel dans le problème de rayonnement en plus de sa participation comme identificateur de l'excitation. En effet la chaussée est en permanence soumise à des sollicitations mécaniques et thermiques combinées avec des phénomènes chimiques. Ces diverses sollicitations vont participer plus ou moins rapidement aux dégradations couramment observées, en particulier les dégradations des revêtements.

Aussi, un intérêt particulier est donné à l'étude de ce paramètre de par sa structure, ses caractéristiques et son dimensionnement. Dans ce cadre, une étude est menée dans laquelle on définit la chaussée de par sa structure et son comportement et des modèles sont présentés.

ABSTRACT

The interaction between the tires of the vehicle and the pavement represents an important contribution in the generation of road noise. Understanding and controlling this phenomenon requires the development and improvement of modeling in order to establish quantitative relationships between the characteristics of the pavement and the tire. The influence of pavement characteristics in terms of texture, stiffness and others is considerable and shows that the pavement plays an essential role in the radiation problem in addition to its participation as an identifier of the excitation. Indeed the roadway is permanently subjected to mechanical and thermal stresses combined with chemical phenomena. These various stresses will participate more or less rapidly in the degradations commonly observed, in particular the degradations of the coatings.

Also, a special interest is given to the study of this parameter because of its structure, its characteristics and its dimensioning. A study is carried out in which the pavement is defined by its structure and behavior and models are presented.

Abréviations et symboles

Symboles

significations

N	trafic cumulé
C	facteur de cumul
PATC	poids total autorisé en charge
t	étant le trafic poids lourds moyen journalier annuel
MJA	l'année de mise en service
C	est le facteur de cumul
T_{pl}	trafic poids lourds à l'année de mise en service
T	Taux d'accroissement annuel
PL/J	le trafic moyen journalier des poids lourds
C.U	charge utile
GB	grave bitume.
M.T.L.H	matériaux traités aux liants hydrauliques.
M.N.T.L.H	matériaux non traités aux liants hydrauliques.
G.N.T	grave non trait.
D.B.C	dalle en béton de ciment.
D.B.A.C	dalle en béton armé continu.
B.M	béton maigre.
P.F.S	plate forme support.
BBTM	Béton Bitumineux Très Mince
ES	Enduit Superficiel
BCMC	béton de ciment mince collé
TMJA	trafic l'année de mise en service
w_t	déformation totale
w_r	déformation résiduelle
m	représente le facteur de mobilisation de capacité portante,
N_c	facteur de capacité portante
C_u	cohésion non drainée.

Liste des figures

Figure 1.1: schéma de principe illustrant les agressivités respectives -vis-à-vis de chaussée –d’un poids lourd.....	5
Figure 1.2 : Classification du trafic selon le « SETRA ».....	7
Figure 1.3 : Véhicules légers	8
Figure 1.4: véhicule utilitaire.....	9
Figure 1.5: Poids lourds et autocars à 2 essieux.....	9
Figure 1.6 : poids lourd à 3 essieux.....	9
Figure 1.7 : Constitution d’une structure de chaussée.....	11
Figure 1.8 : Les chaussées souples.....	12
Figure 1.9 : chaussées semi –rigides.....	12
Figure 1.10 : chaussées rigides.....	13
Figure 2.1 : Schématisation de l’interaction pneumatique-chaussée.....	16
Figure 2.2 : Contact de Hertz pour deux sphères	19
Figure. 2.3 : Schéma du principe illustrant la déflexion d'un sol sous l'effet d'une charge....	21
Figure 3.1 : Constitution d’une structure de chaussée.....	23
Figure 3.2 : Les chaussées souples.....	24
Figure 3.3 : Les différentes couches d'une chaussée souple.....	25
Figure 3.4 : Chaussée rigide	27
Figure 3.5 : Chaussée semi–rigide.....	27
Figure 3.6: Les chaussées bitumineuses épaisses.....	28
Figure 3.7 : Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques.....	28

Figure 3.8 : Les chaussées à structure mixte.....	29
Figure 3.9 : Les chaussées à structure inverse.....	29
Figure 3.10 : Les chaussées en béton de ciment.....	30
Figure 3.11 : Béton armé continu.....	30
Figure 3.12 : Dalles en béton de ciment mince collé.....	31
Figure 3.13 : Schéma de fonctionnement pour une méthode incrémentale de dimensionnement.....	32
Figure 4.1 : Exemple d'un modèle de comportement d'une dégradation.....	37
Figure 4.2 : Exemple d'évolution d'une dégradation	38
Figure 4.3 : Types de modèle de comportement.....	39
Figure 4.4 : manèges de fatigues de l'EPFL et de l'EPFZ.....	40
Figure 4.5 : Représentation type d'une méthode photo.....	42
Figure 4.6 : Descriptif de la méthode photo.....	43
Figure 4.7 : Représentation type d'une méthode vidéo.....	45
Figure 4.8 : Descriptif de la méthode vidéo.....	46
Figure 4.9 : Schéma du modèle de Boussinesq.....	48
Figure 4.10 : Schéma du modèle de Westergaard.....	49
Figure 4.11 : Schéma du modèle de Hogg.....	50
Figure 4.12 : Schéma du modèle de Burmister.....	51
Figure 4.13 : Schéma du modèle de Jeuffroy.....	52
Figure 4.14 : Mécanisme de Rupture.....	53
Figure 4.15 : Paramètres influençant l'apparition et l'évolution des dégradations	55

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Déterminant la classe du trafic

Tableau 2.1 : Les mécanismes de génération et de propagation

Tableau 3.1 : Les valeurs des coefficients d'équivalence

Table de matières :

Remerciements.....	I
Résumé.....	II
Abréviations et symboles.....	III
Liste des figures.....	IV
Liste des tableaux.....	VI
Table de matières.....	VIII
Introduction générale	1

Chapitre 1 : Généralités sur les chaussée et le trafic routier

1. introduction	4
2. Le trafic.....	4
2.1. Détermination de la classe de trafic	6
2.2. Les différentes classes de trafic.....	6
2.3. La voirie à faible trafic.....	7
3. Classification des véhicules.....	8
4. Les structures de chaussées.....	10
4.1. Constitution d'une structure de chaussée	10
4.2. Les différents types de chaussée	12

4.2.1. Les chaussées souples.....	12
4.2.2. Les chaussées semi -rigides.....	13
4.2.3. Les chaussées rigides.....	13
4.3. Caractéristiques de chaussée.....	14
5. L'interaction entre les véhicules et la chaussée.....	15
6. Trafic urbain.....	15

Chapitre 2 : Interaction véhicule -chaussée

1-Introduction.....	18
2-Problématique du contact pneumatique- chaussée.....	19
2.1. présentation.....	19
2.2. Les mécanismes de génération et de propagation.....	19
3-Théorie de contact.....	21
4-Modélisation du contact pneumatique –chaussée.....	22
4.1 Modélisation du pneumatique.....	22
4.2 Modélisation de la chaussée.....	23
5. Action d'un véhicule sur un sol	24
6. Conclusion.....	25

Chapitre 3 : Structure d'une chaussée routière

1. Introduction.....	27
2. Les différents types de structures de chaussées.....	28
2-1.Les chaussées souples.....	28
2-1-1. Les différentes couches d'une chaussée souple.....	29
2.1.2. Matériaux constitutifs des chaussées souples.....	30
2.2. Chaussée rigide	31
2.3. Chaussée semi-rigide	32
3. Les différents types de chaussées selon la couche de roulement.....	33
3.1. Les chaussées bitumineuses épaisses.....	33
3.2. Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques.....	33
3.3. Les chaussées à structure mixte.....	34
3.4. Les chaussées à structure inverse.....	35
3-5.Les chaussées en béton de ciment.....	35
4. dimensionnement de chaussée	36
4.1. Critères de dimensionnement.....	36
4.2. Les différents types de méthodes de dimensionnement.....	37
4.2.1. Méthode mécanique empirique	38
4.2.2. Méthode semi empirique	39

5. durée de vie de chaussée	41
6. Traitement des chaussées.....	41

Chapitre 4 : modèle de chaussée routières

1. introduction.....	44
2- modèle de comportement.....	44
3-modèles empiriques	46
3.1-établissement de modèles empiriques	47
4- Modèles analytiques-empiriques	54
5- Modèles analytiques	54
5.1 Modèle de boussinesq.....	55
5.2 Modèle de westergaard.....	56
5.3. Modèle de hogg	57
5.4 Modèle de burmister	58
5.5 Modèle de jeuffroy	59
6 commentaires	59
Conclusion générale	61

Introduction générale :

Les chaussées routières sont en permanence soumises à des sollicitations mécaniques et thermiques combinées avec des phénomènes chimiques (vieillissement des matériaux). Ces diverses sollicitations vont participer plus ou moins rapidement aux dégradations couramment observées des superstructures routières, en particulier les dégradations des revêtements, notamment les déformations de surface (planéité longitudinale et transversale), les fissurations (fissures isolées et/ou multiples) et les dégradations de surface [10].

On appelle chaussée toute surface spécialement aménagée, sur le sol ou sur un ouvrage, pour le stationnement ou la circulation des personnes et de véhicules.

Les chaussées doivent résister à des efforts élevés et répétés, elles ont donc pour objet de permettre la circulation permanente et sans autre intervention qu'un simple entretien de sa surface, et d'offrir aux véhicules des surfaces unies peu sonores, confortables et sûres. En général, les chaussées sont constituées par des empilements d'une ou plusieurs couches de matériaux.

De par ses dimensions, la variété des matériaux qui la composent, l'aspect aléatoire des sollicitations qu'elle reçoit, une chaussée est un ouvrage très complexe. Il faut signaler que les chaussées ne sont pas des ouvrages qui se calculent avec la rigueur sans cesse accrue qu'on rencontre dans les études de structure usuelles.

Les sols sont des systèmes complexes, dont le comportement sous les charges fait intervenir, soit des modifications de structure par mouvement d'eau, par arrangement du squelette minéral. La durée et la vitesse d'application des charges jouent aussi un rôle important en modifiant sensiblement les caractéristiques mécaniques et il est difficile de se placer en laboratoire dans des conditions identiques à celles dans lesquelles le sol ramoné sera placé lorsque la chaussée sera construite.

L'objet de ce travail, qui s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche, est de faire une étude assez détaillée de la chaussée par une synthèse des travaux et des modèles proposés dans ce domaine, pour servir de plateforme à d'autres études et modélisations plus élaborées. Aussi, le mémoire se divise en 4 chapitres :

Le premier chapitre est consacré à des généralités sur les chaussées et le trafic routier.

Dans le deuxième chapitre, on donne des notions sur l'interaction entre le véhicule et la chaussée et ses conséquences environnementales en mettant un accent sur le rôle de la chaussée.

Le troisième chapitre est destiné à la structure d'une chaussée routière de par son dimensionnement et les matériaux qui la composent.

Dans le quatrième chapitre, des modèles de chaussée, empiriques et analytiques, sont étudiés et discutés.

Le mémoire se termine par une conclusion générale et une synthèse.

Chapitre 1 :
Généralités sur les chaussées
et le trafic routier

1. Introduction :

Les spécialistes du monde routier, des travaux publics, et les constructeurs automobiles s'intéressent depuis longtemps aux aspérités présentes sur les chaussées. Ces défauts de la route par rapport à une surface idéalement plane constituent ce que l'on appelle son uni ou son profil.

Une chaussée est une structure multicouche constituée de trois parties principales qui ont chacune un rôle bien défini

Les types de chaussée sont classés selon leurs constitution, où chaque type à des propriétés et des caractéristiques spécifiques.

Le trafic constitue un élément essentiel du dimensionnement des chaussées.

Le poids des véhicule est transmis à la chaussé, sous forme de pression, par l'intermédiaire des pneumatiques qui provoque des dégradations sur la couche supérieur de la route avec le temps

2. Le trafic

Le trafic de dimensionnement est essentiellement le poids lourds (véhicules supérieur a 3.5tonnes) .il intervient comme paramètre d'entrée dans le dimensionnement des structures de chaussées et le choix des caractéristiques intrinsèques des matériaux pour la fabrication des matériaux de chaussée

Il est apparu nécessaire de caractériser le trafic à partir de deux paramètres :

De trafic poids lourds « T » à la mise en service, résultat d'une étude de trafic et de comptages sur les voies existantes :

De trafic cumulé sur la période considérée qui est donnée par [1]:

$$N = T.A.C \quad (1.1)$$

Avec : N : trafic cumulé.

A : facteur d'agressivité globale du trafic.

C : facteur de cumul

$$C = [(1 + \tau)^p - 1] / \tau \quad (1.2)$$

Avec : τ : Taux de croissance du trafic.

p : nombre d'années de service (durée de vie) de la chaussée.

Le trafic constitue un élément essentiel du dimensionnement des chaussées.

Le poids des véhicules est transmis à la chaussée, sous forme de pressions, par l'intermédiaire des pneumatiques. Pour une automobile, cette pression est de l'ordre de 0,2 MPa. Dans le cas d'un camion elle est de l'ordre de 0,66 MPa.

Le trafic pris en compte est le nombre de poids lourds circulant sur la voie la plus chargée, cumulé sur la durée de service prévue lors du dimensionnement de la chaussée. La définition du poids lourd est la suivante: « véhicule de plus de 3,5 tonnes de poids total autorisé en charge (PTAC) ». [2]

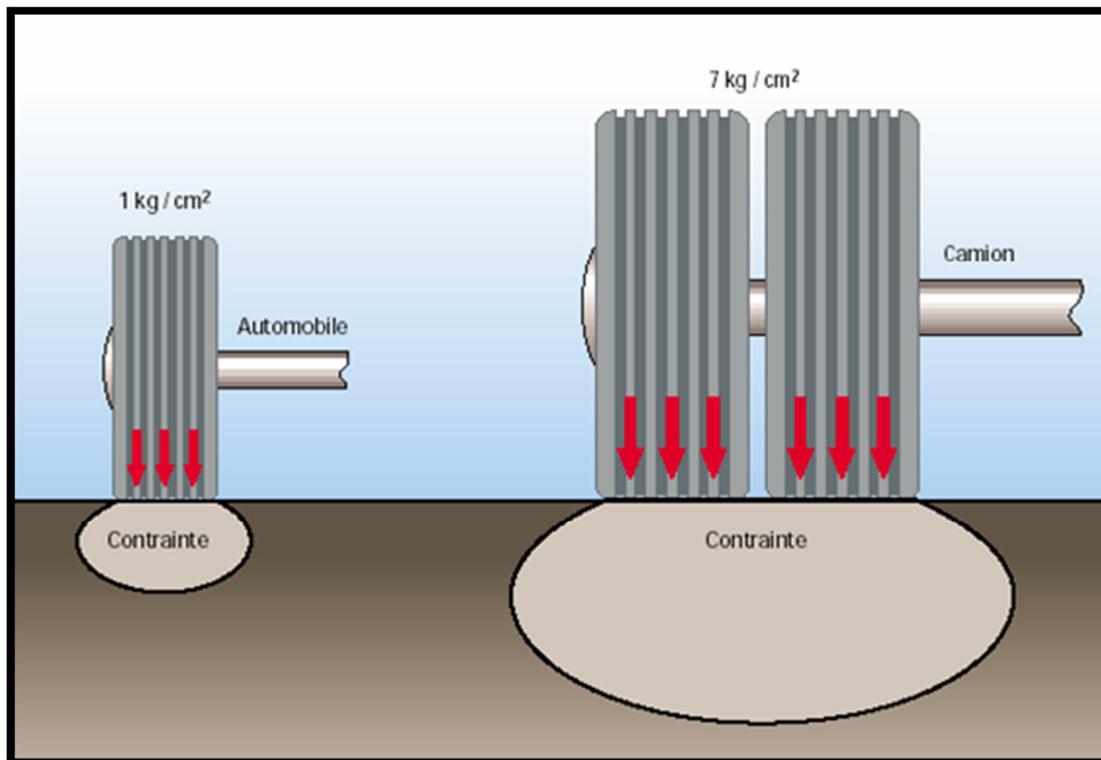


Figure 1.1: Schéma de principe illustrant les agressivités respectives vis-à-vis de chaussée d'un poids lourd [1]

2.1. Détermination de la classe de trafic

<i>Classe de trafic</i>	<i>Trafic poids lourds cumule sur 20 ans</i>
T_1	$T < 7.3 \cdot 10^5$
T_2	$7.3 \cdot 10^5 < T < 2 \cdot 10^6$
T_3	$2 \cdot 10^6 < T < 7.3 \cdot 10^6$
T_4	$7.3 \cdot 10^6 < T < 4 \cdot 10^7$
T_5	$T > 4 \cdot 10^7$

Tableau 1.1 : Déterminant la classe du trafic

Le trafic cumulé est donné par la formule suivante [2]:

$$T_c = T_{pl} \left[1 + \frac{(1 + \tau)^{n+1} - 1}{\tau} \right] \times 365 \quad (1.3)$$

Avec :

T_{pl} : trafic poids lourds à l'année de mise en service.

τ : taux d'accroissement annuel

2.2. Les différentes classes de trafic

Les classes de trafic sont définies par le trafic moyen journalier des Poids Lourds (Charge utile supérieure à 5 T) qui circulent sur la chaussée [1].

On obtient ainsi :

- Classe t6 : de 0 à 10 PL/j
- Classe t5 : de 10 à 25 PL/j
- Classe t4 : de 25 à 50 PL/j
- Classe t3- : de 50 à 100 PL/j
- Classe t3+ : de 100 à 150 PL/j
- Classe T3 : de 50 à 150 PL/j
- Classe T2 : de 150 à 300 PL/j
- Classe T1 : de 300 à 750 PL/j
- Classe T0 : de 750 à 2 000 PL/j

Ces classes de trafic définissent deux grandes catégories de routes

- les voiries à faible trafic regroupant toutes les classes de t6 à t3+,
- les voiries à moyen et fort trafics regroupant toutes les classes de T3 à T0. [2]

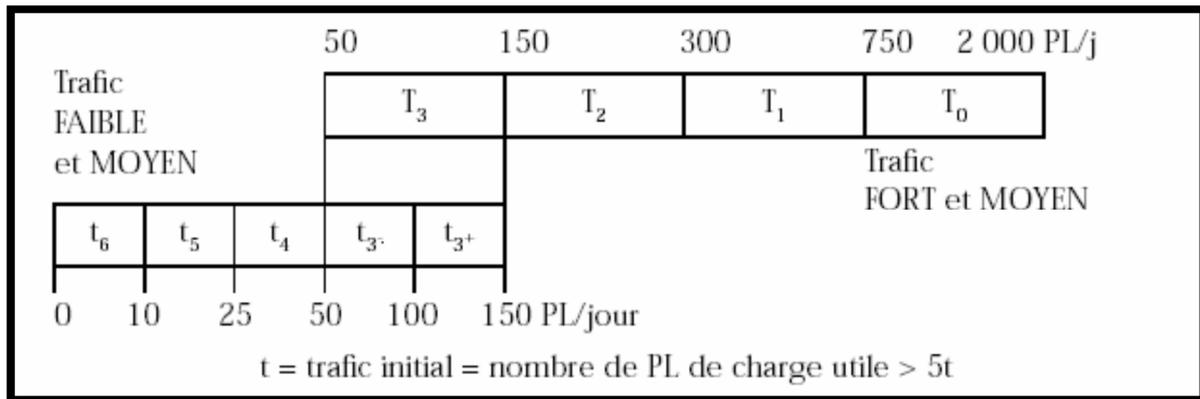


Figure 1.2 : Classification du trafic selon le ((SETRA))

2.3. La voirie à faible trafic

Une voirie est dite à faible trafic lorsque le nombre de véhicules qui y circulent est inférieur à l'équivalent de 150 poids lourds par jour, soit environ 1 500 véhicules par jour, tous modèles confondus [1].

Cette appellation recouvre un très grand nombre de routes.

On distingue :

- Les routes départementales,
- Les routes communales,
- Les voiries agricoles,
- Les voiries forestières,
- Les voiries viticoles,
- Les voiries de lotissement,
- Les aires de trafic industrielles,
- Les aires de stationnement,
- etc.

3. Classification des véhicules

Les automobiles peuvent être classées selon divers critères : la taille, le poids, le type d'usage, la forme de leur carrosserie, la motorisation, le type de transmission, leur niveau d'équipement, leur niveau de personnalisation ou de transformation. Évidemment, chaque modèle d'automobile possède une appellation commerciale particulière pour le distinguer des autres.

Dans le domaine du trafic routier, les spécialistes s'intéressent beaucoup plus pour les trois critères suivants :

- - la hauteur totale du véhicule ou de l'ensemble roulant
- - le nombre d'essieux au sol du véhicule ou de l'ensemble roulant
- Et le plus important :

Le poids total autorisé en charge (PTAC) (pour les ensembles roulants seul le PTAC du véhicule tracteur est pris en compte)

On distingue [2] :

- **Véhicules légers**

Véhicules légers ou ensembles roulants dont le PTAC est inférieur ou égal à 3,5 tonnes et d'une hauteur totale inférieure ou égale à 2 mètres

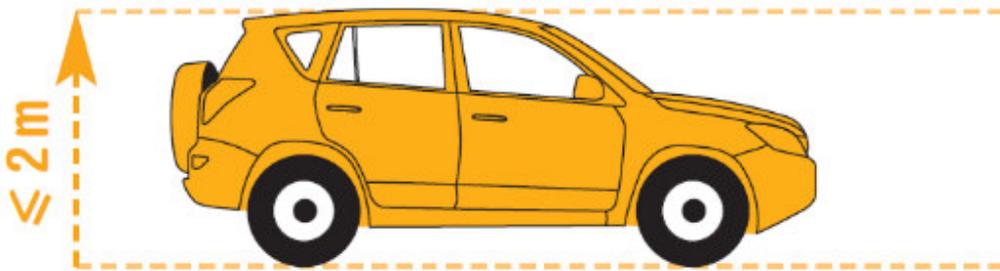


Figure 1.3: Véhicules légers

- **Véhicules intermédiaires**

Véhicules ou ensembles roulants dont le PTAC est inférieur ou égal à 3,5 tonnes et dont la hauteur totale est strictement comprise entre 2 et 3 m



Figure 1.4: véhicule utilitaire

- **Véhicules Poids lourd:**

Les véhicules de poids lourd sont aussi divisés en deux catégories:

- **Poids lourds et autocars à 2 essieux**

- Véhicules à 2 essieux, dont la hauteur totale est supérieure ou égale à 3 mètres ou dont le PTAC est supérieur à 3,5 tonnes.

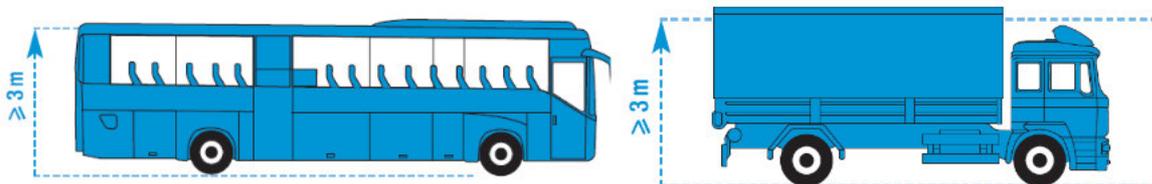


Figure 1.5: Poids lourds et autocars à 2 essieux

- **Poids lourds et autocars à 3 essieux et plus**

- Véhicule ou ensembles de véhicules à plus de 2 essieux, dont la hauteur totale est supérieure ou égale à 3 mètres ou dont le PTAC est supérieur à 3,5 tonnes.

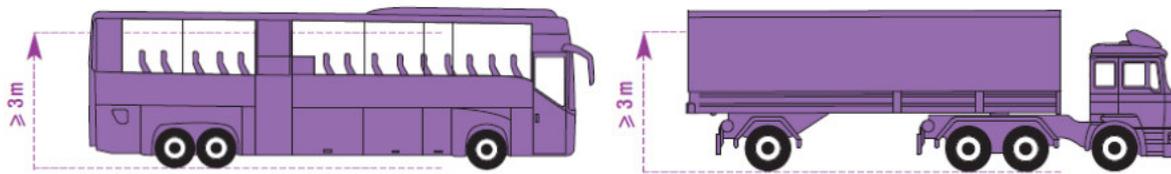


Figure 1.6 : poids lourd à 3 essieux

4. Les structures de chaussées

Les spécialistes du monde routier, des travaux publics, et les constructeurs automobiles s'intéressent depuis longtemps aux aspérités présentes sur les chaussées. Ces défauts de la route par rapport à une surface idéalement plane constituent ce que l'on appelle son uni ou son profil. La géométrie, les irrégularités et les déformations du sol modifient constamment la répartition des forces du contact roues/sol, les positions du véhicule et les orientations des roues. Par conséquent, le profil est considéré comme une entrée essentielle qui affecte d'une manière significative la réponse dynamique du véhicule [7].

La connaissance du profil de chaussée, représenté par un signal non stationnaire, est indispensable surtout pour :

- l'analyse de la qualité de la route pour déduire les conséquences sur le confort des passagers,
- l'optimisation des suspensions,
- l'amélioration de la sécurité et la maniabilité du véhicule,
- une meilleure compréhension de la dynamique du véhicule.

4.1. Constitution d'une structure de chaussée :

Une chaussée est une structure multicouche constituée de trois parties principales qui ont chacune un rôle bien défini.

Tout d'abord le sol terrassé ou sol-support est surmonté généralement d'une couche de forme. L'ensemble sol-couche de forme représente la plate-forme support de la chaussée. La couche de forme a une double fonction. Pendant les travaux, elle assure la protection du sol-support, permet la qualité du nivellement ainsi que la circulation des engins. En service, elle permet

4.2. Les différents types de Chaussée :

Il existe trois types de chaussée:

- Chaussée souple.
- Chaussée semi - rigide.
- Chaussée rigide.

4.2.1 Les chaussées souples :

Les chaussées traditionnelles constituent l'immense majorité des route actuelles. Elles sont composées en couche de base et en couche de fondation de graves roulées ou concassées stabilisées mécaniquement :

« hériçon » ou tout-venant d'oued en fondation, macadam ou tout-venant concassé en couche de base, la couche de roulement a généralement reçu une imprégnation au liant hydrocarboné, elles sont revêtues d'un enduit superficiel monocouche ou bicouche, elles sont exceptionnellement revêtues d'un enrobé à chaud (béton bitumineux) et couramment , pour les route de sud ,d'un enrobé à froid .[10]

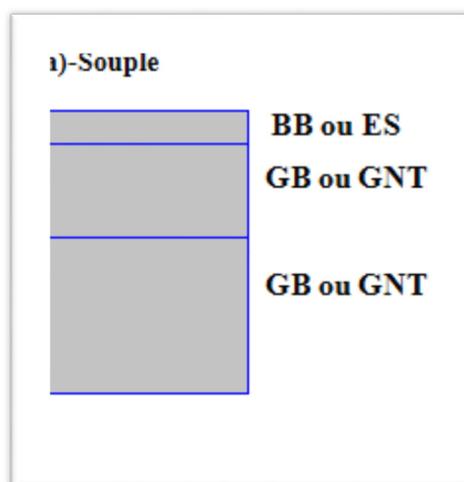


Figure 1.8 : Les chaussées souples

Certaines chaussées traditionnelles, dans les zones de climat semi-aride, sont constituées en couche de basset/ou en couche de fondation d'encroûtements calcaires (tufs), elles sont revêtues d'un enduit superficiel.

4.2.2 Les chaussées semi –rigides :

On distingue [10] :

- Les chaussées comportant une couche de base (et quelque fois une couche de fondation) traitée au liant hydraulique (ciment, laitier granulé...)

La couche de roulement est en enrobé hydrocarboné et repose quelquefois par l'intermédiaire d'une couche de liaison également en enrobé hydrocarboné sur la couche de base traitée dont l'épaisseur strictement minimale doit être de 15 cm,

- Les chaussées comportant une couche de base et/ou une couche de fondation en sable gypseux, on les rencontre fréquemment dans les zones arides.

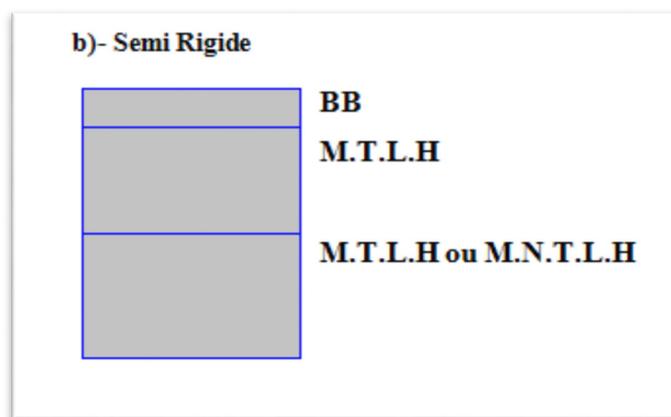


Figure 1.9 : chaussées semi –rigides

4.2.3 Les chaussées rigides :

Elles sont constituées d'une dalle de béton de ciment, éventuellement armée (correspondant à la couche de surface de chaussée souple) reposant sur une couche de fondation qui peut être une grave stabilisé mécaniquement, une grave traitée aux liants hydrocarbonés ou aux liants hydrauliques. [10]

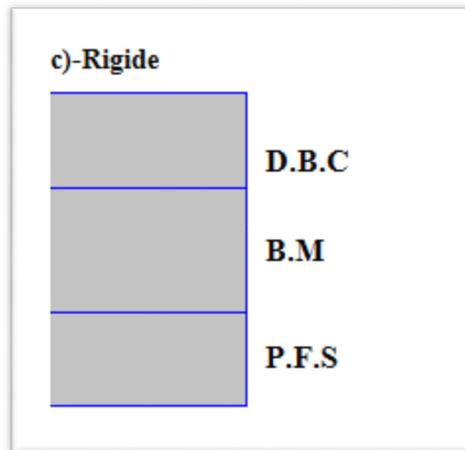


Figure I.10 : chaussées rigides

4.3.Caractéristiques de chaussée

-Qualités requises pour la construction routière:

Ne sont prises en compte et contrôlées que les caractéristiques intrinsèques qui intéressent la

-Construction Routière

Exemple: Nature Pétrographique

-Résistance aux chocs dus au passage de l'essieu

-Résistance à l'attrition

Attrition = usure relative des grains qui bougent et frottent les uns par rapport aux autres

Le phénomène d'attrition est amplifié par la présence d'eau ⇒ Imperméabilisation des chaussées en surface

-Bon contact avec le pneu

Objectif : éviter le phénomène d'Aquaplaning

-Adhérence

Macro texture: Création en couche de surface d'aspérités en forme de canaux qui permettent l'évacuation des eaux

Micro texture: Utilisation de la rugosité Intrinsèques du granulat. ♂ Attention à l'usure trop rapide des gravillons en surface = polissage

-Nature minéralogique: Important pour les bétons: teneur en sulfates, sulfures et chlorures (fissuration et corrosion des armatures)

Présence de matière organique

5. Interaction entre les véhicules et la chaussée

Les vibrations induites par le trafic routier sont principalement générées par les véhicules lourds comme les autobus et les camions. L'influence de ces vibrations sur les autres véhicules est considérée négligeable devant les vibrations induites par le profil de la chaussée [17].

Les charges verticales à l'essieu du véhicule sont constituées d'une composante statique et d'une composante dynamique.

La composante statique résulte de la distribution de la masse du véhicule, en revanche, la composante dynamique est induite par l'irrégularité de la chaussée qui soumet le véhicule à des oscillations verticales et qui dépend du profil de la route, des caractéristiques du véhicule et de la vitesse du véhicule.

L'irrégularité de la chaussée représente la source principale des vibrations des véhicules, il existe de nombreux types d'irrégularité tels que les anciens revêtements en béton dont les dalles forment des marches d'escalier aux joints, les irrégularités de surface, ainsi que les dispositifs surélevés tels que les ralentisseurs et les plateaux.

6. Trafic urbain

Le trafic routier est un phénomène complexe d'une part en raison du nombre élevé d'acteurs qui y participent, d'autre part à cause du caractère très maillé du réseau sur lequel il se déroule. Le phénomène le plus marquant dans le trafic routier est la congestion qui alimente de nombreuses discussions d'usagers. Depuis une cinquantaine d'années, cependant, des théoriciens du trafic cherchent à comprendre et quantifier les mécanismes à l'œuvre.

Pour comprendre la congestion, il faut garder présent à l'esprit que c'est un phénomène qui survient lorsque la demande (le nombre de véhicules qui cherchent à utiliser une infrastructure donnée) est supérieure à la capacité de cette infrastructure. Si la demande excède la capacité, alors des véhicules seront ralentis à l'entrée de l'infrastructure, formant ainsi un bouchon. Ces véhicules excédentaires seront à chaque instant plus nombreux qu'à l'instant précédent. Comme

chaque véhicule occupe une certaine longueur de voie, la longueur de la file d'attente ne fera que croître en proportion du nombre de véhicules présents dans cette file d'attente.

Chapitre 2 :

Interaction véhicule-chaussée

1. Introduction

L'interaction entre les pneumatiques du véhicule et la chaussée représente la contribution majeure dans la génération du bruit routier et il a été constaté qu'au-delà d'une certaine vitesse, le niveau de bruit s'élève considérablement [13].

La compréhension et le contrôle de ce phénomène implique aujourd'hui le développement et l'amélioration des modélisations afin d'établir des relations quantitatives entre les caractéristiques de la chaussée et du pneumatique d'une part et le niveau de bruit mesuré au passage d'autre part [14].

La part respective des différents mécanismes donnant naissance au bruit de roulement est mal connue en raison de la difficulté d'isoler ces mécanismes les uns des autres. Ces mécanismes sont nombreux et peuvent être classés en deux grandes familles : vibratoire et acoustique. L'influence des caractéristiques de la chaussée en termes de texture, rigidité et autres, est considérable et montre que la chaussée joue un rôle essentiel dans le problème de rayonnement en plus de sa participation comme identificateur de l'excitation.

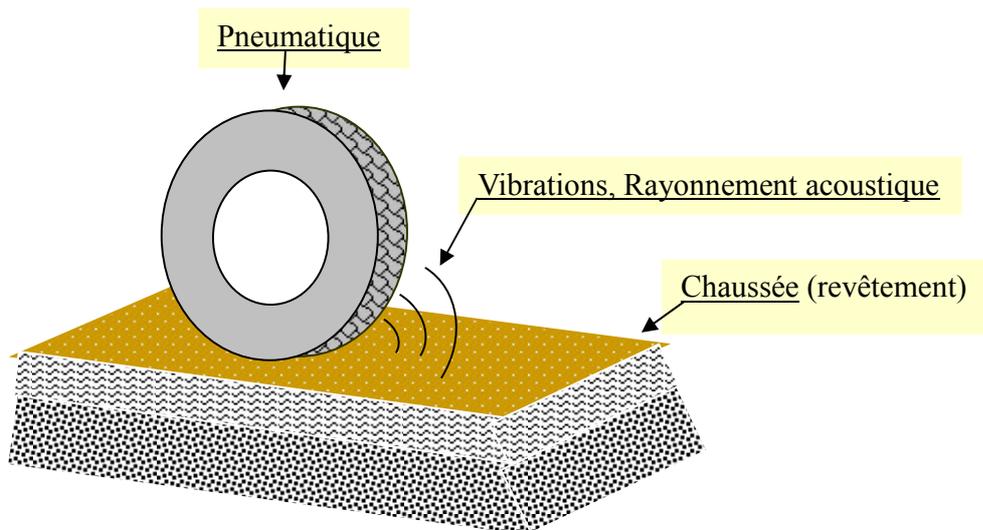


Figure 2.1 : Schématisation de l'interaction pneumatique-chaussée

2. Problématique du contact pneumatique- chaussée

2.1. Présentation

Traditionnellement les constructeurs d'automobiles et de pneumatiques étaient préoccupés essentiellement par le bruit intérieur des véhicules. Depuis quelques années, le bruit externe et notamment le bruit de roulement a attiré l'attention des pouvoirs publics, des industriels et des scientifiques surtout avec l'augmentation du nombre de véhicules et les exigences de plus en plus sévères en matière de confort et d'environnement. Il a été prouvé que la source majeure qui contribue le plus à la génération du bruit de roulement est attribuée à l'interaction entre les pneus et la surface de la chaussée et qu'au-delà d'une vitesse de 50 km/h, le bruit de roulement devient plus important que les autres bruits générés par les véhicules. De plus, son niveau augmente approximativement avec le carré de la vitesse. Globalement, deux grandes familles de phénomènes contribuent à l'émission et à l'amplification du bruit de roulement : des phénomènes mécaniques ou vibratoires et des phénomènes acoustiques]. L'interaction entre les vibrations des pneumatiques et la chaussée avec ses différents revêtements complique d'avantage la situation d'où la nécessité de porter un intérêt particulier à ce problème [13].

2.2. Les mécanismes de génération et de propagation

La recherche sur les mécanismes de génération et de propagation du bruit de roulement a commencé durant les années 70 du siècle dernier. Ces mécanismes sont d'origine vibratoire (excitation et rayonnement du pneumatique principalement sous l'effet de la rugosité de la chaussée) et acoustique (résonance d'air ou « air-pumping » et phénomènes de propagation locaux). Parmi les agents impliqués dans les vibrations du pneumatique on cite entre autres :

- le bloc moteur et ses accessoires
- la boîte de vitesse et la transmission

- les ventilateurs et radiateurs

- les bouches d'admission et d'échappement ainsi que le système d'échappement.

-Les phénomènes vibratoires se produisent à basses fréquences (inférieures à 1 kHz) alors que les phénomènes acoustiques ont lieu à hautes fréquences (supérieures à 1 kHz).

-Il est à souligner que le bruit de contact pneumatique-chaussée est influencé également par d'autres paramètres aussi bien d'utilisation (vitesse et poids du véhicules, conditions météorologiques) que de conception (pneumatiques, revêtement de la chaussée).

-Une description des différents mécanismes est donnée dans le (tableau 2.1) [13].

Mécanismes de génération	Vibrations radiales	<ul style="list-style-type: none"> • Impact des rainures de la bande de roulement de pneu sur les aspérités de la chaussée. • Impact de texture de la chaussée sur la bande de roulement du pneu
	Résonance d'air	<ul style="list-style-type: none"> • Résonance de Pipe • Résonance de Helmholtz • Air-pumping de poche.
	Mécanismes d'adhésion	<ul style="list-style-type: none"> • Mouvements de collement / glissement causant des vibrations tangentielles de pneu • Mouvements de collement / décollement (effet d'adhésion)
Mécanismes d'amplification ou de réduction	L'effet dièdre	<ul style="list-style-type: none"> • Amplification du bruit dans le dièdre formé par la partie courbée de la bande de roulement et la surface de la chaussée
	L'impédance acoustique	<ul style="list-style-type: none"> • Les vides dans les surfaces poreuses agissent comme des matériaux absorbent de bruit. • Affectant aussi la propagation du son au champ loïn.
	L'impédance mécanique	<ul style="list-style-type: none"> • rigidité du contact dynamique influe plus ou moins l'impact de la texture de la chaussée sur les patins de gomme • Les vibrations de pneu peuvent être transférées par l'impact de ses patins sur la chaussée, qui rayonnera par la suite du bruit.

Tableau 2.1 : Les mécanismes de génération et de propagation

3. Théorie de contact

Le problème de contact tel qu'il est considéré aujourd'hui découle de celui introduit par Hertz au 19^{ème} siècle pour l'évaluation des tensions de contact de 2 solides élastiques . La théorie de Hertz stipule que lorsque deux solides non conformes sont mis en contact sous charge ils se touchent dans un premier temps en un point O puis sur une surface finie (de rayon a), petite face aux dimensions des deux solides (figure 2.2). Cette surface augmente à mesure que la charge augmente. Pour exprimer la force de contact en fonction de l'interpénétration, les hypothèses suivantes sont adoptées [15] :

- le secteur de contact est elliptique,
- la surface est continue et non conforme : $a \ll R$
- chaque solide est considéré comme un demi-espace élastique
- les frottements sont nuls entre les deux surfaces de contact

Cela conduit à une équation reliant la charge appliquée P , le rayon de courbure R et l'interpénétration du corps (1) dans le corps (2) .

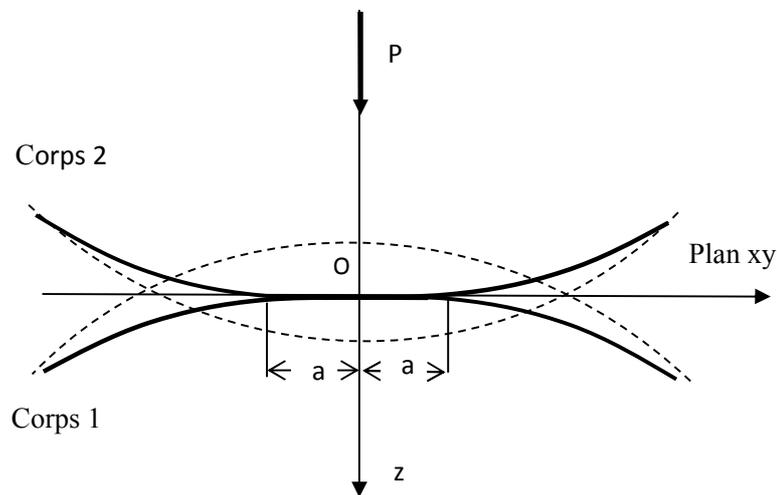


Figure 2.2 : Contact de Hertz pour deux sphères

La surface de contact réelle, la distribution de la pression et la déformation due au contact sont des paramètres très importants. Dans ce cadre plusieurs auteurs ont proposés des modèles de contact variés construits le plus souvent par éléments finis.

4. Modélisation du contact pneumatique –chaussée

4.1 Modélisation du pneumatique

Plusieurs approches ont été utilisées pour la modélisation du pneumatique [15].

- L'approche de base considère celui-ci comme un anneau circulaire supporté élastiquement. Dans ce modèle, la bande de roulement du pneumatique est considérée comme un anneau ou une poutre précontrainte alors que les flancs agissent comme une fondation élastique. Bien qu'il soit simple, ce modèle permet d'étudier les vibrations radiales et les effets dynamiques de la bande de roulement.
- Une deuxième approche dite de membrane ou de coque représente une extension 2D de l'approche ressorts-anneau.
- Cependant ces dernières années, l'approche par éléments finis est largement utilisée et s'avère plus adéquate pour la prise en compte de l'ensemble du comportement mécanique du pneumatique dans la mesure où elle permet une meilleure connaissance des distributions des efforts et contraintes. Dans la plupart des modèles éléments finis, le pneumatique est considéré comme une membrane toroïdale. Le rayonnement acoustique est souvent déterminé sur la base de la connaissance du champ de vitesses de surface de l'enveloppe du pneumatique. La prédiction du rayonnement est basée sur l'utilisation des éléments de frontière.

4.2 Modélisation de la chaussée

La chaussée est un ensemble multicouche dont une partie forme la structure proprement dite (couches d'assise ou fondation de base) et l'autre la couche de surface. Il existe une grande variété de structures de chaussée que l'on peut caractériser par [13] :

- chaussées souples,
- bitumeuses épaisses,
- chaussées à assises traitées aux liants hydrauliques,
- chaussées à structures mixtes,
- chaussées en béton
- et bien d'autres.

Parmi les modèles de chaussée on cite entre autres :

- les modèles structurels en statique où les paramètres intrinsèques pris en compte sont le coefficient de Poisson, la masse volumique et le module d'Young statique.

Les matériaux constituant la chaussée sont supposés isotropes et on adopte l'hypothèse d'élasticité linéaire.

- Les modèles de type souple (massif semi infini) où la pression exercée par le pneumatique est répartie par la chaussée également.

La charge appliquée à la chaussée est exprimée par une pression uniformément répartie sur une aire circulaire et le sol est supposé élastique, homogène, linéaire et isotrope [13].

5. Action d'un véhicule sur un sol

Lorsqu'un véhicule se déplace sur une chaussée, sa charge est transmise au sol par l'intermédiaire de la chaussée sous forme de pression. Il se passe deux choses invisibles à l'œil nu [16]:

- Le sol s'affaisse sous le pneu: on a une déformation totale W_t ,
- Lorsque la roue s'éloigne, le sol remonte mais pas totalement: on a une déformation résiduelle W_r

La différence entre la déformation totale et la déformation résiduelle est appelée *déflexion*

$$d=W_t-W_r. \quad (2-1)$$

L'orniérage est la déformation résiduelle W_r , s'accroît au fil du temps et est proportionnelle à la charge. Ce processus est schématisé à la (figure 2.3).

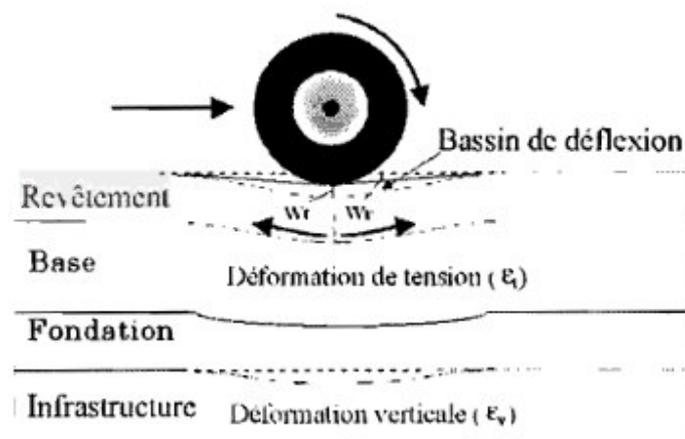


Figure. 2.3 : Schéma du principe illustrant la déflexion d'un sol sous l'effet d'une charge

6. Conclusion

La chaussée s'avère donc un paramètre important et joue un rôle essentiel dans le problème de rayonnement du bruit induit par le trafic routier. Aussi, un intérêt particulier est donné à l'étude de paramètre de par sa structure, ses caractéristiques et son dimensionnement. Ces points sont traités dans les chapitres 3 et 4 suivants.

Chapitre 3 :

Structure d'une chaussée routière

1. Introduction

Une chaussée est une structure multicouche constituée de trois parties principales qui ont chacune un rôle bien défini [8]

Tout d'abord le sol terrassé ou sol-support est surmonté généralement d'une couche de forme.

L'ensemble sol-couche de forme représente la plate-forme support de la chaussée. La couche de forme a une double fonction. Pendant les travaux, elle assure la protection du sol-support, permet la qualité du nivellement ainsi que la circulation des engins. En service, elle permet d'homogénéiser les caractéristiques mécaniques des matériaux constituant le sol ou le remblai, et d'améliorer la portance à long terme.

Puis viennent la couche de base et la couche de fondation formant ainsi les couches d'assise. Les couches d'assise apportent à la chaussée la résistance mécanique aux charges verticales induites par le trafic et répartissent les pressions sur la plate-forme support afin de maintenir les déformations à un niveau admissible.

Enfin, la couche de surface se compose de la couche de roulement et éventuellement d'une couche de liaison entre la couche de roulement et les couches d'assise. Elle a deux fonctions. D'une part, elle assure la protection des couches d'assise vis-à-vis des infiltrations d'eau. D'autre part elle confère aux usagers un confort de conduite d'autant plus satisfaisant que les caractéristiques de surface sont bonnes

Selon les matériaux granulaires liés (enrobés, béton,...) ou non liés composants les couches des chaussées, nous distinguons plusieurs types de structures. Dans la suite, nous allons présenter les classifications des chaussées françaises. [8]

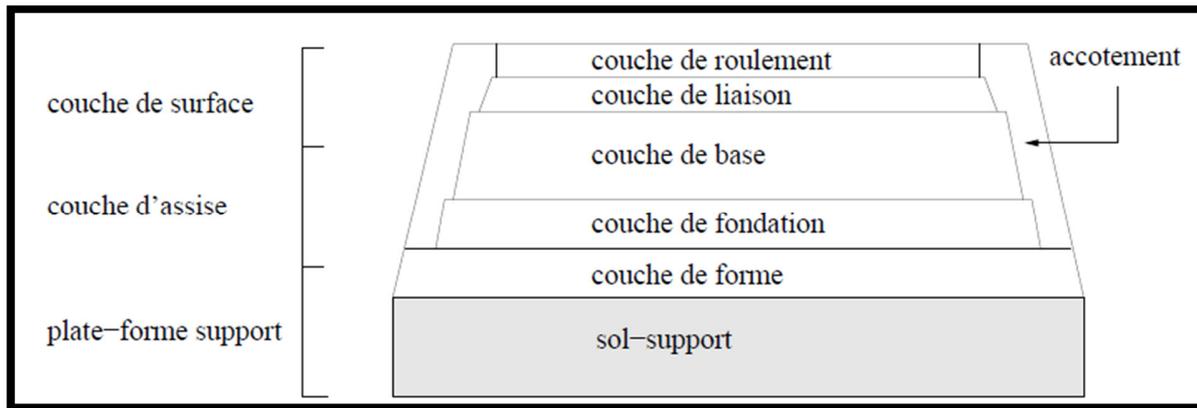


Figure 3.1 : Constitution d'une structure de chaussée

2. Les différents types de chaussées selon la structure

Selon le fonctionnement mécanique de la chaussée, on distingue généralement les trois différents types de structures suivants:

2.1. Les chaussées souples

Ces structures comportent une couverture bitumineuse relativement mince (inférieure à 15 cm), parfois réduite à un enduit pour les chaussées à très faible trafic, reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités. L'épaisseur globale de la chaussée est généralement comprise entre 30 et 60 cm.

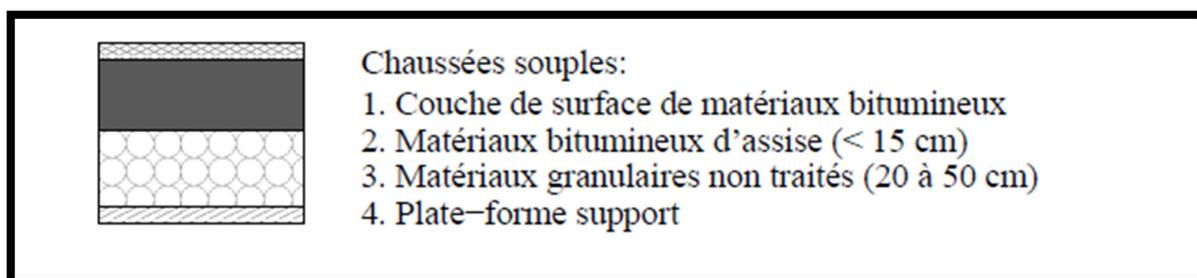


Figure 3.2 : Les chaussées souples

2.1.1 Les différentes couches d'une chaussée souple.

- la couche de surface
- la couche de base
- la couche de fondation
- la sous-couche

Ces différentes couches peuvent ne pas exister simultanément dans une chaussée. S'il y a toujours une couche de base, il n'y a pas toujours de couche de surface ou de couche de fondation.[4]

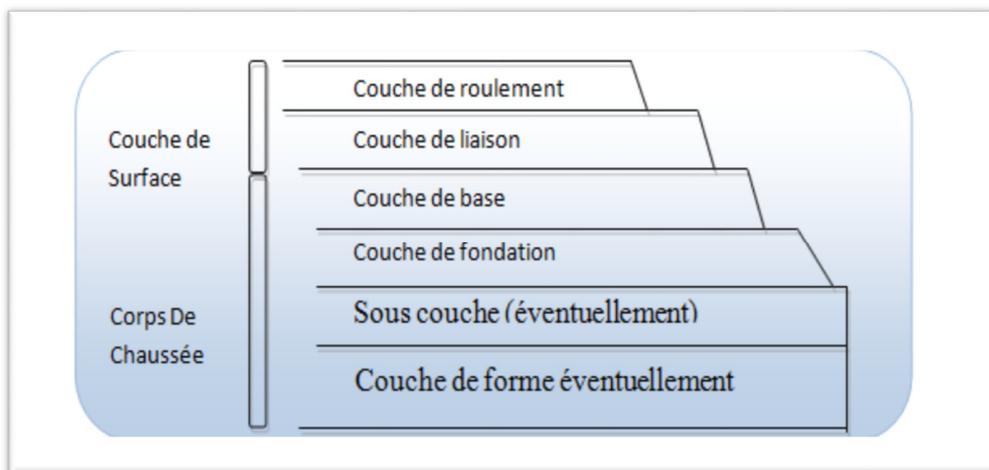


Figure 3.3: Les différentes couches d'une chaussée souple

- Couche de roulement (surface) :

La couche de surface constituant la chape (couche de surface) de protection de la couche de base par sa dureté et son imperméabilité et devant assurer en même temps la rugosité, la sécurité et le confort des usagés

La couche de roulement est en contact direct avec les pneumatiques des véhicules et les charges extérieures. Elle encaisse les efforts de cisaillement provoqués par la circulation.

La couche de liaison joue un rôle transitoire avec les couches inférieures les plus rigides.

L'épaisseur de la couche de roulement en général varie entre 6 et 8 cm.

- Couche de base :

La couche de base joue un rôle essentiel, elle existe dans toutes les chaussées, elle résiste aux déformations permanentes sous l'effet de trafic, elle reprend les efforts verticaux et repartit les contraintes normales qui en résultent sur les couches sous-jacentes.

L'épaisseur de la couche de base varie entre 10 et 25 cm.

- Couche de fondation :

Complètement en matériaux non traités (en Algérie), elle substitue en partie le rôle du sol support, en permettant l'homogénéisation des contraintes transmises par le trafic. Assurer un bon uni et bonne portance de la chaussée finie, et aussi, elle a le même rôle que celui de la couche de base.

- Couche de forme :

La couche de forme est une structure plus ou moins complexe qui sert à adapter les caractéristiques aléatoires et dispersées des matériaux de remblai ou de terrain naturel aux caractéristiques mécaniques, géométriques et thermiques requises pour optimiser les couches de chaussée.

L'épaisseur de la couche de forme est en général entre 40 et 70 cm.

2.1.2. Matériaux constitutifs des chaussées souples

a-Hérisson : type de couche de fondation comportant de grosses pierres soigneusement disposées à la main sur la forme, placées de champ et calées entre elles par des éclats de pierre.[16]

b-Blocage : type de couche de fondation, constitué à l'aide de grosses pierres disposées mécaniquement et fortement comprimées.

c-Macadam : type de couche de base de faible épaisseur constitué de pierres cassées, de granulométrie très serrée et fortement cylindrée.

d- Assises : type de couches de fondation ou de base constituées soit à l'aide d'un sol sélectionné, amélioré ou traité, soit à l'aide d'un tout-venant de concassage.

Les matériaux doivent être formés d'éléments assez petits pour permettre une mise en œuvre aisée à la machine (répand à la mécanique et fort compactage).

e- Les assises peuvent être en matériaux naturels, concassés ou semi-concassés. On dit qu'une grave est semi-concassée lorsque l'on fait passer au concasseur tous ses éléments supérieurs à un certain diamètre, le tout étant ensuite remélangé.

f- Enduits : obtenus par épandages d'une certaine quantité de liant hydrocarboné qui ne pénètre que très peu, et que l'on recouvre ou non de gravillon ou de sable.

g- Tapis : couche de roulement ou de surface réalisée à l'aide de matériaux enrobés.

On distingue les tapis en fonction :

- de leur procédé de fabrication : enrobés à chaud ou à froid,
- de leur texture après mise en place : enrobés ouverts ou enrobés denses.

2.2. Chaussée rigide

Une chaussée rigide est constituée d'un revêtement en béton de ciment pervibré ou fluide.

En règle générale, une chaussée en béton comporte, à partir du sol, les couches suivantes :

- une couche de forme,
- une couche de fondation,
- une couche de roulement en béton de ciment.

Dans le cas d'une chaussée neuve à faible trafic, la couche de fondation n'est pas nécessaire. La dalle en Béton de Ciment peut ainsi être réalisée directement sur l'arase terrassement ou sur la plate-forme support de chaussée (Figure 3.4).

Dans la chaussée rigide, la couche de surface et la couche de base sont confondues. [2]

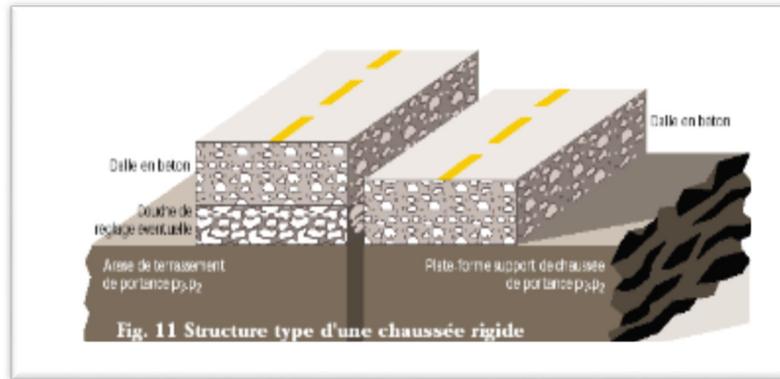


Figure 3.4 : Chaussée rigide

2.3. Chaussée semi-rigide

Elles comportent une couche de surface bitumineuse reposant sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposés en une couche (base) ou deux couches (base et fondation).

Dans le cas d'une chaussée neuve à faible trafic, la structure-type est illustrée sur la (Figure 3.6) [2]

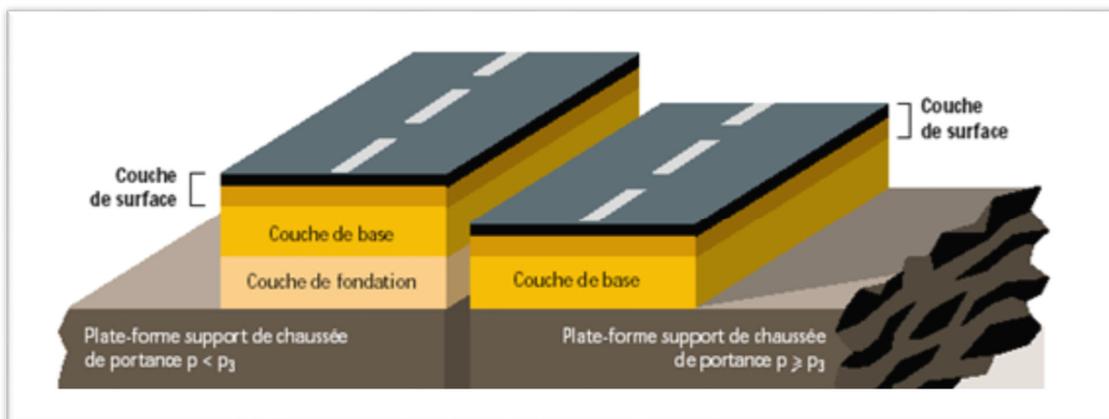


Figure 3.5 : Chaussée semi-rigide

3. Les différents types de chaussées selon la couche de roulement

Le choix de la couche de roulement ou la couche de revêtement dépend de la structure de la chaussée.

3.1. Les chaussées bitumineuses épaisses

Ces structures se composent d'une couche de roulement bitumineuse sur un corps de chaussée en matériaux traités aux liants hydrocarbonés, fait d'une ou deux couches (base et fondation).

L'épaisseur des couches d'assise est le plus souvent comprise entre 15 et 40 cm. [6]

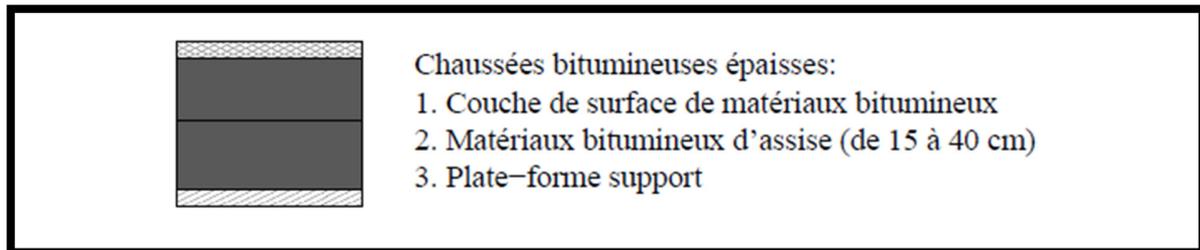


Figure 3.6: Les chaussées bitumineuses épaisses

3.2. Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

Ces structures sont qualifiées couramment de “semi-rigides”. Elles comportent une couche de surface bitumineuse sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposés en une ou deux couches (base et fondation) dont l'épaisseur totale est de l'ordre de 20 à 50 cm. [6]

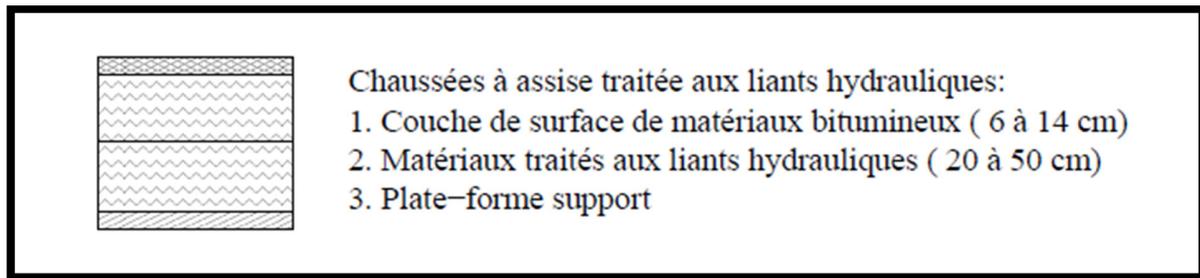


Figure 3.7 : Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

3.3. Les chaussées à structure mixte

Ces structures comportent une couche de roulement et une couche de base en matériaux bitumineux (épaisseur de la base : 10 à 20 cm) sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm). Les structures qualifiées de mixtes sont telles que le rapport de l'épaisseur de matériaux bitumineux à l'épaisseur totale de chaussée soit de l'ordre de 1/2. [6]

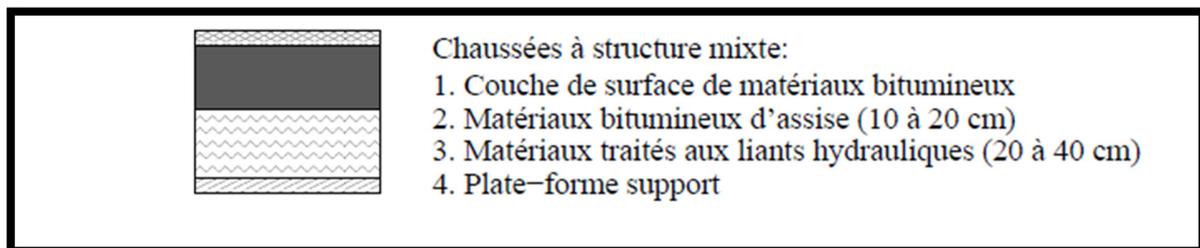


Figure 3.8 : Les chaussées à structure mixte

3.4. Les chaussées à structure inverse

Ces structures sont formées de couches bitumineuses, d'une quinzaine de centimètres d'épaisseur totale, sur une couche de grave non traitée (environ 12 cm) reposant elle-même sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques. L'épaisseur totale atteint 60 à 80 cm [6].

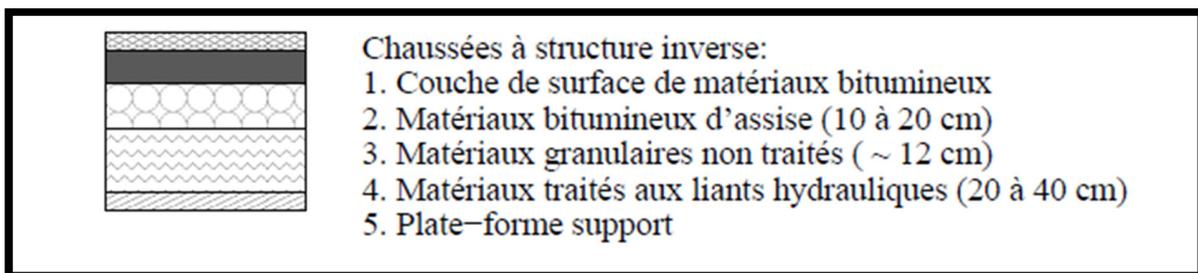


Figure 3.9: Les chaussées à structure inverse

3.5. Les chaussées en béton de ciment

Ces structures comportent une couche de béton de ciment de 15 à 40 cm d'épaisseur qui sert de couche de roulement éventuellement recouverte d'une couche mince en matériaux bitumineux.

La couche de béton repose soit sur une couche de fondation (en matériaux traités aux liants hydrauliques ou en béton de ciment), soit sur une couche drainante en grave non traitée, soit sur une couche d'enrobé reposant elle-même sur une couche de forme traitée aux liants hydrauliques.

La dalle de béton peut-être continue avec un renforcement longitudinal ("béton armé continu"), ou discontinue avec ou sans élément de liaison aux joints. Ci-dessous nous présentons les structures de chaussée en béton de ciment [6]



Figure 3.10: Les chaussées en béton de ciment

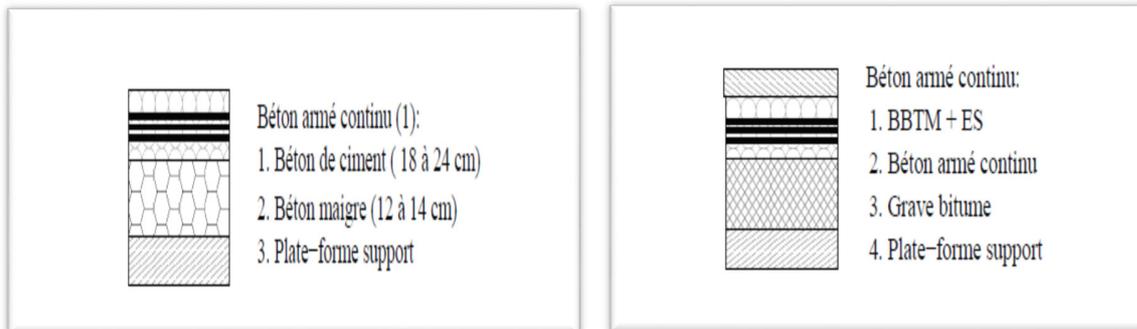


Figure 3.11 : Béton armé continu

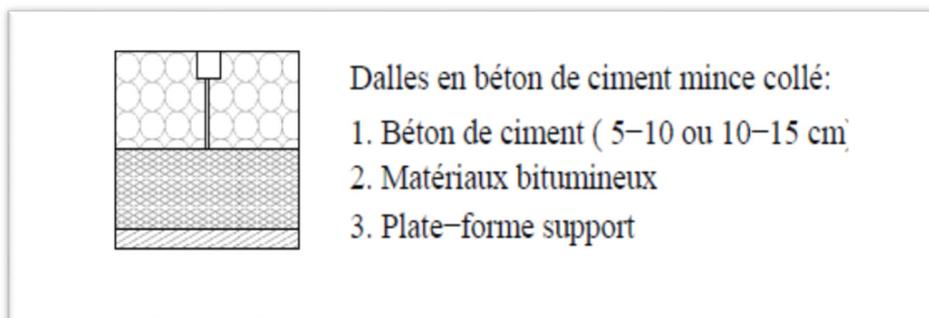


Figure 3.12 : Dalles en béton de ciment mince collé

4. dimensionnement d'une chaussée

4.1. Critères de dimensionnement

La méthode de dimensionnement prend donc en considération les facteurs suivants :

- la vocation de la voie,
- le trafic,
- la durée de service,
- l'environnement (données climatiques),
- la plate-forme support de chaussée,
- les matériaux de chaussée,
- la qualité de la réalisation

Nous avons deux grandes familles de méthodes :

- Celle qui utilise la structure de la chaussée à travers un modèle mécanique pour la détermination des contraintes et déformations, cette méthode est dite rationnelle.
- L'autre qui consiste à observer le comportement sous trafic des chaussées (réelles ou expérimentales) et d'en déduire les règles pratiques du dimensionnement, et c'est la méthode empirique.

4.2. Les différents types de méthodes de dimensionnement

Contient la description et les principes de deux différents types de méthodes de dimensionnement:

- méthode mécanique empirique (ou analytique empirique)
- méthode semi empirique

4.2.1 Méthode mécanique empirique

Dans cette méthode 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 [18] :

- 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. [4].

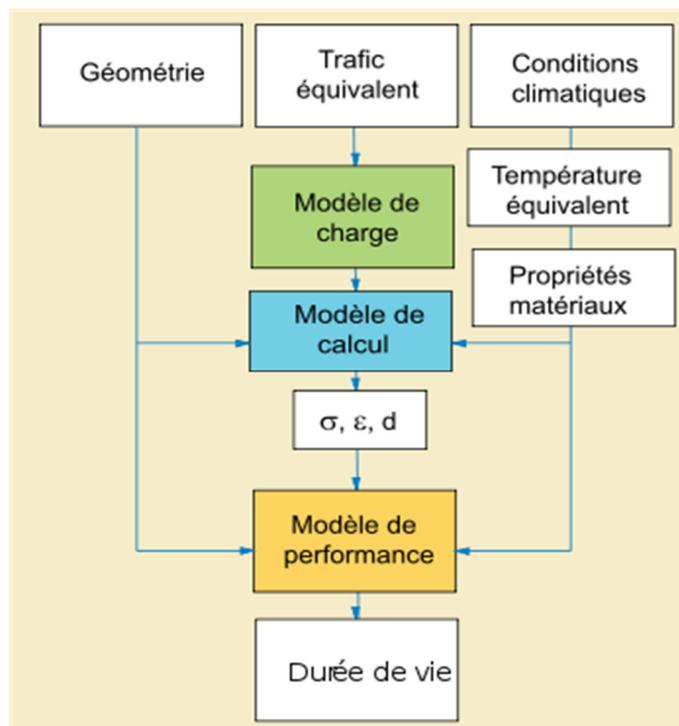


Figure 3.13: Schéma de fonctionnement pour une méthode mécanique empirique de dimensionnement

4.2.2. Méthode semi empirique:

C'est une méthode semi empirique qui se base sur un essai de poinçonnement sur un échantillon du sol support en compactant les éprouvettes de (90° à 100°) de l'optimum. [4].

Elles sont basées sur le calcul de la réponse théorique de la structure soumise à une sollicitation et utilisent le comportement approché linéaire du sol avec le module d'Young E. Le calcul se fait en deux étapes

- Calcul des contraintes et des déformations admissibles dans la chaussée en fonction du trafic attendu (modèle de fatigue et de déformation permanente)
- Calcul des épaisseurs requises pour rencontrer les critères de contraintes et/ou des déformations admissibles

La détermination de l'épaisseur totale du corps de chaussée à mettre en œuvre s'obtient par l'application de la formule présentée ci après:

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

$$e = \frac{100 + 150\sqrt{P}}{I_{CBR} + 5} \quad (\text{cm}) \quad (3.1)$$

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

$$e = \frac{100 + \sqrt{P}(75 + 50 \log \frac{N}{10})}{I_{CBR} + 5} \quad (\text{cm}) \quad (3.2)$$

Avec:

e: épaisseur équivalente

- **I_{CBR}** : indice CBR (sol support)
- **N**: désigne le nombre journalier de camion de plus 1500 kg à vide
- **P**: charge par route P = 6.5 t (essieu 13 t)
- **Log**: logarithme décimal

L'épaisseur équivalente est donnée par la relation suivante:

$$e = c_1 \times e_1 + c_2 \times e_2 + c_3 \times e_3 \quad (3.3)$$

Où:

C_1, C_2, C_3 : coefficients d'équivalence.

e_1, e_2, e_3 : épaisseurs réelles des couches.

Coefficient d'équivalence :

Le tableau ci-dessous indique les coefficients d'équivalence pour chaque matériau :

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

Tableau 3.1 : Les valeurs des coefficients d'équivalence

5. Durée de vie d'une chaussée

La durée de vie d'une route dépend fortement de son utilisation et de son entretien. Sans entretien régulier, une route nouvellement construite se délabrerait en une cinquantaine d'années. La planification des travaux d'assainissement à moyen et à long terme est délicate car une route est constituée de plusieurs éléments: la couche de roulement, la couche de base et le fondement. A leur tour, les couches sont constituées de divers matériaux et ont des durées de vie différentes. Les travaux d'entretien doivent donc être planifiés puis exécutés en fonction des différents composants de la route [6].

Durée de vie des différents éléments d'une route:

- Couche de roulement: 20 à 25 ans
- Couche de roulement et de liaison: 50 ans
- Remplacement total du fondement: 100 à 125 ans
- Conduites d'eau: 80 à 100 ans

Sur les autoroutes, la durée de vie est réduite d'environ 35 %.

La tâche consiste à déterminer l'intervalle pour les travaux d'assainissement de sorte à optimiser l'utilisation d'une route, sachant qu'entretemps les mesures antibruit et d'autres besoins évoluent et que la population s'accroît.

6. Traitement des chaussées

- Compacter un sol, c'est réduire son volume apparent, c'est-à-dire améliorer l'arrangement relatif des grains par des moyens mécaniques appropriés.
- Stabilisation : rendre un sol apte de façon durable à des usages routiers. On distingue:
Mécanique : criblage, concassage, mélange avec un sol d'apport, malaxage et surtout compactage,
Chimique : addition d'un produit tel que les ciments laitiers, bitumes, goudrons.

- Imprégnation : traitement consistant à répandre un liant hydrocarboné sur une couche de chaussée à pores fins, le liant étant choisi de telle façon qu'il pénètre par capillarité dans les pores de la chaussée.
- Pénétration : traitement consistant à répandre un liant hydrocarboné sur une couche de chaussée à pores relativement gros, le liant pénétrant dans ses pores par gravité.

Chapitre 4 :

Modèles de chaussée routière

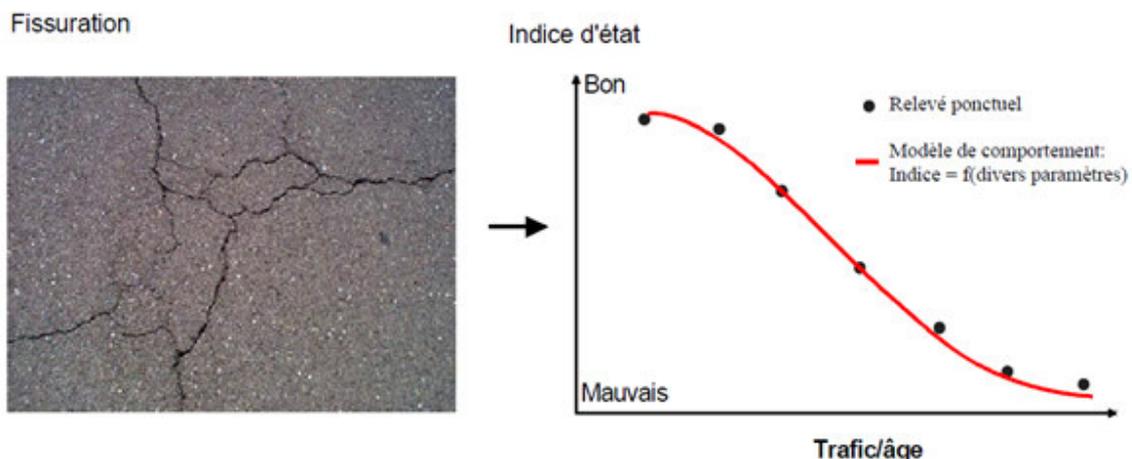
1. Introduction

Les chaussées routières sont en permanence soumises à des sollicitations mécaniques et thermiques combinées avec des phénomènes chimiques (vieillessement des matériaux). Ces diverses sollicitations vont participer plus ou moins rapidement aux dégradations couramment observées des superstructures routières, en particulier les dégradations des revêtements, notamment : les déformations, les fissurations et les dégradations de surface [10].

Les modèles de la mécanique des chaussées permettent d'expliquer le fonctionnement et le comportement des divers types de structures routières à partir d'une schématisation simple des structures et des charges appliquées. Ils permettent aussi d'évaluer le niveau de sollicitation d'une structure de chaussée. Les modèles doivent donc représenter le plus possible le fonctionnement des structures étudiées. Par souci de simplicité, la plupart des méthodes de calcul de la réponse mécanique de la chaussée sont basées sur des hypothèses simplificatrices [12]. Les chaussées sont dimensionnées pour une certaine durée de vie qui diffère d'une région (ou pays) à une autre.

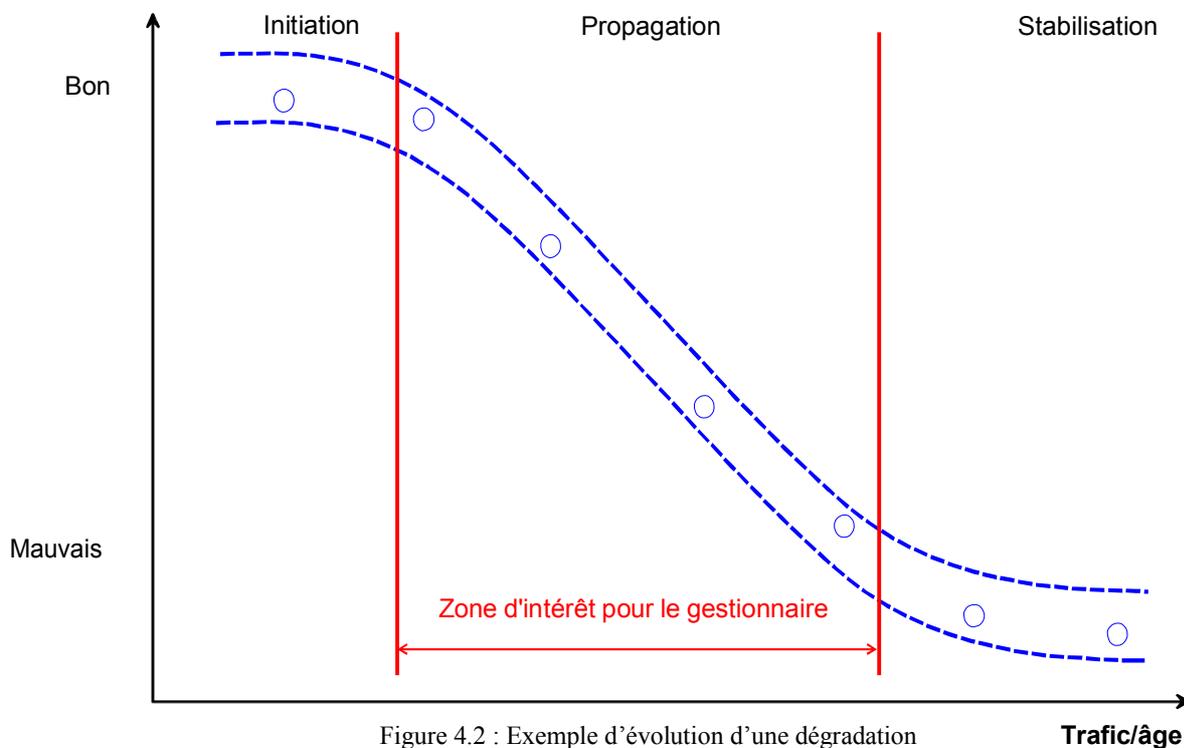
2- modèle de comportement

Un modèle de comportement est une loi mathématique élaborée sur la base de considérations théoriques ou empiriques (basés sur l'observation), permettant de prévoir l'évolution dans le temps d'un indice caractérisant l'état d'une dégradation (Figure 4.1)



L'évolution d'une dégradation peut-être schématisée par une tendance regroupant les points des relevés de la dégradation d'une chaussée type pris à différentes périodes. Cette évolution peut être divisée en 3 phases, à savoir (Figure 4.2) :

- Une **phase d'initiation** représentant la période entre la construction du revêtement et la première apparition d'une dégradation à la surface de celui-ci. Le moment de la première apparition d'une dégradation dépend de la qualité des matériaux d'origine et de l'exécution de la superstructure, des charges mécaniques et/ou thermiques, et de l'aptitude de la structure à résister à ces diverses charges.
- Une **phase de propagation** représentant la période durant laquelle une dégradation, après être apparue à la surface de la chaussée, se développera selon sa propre loi d'évolution, celle-ci pouvant être linéaire, exponentielle ou autre.
- Une **phase de stabilisation** représentant la période à partir de laquelle la dégradation tend à se stabiliser. Cette phase ne fait pas l'objet de modélisation. Elle est au-delà d'un seuil critique, voir même au-delà du seuil admissible de sécurité et, donc, aura déjà nécessité la réalisation de travaux de maintenance.



Parmi les 3 phases, la phase de propagation représente la zone d'intérêt pour le gestionnaire qui doit décider et prévoir les interventions d'entretien.

En fonction du type de l'approche utilisée pour développer les modèles de comportement on peut considérer trois types de modèles [10]

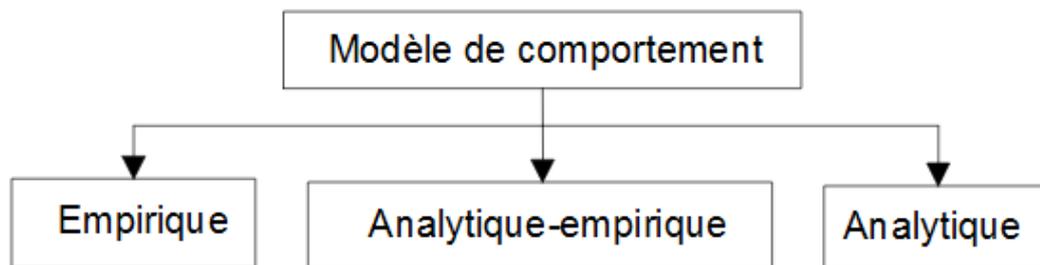


Figure 4.3: Types de modèle de comportement

3-Modèles empiriques

Les modèles empiriques sont des modèles basés sur l'analyse de l'observation des dégradations des chaussées et en particulier leur évolution.

Ces modèles sont issus de 4 options possibles [13]:

- Observation d'un réseau ((méthode "photo"))
- Suivi de l'évolution du réseau ((méthode "vidéo"))
- Suivi de planches d'essais in situ
- Essais accélérés (ALT : Accelerating Loading Test) (Figure 4.4).

Les planches d'essais in situ sont des sections de chaussée choisies en certains endroits du réseau, soumises aux charges de trafic et aux conditions climatiques réelles. Si ces données décrivent le développement effectif des dégradations de la chaussée, elles présentent deux inconvénients majeurs pour l'élaboration de lois de comportement. Le premier est que le développement des dégradations sur des sections standards du réseau routier se réalise de manière relativement lente. Il est donc nécessaire que les observations utilisées pour l'établissement de modèles de comportement couvrent une période de

plusieurs années. D'autre part, le développement des dégradations ne peut être observé que jusqu'à ce que le niveau usuel d'intervention soit atteint.

Ces deux inconvénients ne s'appliquent pas aux données obtenues à l'aide des essais accélérés. Par l'application très rapide de cycles de chargement mécanique, le développement des dégradations est également accéléré. De plus, les dégradations peuvent être observées jusqu'à la destruction totale de la chaussée, puisque la sécurité des usagers et l'intégrité structurelle de la chaussée ne sont pas déterminants.



Figure 4.4 : manèges de fatigues de l'EPFL et de l'EPFZ

Par contre, l'essai accéléré présente le défaut de ne pas intégrer l'effet du vieillissement notamment celui des liants bitumineux. De même, les sollicitations climatiques ne sont pas ou que mal simulées.

3.1-Etablissement de modèles empiriques

En fonction de la quantité et du type de données à disposition, deux méthodes empiriques sont utilisables pour élaborer de nouveau modèles de comportement. Ces méthodes, présentées ci-après, sont la méthode de type "photo" et la méthode de type "vidéo". [12]

- **Méthode photo**

Les modèles de type “photo” sont obtenus par analyse de données réelles observées sur l'ensemble d'un réseau, rassemblées dans un diagramme "Etat = f(Temps)". C'est à dire que les valeurs d'état observées sont classées en fonction de l'âge de la chaussée au moment du relevé des mesures.

On les qualifie de type “photo” car c'est comme si l'on prenait des photos à certains endroits du réseau que l'on superposerait en fonction de l'âge du revêtement. Cela exprime également l'aspect “statique” des données

Principe

Pour établir des modèles d'évolution du type “photo”, les étapes suivantes sont à réaliser :

- Réaliser le relevé de l'état de la dégradation que l'on désire modéliser sur l'ensemble du réseau à gérer. Pour chaque donnée, il est nécessaire de déterminer l'âge du revêtement au moment du relevé.
- Regrouper l'ensemble des données relatives à une dégradation dans un diagramme donnant l'état de la dégradation en fonction du temps.
- Déterminer les paramètres qui influencent l'évolution de la dégradation considérée (charge de trafic, type de revêtement, épaisseur des couches, condition climatique, ...).
- Filtrer les données en fonction des paramètres influents.
- Déterminer la régression appropriée aux divers groupes de données. Cette régression représente alors la loi de comportement, applicable aux chaussées ayant les mêmes caractéristiques.

Avantages

- Réalisation d'une seule série de relevé
- Rapide
- Economique

Inconvénients

- Filtration des données
- Ne reflète pas une réelle évolution mais une tendance
- Ne tient pas compte du passé de la chaussée

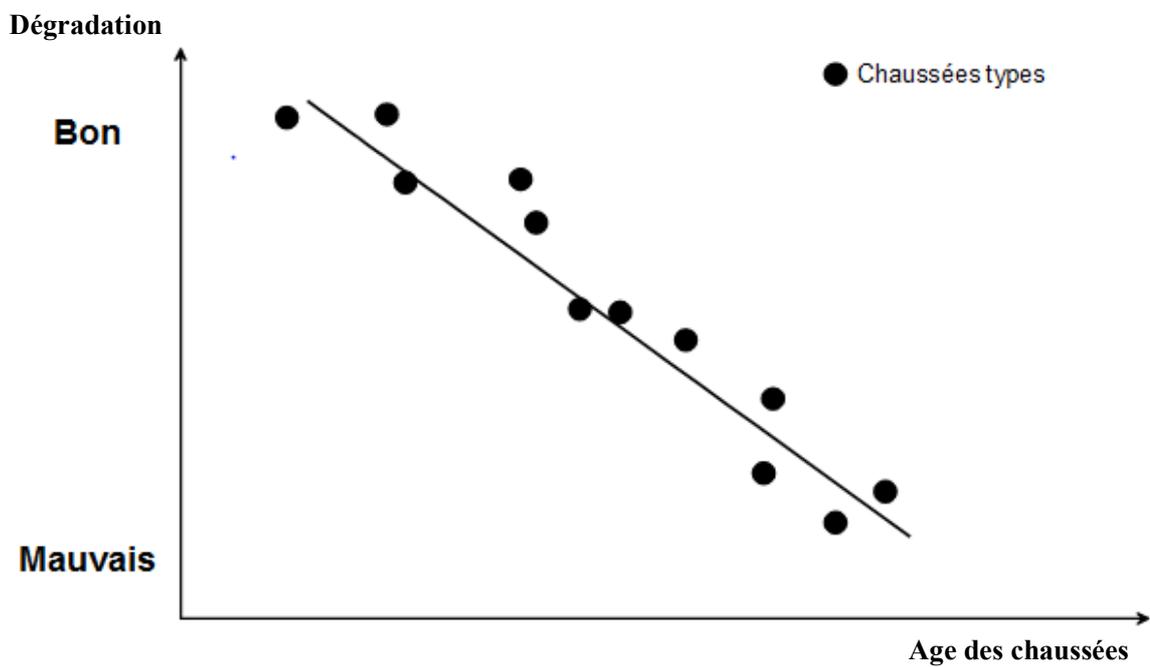
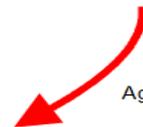
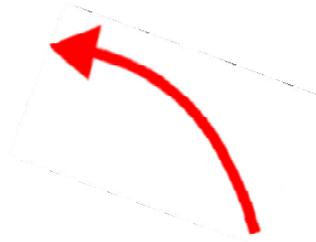


Figure 4.5: Représentation type d'une méthode photo

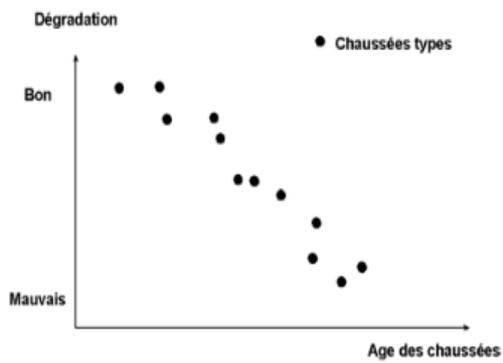
Les points issus de la (Figure 4.5) correspondent à l'état d'une dégradation considérée de chaussées d'un type défini, d'âges différents et qui subissent le même ordre de sollicitations.



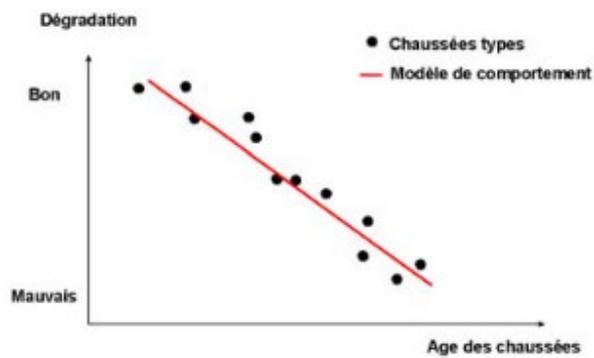
Relevé de l'état sur l'ensemble du réseau, en relevant l'âge du revêtement au moment du relevé



Aggrégation des données



Détermination de la régression appropriée



Loi d'évolution:
 $Y = aX + b$

Figure 4.6: Descriptif de la méthode photo

- **Méthode vidéo**

Les modèles de type vidéo sont obtenus en suivant l'évolution des dégradations sur des sections données du réseau.

On les qualifie de type "vidéo" car les informations sont obtenues un peu comme si l'on avait fixé une vidéo sur un tronçon de chaussée pendant une période donnée, et que l'on analysait l'évolution des dégradations à l'aide du film. Cette notion exprime également l'aspect évolutif des données.

Principe

Pour établir des modèles d'évolution du type "vidéo", les étapes suivantes sont à réaliser :

- Sélectionner des tronçons représentatifs du réseau.
- Relevé sur plusieurs années l'état de la dégradation que l'on veut analyser.
- Représenter les données dans un diagramme donnant l'état de la dégradation en fonction du temps.
- Déterminer la régression appropriée aux données.

Avantages

- Représente l'évolution effective d'une chaussée donnée
- Prend en compte le passé de la structure
- Simple à réaliser
- Précision du résultat

Inconvénients

- Nécessite plusieurs séries de relevés
- Long à réaliser (plusieurs années)

- **Remarque**

De manière à diminuer la période d'élaboration des lois de type vidéo, il est possible d'utiliser les données provenant de planches d'essais soumises à un manège de fatigue. Celui-ci permet de simuler la circulation du trafic de manière accéléré, et permet donc d'observer, dans un laps de temps restreint, le comportement de la structure. Ces données sont appelées données ALT (accelerating loading test).

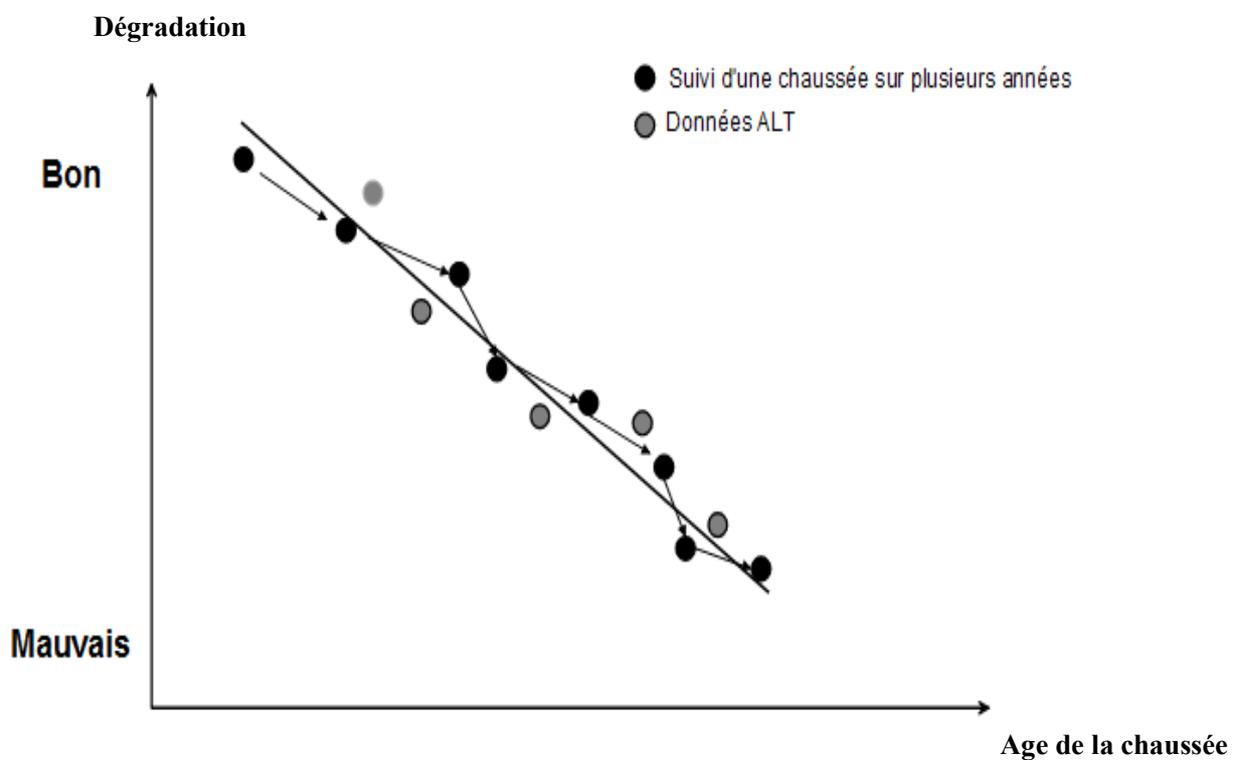
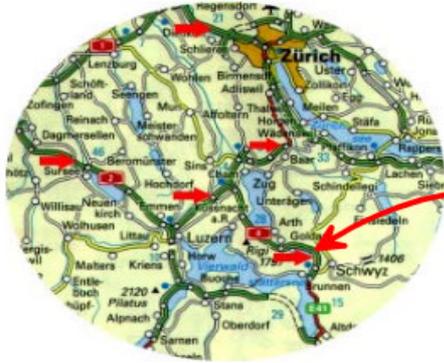


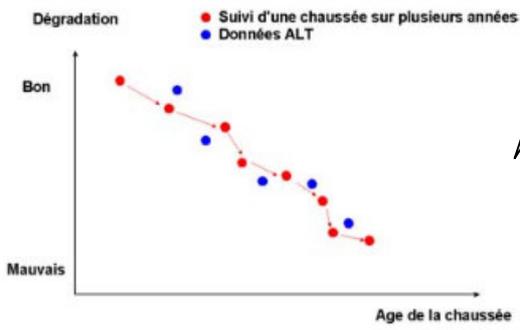
Figure 4.7: Représentation type d'une méthode vidéo



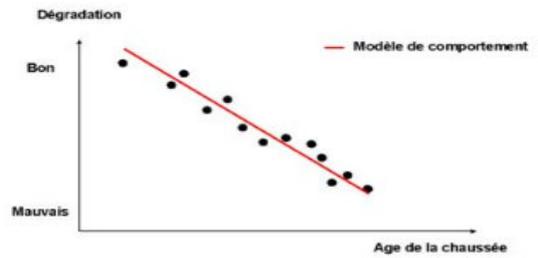
Suivi de l'évolution des dégradations, sur plusieurs années, d'une section donnée du réseau



Données ALT



Détermination de la régression appropriée



Loi d'évolution:
 $Y = aX + b$

Figure 4.8: Descriptif de la méthode vidéo

- **Suivi de planches d'essais in situ**

Les planches d'essais in situ sont des sections de chaussée choisies en certains endroits du réseau, soumises aux charges de trafic et aux conditions climatiques réelles. Si ces données décrivent le développement effectif des dégradations de la chaussée, elles présentent deux inconvénients majeurs pour l'élaboration de lois de comportement.

Le premier est que le développement des dégradations sur des sections standards du réseau routier se réalise de manière relativement lente. Il est donc nécessaire que les observations utilisées pour l'établissement de modèles de comportement couvrent une période de plusieurs années.

D'autre part, le développement des dégradations ne peut être observé que jusqu'à ce que le niveau usuel d'intervention soit atteint.

- **Essais accélérés**

Le développement des dégradations est accéléré par l'application très rapide de cycles de chargement mécanique. De plus, les dégradations peuvent être observées jusqu'à la destruction totale de la chaussée, puisque la sécurité des usagers et l'intégrité structurelle de la chaussée ne sont pas déterminants. Par contre, l'essai accéléré présente le défaut de ne pas intégrer l'effet du vieillissement notamment celui des liants bitumineux. De même, les sollicitations climatiques ne sont pas ou que mal simulées

4- Modèles analytiques-empiriques

Les modèles analytique-empiriques se basent pour une part sur les lois de comportement des matériaux, mais également sur l'observation de l'évolution des dégradations des chaussées. Ces modèles permettent de combiner les avantages des modèles analytiques et empiriques tout en diminuant les désavantages de l'un et de l'autre. [12]

5- Modèles analytiques

Les modèles analytiques sont basés sur l'application des lois théoriques de comportement des matériaux. Les structures de chaussées étant un système multicouche de matériaux hydrocarbonés, ces modèles nécessitent la détermination d'un nombre considérable de paramètres. Ces modèles présentent l'avantage de pouvoir simuler le comportement de

n'importe quel type de structure bitumineuse pour des conditions de sollicitations (charge, température) définies. Toutefois, ces modèles sont difficilement applicables de part la difficulté du calage des sollicitations théoriques avec les sollicitations réelles que subit la chaussée.

Ces dernières années, les recherches fondamentales se dirigent vers de telles approches mais cette évolution nécessite un investissement en temps et en argent considérable pour le gestionnaire d'un réseau routier. [12]

5.1 Modèle de Boussinesq

Le sol est considéré comme un massif élastique semi infini. On suppose en plus que le corps de chaussée en matériau granulaire n'est pas très différent du sol support. La charge du pneumatique appliquée à la chaussée génère une contrainte en fonction de la profondeur. Le but est de rechercher à quelle profondeur du sol support la contrainte verticale a été suffisamment diffusé pour ne pas dépasser la contrainte admissible. L'allure du diagramme de contrainte à différentes profondeurs est schématisée sur la (Figure 4.9). L'expression de la contrainte est :[12]

$$\sigma_z = q_0 \left[1 - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \right] \quad (4.1)$$

avec : q_0 : pression appliquée par le pneumatique
 a : rayon d'action de la charge,
 z : profondeur

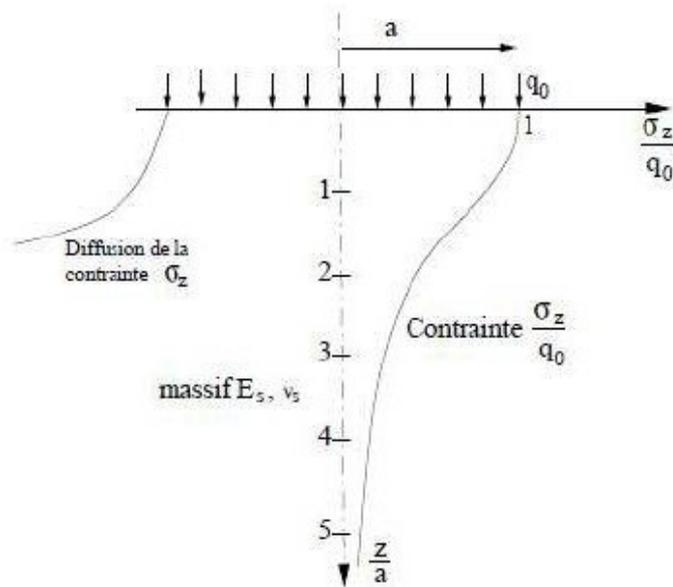


Figure 4.9 : Schéma du modèle de Boussinesq

Il reste donc à déterminer la contrainte admissible σ_{adm} du sol ainsi que la profondeur (épaisseur du corps de chaussée) pour laquelle, la contrainte verticale σ_z sur le sol support ne dépasse pas celle admissible du sol.

L'application de ce modèle à l'étude de la fissuration des structures de chaussées présente les inconvénients suivants [12]:

- ce modèle ne peut pas prendre en compte des discontinuités ;
- la zone d'application est limitée (seulement pour les cas où le corps de chaussée n'est pas trop différent du sol naturel) ;
- il ne peut pas modéliser les structures multicouches.

5.2- Modèle de Westergaard

C'est un modèle assez simple où le sol est considéré comme un assemblage de ressorts indépendants. Le déplacement vertical w en un point de contact entre la couche et le massif est alors proportionnel à la pression verticale σ_{zz} en ce point, soit $\sigma_{zz} = kw$ (figure 4.10) où k est appelé le module de réaction de fondation et il est fonction de cette dernière. [12]

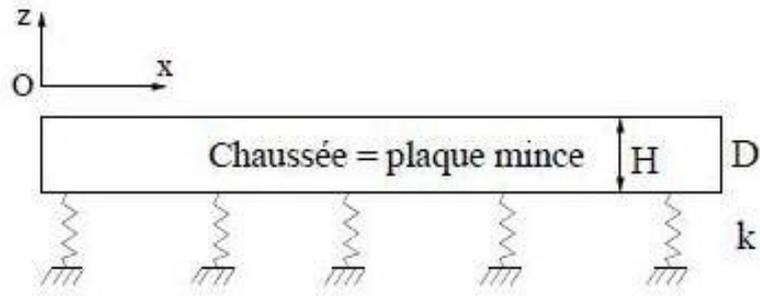


Figure 4.10 : Schéma du modèle de Westergaard

5.3. Modèle de Hogg

La chaussée est représentée par une plaque mince ($E_1; \nu_1$) et repose sur un massif infini de type Boussinesq ($E_s; \nu_s$). Avec l'hypothèse que la chaussée glisse parfaitement sur son support, il ne reste que deux inconnues principales du problème à déterminer : u_z et σ_{zz} à l'interface chaussée-sol. Les deux relations de continuité pour ces deux inconnues sont fournies d'une part par les équations de la plaque mince, d'autre part par les équations de Boussinesq d'un massif élastique semi-infini [12]

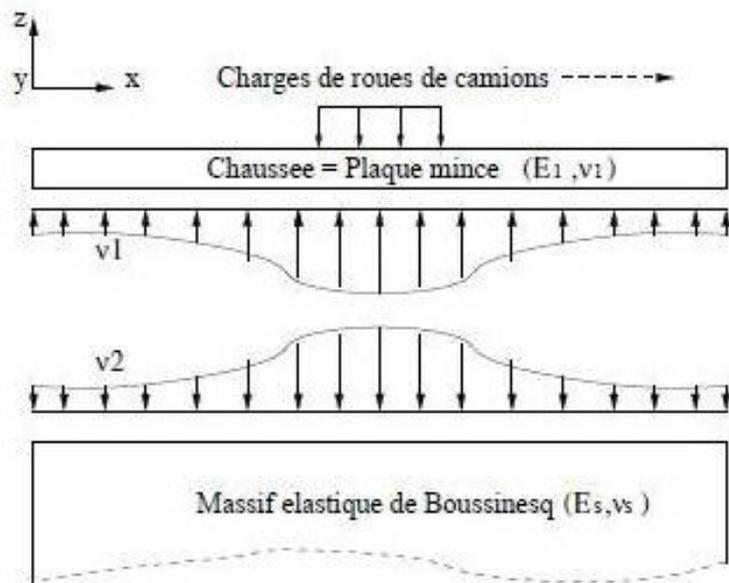


Figure 4.11 : Schéma du modèle de Hogg.

Ce modèle présente encore les inconvénients suivants : [12]

- Les cisaillements ne sont pas pris en compte à l'interface chaussée-sol, ce qui influence beaucoup les résultats.
- Il ne peut pas représenter un complexe de type multicouche de chaussée.

5.4 Modèle de burmister

C'est modèle à n couches reposant sur un massif élastique semi-indéfini [12]. Les principales particularités du modèle sont :

- les couches sont traitées comme des structures élastiques (et non comme des plaques),
- les interfaces entre couches peuvent être collées ou décollées,
- le cas de charges complexes peut être traité en additionnant les effets des charges élémentaires,
- sa principale limitation réside dans le fait que les couches sont infinies en plan.

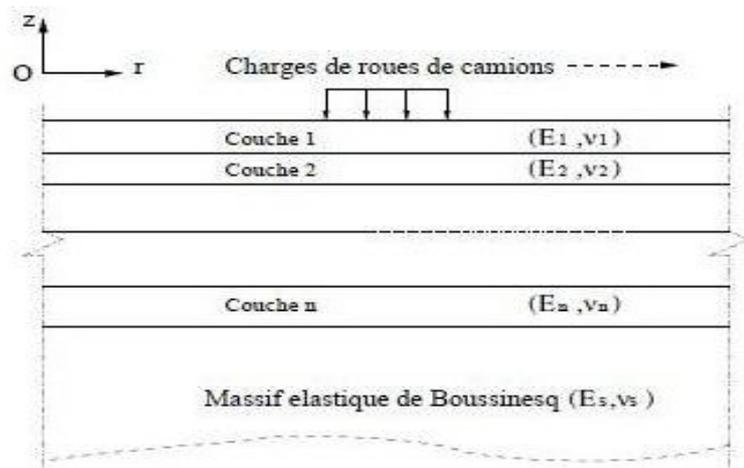


Figure 4.12 : Schéma du modèle de Burmister

5.5 Modèle de Jeuffroy

Ce modèle est une combinaison des modèles de Hogg et de Burmister . Il se compose d'une plaque mince reposant sans frottement sur une couche élastique de Burmister. Le sol est un massif semi infini. Avec cette combinaison, le modèle permet d'y introduire des discontinuités verticales dans la première couche de chaussée (chaussée en dalle de béton par exemple). La deuxième couche est traitée comme un solide élastique.

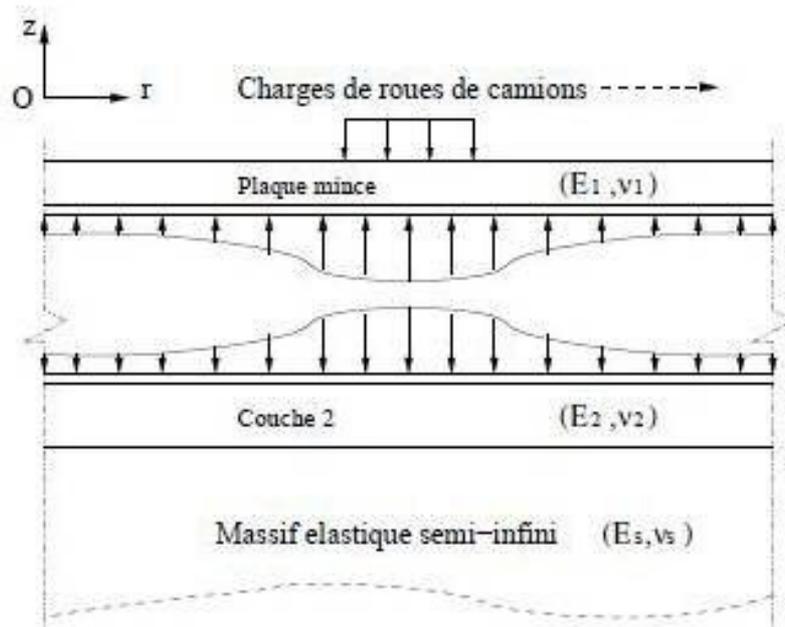


Figure 4.13 : Schéma du modèle de Jeuffroy

6 COMMENTAIRES

Un réseau routier présente une grande diversité de combinaisons de types de structures et de types de matériaux dont la composition, la mise en oeuvre et leur âge influenceront sur le comportement de la chaussée. D'autre part, les sections composant un réseau ne sont pas toutes soumises aux mêmes sollicitations : les charges de trafic et les conditions climatiques locales ainsi que la situation géométrique peuvent différer. Les modèles cités ci-dessus présentent chacun des avantages et des inconvénients. Le modèle idéal serait celui qui prendrait en compte tous les

paramètres ayant une incidence sur la dégradation considérée. Cependant, un tel modèle se révèle d'une rare complexité [10]

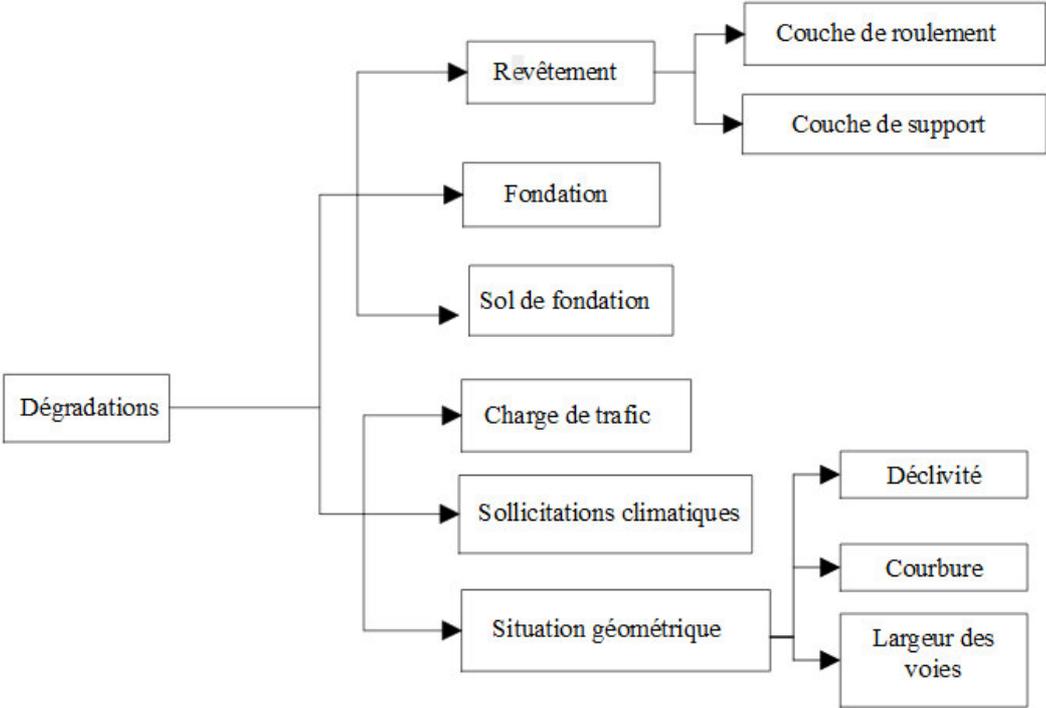


Figure 4.14 : Paramètres influençant l'apparition et l'évolution des dégradations

CONCLUSION GENERALE

La chaussée est un paramètre important et joue grand rôle dans le trafic routier. De par ses dimensions, la variété des matériaux qui la composent, l'aspect aléatoire des sollicitations qu'elle reçoit, la chaussée s'avère un ouvrage très complexe.

Aussi, ce paramètre devait être pris en considération et de nombreux travaux ont été entrepris dans ce domaine. Des modèles aussi bien empiriques qu'analytiques ont été élaborés et avec l'apport de l'outil informatique des modèles numériques sont développés dans les laboratoires spécialisés.

Notre travail a consisté en l'étude de la chaussée routière, dans sa généralité, comme paramètre très influent du trafic routier. Une attention particulière a été donnée à la structure d'une chaussée, les sollicitations qu'elle endure et les conséquences qu'elle subit. Nous avons présenté, aussi, et discuté quelques modèles cités dans la littérature.

Nous espérons que cette initiative servira à d'autres études et que ce domaine jouira d'un intérêt par les chercheurs particulièrement dans la modélisation et simulation numériques.

Références bibliographiques

[1] **LCPC, 1994 LCPC.** *Conception et dimensionnement des structures de chaussées.* Guide Technique, LCPC-SETRA, 1994.

[2] **Frédéric Visa,** Etude géotechnique routière, Lyon-France, Mars2015.

[3] **TUNG HOANG-** TRONÇONS AUTOROUTIERS : une méthodologie de modélisation environnementale et économique pour différents scénarios de construction et d'entretien, thèse de doctorat, spécialité : Génie Civile, 2005, l'école centrale de Nantes.

[4] **G.JEUFFROY-** Conception et Construction des Chaussées, Editions Eyrolles PARIS 1978.

[5] Conception et dimensionnement des structures de chaussée -Guide technique, SETRA, Paris, 1er décembre 1994, 266p. (ISBN 2-7208-7010-2)

[6] **AIT TAHAR Kamal , AIT AIDER Hacène-** CONTRIBUTION à LA NOTION d'adhérence sur les chaussées du réseau algérien.2003

[7] **Quang Dat Tran.** Modèle simplifié pour les chaussées fissurées multicouches, Thèse présentée pour l'obtention du diplôme Docteur de l'Ecole Nationale des ponts et chaussées. Université de Paris-est. 30 sept 2004.]

[9] **Godlewski D.** (1985): Optimisation de la gestion routière : utilisation de l'uni longitudinal. Thèse de l'Ecole nationale Ponts et Chaussée, Paris. NS 12766

[10] Analyse des modèles de comportement des chaussées. Laboratoire des voies de circulation LAVOC, EPF Lausanne (Suisse) (Mandat de recherche n°11/99)

[11] **S. TRIAW :** Dimensionnement mécanistique-empirique des structures de chaussée: Application au tronçon Séo-Diourbel. PFE , Ecole Supérieure Polytechnique, Dakar (Sénégal), 2006

[12] **S. Sadok :** Etude de renforcement par géogrilles d'une plateforme routière. Mémoire de Magister, Université de Tébessa, 2015

[13] **H. Abo Shighiba.** "Etude de l'effet de l'absorption de la chaussée dans un modèle de rayonnement pneumatique-chaussée". Mémoire de Magister, Département de Mécanique, Université de Blida, Algérie, 2007.

[14] **A. Houari.** "Influence de la rigidité de la chaussée sur le bruit de contact pneumatique-chaussée", Thèse de doctorat, Université de Compiègne, France, 2002

[15] **A. Sameur.** "Modèle de contact pneumatique/chaussée pour la prévision du bruit de roulement". Thèse de doctorat, Ecole nationale des ponts et chaussées (ENPC), France, 2004.

[16] comparaison-entre-les-chaussees-souples-bitumineuses-et-les-chaussees-rigides-en-beton.pdf

<http://www.bitumequebec.ca/wp-content/uploads/2015/06>

[17] <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00529388/document>

[18]. **Jercan, S., Romanescu, C., Dicu, M.** – Construcia drumurilor - Încercari de laborator. Ed. I.C.B.-Eurohot, 1992.