
RÉPUBLIQUE DU SÉNÉGAL



ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE THIÈS

PROJET DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGÉNIEUR DE CONCEPTION

TITRE

: ETUDE DES DEFAUTS DE SURFACE DES CHAUSSEES
SOUPLES REVETUES.

DATE : JUIN 1990

AUTEUR : ALI BOUKARI
DIRECTEUR : MASSAMBA SAIL SAMB
CO-DIRECTEUR :

TABLE DES MATIERES

Remerciements.....	i
Sommaire.....	ii
Chapitre I. INTRODUCTION.....	
Chapitre II. Etude Theorique de la chaussée et des dégradations	3
A-Présentation des défauts.....	3
B-Les matériaux.....	8
C-Environnement.....	24
D-Trafic.....	29

2ème Partie

Chapitre III DIAGNOSTIC.....	60
A-Analyse:.....	60
B-Propositions.....	63
Chapitre IV METHODES DE REPARATION.....	76
A-méthodes actuelles.....	76
B-Analyse.....	76
C-PROPOSITIONS.....	78
Chapitre V RECOMMANDATIONS	82
Chapitre VI CONCLUSION	89
ANNEXES.....	91-96
BIBLIOGRAPHIE.....	97

DEDICACE

A ma mère , ce socle de tendresse.

A toi qui de la glaise insuffla cette terrible
chaleur humaine

A toi cette femme à l' aura divine.

Tu es courage .

Tu es de ces Etres limpides comme des mages .

Aurai-je assez de vie pour te remercier.

Tu es ma mère

Tu es mère tout court.

...Et je te dedie ce travail

Il est de toi .

Il est à toi .

A mon regretté père .

Toi cet homme si valeureux.

Tu es une valeur sûre .

Tu es le héros et l'anti héros .

Toi cet ETRE supérieur .

Je te regreterai toujours.

Revis ici à travers ma plume

Et reçois cette dedicace

A ADRIENNE ...!

REMERCIEMENTS

Mes remerciements à MONSIEUR MASSAMBA SALL SAMB ,mon directeur de projet ,mon professeur de route , qui a su se montrer d' une constante disponibilité, malgré ses multiples tâches de directeur du Groupement d'Ingenierie et de Construction (G.I.C). Ses précieuses suggestions ,son abondante documentation conjuguées à sa discrète courtoisie m'ont largement épaulé dans cette entreprise.

Monsieur MASSAMBA DIENE ,mon professeur de Mécanique des sols, qui a su se montrer courtois et surtout très disponible malgré ses tâches de professeur et de chef de département du genie civil de l' E.P.T . Ses conseils et ses directives m'ont été d' un apport certain;il a su me faciliter mes différentes démarches administratives.Qu'il retrouve ici l'expression de ma gratitude , simple mais sincère.

Puisse monsieur JOSEPH GABRIEL SAMBOU ,ingenieur ,adjoint chef d'arrondissement des T.P de THIES, retrouver ici ma modeste reconnaissance eu égard à sa franche collaboration ,sa documentation et son expérience qui m'ont été d'un "plus" très important.

A Messieurs BOURAMA DIAIKHITE ,DEMBA SALL, LAMINE N'DIAYE , respectivement directeur ,et techniciens de la D.E.R.M.(Direction de l'Entretien Routier et du Matériel), toute ma reconnaissance pour les informations de terrain et des différents documents du ministère dont ils ont su me faire positivement profiter .

Enfin à tous ceux qui m'ont aidé .

SOMMAIRE

L'objectif de cette étude est en fait multiple :

étudier la dynamique du processus de dégradation des chaussées souples revêtues d'une part ; analyser les méthodes d'approche de ces problèmes adoptés par les organismes concernés afin de situer leur adéquation et insuffisances puis d'émettre quelques suggestions ,d'autre part.

pour l'essentiel l'étude est composé de deux(2) principaux volets: ETUDE THEORIQUE du phénomène et ANALYSE DES METHODES en vigueur dans les services nationaux de nos pays .

Quelques essais viennent en appui à certains points de discussion Enfin des RECOMMANDATIONS sont faites en rapport aux méthodes et aux essais pour une meilleure maîtrise des dégradations de surface des chaussées revêtues .

CHAPITRE I . INTRODUCTION

Le développement économique , c'est le leit motiv qui revient souvent dans les discours de nos responsables africains .Or de tout l'appareil économique dans tous les pays du monde , la route occupe une place privilégiée ,encore plus aigüe en AFRIQUE que partout ailleurs.

En effet d'après des études d'experts de la Banque Mondiale (B.I.R.D) , environ sept cents (700) à huit cents millions de tonnes de marchandises , et près d'un milliard de passagers sont transportés chaque année et par kilomètre de route.

Le chiffre d'affaire du secteur routier dans l'économie nationale du SENEGAL représente environ cent cinquante milliards de francs CFA (150.000.000.000) . Le réseau routier du SENEGAL d'une longueur de quatorze mille kilomètres de (14.000 Km) dont quatre mille sont revêtues ,représente un investissement estimé environ à six cents milliards de francs (600.000.000.000) ,réseau dont soixante pour cent (60%) a plus de quinze ans , donc très dégradé . La récente table ronde de DAKAR du vingt cinq JANVIER 1990 , souligne encore l'importance de l'entretien du réseau routier en AFRIQUE . Cette rencontre a réuni les ministres ou leurs représentants du réseau routier de plusieurs pays dont :le NIGER, le SENEGAL , le MALI , le CAP VERT , la GUINEE BISSAU , SAO TOME et PRINCIPE ,le TCHAD en présence de la commission économique pour l'AFRIQUE (C.E.A) et les bailleurs de fonds . Au vu de tout ceci il nous parut fondamental de se pencher sur ce délicat problème

de l'entretien routier . L'enjeu est de taille , aussi nous sommes sous limités au cas des dégradations de chaussées revêtues .

Notre étude n'a pas la prétention d' apporter une solution toute faite aux problèmes de l'entretien . Elle s'évertue à baliser la route pour un meilleur devenir de l'entretien .

CHAPITRE II ETUDE THEORIQUE DE LA CHAUSSEE ET DE SES DEGRADATIONS

A- Présentation des défauts courants

Ce sont les efforts de cisaillement développés qui se manifestent au contact des pneumatiques et dont la résultante équilibre les forces de traction qui parfois entraînent les pertes de matériaux des couches non revêtues et le polissage des granulats des tapis superficiels hydrocarbonés

Cette usure de la couche superficielle est aussi fonction croissante de la vitesse des véhicules et se trouve aggravée par la présence de remorques (effet de poids).

La répétition des contacts intergranulaires entraîne les effets d'attrition, la production de fines et l'augmentation de la plasticité de la chaussée. Celle-ci devient moins rigide, les déformations sous charge augmentent, deviennent irréversibles et il en résulte une destruction plus ou moins rapide de la couche de roulement . Noter que la fatigue des couches inférieures résulte de la transmission des efforts verticaux à la fondation. (Voir l'effet de la fatigue des couches inférieures sur la couche de roulement). Pour ces phénomènes de fatigue voir les essais AASHO. Nombre de répétition et le poids des essieux , phénomène de fatigue: le poids intervient à la puissance 4 et le nombre de répétitions de manière logarithmique. On peut penser alors, que l'allure logarithmique des effets de répétition des charges tend vers une stabilité avec le temps. Il n'en est rien. En effet, au terme de leur évolution normale, les dégradations entrent dans une phase de déformations plastiques importantes; les revêtements, trop

sollicités, arrivent à perdre leurs qualités essentielles de perméabilité et des phénomènes secondaires encore plus rapides ne tardent pas à se manifester et à aboutir à leur ruine totale.

1.-Usure de la couche de roulement

Sous le trafic, les agrégats se polissent, la compacité augmente, la surface se ferme, le liant resseut et la rugosité diminue. Même en l'absence de circulation, les liants vieillissent par suite de lents phénomènes d'oxydation et de polymérisation accélérés par l'action des rayonnements ultra-violetts. Les fines produites par attrition contribuent à l'évolution en fixant de façon préférentielle ceux qui se trouvent en excès. La plasticité (des liants) diminue progressivement et les déformations des couches inférieures entraînent l'apparition de micro-fissures et la diminution de l'imperméabilité (l'accroissement de la perméabilité qui est similaire à la perméabilité secondaire due à la fissuration).

2 . Dégradations du revêtement

a.-La peau de crocodile

C'est une détérioration des enduits qui se manifestent par un réseau plus ou moins rectangulaires de fissures sur toute l'épaisseur du revêtement et pouvant entraîner la dégradation totale de celui-ci. On le lie souvent à une insuffisance de la résistance de la couche de base. On doit vérifier l'adéquation des caractéristiques de la chaussée et celles du trafic.

b.-Le faïençage

Il concerne les couches de surface en enrobés en general. Il consiste en un réseau très disparate dans des configurations de fissures pouvant réduire considérablement la perméabilité et les conséquences qui en résultent:à méditer.

Le faïençage résulte d'un défaut d'adaptation du revêtement aux déformation de la couche de base.Il en résulte en définitive,que le faïençage est du à la fatigue ou à l'insuffisance de la couche de base,à une diminution de la plasticité de la couche de roulement consécutive au vieillissement du liant et/ou l'excessive production de fines sous l'effet de la circulation(trafic).

c- Le désenrobage des gravillons de la couche de surface.

Il peut se présenter à tout âge de la chaussée et présente des intensités variables.

-Sur revêtement récent,il peut provenir d'un dosage trop faible en liant,ou d'un défaut d'adhésivité.

-Sur une chaussée ancienne est une manifestation normale d'usure,et en particulier de vieillissement du liant.

d.-Le ressuage.

C'est un phénomène qui s'observe surtout sur les enduits,lorsque le dosage en liant est trop élevé.Il peut se produire pour les memes raisons sur les matériaux enrobés.Lorsqu'il est trop prononcé il peut se former des plaques glissantes très dangereuses pour la circulation.Il est fréquent sur les emplois partiels mal exécutés .(Mise en oeuvre).

e.-Le glissement des revêtements .

Ce sont des mouvements très importants de la couche de surface qui se manifestent par un réseau de fissures paraboliques, qui, dans les cas extrêmes tendent vers de larges déchirures. Ils sont dus à la fois à un collage défectueux sur la couche de base et à une stabilité ou à une épaisseur insuffisante, des charges supportées, d'une couche en enrobés minces.

f.-L'usure des bords de revêtement.

Elle est due à l'absence de butée latérale. Elle est souvent aggravée par l'action des eaux de surfaces sur des accotements insuffisamment stabilisés ou en pente trop forte. Elle est particulièrement accélérée sur les routes revêtues sur 3,50 m de largeur. (Exemple: NIGER).

3.-Dégradations localisées.

a.-Ornières et flashes.

Elles proviennent d'un défaut de résistance d'une couche inférieure de la chaussée ou de la fondation. Elles peuvent être le résultat d'une insuffisance de stabilité d'une couche de surface en enrobés.

Si les ornières et flashes sont causées par un défaut de résistance des couches inférieures, elles s'accompagnent souvent, dans ces cas, de fissures d'autant plus prononcées que ce défaut est grand.

b.-Les affaissements des bords de chaussée.

Comme l'usure des bords de revêtements, ils sont dus à une insuffisance ou à une absence de butée latérale au niveau des accotements ou une portance insuffisante du sol de fondation. Ces types de dégradation se rencontrent sur les routes revêtues sur une plate-forme étroite sans accotements suffisants.

Ils se rencontrent aussi souvent le long des accotements non dérasés favorisant les infiltrations d'eau de pluie en bordure des chaussées (réduction de la portance des couches inférieures) .

Un défaut de drainage peut aussi être la cause de ces affaissements.

c.-Déformations d'aspect ondulatoire.

En effet des déformations d'aspect ondulatoire peuvent se produire sur des revêtements épais ou sur des couches de base en enrobés fins aux carrefours, aux accès d'ouvrages ou dans les rampes. Elles sont la conséquence des freinages répétés et sont imputables à un défaut de stabilité de l'enrobé.

d.-Les nids de poules.

Ce sont des cavités à bords francs plus ou moins profonds, caractérisées par la destruction complète de la couche de roulement et l'éjection des quantités importantes de matériaux de corps de chaussée. Ils se propagent parfois en chapelet entraînant alors la ruine complète de la route. Ils n'ont pas de causes spécifiques. Ils sont constitués simplement au stade avancé de

l'évolution de la plupart des désordres sus-mentionnés lorsqu'ils ne sont pas traités à temps. Source d'inconfort pour les usagers de la route, danger pour leur sécurité et entrave à l'assainissement et à une bonne tenue de la chaussée. D'où l'importance d'une bonne politique de l'entretien routier de manière générale. Nous avons vu que ce type de dégradation est l'aboutissement d'un long processus de détérioration ou la résultante de plusieurs autres dégradations individuelles. Mais ces dégradations individuelles initiatrices du phénomène sont elles aussi tributaires des matériaux et leur mise en oeuvre, de l'environnement et du trafic entre autres.

B) Les Matériaux

B1) Agregats

a. Rôle

Notre étude concernant seulement la couche de roulement (revêtement) nous allons situer ce rôle au niveau seulement de celle-ci. Nous reviendrons sur l'influence des granulats sur le comportement des couches inférieures.

Ils créent la rugosité du revêtement, lui confèrent donc ses propriétés drainantes en surface. Pour réaliser cette fonction les granulats doivent posséder des qualités d'adhésion vis à vis du liant, et de résistance vis à vis de l'agression de la circulation et des agents atmosphériques.

b.Caractéristiques

On distingue les caractéristiques intrinsèques et les caractéristiques de fabrication.

Les caractéristiques intrinsèques qui caractérisent la résistance des granulats, dépendent surtout de la nature et de la qualité des gisements;néanmoins une amélioration judicieuse (concassage sélectif) permet une certaine amélioration de ces caractéristiques . Quant aux caractéristiques de fabrication,elles sont essentiellement liées aux modalités d'élaboration mais aussi à la nature des matériaux d'origine.

L'essai de fragmentation dynamique (FD) norme NF 18574 pourra être utilisé après étalonnage avec l'essai Los Angeles.

Il est important de veiller à l'homogénéité de la qualité des gravillons.les granulats issus d'une roche altérée et friable doivent être proscrits,ceux-ci pouvant être facilement décelés par l'essai Micro-Deval en présence d'eau (MDE) .

b-1 Caractéristique de fabrication:

Elles dépendent essentiellement des modalités de fabrication , pour les enduits.

***Granularité:**

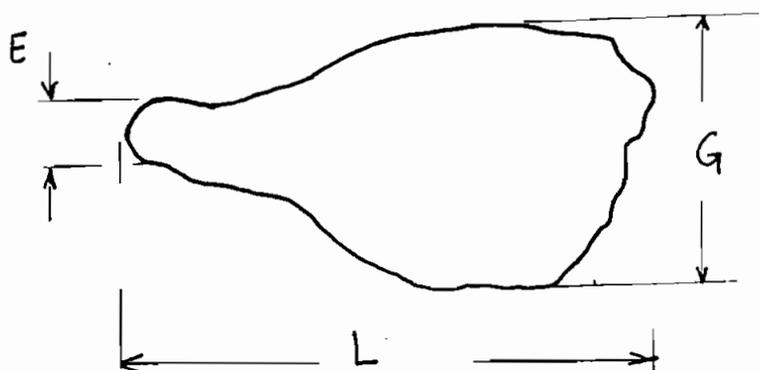
Les spécifications relatives à l'étalement des granularités sont assez sévères,de façon à obtenir une mosaïque homogène.

***Forme:**

Le rapport G/E caractérise la platitude d'une granulation.

Si G/E est supérieure ou égale à 1,58 alors on a un granulat plat. G et E étant respectivement la grosseur et l'épaisseur du granulat.

Figure 1



G : Mesuré par tamis à maille carrée

E : Mesuré par tamis à barres

Le coefficient d'applatissement (A) est le pourcentage en poids des granulats plats.

Une trop forte proportion de granulats plats entraîne une modification du "pouvoir couvrant", donc des dosages en granulats et en liants. En outre l'excès d'éléments plats fragilise les granulats.

*Angularités:

Pour les granulats qui proviennent de matériaux alluvionnaires, le rapport de concassage (RC) est le rapport entre la dimension minimale du matériau d'origine et la dimension maximale du granulat obtenu.

// ***Popreté:**

La présence de fines nuit parfois à l'adhérence; le contact intergranulaire n'est pas effectif.

// ***Granularité:**

Une granularité assez uniforme est un gage de bonne tenue vis à vis de la ségrégation qui est cause d'hétérogénéité des propriétés de la couche.

Les agrégats absorbants tendent à accroître la viscosité de la couche de liant qui les enrobe par absorption sélective des constituants les plus légers du produit bitumineux.

// ***Porosité:**

Une très grande porosité expose la structure à une grande sensibilité au phénomène de retrait et au fluage. Une incompatibilité agrégat-liants peut conduire à une dégradation trop prématurée de la couche revetue.

// B2 .LES LIANTS

Nous nous intéressons essentiellement aux liants hydrocarbonés et un survol des liants hydrauliques dans les cas des enduits. Nous ferons une brève analyse sur les enrobés.

Nous nous pencherons essentiellement sur les caractéristiques essentielles des liants.

// Liants hydrocarbonés.

Du point de vue pratique, les qualités essentielles d'un matériau bitumeux sont les suivantes:

1. Il doit posséder un bon pouvoir de cimentation ou une bonne cohésivité.

2. Il doit posséder et garder une bonne affinité ou adhésivité pour les substances minérales.

3. Il doit être physiquement stable, c'est-à-dire résistant au vieillissement.

4. Il doit avoir un caractère uniforme et ne contenir que des traces d'impureté.

5. Il ne doit pas poser de problème à la construction. Il doit posséder une bonne viscosité, un temps de soudage ou de prise raisonnable, etc.

Les conditions sus-mentionnées sont rarement réunies dans la pratique; encore moins pour les chaussées d'un âge avancé. ainsi différents phénomènes relatifs aux liants sont souvent à l'origine des désordres. Nous en recensons les plus fréquents:

// # Vieillissement

Il est du à trois causes principales :

- Evaporation des huiles fluidifiantes du bitume (Emulsion)
- Oxydation
- Polymérisation par des ultra-violets

Le vieillissement se manifeste par un revêtement présentant des fissures désordonnées dès les premiers jours de la mise en oeuvre.

Ceci constitue une initiation dangereuse à des dégradations futures: la couche ne remplit plus efficacement son rôle d'imperméabilité du corps de la chaussée, ce qui en réduisant la capacité portante des couches structurales, même vers des déflexions croissantes, et avec l'effet conjugué du trafic jusqu'à la ruine.

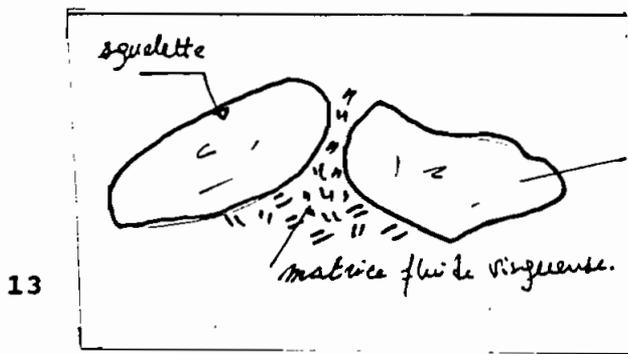
D'autre part pour les émulsions, le vieillissement peut provenir d'un entreposage prolongé qui, en provoquant une sédimentation de l'émulsion la prédispose à un vieillissement accéléré

La sédimentation se manifeste par un grossissement croissant des globules de la phase discontinue.

// # La perte de cohésivité

La cohésivité garantit une déformation homogène de l'assemblage squelette et matrice fluide dans le cas des émulsions.

figure 2



La perte de cohésivité conduit à des désordres dus à l'arrachage de matériaux solides et à des fissurations internes au cours des déformations; ce qui initie des désordres ultérieures plus graves.

// **Insuffisance d'adhésivité**

Elle se traduit souvent par l'abondance d'agrégats saillants nus non recouverts. Cela s'observe pour les émulsions en présence d'eau pour des agrégats dont le caractère hydrophile est très prononcé: leur affinité avec l'eau étant plus grande que pour le bitume, les molécules d'eau se substituent à celles du bitume. Pour une bonne mise en oeuvre un bon mouillage est une bonne préparation contre un pareil comportement des émulsions. Une mauvaise adhérence peut entraîner un départ du revêtement.

D'autre part, un défaut de liant entraîne un mauvais accrochage des granulats et un excès entraîne une remontée de liant, avec comme conséquence une prédisposition à une ou à des dégradations que nous avons énumérées tout au long de la présente étude

Précisons que les émulsions de bitume sont obtenues par la mise en suspension stable de particules très fines de bitume dans l'eau. Elles sont fabriquées en usine par dispersion énergétique en présence d'un émulsif, d'un mélange grossier de bitume et d'eau. L'émulsif est un produit tensio-actif qui, d'une part, facilite la dispersion en abaissant la tension interfaciale eau-bitume, et d'autre part assure la stabilité de l'émulsion en se

fixant à la surface des globules de bitume qu'il entoure d'un film protecteur.

Selon la nature de l'émulsif, l'émulsion est dite anionique (basique) ou cationique(acide). Dans le premier cas, il s'agit le plus souvent d'un savon alcalin d'acide gras, dans le second cas, il s'agit d'un sel minéral d'amine grasse.

// # **Phénomène de rupture**

Ce qui précède nous permet de mieux cerner lce phénomène qui expose le revêtement fait à l'aide d'émulsions, à une usure prématurée.

En effet, acide ou basique, une émulsion n'est stable que dans des conditions de pH déterminées. Si l'on modifie ces conditions soit par évaporation de l'eau, soit par addition d'un acide ou d'une base, c'est-à-dire en pratique, au contact des granulats, le film émulsif qui enrobe les globules de bitume se disperse. Ceux-ci s'éliminent et l'eau s'élimine. C'est le phénomène de la rupture.

Les émulsions anioniques les plus anciennement fabriquées conviennent seulement pour l'enrobage des granulats calcaires. En présence de granulats acides, elles se rompent sans y adhérer. Les émulsions cationiques, d'utilisation plus récente, et plus chères conviennent particulièrement pour les matériaux silicieux. Certaines d'entre elles qualifiées de "biactives" adhèrent également aux matériaux calcaires et sont donc particulièrement intéressantes.

Une des caractéristiques importante des liants est la viscosité. Nous nous proposons une brève analyse de cette propriété avant de situer son rôle dans les dégradations.

La viscosité des bitumes:

Elle varie avec la température et c'est cette propriété qu'on appelle la susceptibilité thermique.

La pénétration d'un bitume est liée à sa viscosité et on a approximativement:

$$np^2 = \text{Const}$$

Etant donné que la pénétration varie avec la température selon la loi:

$$P = P_{25} \exp[h(t-25)]$$

P et P_{25} étant respectivement les pénétrations à t et à 25°C

Le paramètre "h" caractérise la susceptibilité du liant.

Un essai de pénétration donne une mesure indirecte de la viscosité à une température donnée et un essai Bille et Anneau qui mesure une température d'équiviscosité, permettent de déterminer la variable h:

$$h = \frac{20 - IP}{10 + IP} * \frac{1}{50}$$

La pénétration des bitumes à la température Bille et Anneau étant sensiblement égale à 800.

Généralement on emploie l'"Indice de pénétration" IP plutôt que h pour caractériser la susceptibilité.

Plus sa valeur est élevée, moins le bitume est susceptible. L'insuffisance de pénétration a comme conséquence une faible adhérence surtout dans le des enduits superficiels.

Viscosité des Cut-Back

La viscosité des Cut-Back évolue très rapidement dès l'emploi, par suite de l'évaporation du solvant. A ce niveau il importe de signaler que suivant la nature du solvant on distingue trois variétés de Cut-Backs.

a.- Les bitumes fluides à prise rapide (RC) contenant de l'essence.

b.- Les bitumes fluides à prise semi-rapide contenant du kérosène (MC)

c.- Les bitumes fluides à prise lente (RC) contenant de l'huile légère.

Ces solvants: essence, kérosène et huile étant des produits de la distillation du pétrole et de volatilité décroissante.

Les Cut-Backs ou bitumes fluidés sont destinés à permettre un emploi soit à la température ambiante, soit après un chauffage modéré. La viscosité du bitume est considérablement abaissée par adjonction d'un fluxant.

A partir de la genèse des cut-backs on voit qu'il est

dangereux de choisir un RC lorsque la mise en oeuvre se fait à des températures élevées parce que la mise en oeuvre devient délicate et même il peut en résulter de grandes ruptures dans le squelette du revêtement dès les premiers jours de la mise en service de la chaussée.

Une attention toute particulière doit donc être portée au choix du type de cut-back si ce dernier est le liant utilisé.

Les émulsions

La viscosité des émulsions à température donnée dépend de la nature de bitume, de la finesse de dispersion, de la viscosité du milieu dispersif et de la teneur en bitume.

Les facteurs les plus importants sont la teneur en bitume (au dessus de 60% les émulsions sont rapidement très visqueuses) et le milieu dispersif.

La viscosité décroît lorsque la température croît. Par exemple une émulsion basique 60% qui à 20°C a une viscosité Engler de 9, verra celle-ci s'élever à 11 à 10°C et descendre à 6 à 40°C. La susceptibilité est d'ailleurs d'autant plus élevée que la teneur en liant est plus importante.

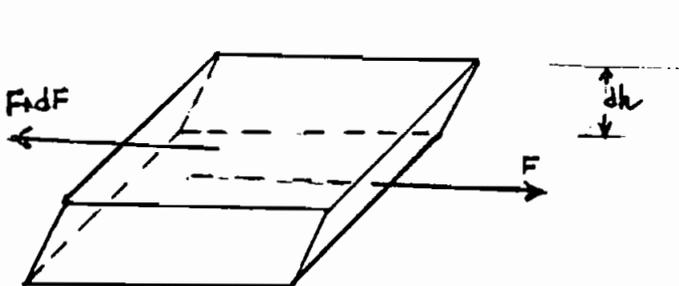
On peut estimer que selon l'intensité de la circulation, la viscosité minimum nécessaire du liant pour qu'il résiste à l'arrachement par les roues des véhicules se situe entre 300 et 600 poises. Il est donc fondamental que cette opposition entre le séchage du liant (surtout cut-back) et les effets du trafic soit résorbée grâce à un séchage rapide ou une forte

viscosité initiale. D'autre part le risque de déplacement par l'eau est écarté avec une augmentation de la viscosité. La viscosité est la caractéristique la plus importante et sur laquelle nous reviendrons.

La viscosité des liants hydrocarbonés au moment de leur mise en oeuvre

Si dans un corps déformable, deux éléments de surface parallèles ds , distants de dh , ont une vitesse relative dv , on dit que le corps est visqueux lorsque pour maintenir ce gradient de vitesse dv/dh il faut exercer sur chaque élément ds des efforts F_1 et F_2 tel que $F_2 - F_1 = dF$

figure 3



$$\frac{dF}{dS} = \mu \frac{dV}{dh}$$

Déformation d'un liant hydrocarboné

μ est appelé viscosité dynamique
 dF/dS contrainte de cisaillement
 dV/dh gradient de vitesse

Si pour une température donnée, μ ne dépend pas du gradient de vitesse, le corps considéré est dit Newtonnien.

Soit ϵ la déformation et σ la contrainte ;on a:

$$d\epsilon/dt = \sigma/\mu$$

$$\mu = \text{const}; \epsilon = (\sigma/\mu)t$$

μ/t est l'équivalent d'un module de cisaillement et on appellera module de déformation $S=3\mu/t$ puisque, entre les modules de cisaillement et les modules de Young, on a le rapport 1/3 dans le cas des milieux incompressibles.

Interactions liants-granulats

Le but principal lors de la préparation des couches bitumineuses est d'obtenir une cohésion efficace et d'assurer une rigidité élevée de la chaussée.

Cette fonction d'agglomération des granulats nécessite certains préalables:

- a.-Un bon mouillage des grains minéraux par le liant fluide
- b.-Une bonne adhérence du liant durci aux grains minéraux
- c.-Le maintien de cette adhérence même en présence d'agents qui tendent à se substituer au liant à la surface des grains.

Le plus dangereux des agents c'est toujours l'eau puisqu'il est le plus fréquent.

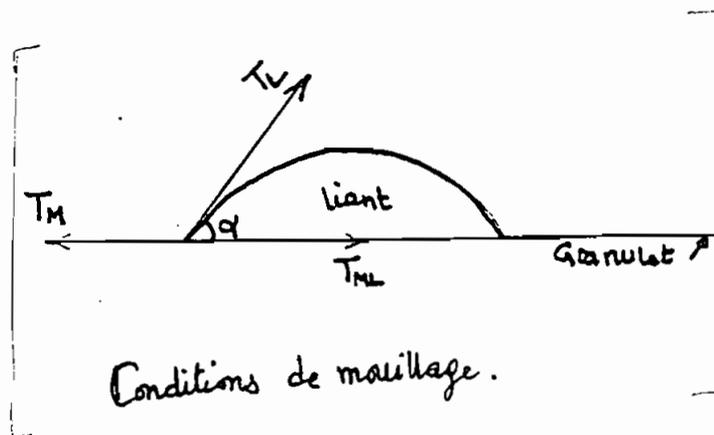
Il existe des adjuvants qui permettent d'améliorer les conditions de contact granulat-liant; ce sont les dopes. Nous y reviendrons plus tard. Disons seulement qu'ils modifient à la fois le mouillage et l'adhésivité.

a- Le mouillage

Condition nécessaire mais non suffisante pour une bonne adhésivité du liant et du granulat, est l'étalement en film mince du liant liquide à la surface du granulat supposé à la même température que le liant. Disons tout de suite que si un liant chaud est répandu sur un granulat froid, le liant se fige immédiatement et le mouillage ne peut se produire.

Considérons une goutte de liant s'étalant à la surface d'un solide. Nous adoptons l'hypothèse d'ailleurs justifiée de l'existence de tensions tant à la surface du liant (T_l) qu'à la surface du granulat (T_m) et qu'à l'interface du liant et du granulat (t_{ml}):

Figure 4



A l'équilibre on pourra écrire:

$$T_m = T_l \cdot \cos(\alpha) + t_{ml}$$

* Si $T_m - t_{ml} > T_l$ l'équilibre est impossible et il y a étalement du liant c'est-à-dire mouillage.

* Si $T_m < T_l - t_{ml}$ l'équilibre est aussi impossible et il y a retraction du liant et absence de mouillage.

Le mouillage sera d'autant plus meilleur que T_m est plus

grand et $T_{ml} - T_l$ est faible. Les liants à faible tension superficielle et interfaciale mouillent bien.

Notons que la viscosité intervient quant à la rapidité du mouillage mais n'influence pas le résultat final.

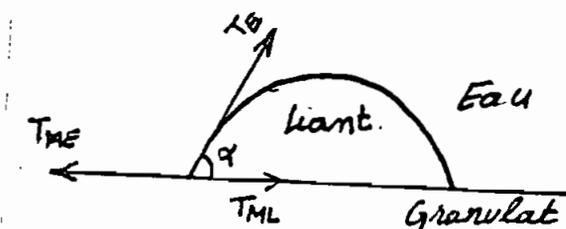
L'eau qui a une tension superficielle élevée mais une tension interfaciale faible est un bon mouillant et le mouillage est rapide.

// b- Le déplacement par l'eau

Ce point rejoint notre phénomène de désenrobage dont nous avons fait mention parmi les dégradations du revêtement.

A la suite d'un défaut quelconque d'enrobage il se crée des points du granulat où le liant est lacunaire; cela crée une situation où tôt ou tard on aura trois phases en contact: liant-granulat-eau. On a la situation suivante

Figure 5



T_{me} : tension interfaciale eau/granulat;

T_{ml} : tension interfaciale granulat/liant;

T_e : la tension interfaciale eau/granulat

La condition d'équilibre des trois phases nous

donne:
$$\cos\alpha = \frac{T_{me} - T_{ml}}{T_{le}}$$

T_{me} étant généralement faible, $\cos\alpha$ est donc négatif et il y a formation de gouttes de liant, celui-ci étant généralement chassé par l'eau. Cependant ce déplacement est gêné par l'existence de liaisons mécaniques ou chimiques qui ont pu s'établir entre le liant et le granulat.

C .- L'ENVIRONNEMENT

Nous considérons sous cette rubrique essentiellement la température, les vents et le régime pluviométrique.

// 1.-La température

L'évolution de la viscosité dépend de la température à laquelle le séchage s'effectue. Ceci est capital en ce qui concerne les enduits superficiels, car si une température élevée favorise l'évaporation, elle fluidifie le liant et peut conduire, aux premiers âges de l'enduit à une faible stabilité sous la circulation. Ceci rejoint ce que nous avons vu quant au phénomène de la susceptibilité thermique des liants. La température influe aussi sur le module de rigidité du bitume. Des essais anglais ont montré que la déformation supposée tolérable lors des études de fatigue, augmente avec la température et elle est de la forme:

$$N = K \epsilon^{-6}$$

Où k dépend de la température, des conditions de l'essai et de la nature du liant.

La température intervient aussi dans le phénomène de vieillissement, prélude à une perte de souplesse du revêtement surtout dans le cas des cut-backs.

// En plus, une sous-estimation de ce paramètre conduit certainement à d'énormes difficultés de mise en oeuvre pour les bitumes fluides, ce qui entraîne des conséquences dont le moindre sera un bitume mou et une surface ondulée dès les premiers jours de la mise en service. Il est donc essentiel de connaître le point

de ramolissement des bitumes avant leur mise en oeuvre surtout dans nos pays à climats chauds.

La plupart des caractéristiques intéressantes sont influencées par ce paramètre; nous en reparlerons quand nous aborderons les autres formes de revêtements. Par exemple la rigidité du mélange bitumineux dépend énormément de la température.

2. Le régime pluviométrique et le drainage

Le régime pluviométrique intervient à différents niveaux:

* Au niveau des couches inférieures

Plusieurs phénomènes peuvent intervenir à ce niveau.

D'abord les problèmes de tassement, ce qui se repercute sur le reste de la chaussée en lui donnant cette configuration de cuvette dans le profil en long. Ainsi, en plus des efforts statiques (cisaillement, poinçonnement, etc) il y a du fait de ces cuvettes- abstraction faite de l'un des efforts dynamiques sur la chaussée qui amplifient la sollicitation sur le revêtement. Ceci provoque l'apparition de fissures initiatrices de plus grands désordres ou tout simplement en cas de mauvaise cohésivité l'apparition pure et simple de nids de poule.

* Ensuite le retrait. L'infiltration de l'eau en hivernage due à une proximité des fossés non protégés, ou d'une élévation du corps de la chaussée non suffisante par rapport aux fossés, s'accompagne de tassements- ce qui nous ramène à la situation précédente- ou de la fissuration de profondeur qui ruine

prématurément la chaussée. En effet du fait même de la discontinuité provoquée sur le revêtement par de telles fissures (diagonales en générale) celui-ci est d'office condamné à l'arrachement rapide puis à l'apparition systématique de nid de poule.

* Enfin, le gonflement. La présence de fines dans les couches inférieures dues à la granulamétrie de départ, par l'attrition sous l'effet de trafic, s'accompagne de ce phénomène de gonflement en période pluvieuse. Le gonflement se repercute sur le revêtement (condition d'équilibre; variation de pression entraînant variation de volume) qui présente ainsi une zone d'initiation de dégradations locales si les couches au-dessus n'ont pas les épaisseurs nécessaires pour absorber cette tendance. Les phénomènes alternatifs de retrait et de gonflement de certains sols tiennent à la nature minéralogique des argiles dont ils sont constitués. Ces matériaux appartenant généralement au groupe de montemorillonite, ont une structure en feuillets qui peuvent réversiblement absorber et rejeter de l'eau selon les conditions hydriques du milieu. Les variations de volume et de pression qui en résultent peuvent être énormes.

En saison sèche, une importante déshydratation se produit, conduisant à l'ouverture de fissures de retrait qui peuvent atteindre 10 cm de large et 3 à 4 cm de profondeur. En saison humide l'eau pénètre par des fissures et imbibe le terrain qui subit un gonflement, ruinant l'ouvrage qu'il supporte.

* A noter la contribution des arbres dans le processus de

dessiccation de la plate forme si ceux-ci sont situés à moins de 5m au moins de celle-ci.

* 3 Drainage

En cas de comportement défectueux d'une chaussée, il est impératif de vérifier si le drainage est convenable avant d'entreprendre la recherche dans d'autres directions. En effet, comme nous l'avons vu, l'imbibition de la plate-forme et les remontées capillaires, principales causes de perte de portance des sols contre lesquelles il faut se prémunir. IL est indispensable de bien réaliser les deux types de drainage suivants:

* * Le drainage superficiel pour l'évacuation des eaux de pluies

* * Le drainage profond dont le but est l'élimination de l'eau excédentaire contenue dans les sols.

* Si le premier est souvent assuré par des accotements suffisants en largeur et protégés (enduits et imprégnation) et un talus de pente convenable et un revêtement convenable, le second lui est parfois fondamental et une attention spéciale doit lui être portée. Il peut arriver d'avoir une couche de base perméable entre une couche de roulement et de fondation imperméable, si aucun drainage en profondeur n'est prévu, l'infiltration latérale peut nuire considérablement à la chaussée à travers la couche de base.

* Il ne faut pas que le niveau de l'eau dans les fossés soit très voisin de celui la couche sinon il s'ensuivrait une infiltration latérale. Celle-ci est d'autant plus dangereuse que le temps de contact avec la couche, pour des profils en long à faible pente, peut

être relativement long.

4 Le vent

* Il intervient dans l'accélération du phénomène de vieillissement (en déplaçant à chaque fois l'équilibre liquide-vapeur du liant sous haute température) du liant, le phénomène de retrait de même

Le vent, par l'apport de fines qui, en polluant la chaussée provoque des décollements généralisés entre autres conséquences

* L'environnement intervient aussi dans la tenue de la chaussée par l'intermédiaire des autres utilisations de l'espace urbain et interurbain. Pour le Sénégal, citons la SONATEL, la SENELEC, la SONESS (équivalents aux PTT, NIGELEC et SNE respectivement pour le Niger)

Ces organismes lors de l'extension des leurs réseaux sont parfois amenés à casser la chaussée afin d'enfuir leurs différents éléments (foureaux, conduites, cables). Le racommodage qui s'ensuit est souvent inadéquat et cela est critique dans la plupart des cas pour la chaussée. D'abord la largeur de la chaussée concernée n'est pas suffisante pour un compactage mécanique, ce qui engendre sous le trafic un tassement beaucoup trop prononcé par rapport au reste du tronçon. Ce sont parfois l'origine de certaines formes de "cuvette" qu'on rencontre dans nos pays. Ce qui ajoute des effets dynamiques aux autres sollicitations de la chaussée en cet

endroit, d'où création de zones de faiblesse. Ensuite, il y a discontinuité dans le revêtement, ce qui est nocif vis-à-vis de l'étanchéité de la surface. Il s'ensuit la création des points d'infiltration et les conséquences de cette dernière sont évidentes.

B- EFFETS DU TRAFICS

Il y a un fait important qu'il faut signaler ici; la plupart de nos chaussées ont été dimensionnées suivant le guide CEBTP (Guide de dimensionnement des chaussées pour pays tropicaux), or ce guide propose un dimensionnement basé essentiellement sur le CBR, sans réellement tenir compte des paramètres du trafic. Nous nous proposons d'analyser certaines méthodes qui prennent en considération les variables autres que le CBR, telles que le trafic et les variables connexes.

Nos considérations porteront sur les effets suivants du trafic:

- 1- Les effets statiques
- 2- Les effets de la fréquence
- 3- Les effets du spectre de chargement
- 4- Les effets des pneumatiques sur le revêtement.

Il est important de signaler que :

Toute méthode de dimensionnement des chaussées doit, pour être suffisamment rationnelle en soi, définir rigoureusement les trois concepts suivants :

- 1- La théorie utilisée pour définir le paramètre de ruine
- 2- Les propriétés du matériau nécessaires pour conduire cette théorie
- 3- La relation entre la valeur de ce paramètre en question et la ruine ou le niveau de performance requis.

Considérant les concepts des couches multiples nous faisons l'hypothèse que pour chaque couche les conditions suivantes sont réunies :

- 1- Chaque couche est homogène, isotrope
- 2- Chaque couche est d'épaisseur finie sauf le sol-support
- 3- Toutes les couches sont latéralement (transversalement) infinies
- 4- Il n'y a pas de déplacement relatif entre les couches
- 5- Nous considérons le module élastique E et le coefficient de Poisson U comme principales propriétés intrinsèques des matériaux constituant les couches.

La théorie linéaire élastique des couches multiples est actuellement la plus utilisée (même si en Afrique la méthode de CBR est encore de mise, nous en parlerons plus tard).

① 1- Effets Statiques

a- Système à une couche : C'est le sol-support

Rappelons que BOUSSINESQ a développé pour une charge ponctuelle et un milieu homogène, isotrope et élastique, les relations suivantes

$$\sigma = k \frac{p}{z^2}$$

$$k = \frac{3/2\pi}{[1 + (r/z)^2]}$$

σ_z = contrainte verticale

r = distance horizontale radiale par rapport au point d'application de la charge

z = profondeur.

Disons seulement que σ_z est maximale sur les faibles profondeurs sous le point d'application de la charge ponctuelle.

Mais les charges développées par les pneumatiques sont des charges réparties suivant des cercles (Foster et Ahlvin) ou selon

SANBORN et YODER suivant des surfaces semi-ellipsoïdales. En considérant l'approche de AHLVIN et ULERY qui ont généralisé celle de FOSTERET AHLVIN ($\mu = 0,5$) on a :

$$\begin{aligned}\sigma_z &= p (A+B) \\ \sigma_r &= p[2\mu A + C + (1-2\mu)F]\end{aligned}$$

$$\epsilon_z = \frac{p(1+\mu) [(1-2\mu)A + B]}{E_1}$$

$$\epsilon_r = \frac{p(1+\mu) [(1-2\mu)F + C]}{E_1}$$

$$\text{Déflexion verticale } D_z = - \frac{p(1+\mu)a}{E_1} [z/a A + (1-\mu) H]$$

Les variables A,B,C,D,E,F,G,H, sont des fonctions de z/a , r/a ; ces fonctions tabulées (voir tables en annexe)

L'étude des effets statiques sur une couche nous permet sous certaines hypothèses de déterminer les déflexion du sol support. En effet si nous supposons que les couches au-dessus du sol support ne contribuent pas ou peu, à la déflexion verticale on a :

$$\text{Pour } \mu=0.5 \quad D_z = 1.5pa (z/a + H/2)$$

Cette expression montre que la déflexion verticale est :

- directement proportionnelle à la pression de gonflage p
- directement proportionnelle au rayon de charge a

- directement proportionnelle au rapport z/a
- directement proportionnelle aux variables A et H qui elles-mêmes dépendent de z/a et r/a .

A est maximale pour $z/a = 0$ et $r/a = a$ c'est-à-dire au centre du cercle immédiatement sous la roue où $A = 1$

Pour $z/a=0$ $r/a=0$ on a : $D_z = \frac{1.5pa}{E_1}$

✗ Donc à la surface du sol support la déflexion horizontale, au centre de la surface chargée, dépend uniquement de P , a et E_1 . Plus la couche est rigide plus D_z est faible et pour une même valeur de E , D_z croît avec la charge supportée par une roue :

On sait que $a = (P/p\pi)^{0.5}$

$$D_z = \frac{1.5P}{\pi a E_1}$$

D'où, si toutes les variables sont gardées constantes, D_z croît sous des charges/roue de plus en plus élevées.

b- Système à deux couches

Rappelons qu'une chaussée souple est conçue de telle manière qu'on ait une décroissance des modules élastiques avec la profondeur. Ceci dans le but de réduire les contraintes et les déformations sur le sol-support telle que calculés pour le cas

homogène monocouche précédent.

La solution du problème nous le devons à BURMISTER. Les hypothèses d'interface demeurent variables.

BURMISTER a établi des courbes d'influence en fonction des rapport E_1/E_2 , du coefficient σ/p et du paramètre z/a

Ce système à 2 couches correspond en pratique à une couche de base d'épaisseur h et de module élastique E_1 sur un sol-support d'épaisseur infinie et de module E_2 . Il apparaît ici toute l'importance d'avoir un couche de base de grande rigidité afin d'atténuer les contraintes sur le sol-support.

Exemple : A l'interface des 2 couches ($z/a = 1$) on :

pour $E_1/E_2 = 2$; $\sigma_{z=}$ 55%

$E_1/E_2 = 100$; $\sigma_z = 10\%$

Il est donc évident qu'en plus, lorsque l'épaisseur de la couche de base augmente on a davantage d'atténuation des contraintes :

pour $z/a=3$ et $E_1/E_2 = 100$ on a $\sigma_z/p=5\%$ la contrainte sur le sol-support σ_z de 0,05 fois la pression de contact . La réduction est assez large. L'observation des courbes de BURMISTER montre que plus l'épaisseur croît plus l'influence des rigidités relatives tend à être négligeable (voir annexes) . La déflexion totale peut s'exprimer comme suit :

$$D_{z=} (1.5pa/E_2) F_2$$

p = charge sur une plaque circulaire

a = rayon de la plaque

E_2 = module élastique du sol-support

F_2 = facteur adimensionnel dépendant de z/a et de E_2/E_1 .

Les valeurs de F_2 sont tabulées (Voir Annexes).

Il apparaît ici que pour un sol support donné ($E_2 = \text{cte}$) pour une pression de gonflage donnée et un rayon a donné ($P = \text{cte}$, $a = \text{cte}$) . La déflexion totale à la surface du sol-support dépend de la rigidité de la couche de base et de l'épaisseur de celle-ci.

La déflexion est considérablement réduite lorsque l'épaisseur et la rigidité de la couche de base croissent; ou encore pour un rapport E_2/E_1 donné, décroît pour z/a croissant.

HUANG a aussi développé une expression permettant de déterminer la déflexion à l'interface des deux couches par extension de la théorie de Burmister :

$$D_s = (pa/E_2)F$$

Où F est une fonction de la profondeur relative z/a , du rayon rapporté au rayon du disque de chargement r/a . Pour chaque rapport de module une série de courbes permettent de déterminer F (sous hypothèse que $u = 0,5$). La connaissance de D_s permet de déterminer la déflexion partielle de la couche de base D_p :

$$D_T = D_p + D_s, \text{ déflexion totale}$$
$$D_p = D_T - D_s$$

Les mêmes remarques restent valables quant à l'épaisseur de la couche supérieure et du rapport E_1/E_2 sur la déflexion interfaciale.

Il apparaît ici que plus D_s est faible plus D_p tend vers D_T . D_s faible si, pour $E_1/E_2 = \text{cte}$ et $\sigma/a = \text{cte}$ on a z/a croissant.

Exemple : $E_1/E_2=25$; on a pour : $z/a=1$ $F=0.53$

$$z/a=5 \quad F=0.09$$

Soit pour une différence de profondeur de 4 unités (rayon de charge) une déflexion réduite au 1/6 de sa valeur

D'où l'importance de toujours chercher les épaisseurs convenables. Nous en reparlerons dans l'aspect DESIGN du problème.

$$D_p = pa/E_2(1.5F^2 - F)$$

Le comportement idéal correspondrait à $D_T = D_s = D_p = 0$

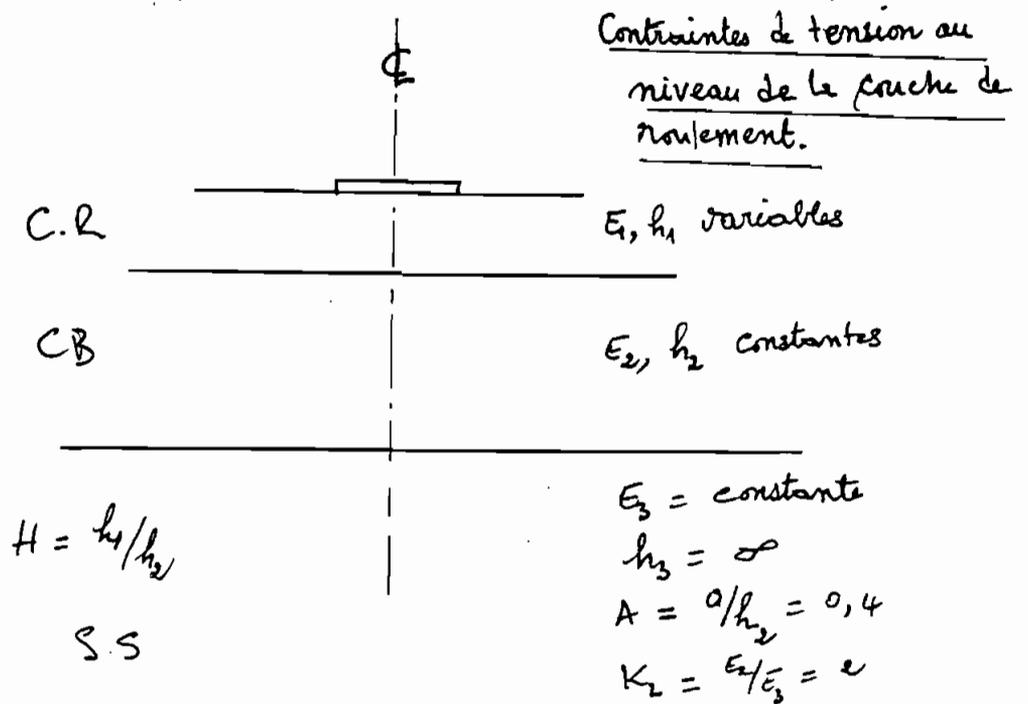
① c- Système à 3 couches

Les travaux de BURMISTER ont permis de solutionner analytiquement les systèmes élastiques à deux et trois couches (contraintes et déplacements). Cependant c'est à FOX et ACUM que nous devons les premières tables résumant les contraintes normales et radiales aux interfaces des couches dans les systèmes à trois couches dans l'axe de la surface chargée (plaque).

JONES et PEATTIE ont à leur tour développé ces dernières solutions à une plus grande gamme de solutions.

La structure-type que les paramètres tabulés et mis en abaque par ces deux derniers auteurs permettent de solutionner, est la suivantes :

FIGURE 6



Le système à 3 couches est, de tout ce que nous avons vu précédemment, celui qui approche le mieux la réalité. En effet, la forme classique d'une chaussée souple c'est, suivant l'ordre des modules décroissants :

- 1 couche de roulement (CR)
- 1 couche de base (CB)
- 1 sol-support (SS)

Bien sûr, sous certaines conditions la nécessité s'impose de prévoir une couche de fondation (lorsque le sol support n'a pas les caractéristiques mécaniques minimales requises).

Ces abaques de Peattie et les tables de JONES concernent les contraintes suivantes :

- σ_{z1} : contrainte verticale à l'interface 1
- σ_{z2} : contrainte verticale à l'interface 2
- σ_{r1} : contrainte horizontale à la base de la couche 1
- σ_{r2} : contrainte horizontale à la base de la couche 2
- σ_{r3} : contrainte horizontale à la surface supérieure de

la couche 3.

Les contraintes verticales sont données sous forme graphique par Peattie(voir annexes)

Les contraintes horizontales sont obtenues par Jones sous formes de tables(voir annexes) .

Remarques

Ces solutions sont validées seulement sous les conditions suivantes :

- 1- les contraintes sont calculées dans l'axe de symétrie d'une charge donnée (P) voir figure précédente.
- 2- $u = 0,5$ pour toutes les couches.
- 3- les contraintes sont positives en compression.
- 4- les interpolations sont permises mais aucune extrapolation n'est valable pour la détermination des facteurs de contraintes.

Paramètres d'entrée

Pour les abaques de Peattie :

On définit les paramètres d'entrée comme suit :

$K1 = E1/E2$ $K1$ prend les valeurs : 0,2 - 2,0 - 20,0 - 200,0

$K2 = Er/Ez$ $K2 = 0,2 - 2,0 - 20,0 - 200,0$

$A = a/h2$ $A = 0,1 - 0,2 - 0,4 - 0,8 - 1,6 - 3,2$

$H = h1/h2$ $H = 0,125 - 0,25 - 0,5 - 1,0 - 2,0 - 4,0 - 8,0$

Pour les tables de Jones on a les variables identiques :

$k1 = K1$

$k2 = K2$

$a1 = A$

$$h = H$$

les contraintes verticales se déterminent comme suit :

$$\sigma_{z1} = p(ZZ1)$$

$$T_{z2} = p(ZZ2)$$

les contraintes horizontales s'obtiennent à partir des tables de Jones de la manière suivante :

$$\sigma_{z1} - \sigma_{r1} = p[ZZ1 - RR1]$$

$$\sigma_{z2} - \sigma_r = p[ZZ2 - RR2]$$

$$\sigma_{z2} - \sigma_{r3} = p[ZZ3 - RR3]$$

Les paramètres de Peattie permettent de déterminer ZZ1, ZZ2. Ceux de Jones permettent de déterminer les différences : ZZ1-RR1; ZZ2-RR2; ZZ3-RR3 .

Déformations

L'hypothèse d'élasticité des systèmes, d'homogénéité des couches, leur isotropie, leurs dimensions transversales infinies et la position centrale (axiale) des points d'analyse, permettent de déterminer les déformations à partir des équations des déformations de milieu homogènes isotropes élastiques et semi-infinie :

$$\epsilon_{r1} = \sigma_{r1}/E1 - \mu_1 \sigma_{z1}/E1$$

en vertu de la symétrie supposée on a :

$$\sigma_{t1} = \sigma_{r1}$$

$$\epsilon_{r1} = 1/2E1 [\sigma_{r1} - \sigma_{z1}]$$

$$\epsilon_{z3} = 1/E3 [\sigma_{z2} - \sigma_{r3}]$$

Notons seulement que les contraintes Tr sont les contraintes de traction et qu'elles sont à analyser de plus près. L'étude qui

précède nous amène à analyser la structure de la chaussée à partir des contraintes, des caractéristiques intrinsèques des matériaux, des dimensions des couches.

C'est ce que nous nous proposons de faire dans les pages qui suivent.

Contraintes au niveau du sol-support: (voir fig 2.11 en annexe)

c
 a \rightarrow ^{to copy in acetat} Cette figure montre que les contraintes au niveau du sol support sont largement atténuées quant le paramètre $\lambda = 0/h_2$ décroît. Ce qui implique que pour une charge donnée (rayon de contact $a = cte$), cette atténuation des contraintes verticales peut résulter d'une augmentation de l'épaisseur de la couche de base ().

le niveau de contrainte peut dans une moindre mesure somme toute-être réduit lorsque $H=h_1/h_2$ croît. C'est-à-dire pour une épaisseur donnée de la couche de base (h_2) , cette atténuation est obtenue en augmentant l'épaisseur de la couche de roulement.

✗ Il nous apparaît nettement ici que lorsque les caractéristiques mécaniques, notamment la rigidité du sol-support, ne sont pas suffisantes, il est évident que si d'autre part les épaisseurs des couches de base et/ou le support ne sont pas assez grandes, le sol-support se plastifierait et des fissures profonds y apparaîtraient et se propager jusqu'à la surface et la ruine naturellement s'ensuivrait. C'est une ruine structurale.

✗ Cependant une autre solution existe pour la réduction des contraintes dans le sol-support. On peut augmenter la rigidité des couches supérieures .les différentes courbes établies par Peattie le montrent clairement. Dans un système à plusieurs couches, la couche immédiatement au dessus de la couche de base, est en général celle dont la rigidité influence considérablement sur le niveau de contrainte. Ainsi, dans un système à 3 couches, le modèle de la

→) couche de base (ce que nous avons désigné par E2 précédemment) à l'effet le plus prépondérant sur la réduction des contraintes qui agissent sur le sol-support. Cela aussi peut s'observer à la lecture des abagues de peattie qui montrent les bonnes qualités de répartition de contraintes des couches à modules élastiques élevés . Mais, on peut toutefois abaisser les contraintes de compression qui sollicitent le sol-support en prévoyant les épaisseurs assez significatives tant de la couche de roulement que de la couche de base : on peut dans le même dessein remplacer les matériaux des différentes couches par les matériaux de rigidité plus grandes . Si les contraintes budgétaires le permettent.

Déflexions

Selon le type de structure de chaussée qu'on a à analyser, la proportion de la déflexion totale due au sol-support varie de 70 à 95% . On peut dès lors dire que l'essentiel de la déflexion est due à la compression élastique du sol-support.

L'amplitude de la déformation pour un matériau donné, à un point donné de la structure, est une fonction directe de l'état tridimensionnel de contraintes, on peut donc dire que les mêmes facteurs qui tendent à réduire les déformations de compressions dans le sol-support, réduisent aussi les déflexions de la chaussée. C'est d'autant plus fondé que la déflexion n'est qu'une simple intégration mathématique des déformations verticales de compressions, sur la profondeur. En effet, en nous référant au cas du système à 2 couches, on voit que la croissance de l'épaisseur de la couche supérieure (au sol-support) une augmentation de la rigidité de cette même couche induisent une plus grande réduction de la déflexion.

Il faut noter cependant, qu'en rigidifiant la couche supérieure ou gregni plus en réduction de déflexion qu'en augmentant l'épaisseur de la dite couche.

On voit ainsi l'origine de certaines déflexions qui apparaissent quelquefois dès les premiers âges de ce chaussée.

Une négligence dans le choix des épaisseurs, une attitude trop optimiste vis à vis les caractéristiques mécaniques du support,

peuvent conduire à de grandes déflexions superficielles qui proviennent d'une déformation encore plus profonde de ce même sol-support. C'est ce qui s'observe ici et là sur certaines de nos routes qui présentent un profil en long des plus irréguliers, qui avec l'abandonner des cuvettes et le supplément d'effets dynamiques qui en sont le corrolaire, connaissent une ruine fonctionnelle parfois prématurée . Signalons la ruine fonctionnelle correspond à un niveau quasiment nuisible au confort minimal des usagers.

Contrainte de Cisaillement

Nous savons maintenant que si l'on se fixe comme objectif la minimisation des contraintes de compression sur le sol-support, l'augmentation de la rigidité des couches supérieures est une des meilleures solutions.

↳ Mais ce que l'on gagne en rigidifiant les couches supérieures en termes de baisse de contraintes au niveau du support on le perd en contraintes de cisaillement transversal. Plus la rigidité de la couche de roulement, par exemple, croît plus le cisaillement s'accroît dans le sens transversal au sein de la couche rigidifiée.

On remarque que le cisaillement transversal croît largement sur la première couche lorsque la rigidité de celle-ci augmente. En plus la contrainte de cisaillement transversale est maximale pour l'ensemble de la structure agit dans la mi-épaisseur de la couche de roulement. A partir de cette figure on voit aussi que la contrainte de cisaillement horizontale agissant à l'interface des 2 premières couches est considérablement réduite pour un rapport K_1 , les modules ($K_1 = E_1/E_2$) élevé.

L'épaisseur de la couche supérieure joue aussi un rôle appréciable dans la valeur des contraintes de cisaillement développées au sein de la couche. (Voir figure 2.13) Nous devons ces figures (2.12 & 2.13) à NIELSON.

Pour des valeurs $k_1 = E_1/E_2$ et de $K_2 = E_2/E_3$ données, une croissance de l'épaisseur (h_1) de la couche de roulement s'accompagne de la décroissance de la contrainte maximum de

cisaillement se déplace du milieu de la couche de roulement au tiers (1/3) de celle-ci. Il est nécessaire de rappeler que cette contrainte est critique pour la stabilité mécanique de la structure. Elle est à l'origine des fissures longitudinales qui, naissant au sein de la couche de roulement se propagent en surface (revêtement) et avec l'infiltration réduisent la capacité portante des couches y compris le sol support et la chaussée est vite mise hors service en l'absence d'entretien à temps.

→ On doit donc faire attention dans le choix des paramètres caractéristiques de la chaussée. Un compromis est nécessaire entre la rigidité recherchée pour protéger la survie du sol-support et les cisaillements qui peuvent s'avérer d'une grande agressivité.

Contrainte de tension

⊕ La base de la couche de roulement dans un système à trois couches, est le lieu où les contraintes de traction sont les plus critiques. La courbe Contrainte Versus $H = h_1/h_2$ nous amène à certaines considérations. En effet on voit dans une chaussée où :

$H = h_1/h_2 < 2$ et qui a un rapport $K_1 = E_1/E_2$ très élevé la contrainte de traction prend des valeurs très grandes. Ceci nous amène à ce que nous avons vu pour le cisaillement, lorsqu'on rigidifie trop la couche de roulement (E_1 augmente) et que l'épaisseur de celui-ci est assez faible, on s'expose à la naissance plus ou moins prématurée de fissures à la base de la couche de roulement qui se propagent en surface sous les charges des véhicules. En plus l'infiltration s'ensuit et une plus grande

perte de portance des couches inférieures. Puis la ruine sans une intervention rapide et adéquate.

Ainsi si on veut une couche de roulement d'une certaine rigidité afin de suppléer au sol support de faibles valeur structurale, et pour une valeur donnée il faut veiller à avoir une épaisseur telle que soit contenue dans certaine proportion.

Effet de la pression de gonflage et de la charge totale:

La valeur de la contrainte verticale en un point de la surface de la chaussée due à une charge verticale, dépend aussi bien de la pression de gonflage de la roue que de la charge totale.

Fig(2.15;2.16 en annexe) représentent les variations des contraintes verticales de Boussinesq dans une masse de sol idéal, pour plusieurs combinaisons de pressions et de charges totales.

Considérons les deux courbes dont l'une est établie pour une pression de gonflage de 100 psi et l'autre pour une pression de 200 psi le poids total étant le même pour les deux ($P = 80$ Kips). On voit nettement l'effet prononcé de la pression de gonflage sur les couches supérieures de la chaussées. De plus on voit que pour une même épaisseur de la couche, la contrainte verticale de compression est plus élevée lorsque, pour une même charge totale P , la pression de gonflage croît. Mais au-delà de 96 inches (pouces) l'effet de la pression est presque nul, seul le poids total influe sur le niveau de la contrainte et l'épaisseur de la couche correspondante.

Les hautes pressions de gonflage des roues, nécessitent les matériaux de grande qualité pour les couches supérieures de la chaussée; cependant l'épaisseur des couches n'est pas influencée de manière significative par la pression de gonflage des roues. Par ailleurs, pour une pression de gonflage donnée, l'augmentation de la charge totale des roues, s'accompagne toujours d'un accroissement de la contrainte verticale quelle que soit l'épaisseur de la couche.

La figure(2.16) montre l'influence de la configuration de l'essieu sur la valeur des contraintes verticales à différentes profondeurs. C'est un problèmes de Boussinesq.

A la lumière de l'influence de la configuration des essieux il apparaît qu'à la surface de la chaussée, pour une pression de gonflage donnée, les contraintes sont égales à la pression de gonflage et que pour une couche assez épaisse et pour un essieu donné (il faut considérer l'essieu le plus fréquent et le plus large et le plus lourd) la configuration des essieux influe peu.

La nécessité apparaît de manière évidente que le spectre de véhicules (essieu) qui sollicitent la chaussée doit être maîtrisé pour un dimensionnement objectif, sinon une méconnaissance de ce spectre expose la chaussée à des contraintes imprévues ou mal estimées. C'est aussi fondamental pour les services d'entretien. D'autre part les essais AASHO ont permis d'établir une certaine corrélation entre la déflexion et la structure de la chaussée. (voir annexes)

Les coefficients dépendent de la saison à laquelle les mesures sont faites, vu que la température influe sur la rigidité des enrobés et la teneur en eau influe sur la déformabilité du sol.

Toutes choses égales par ailleurs on voit l'importance ou l'influence de la charge statique sur la valeur de la déflexion.

L'essai de plaque, en plus de nous renseigner sur les effets statiques, peut nous donner des informations précieuses sur l'influence de la répétition des charges sur la déformation totale des chaussées.

Une croissance exagérée du trafic entraîne nécessairement des tassements plus larges de couches structurales, ce qui emmène une ruine prématurée ou en tout cas une menace évidente de ruine.

2) FATIGUE

La répétition des charges intervient de manière plus critique dans le phénomène de fatigue de la chaussée.

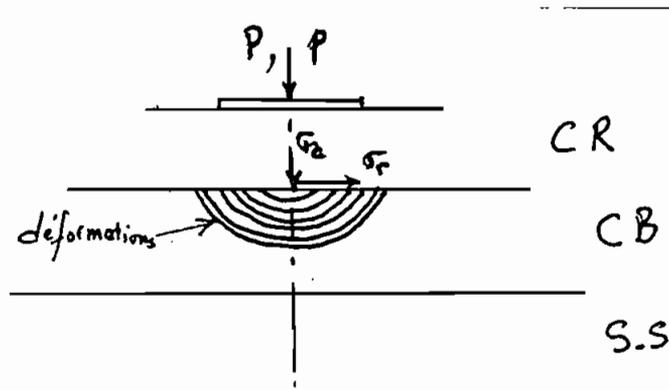
DEZCON et WITCZAK ont, lors de leurs travaux pour déterminer un critère de calcul d'un facteur de conversion des charges, abouti à la formule de fatigue suivante: $N_f = K_q (1/\epsilon_q)^c$

Rappelons que la fatigue c'est le phénomène de déformation d'un milieu suite à l'application des charges répétées ou de déformations répétées.

L'analyse de ce phénomène peut se faire suivant 2 approches classiques : l'analyse peut être conduite pour un niveau de charge constante appliqué plusieurs fois de suite jusqu'à la rupture. Suite à la déformation progressive du milieu une diminution de la rigidité s'ensuit. Ceci, à son tour, accroît le niveau de déformation en fonction de la charge appliquée. L'autre approche, c'est la déformation qu'est fixée : on varie la charge appliquée. Il en résulte que la contrainte décroît au fil des chargements pour une même déformation.

Le schéma suivant traduit les effets de la fatigue sur la chaussée.

Fig 7.



A partir de la courbe (fig 8.22) on peut dire que : pour un niveau de déformation fixé, le nombre de répétitions de charge à la rupture est d'autant plus grand que le module EI de la couche de roulement est faible. Or en général on choisit une valeur donnée de déformation (déflexion) comme seuil en vue d'une réfection. Cette déformation (déflexion) doit donc prendre en compte et la rigidité de la CR et le trafic (trafic équivalent). Des essais permettent de connaître le niveau de déformation (allongement) au-dessus de laquelle la répétition de charges n'influe plus sur la valeur de la déformation. Connaissant la qualité moyenne (E moyen) de nos matériaux, nous pouvons nous fixer un niveau de déformation-seuil pour une réfection courante ou poussée pour un niveau de trafic donné. La direction de l'entretien doit chercher à connaître le comportement en fatigue des matériaux de construction et d'entretien des routes.

3) Méthode de dimensionnement AASHO des Chaussées Souples.

AASHO (American Association of state highway officials). Cette méthode de dimensionnement résulte des essais conduits vers la fin 1950 et début 1960 à Ottawa dans l'Illinois. C'est la première méthode à introduire la notion de ruine d'une chaussée du point de

vue de l'utilisateur (ruine fonctionnelle) contrairement à la philosophie classique selon laquelle la ruine est essentiellement structurelle.

Il nous semble fondamental d'introduire cette méthode dans notre étude parce qu'elle nous permet de mieux percevoir l'importance du trafic dans le design. En même temps on saisira les conséquences résultant d'un dimensionnement qu'on tiendrait pas en compte ce paramètre trafic.

PRINCIPES DE BASE

$$\log G_t = 5.93 + 9.36 \log(SN+1) - 4.79 \log(L_1 + L_2) + 4.33 \log L_2$$

où :

G_t = Une fonction logarithmique du rapport d'une perte du niveau de service au temps t et d'une perte potentielle de niveau de service en un point où l'indice de qualité de service $p_t = 1.5$.

β = une fonction de design et des variables de chargement, qui détermine la courbe p versus W où p = indice de qualité de service ("serviceability")

W_t = Nombre d'application de charge au temps t

p_t = indice de qualité de service

L_1 = Charge sur un essieu simple ou un essieu tandem
(kips)

L_2 = Code relatif à l'essieu ($L_{2=1}$ pour essieu simple;
 $L_{2=2}$ pour essieu tandem)

SN = Nombre structurel de la chaussée.

En ramenant les variables chargements à l'essieu standard la procédure se simplifie considérablement. AASHO utilise un essieu simple standard le 18 kip avec $L_1 = 18000$ Lb et $L_2 = 1$.

Lors des essais AASHO, on a trouvé, pour une chaussée neuve flexible, $PSI = 4,2$. En intégrant les variables L_1 , L_2 , PSI par leurs valeurs on a :

$$\log \frac{W_t}{W_{t18}} = 9,36 \log(SN+1) - 0,20 + \frac{\log[(4,2 - p_t)/(4,2 - 1,5)]}{0,40 + [1094 / (SN+1)]^{5,19}}$$

W_t = Nombre d'applications de charges de 18 kip au temps t

p_t = Correspond au PSI terminal.

L'équation ci-dessus correspond à l'équation fondamentale de désign de la méthode AASHO dans les conditions réelles (sol, environnement) des essais AASHO.

Pour rendre cette méthode utilisable dans des conditions différentes de celles de l'AASHO, des facteurs de correction ont été établis. C'est ainsi que furent définis les quantités (S) pour le sol-support et (R) pour tenir compte des autres spécificités de la région (R= facteur régional).

$S = 3,0$ pour les conditions de sol AASHO (ILLINOIS)

$S = 10,0$ pour un substratum rocheux (hypothèse de rigidité quasi-infinie).

Les valeurs intermédiaires entre ses deux conditions du sol-support sont obtenues par la relation suivante:

$$\log W_{t18} = \log N_{t18} + K(S_i - S_0)$$

S_i = caractéristique du sol-support correspondant à la condition i

S_0 = valeur de sol-support pour les conditions AASHO

K = Constante de régression ($K= 0,372$).

Quant au facteur régional R il est défini par:

$$W_{t18} = N_{t18} (1/R)$$

où N_{t18} = Nombre d'application de charges (non pondérées)

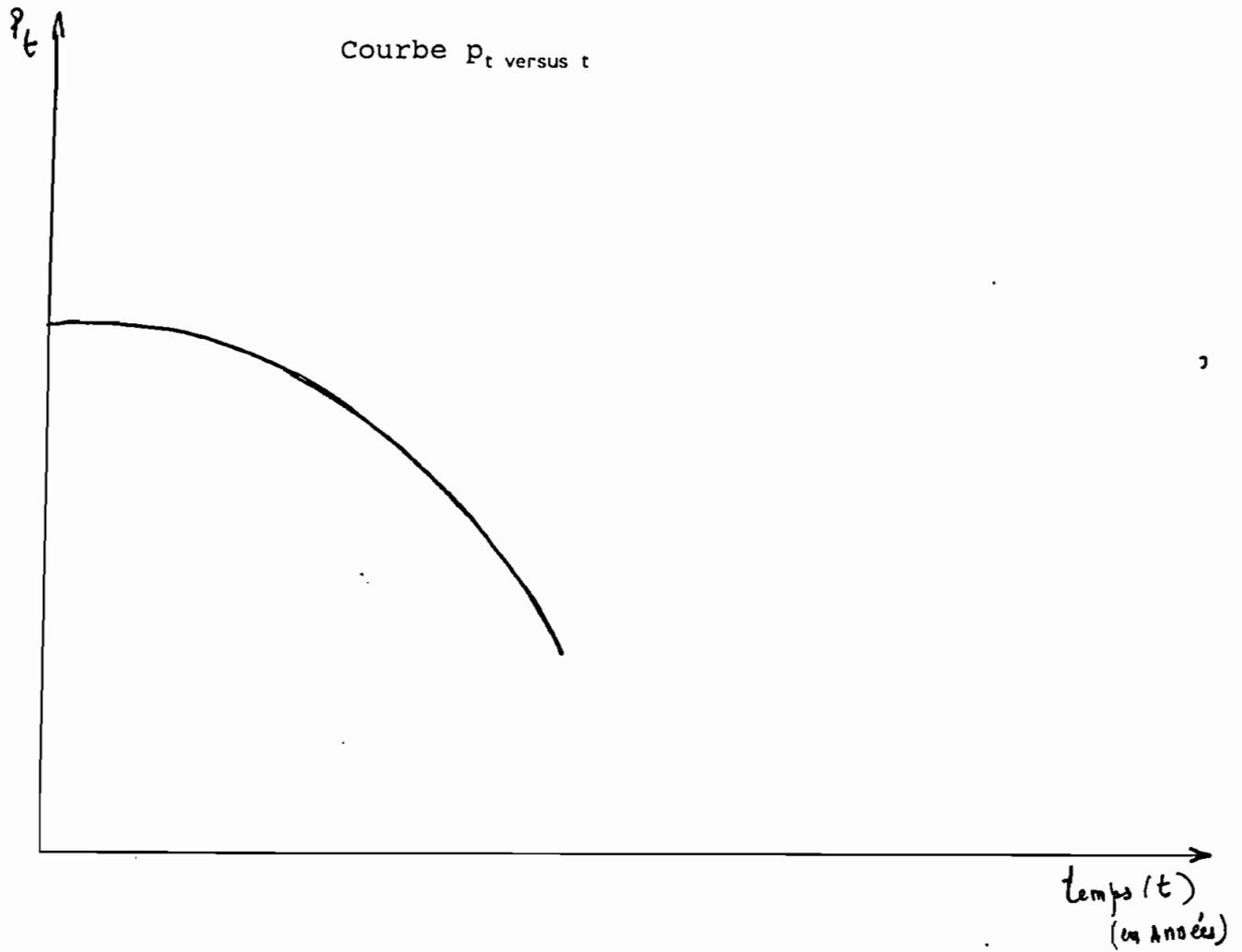
Les modifications sus-mentionnées permettent ainsi de récrire l'équation fondamentale AASHO sous sa forme définitive:

$$\log W_{t18} = 9,36 \log(S\bar{N} + 1) - 0,20 + \frac{\log [(4,2 - P_t) / (4,2 - 1,5)]}{0,40 + [1094 / (S\bar{N} + 1)^{5,19}]} + \log \frac{1}{R} + 0,372 (S_i - 3)$$

Pour une structure de chaussée donnée (SN), les conditions climatiques données (R), un sol-support donné (Si) et un niveau de service-limite (P_t) donné, on peut calculer le nombre d'applications de charges de 18 Kips total pour la durée de vie supposée. Cette équation a été solutionnée graphiquement (nomographe) pour des niveaux de service $P_t = 2,5$ et $P_t = 2,0$

Notons que les valeurs de P_t les plus courantes tournent autour de 2,5 et 2,0; P_t correspond au plus bas niveau de service acceptable de la chaussée.

Il est d'une grande importance de pouvoir établir une corrélation entre l'indice de qualité service P_t et le temps t d'exploitation de la chaussée. Généralement cette relation est de la forme suivante:



Evolution du Niveau de service en fonction du temps

Pour déterminer le temps au-delà duquel la chaussée est considérée hors service (i-e ruine fonctionnelle) il suffit de connaître la croissance du trafic.

La méthode AASHO convertit un trafic en trafic équivalent eu égard à la déformation induite par un essieu quelconque en fonction de celle due à un essieu standard de 18 Kips (simple). W_{t18} . correspond au nombre d'applications de charge équivalentes $F_j = N_{fj} / N_{fs}$ sur la période d'analyse de trafic.

Le trafic peut-être pris en compte comme le nombre d'applications d'essieu de 18 kips par jour lorsque la période de désign est de 20 ans; ou encore le nombre total d'application de charges de 18 kip pendant la période de Design choisie.

Le facteur régional R, le guide AASHO a établi une table correspondant à plusieurs conditions de sol . Il est fondamental pour l'utilisation de la méthode AASHO de bien choisir la valeur de R correspondant aux conditions locales réelles.

Le nombre structural SN est défini par:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 + a_3 D_3$$

Les a_i, D_i désignent respectivement les valeurs de coefficients de couche et d'épaisseurs.

Les coefficients de couche représentent la relation empirique entre SN, pour une structure de chaussée donnée et l'épaisseur de couche, exprimant la capacité d'un matériau donné à servir comme composante d'une chaussée.

Des monographes ont été élaborés pour relier d'autres caractéristiques des couches (comme CBR, MARSHALL, etc) aux coefficients de couches pour standardiser l'utilisation de la méthode AASHO (Voir annexes). Des corrélations identiques ont été établies pour le paramètre du sol-support . (Voir annexes)

Ce que nous venons de voir nous montre tout l'intérêt d'une bonne maîtrise du trafic en terme nombre d'applications de charges (en équivalent d'essieu standard).

4) AGRESSIVITE DU TRAFIC

Mentionnons le concept d'agressivité du trafic qui traduit à quel taux la chaussée est sollicitée. Pour déterminer l'agressivité du trafic, pour un essieu de 13 t, on découpe le trafic en classe; pour chaque classe "i" on définit une charge caractéristique "Pi", un facteur de conversion $a_{i=(pi/13)^{\alpha}}$ où $\alpha = 4$ pour les chaussées souples. On définit l'agressivité par :

$$A_{13} = \frac{\sum a_i f_i}{100}$$

où f_i = fréquence statistique de passage d'un véhicule de classe "i".

L'établissement de ce facteur nécessite donc une pesée et un comptage sur tout le réseau qu'on veut analyser.

On a pour quelques pays les valeurs suivantes

✂ Pays	Surcharges	Agressivité
Zaire	3	0,35
R C I	6,5	0,85
Cameroun	10	1,1
NIGER	12	1,2

L'agressivité traduit le taux auquel la chaussée est sollicitée. Pour des valeurs du coefficient d'agressivité $A > 1$ on doit penser à accroître le réseau concerné ou "augmenter" la classe de la chaussée. Cela montre le manque de prévision et de contrôle dans la gestion des réseaux routiers nationaux . Un facteur $A_{13} > 1$ donne une idée de l'écart entre le niveau du trafic du désign et le niveau actuel, surtout et traduit un plus ou moins large dépassement de la charge légale pour les différentes chaussées.

Il résulte des analyses précédentes qu'il est trop important de bien maîtriser le trafic en poids comme en fréquence pour un meilleur programme d'entretien d'une part, parce que la durée de vie dépend du trafic pour un niveau de service donné. D'autre part

une mauvaise appréciation (sous-estimation) du trafic conduit à sous-estimer les épaisseurs avec les réductions de la durée de vie pouvant aller jusqu'à 10 ans et parfois plus pour une sous-estimation d'1 pouce de l'épaisseur d'une couche donnée.

DEUXIEME PARTIE

III DIAGNOSTIC

A Analyse des procédés des services d'entretien

Un problème bien posé est à moitié résolu.

Aussi, un diagnostic juste est le préalable indispensable à tout système de maintenance ou de cure. Un bon entretien c'est celui qui permet d'apporter les remèdes appropriés et en un temps opportun aux dégradations des chaussées.

Dans ce chapitre-ci nous parlerons des méthodes de diagnostic utilisées par la direction de l'Entretien Routier et du Matériel (D.E.R.M) et nous ressortirons ses (leurs) insuffisances ; nous en proposerons quelques unes qui nous paraissent mieux convenir.

L'essentiel des activités de l'entretien routier est basé sur un document de base " Manuel de Système de Programmation et de la planification de l'entretien routier ". Ce manuel propose l'inspection visuelle comme unique technique pour diagnostiquer l'état des routes. << L'équipe d'inspection des routes attribue un classement numérique (indice de dégradation) d'une section routière donnée en fonction d'une description appropriée des dégâts (...) >>. Cette phrase traduit la philosophie du diagnostic selon Mr Gérard T. Scott du cabinet Louis Berger International Inc,

auteur du manuel sus-mentionné. L'inspection visuelle informe seulement sur les dégradations qui ont atteint un niveau d'évolution plus ou moins élevé. Aussi, étant donné que plusieurs causes peuvent produire la même forme de dégradation et que l'évolution d'une déformation n'est pas toujours prévisible, cette méthode est non seulement inefficace comme base d'un diagnostic mais surtout dangereuse. En effet, nous avons montré que le nid de poule est le plus souvent la résultante d'une ou de plusieurs dégradations locales ; alors diagnostiquer que le nid de poule provient d'un arrachement suite au vieillissement du revêtement, alors qu'en réalité c'est dû par exemple à l'éclatement d'une poche de gonflement ou un défaut de compactage local de la couche de base, c'est le point de départ d'une réparation inadéquate. Les conséquences d'une insuffisance de l'auscultation sur la vie de la chaussée sont nombreuses. Considérons l'état de l'uni d'une chaussée revêtue; une simple inspection visuelle ne permet pas toujours de se rendre compte de sa sévérité soit parce que la chaussée, surtout neuve, présente une apparente homogénéité, ou que la superficie concernée paraît infime. Or une telle négligence a des retombées considérables. En effet un mauvais uni, en donnant prise aux efforts de cisaillement des pneumatiques, constitue le point d'initiation des arrachements, ensuite l'infiltration aidant la perte de portance des couches inférieures s'ensuit ce qui, avec l'apparition des nids de poules de plus en plus profonds et un affaissement local plus ou moins accéléré du corps de chaussée, conduit celle-ci à la ruine structurelle. Les exemples abondent sur

les conséquences d'un diagnostic faussé parce que résultant d'une " auscultation " insuffisante.

Le manuel dont se servent les services d'entretien, après cette inspection visuelle, procède à une catalogation revêtues suivant leur état présumé. Nous donnerons en annexe le " Catalogue des Indices de dégradation ".

Les indices sont de 5 à 1 correspondant respectivement à une chaussée en excellent état et une en très mauvais état. Cette indication est faite sur la base d'interprétation des descriptions de l'état de la chaussée ; par exemple: Indice 4 correspond à une chaussée en bon état, décrite comme suit:<< Détérioration (fissures nids de poule, ressuage, déchaussement, déformations) rares, sur moins de 5% de la longueur. L'état de la chaussée est satisfaisante pour le trafic existant >>. Et les travaux de refection seront entièrement basés sur les indications de ce manuel. On voit aisément le danger de la situation. Une fissure, c'est parfois le signe de fatigue des couches inférieures du corps de chaussée; une chaussée neuve sous-dimensionnée ou sollicitée par un trafic exceptionnel peut présenter des signes de fatigue prématurée. Aussi, en se fiant à son âge ou à la faiblesse de la superficie concernée par des fissures, on commettrait une erreur de jugement dont la conséquence la plus élémentaire serait la rupture brutale du corps de chaussée à partir de l'interface couche du roulement _ couche de base ou, s'il y a une couche d'accrochage, entre celle-ci et la couche de base. Il apparaît là encore une insuffisance de la méthode d'appréciation utilisée par les services d'entretien, liée

cette fois au trafic. Il en de même pour les ornières. Une seule ornière constatée peut, selon cette méthode, conduire à estimer la chaussée en bon état, alors que le sol-support est plastifié avec la superficie d'une propagation très prochaine d'un phénomène de plastification. Ainsi une faiblesse de l'inspection visuelle c'est de vouloir lier la gravité de l'état d'une chaussée à la superficie concernée par les dégradations constatée ; elle peut conduire souvent à minimiser les dégradations initiatrices et d'origine structurelles. Une autre de ces insuffissances c'est d'isoler la chaussée pour l'analyser comme une entité indépendantes; cette attitude amène les " inspecteurs visuels " à ne pas appréhender la qualité du drainage de la chaussée observée, du moins cela n'est pas perceptible dans la procédure. Or, sans un drainage adéquat, la chaussée la mieux dimensionnée et avec le meilleur revêtement ne saurait survivre aux infiltrations soit latérales (talus), soit intersticielles (vides du revêtement), car à cette guerre d'usure entre l'eau et la chaussée, l'eau l'emporte toujours ou que l'étanchéité des revêtements n'est jamais parfaite. Par ailleurs, les dégradations des chaussées sont principalement de deux catégories: les dégradations de surface et celles de structure ou fonctionnelles et structurelles.

B_ Propositions

L'analyse des dégradations de surface d'une chaussée revêtue est très complexe et cela pour plusieurs raisons:

1_ Le caractère hétérogène des mélanges, des

matériaux eux-mêmes (liants , granulats)

2- L'énorme différence de comportement des matériaux bitumineux soumis à des tests de laboratoire et en service sous trafic

3- La difficulté d'intégrer efficacement le paramètre environnement dans l'évolution des caractéristiques mécaniques et chimiques des matériaux routiers

4- La multiplicité des causes possibles pour un même type de désordre

5- ETC

Nous allons quand même essayer de proposer quelques éléments pouvant aider à évaluer l'état d'une chaussée revêtue, afin de fournir une base à un meilleur diagnostic, condition sine qua non d'un entretien adéquat. pour cela nous préconisons ce qui suit:

1- Evaluation par inspection visuelle

Contrairement à la démarche du manuel précédemment mentionné, nous nous proposons de corréler la cote qualitative attribuée aux chaussées suite à une inspection visuelle, une quantité mesurable.

Nous considérons les cinq (5) types de dégradations suivantes:

- 1- Les nids de poules
- 2- Les pelades
- 3- Les têtes de chats
- 4- Les fissures ouvertes (y compris faïençage)
- 5- Les arrachements (plumage)

Ces défauts nous paraissent les plus représentatifs pour servir de support quantitatif à l'évaluation visuelle et cela pour plusieurs

raisons:

1- Les nids de poule

Ils enlèvent au revêtement l'une de ses fonctions essentielles: l'imperméabilisation du corps de chaussée. Ils

constituent ainsi un danger immédiat à la survie de la structure.

2- La pelade

C'est le prélude à une série de nids de poule en chapelet.

3- Les têtes de chat

Par le nombre de saillies créées sur le revêtement, c'est pire qu'un simple défaut d'uni puisque les efforts de cisaillement et tangentiels des pneumatiques ont meilleure prise. C'est des zones de faiblesse potentielles.

4- Fissures ouvertes (y compris faïençage)

C'est des zones privilégiées pour les infiltrations d'eau et l'initiation d'une série de dégradations imprévisibles en plus de la perte de portance qui à son tour entraine des affaissements local d'une section entière de chaussée.

5- Arrachements (plumage)

Ils sont le point de départ le plus flagrant à la formation des nids de poules. Ils favorisent l'infiltration de l'eau dans le corps de et entraînant ainsi une généralisation du phénomène de de décallement entre autre. Ajoutons que pour rendre maîtrisable ces

parametres nous avons opéré une sélection parmi l'éventail de défauts parfois semblables pour limiter le nombre.

Nous avons ensuite pondéré la sévérité relative de chaque type

de défaut; on a ainsi:

1- Nids de poule (NP)	40%
2- Pelade (P)	15%
3- Tête de chat (TC)	15%
4- Fissures ouvertes (FO)	15%
Arrachements (Faiençage) (SA)	15%

Nous avons choisi pour chaque type de défaut une unité qui nous semble la plus expressive:

- 1- Nid de poule en nombre de NP/m²
- 2- P : Longueur pelée (m)/m
- 3- Surface à tête de chat/m²
- 4- Densité fissures ouvertes (m²/m²)
- 5- Surface arrachée (m²/m²)

Nous avons ensuite défini des bornes inférieure et supérieure à chacune de ces variables:

La valeur maximale de P, TC, FO, SA est la même, c'est l'unié. En effet la longueur maximale qui peut être pelée sur un mètre de chaussée c'est bien un mètre c'est-à-dire quand la chaussée est entièrement pelée sur tout son profil en long. Il en est de même pour les TC, FO,SA. Pour les nids de poule nous avons estimé que 10NP/m² est une valeur assez critique en raison de la concentration

des faiblesses en section que cela représente.

Nous avons ainsi pour définir un indice E(Etat) qui nous renseigne, selon trois (3) plages que nous définirons plus tard.

$$\frac{1}{1} E = 0.4 NP + 0.15 \mu_i (P+ TC + FO) \frac{1}{1}$$

ou` le coefficient μ_i est un facteur de simultanéité ; l'indice 'i' indique le nombre de types de défauts existant simultanément sur un tronçon donné ; varie comme le carré de l'indice 'i'. Nous avons voulu mettre l'accent, par ce coefficient, sur le caractère plus que proportionnel du défaut résultant de la conjugaison de deux défauts individuels. Les coefficients μ_i concernant les combinaisons de défauts d'égale pondération (P, TC, FO, SA). On a ainsi :

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 1^2 = 1 \\ \mu_2 &= 2^2 = 4 \\ \mu_3 &= 3^2 = 9 \\ \mu_4 &= 4^2 = 16 \end{aligned}$$

Il va sans dire que plus l'indice E est grand plus le tronçon étudié est en mauvais état . Nous avons les bornes suivantes:

$$E_{max} = 0.40 * 10 + 0.15 * 16(1+1+1+1)$$

$$\frac{1}{1} E_{max} = 13.6 \frac{1}{1}$$

La valeur E_{max} correspond à une chaussée complètement en ruine fonctionnelle .

1		1
1	$E_{min} = 0$	1
1		1

E_{min} correspond à chaussée en excellent état. Soit le tableau suivant (voir ANNEXE)

Nous avons ainsi défini les plages suivantes:

$0 \leq E \leq 4.00$ chaussée en bon état

$4.05 \leq E \leq 8.05$ chaussée de niveau acceptable

$9.6 \leq E \leq 13.6$ chaussée en voie de ruine fonctionnelle ou déjà ruinée.

Quoiqu'incomplet et insuffisant, l'indice E permet à l'évaluateur de porter un jugement moins subjectif c'est à dire variable selon les personnes. Il sait qu'une chaussée dont l'indice E est très proche de E_{max} est une chaussée malade qu'il faut voir de plus près.

Justement, c'est pour combler les lacunes de la précédente procédure que la nécessité d'une " inspection d'évaluation structurelle" s'impose.

2-Inspection d'Evaluation Structurelle

Cette inspection doit permettre d'évaluer l'adéquation structurelle de la chaussée vis-à-vis l'exploitation qui en est faite.

Les trois (3) phénomènes qui caractérisent en pratique l'évolution d'une chaussée à l'exclusion de la glissance sont:

- 1 --- Le bossellement
- 2 --- La formation d'ornières longitudinales
- 3 ---L'apparition de fissures dans le revêtement .

Ces phénomènes traduisent la fatigue des diverses couches de la chaussée de manière générale. L'A A S H O (American Association Of State Highways Officials) a essayé de normaliser l'appréciation de ces défauts par des procédés simples. Nous nous inspirerons de cette méthode pour évaluer structurellement nos chaussées.

Definissons d'abord nos différentes variables :

1_ le bossellement : mesure avec un profilomètre (profilomètre chloé) et se traduit par la variance de la pente longitudinale de la chaussée : SV slope variance)

2_ l'ornienage se mesure par le carré de la profondeur moyenne des ornières sous une règle transversale de 1.20, placée tous les 7.60 m: RD² (RD ==> Rut Depth)

3_ les fissures (cracking) ou le fainçage (pathing) se mesurent

par la proportion de la surface sur laquelle le phénomène est développée, évaluée en millièmes C+P(craking+pathing)

On peut ainsi définir la qualité de la chaussée avec le present serviceability index " (PSI) comme suit:

$$P.S.I = 5.03 - 1.91 \log \left(1 + \frac{SV}{10} \right) - 0.01[C+P]^{0.5} - 1.38 \overline{RD}^2$$

Les coefficients qui figurent dans l'expression sont des valeurs empiriques.

Selon les valeurs de PSI on a les trois cas suivants :

- PSI = 5 chaussée neuve
- PSI = 2.5 chaussée nécessitant un reprofilage
- PSI = 1.5 chaussée nécessitant une refection totale

Note

$$SV = \frac{\sum Y^2}{n-1} - \left(\frac{1}{n} \right) (\sum Y)^2$$

Y = différence d'élévation entre deux points distants d'1 ft

n = nombre de lectures (au profilomètre)

Mais cette méthode AASHO ,même si elle est un peu rationnelle que la simple "valorisation qualitative " de l'inspection visuelle, ne peut à elle seule permettre une conclusion complète sur l'état d'une chaussée . Il est possible par exemple qu'un tronçon ait un PSI = 5 mais que la sollicitation de la route par un trafic assez

dense reduise ses capacités mecaniques et superficielles. C'est pour inclure ce volet traffic que nous proposons l'introduction de de l'agressivite du traffic.

3- Agressivité au traffic

En matière d'entretien, il est de loin plus important de prevoir le besoin d'entretien, c'est à dire un entretien préventif, que de baser les programmes d'entretien uniquement sur le palliatif et/ou le curatif. Aussi est-il un impératif de maitriser le taux auquel un réseau donné est sollicité par le traffic. Un des moyens dans ce domaine c'est le facteur d'agressivité du traffic.

Si nous considérons un essieu standard de 13 tonnes, nous pouvons définir le facteur sus-mentionné noté A par

$$A = \sum_{i=1}^n \frac{a_i f_i}{100}$$

Pour définir ce facteur A il est nécessaire de connaître les quantités a, f. Pour cela, il faut définir des classes de charges à l'essieu (en tonnes) ; pour chaque classe "i" choisir une charge caractéristique p (en tonnes). Il faut ensuite déterminer le nombre N des véhicules qui sollicitent chaque classe. On définit ainsi les paramètres a et f comme suit:

$$a_i = \left[\frac{p_i}{13} \right]^4$$

$$f_i = \frac{N_i}{N}$$

Déjà à partir des valeurs de f_i on peut voir dans quelle mesure la charge légale est dépassée, donc le taux de surcharge étudié.

Un exemple nous renseigne encore mieux; considérons le tableau suivant :

<u>pays</u>	<u>surcharge</u>	<u>Agressivité (A13)</u>
ZAIRE	3	0.35
RCI	6,5	0.85
CAMEROUN	10	1.1
NIGER	12	1.2

On voit que par exemple pour des pays comme le Cameroun et le Niger, le réseau est surexploité avec des conséquences que l'on sait pour le NIGER où la plupart des routes bitumées sont en enduits parfois simple monocouche .

Alors le facteur d'agressivité du trafic permet de savoir même pour une chaussée neuve les risques liés à l'exploitation et de prendre les mesures adéquates en temps opportun. Cela est extrêmement important, car ça prémunit contre les ruptures brutales liées à la fatigue ou à l'usure prématurée.

4- Autres mesures

Il va sans dire que la détermination des caractéristiques mécaniques du sol de plateforme (sol_support) est capital pour un diagnostic de chaussée . Aussi, nous pensons que quelques tests soient effectués en ce sens notamment :

a_ CBR : cet essai peut donner une idée de la capacité mécanique du sol support .

- Si le sol à tester n'a pas de cohésion il est préférable de faire un essai in-situ.

Si le sol est à " cohésion ", on peut échantillonner et mener des tests au laboratoire.

b- Essais de plaque

Ces essais sont surtout utiles pour des sols non plastiques. Peuvent servir pour la détermination des modules d'élasticité des couches de la chaussée de même que le module de réaction du sol-support. Il en existe plusieurs sortes d'essai de plaques; le type du LCPC (Laboratoire central des ponts et chaussée) permet la détermination du degré de compacité des différentes couches. Nous n'estimons pas nécessaire de décrire dans les détails les étapes de cet essai, disons seulement ceci : On mesure les enfoncements e_1 , e_2 d'une plaque de diamètre $a = 0.60m$ suite à deux (2) cycles de chargement 7065 daN (2.5bars) et 5650 daN (==> 2.0 bars). On détermine ainsi les modules E_{v1} et E_{v2} à partir du premier et du deuxième cycle de chargement comme suit :

$$Ev1 = \frac{0.1125}{e1}$$

$$Ev2 = \frac{0.09}{e2}$$

Ainsi vis-à-vis du compactage on a :

$$\frac{EV2}{EV1} < 1.2 \quad \text{Très bon compactage}$$

$$1.2 \frac{EV2}{EV1} < 2 \quad \text{Bon compactage}$$

Notons que cet essai n'est valide que pour des profondeurs $h > 1.5 a$ ($a =$ diamètre de la plaque); cet essai permet de classifier aussi les sols selon un indice de qualité de zéro (0) à cinq (5) .

c.) Le " standard penetration test " peut être utilisé à bon escient dans l'évaluation des capacités du sol-support.

d.) Mesures de déflexion au déflectomètre ou à la poutre de Benkelman. Elles peuvent servir non seulement lors de l'évaluation courante et pour l'étude des chaussées à renforcer.

Il faut voir les essais ci-avant mentionnés simplement comme indications utiles, la liste est en effet loin d'être exhaustive. Bien d'autres essais et mesures nous paraissent très importants ; par exemple la mesure d'uni avec l'analyseur de profil en long (APL25) du LCPC , est d'une importance remarquable, l'uni étant un critère souvent choisi dans plusieurs logiciels de technique routière comme le HDM3

Notons avant de clore cette partie (auscultation/diagnostic) que nos visites sur le chantier en refection sur un tronçon de la route Tivaouane-Mboro nous permis de constater effectivement que

un certain niveau de concentration de nids de poule est souvent caractéristique de chaussées " vieilles " et "fatiguées". On y constate une forte concentration de nids de poules bouchées sur ces routes qui selon les sources des TP de Thiès datent d'en moyenne de vingt à vingt-et-cinq ans! De plus la forte sollicitation de ces routes par les charges élevées des convois de Taïba explique largement leurs forts taux de tassement qui les prédisposent à une rupture franche et imminente. L'inconfort des usages est à son comble.

IV METHODES DE REPARATION

=====

Dans cette partie nous allons d'abord exposer les methodes de reparation adoptees par les services du ministere des travaux publics .Ensuite nous analiserons ces méthodes et enfin nous émettons quelques propositions.

A) Les Méthodes actuelles.

Les différents services du ministere contactés travaillent sur la base du manuel emis par G. Scott du cabinet Louis Berger International déjà mentionné.

Ce manuel prévoit deux types d'entretien : l'entretien de routine et l'entretien périodique .

a) **Entretien de routine.** (catalogué ARB pour les chaussées revêtues)

ARB1 Point à temps

point à temps avec enrobes ou enduisage pour assurer une reparation rapide des chaussées revêtues .

ARB2 reflachage

Reparation des zones où le revêtement est déformé, mais non détérioré et ainsi restaurer les caractéristiques du profil en travers (par enduisage pour deformation inférieures à 1-2cm ;par enrobes aux profondeurs plus importantes)

b) **Entretien périodique .** (APB)

APB1 . Tapis bicouche .

Restaurer les qualités d'imperméabilité , les qualites anti-

dérapantes, l'aspect uniforme et les qualites roulantes d'une chaussée bitumée .

Cette tâche est exécutée apres les corrections du profil en travers. Une bicouche est recommandée de façon à accroitre l'epaisseur de la surface en fonction de l'accroissement du trafic.

APB2. Tapis enrobés dense.

Reparer où remplacer le revêtement losqu'une ruine partielle de la chaussée s'est produite ou que sa vie est terminée ,pour restaurer la solidité ou les qualites roulantes de la chaussée .

APB3. reprofilage aux enrobés .

Mettre en place un nouveau revêtement lorsque la vie du précédent est terminée.

B) ANALYSE

Un premier reproche qu'on peut faire à ces différentes méthodes sus mentionnées, c'est d'abord la systématisation du point à temps. En effet se limiter à boucher des nids de poule par enduisage ou par enrobes nous paraît quelque peu simpliste .Le nid de poule est une dégradation très serieuse parfois de la couche de base ;en remplissant un nid avec de l'enrobé froid (ouvert) le bloc d'enrobes au terme de son durcissement agit comme un poinçon sur la couche de base .Il se crée ainsi une faille de discontinuité épousant la géometrie du trou bouché à la surface et dans le corps de la chaussée;ainsi naît une nouvelle zone de faiblesse beaucoup plus grande qui ,avec l'infiltration inevitable de l'eau , entraine une perte de portance du corps de chaussée prelude à une ruine parfois prématurée.

D'autre part l'enrobé à froid du fait de sa texture ouverte ne doit pas être utilisé pour boucher les nids de poule lorsqu'on ne dispose pas d'informations pertinentes sur les qualités géotechniques et hydrauliques des matériaux de la couche de base. Le reflachage, s'il permet de régler les petites déformations, qui ne sont souvent que les conséquences du fluage du revêtement, ne peut résoudre le cas des profondes déformations dont l'origine est le sol-support. En effet, lorsque les flaches atteignent une certaine profondeur, il est presque sûr que c'est le sol-support qui est en cause (voir la partie A de notre étude.). Un exemple assez représentatif est la route Tivaouane-M'Boro ; les flaches qu'on peut observer sont presque des cuvettes, la dénivellation entre deux (2) bandes peut atteindre 8/10cm. Dans ce cas précis, il s'agit d'une chaussée qui n'était pas dimensionnée pour un trafic tel que celui engendré par les exploitations de Taïba (phosphates) car construite avant l'installation de cette usine. Ici, un simple reflachage ne résout pas le problème. Le sol-support est sûrement entré dans sa phase plastique et est ainsi le siège des grandes déformations. Enfin l'enduit s'il permet une bonne imperméabilisation, n'est qu'un piètre palliatif aux problèmes de structure. Aussi est-il nécessaire de bien s'assurer l'objectif visé.

C) PROPOSITIONS

1) Le faïençage.

On peut recourir à un enduit ; sinon lorsque les fissures sont assez ouvertes ,bien colmater avec du microenrobé.Lorsqu'il s'agit de fissures peu profondes ,une régénération aux huiles lourdes peut redonner à la chaussée ses qualités de surface.

2)Déformations d'aspect ondulatoire

Le seul remède est ici la refection totale.Pour les autres types de dégradations voir en annexe.Nous-nous apesantirons sur le traitement des nids de poule .

3 .Nids de poule

Nous suggerons deux(2) procédures.

Procédure 1

Elle consiste en deux operations:

1)Delimiter la zone à
reparer suivant une geometrie regulière.

2)Excaver cette zone .
_ Retirer tout le materiau
de la zone marquée
_ Approfondir l'excavation
jusqu'a un niveau relativement compact.

- Tailler les parois
jusqu'a ce qu'elles soient bien verticales.

-Tailler le fond jusqu'à
ce qu'il soit plat et horizontal .

- Compacter correctement

le fond du trou .

3) Boucher avec un matériau de qualité semblable à celle de la couche de base .

4) compacter par faibles épaisseurs successivement. Prévoir une surepaisseur qui peut varier de 1/5 à 1/3 de la profondeur du trou pour tenir compte de la densification par le trafic.

5) Refaire le revêtement . De préférence il faut prévoir une impregnation au cut-back 0/1 si la nouvelle surface présente des pores fines ou du 10/15 si les pores sont grossiers. Enduire ou poser un tapis mince en enrobés selon le trafic .

Procédure 2

Cette procédure convient mieux aux revêtements en enduit superficiel. En effet , avec l'enduit cette méthode donne une bonne continuité entre couches réparées et couches saines. Elle consiste en 8 étapes

1- Aprofondissement et balayage.

On agrandit l'excavation de 20 à 30cm et on avive les bords. Ensuite on balaye soigneusement.

2- Pulvérisation.

Cette opération consiste à impregner le fond de l'excavation autant que les parois au cut-back 0/1 .

3- Repandre une 1ère couche de pierre 20/40. Ces pierres doivent être assez dures et propres.

Compacter.

4- Pénétrer la couche de pierre avec du liant. Ce liant peut être du cut-back un plus visqueux 150/250 ou 400/600 ou encore de l'émulsion cationique à rupture rapide. On passe ensuite une 2ème couche de gravillons 8/12.5. Compacter

5- Pénétration sur la 2ème couche et passage d'une 3ème couche de gravillons 5/8. Compacté.

6- Pénétration sur la 3ème couche et repandre une 4ème couche de gravillons 2.5/5. Compacter.

7- Pénétration sur la 4ème couche ; repandre une 5ème couche de gravillons 2.5/5. Compacter

8- Compacter suffisamment.

NOTA: Ces différentes étapes dépendent de la taille de l'excavation, qui elle-même dépend de la profondeur de la dégradation. Cette 2ème procédure est de loin préférable au bouchage aux enrobés; ces enrobés surtout s'ils sont moyens ou fins et préparé avec du cut-back pour de grandes profondeurs, risquent de rester longtemps déformables.

V.Recomandations

Suite à nos analyses, recherches et essais (pour ces dernières voir ANNEXES), nous jugeons nécessaire de suggérer des méthodes, des procédures, des attitudes pour une meilleure résolution des défauts de surfaces des chaussées souples revêtues. Ces recommandations sont:

1_ Bien diagnostiquer les causes des dégradations en utilisant des méthodes plus quantitatives que qualitatives (descriptives). Cela suppose l'utilisation de matériel adéquat tel que: Analyseur de profil en long (APL) pour des mesures d'uni; Profilomètre (il en existe plusieurs modèles); etc. Cependant, avant de chercher les causes ailleurs il est primordial de drainer nos chaussées; c'est hélas le soin qui manque le plus dans nos pays.

2_ Utiliser des géotextiles

En effet les géotextiles permettent:

a) de **solidariser les couches** de renforcement d'une chaussée fissurée avec les anciennes. C'est très efficace comme système d'affichage.

b) de parer à la **remontée des fines**. On l'installe entre couche de fondation et sol_support ou intégrer dans l'une des couches du corp de chaussée.

c) de **répartir les charges assez uniformément** sur les sols peu homogènes et où des tassements différentiels sont à craindre.

d) de **freiner la propagation et la remontée des fissures**.

3_ **Amélioration des revêtements par addition de déchets plastics.** L'ajout de déchets plastics solides lors du malaxage d'un enrobé bitumineux procure à celui-ci des propriétés particulières qui le rendent à la fois plus rigide et moins susceptible. De plus c'est tout particulièrement indiqué pour des couches de roulement anti_ornièrage et les enrobés à haut pouvoir de renforcement.

4_ L'emploi des enrobés stockables pour boucher des trous est une pratique à proscrire pour les couches de base. A moins d'utiliser des gros granulats comme 40/60 et de prévoir un enduit de scellement avec du 4/6 après enduisage et compacter. Mais cette méthode peut bien convenir aux emplois partiels sur faibles épaisseurs. Cependant, lorsqu'on veut réaliser des épaisseurs entre 8 et 10 cm avec des enrobés de granulométrie 5/15 par exemple, il y a de fortes chances que la couche ainsi constituée reste déformable pendant des mois. (Voir Tableau ANNEXE)

5_ Avant l'exécution d'un enduit on doit s'assurer que la chaussée est stable et propre. Il est illusoire de vouloir solutionner le problème d'une couche de base usée (ornière, nid de poule, etc) avec un enduit classique, car ce dernier n'est souvent qu'une couche d'usure et non de structure. Lorsque les dégradations ne concernent que le revêtement arrivé terme, il suffit d'épandre de l'émulsion et des gravillons propres dans les nids de faible profondeur. Mais si la couche de base est atteinte, avant l'enduisage, il faut reconstruire la couche de

base.

6_ Se doter de moyens d'évaluer les niveaux de la chaussée afin de fixer un seuil critique où la chaussée doit subir des réfections la ramenant à un niveau acceptable. On peut à défaut s'inspirer du fameux PSI de AASHO. La définition des critères objectifs d'évaluation de niveau peut constituer l'objet d'un projet de fin d'études en soi et serait fort utile car permettant des interventions plus systématiques et plus sûres.

7_ Essayer les structures "SANDWICH" (ou Structures Inverses)

Elles se composent ainsi :

- 1_Un sol naturel
- 2_Une assise traitée aux liants hydrauliques
- 3_Une couche non traitée
- 4_Enrobés bitumineux

Cette structure par l'effet d'amortissement de la couche intercalaire non traitée, supprime les fissures et ainsi minimise l'entretien ultérieur.

8_ Essayer la méthode CRAFT (Création Automatique de Fissures Transversales) pour les chaussées dont les assises sont traitées aux liants hydrauliques.

C'est donc une technique qui permet l'accélération du processus de création des fissures afin de maîtriser leur nombre.

La pré- fissuration consiste à créer des emplacements prédéterminés aux fissures de retrait dans l'assise au moment de

sa mise en oeuvre. La fissure est créée par sillonnage (espacement de 2 à 3cm).La méthode a été testée en 1987 sur chantier de renforcement du CD485 en Saône_et_Loire (20 cm de grave_ciment revêtue par bicouche) et a donné des résultats intéressants : les préfissures ont presque disparues tandis que les zones non préfissurées commençaient à se dégrader suite à une fissuration anarchique.

Bref ce procédé permet :

1_Un traitement préventif de chaque fissure avant mise en place de la couche de roulement.

2_Un meilleur engrènement des bords de la fissure

3_La conception d'un système de revêtement capable de résister sans se rompre et sans transmission de fissures à la surface.

9_ Il faut veiller lors même de la composition d'un enrobé à avoir des granulométries assez grenues , c'est à dire comportant peu de sable,pour une meilleur compacité .

En effet elles sont peu sensibles aux écarts de teneur en liants.

10_ Le choix d'une teneur en liants doit être la moyenne des teneurs correspondant à :

_ la stabilité maximale(MARSHALL)

_ la masse volumique maximale

_ le pourcentage des vides du mélange qui se situe sur la médiane des les limites des spécifications. Mais il n'est pas souhaitable de choisir des mélanges ayant une stabilité anormalement élevée et des valeurs de fluage anormalement faibles; les pavages faits avec de tels mélanges tendent à être plus rigides ou fragiles et peuvent subir des fissures sous trafic lourd, s'il y a des déformations dans la fondation.(Voir courbes ANNEXES)

11_ Il est d'une grande utilité pour les services de l'entretien routier de procéder à des essais tels que :

a)_ Le TWIT (Total Water Immersion Test) qui donne une idée de l'adhésivité du liant sur granulat en présence d'eau. C'est une mesure implicite d'adhésivité dite passive .

b)_ Essai de stabilité au stockage qui permettent de limiter la durée du stockage acceptable eu égard aux propriétés physiques, chimiques ou mécaniques minimales requises.

c)_ Essais de viscosité pour vérifier le respect des spécifications et des clauses du marché par les entreprises_fournisseurs (ex: FOUGEROLLE; JEANLEFEBRE, etc).Des essais rapides lors de la mise en oeuvre qui permettent de mieux

ordonnancer les différentes opérations du chantier pour une meilleure tenue des différents éléments du revêtement. Par exemple lorsqu'on a un cut_back à séchage lent et qu'on gravillonne aussi après sur un telle cut_back, on aura un enduit qui murira tard

et on risque des rejets de gravillons considérables sous trafic. Nous tenons à préciser que les essais que nous avons l'intention de faire au moment de la mise en oeuvre du chantier de réfection de voie Tivaouane_Mboro, ont été faits par la CEREEQ pour le compte de l'administration, nous nous sommes contentés de faire des essais Marshall sur enrobés à froid et d'analyser les différents résultats de l'ensemble des essais. Voir ANNEXES Résultats essais et analyses.

d)_ Afin de bien connaître la perte de masse du liant utilisé, il est évidemment conseillé de pratiquer l'essai d'évaporation en film mince en étuve ventilée (15 jours à 50°C).

12_ Il est fondamental de mener des campagnes périodiques de comptage et de pesée. Cela est une condition nécessaire pour mieux asseoir les politiques d'entretien préventif car permettant d'estimer l'agressivité entre autre. Sans pesée et comptage, aucun dimensionnement ne saurait être juste car ne pouvant intégrer le facteur trafic qui détermine le paramètre fatigue.

Des postes continus doivent exister sur les principaux tronçons en même que des postes provisoires en des périodes

carctéristiques. Cela pourrait donner une base de données permettant de faire de meilleurs estimations du taux de croissance du trafic ; et une bonne prévision du trafic est un gage d'une meilleur maîtrise du réseau, ses mesoins d'extension ou de réfections légères ou profondes.

Il faut bannir les méthodes de dimensionnement CBR qui comme nous l'avons dit ne donnent pas de garantie par rapport au phénomène de fatigue.

Nous recommandons dans les années à venir de consentir quelques sacrifices afin de doter les services de travaux publics ou le CEREEQ de planches d'essais. Ceci aurait le double privilège de mieux approcher le comportement réel des matériaux routiers dans les conditions réelles d'exploitation; on aurait ainsi l'avantage de trouver des solutions appropriées à une bonne partie des dégradations qui sont parfois plus le fait de stabilités de tout ordre et de compatibilité de certains paramètres entre eux. Ces planches sont indispensables car aujourd'hui la plupart des laboratoires critiquent la validité des essais Marshall; cet essai que nous privilégions pour la composition de nos enrobés. En effet d'énormes écarts sont parfois constatés entre les résultats des essais en laboratoire et le comportement en chaussée. On lui reproche de ne pas permettre de déceler des mélanges qui sous un trafic très concentré sont le siège de densifications pouvant amener un chute sensible de la stabilité.

VI. CONCLUSION

Cette étude constitue juste une ébauche dans l'analyse des défauts de surface des chaussées revêtues .En effet, les phénomènes à l'origine de ces dégradations sont inombbrables et surtout multiformes . Cependant , nous avons situer les insuffisance de certaines pratiques observées en matière d'entretien routier en vigueur dans nos pays .

Une première leçon qu'on peut tirer, c'est que le bon fonctionnement d'une route dépend dans une large mesure de la politique d'entretien adoptée .Dans nos pays cette politique est du type au jour-le- jour, pour des raisons semble-t-il, économiques .Or, il est de loin moins économiques de réparer chaque année voir chaque mois les mêmes défauts, que de les réparer adéquatement et durablement à des coûts relativement équivalents .Et tant que l'on ne se donne pas les moyens de bien diagnostiquer les causes , les remèdes ne peuvent qu'être inefficaces.

Le point à temps appliqué systématiquement , l'enduisage sans reconstitution préalable du corps de chaussée, le bouchage des nids de poule avec des enrobés à froid suivi d' enduit , sont autant de pratiques à proscrire car elles constituent souvent des solutions très imparfaites et un gaspillage de ressources.

L'entretien routier en afrique subsaharienne souffre de graves retards .En effet selon les experts de la banque mondiale les retards actuels d'entretien des routes dans cette partie del'afrique , coûtent environ 5 MILLIARDS de DOLLARS; près de 1200millions de dollards sont nécessaires chaque année en entretien

courant et en entretien périodique .Le ratio de la longueur du reseau de routes principales au PNB, varie de 0.4et 14.5 km par million de dollars de PNB . La part de devise est de l'ordre de 50% pour l'entretien .Au vue du poids financier préponderant de ce poste, des etudes plus élaborés doivent être entreprises dès maintenant de mieux participer aux différents programmes en cours d'elaboration ou en début d'exécution comme le PAST(Programme d'Ajustement Sectoriel des Transports) ou le SSATP(Sub Saharian Africa Transportation Program) de la banque mondiale(BIRD) . Enfin ,les attitudes fatalistes ou défaitistes doivent céder la place à l'angagement courageux et décisif vers une politique de l'entretien ,plus effective et efficace .En effet ce developpement economique si cher à nos coeur, ne peut avoir avoir de base sûre sans une chaussée bien conçue et sutout mieux entretenue .

ANNEXE 1

tableau des valeurs de l'indice E :

NP = nid de poule ;

P = pelade ;

FC = fissures ouvertes ;

SA = surfaces arrachées ;

E = indice Etat

NP	P	TC	FO	SA	E
0	0	0	0	0	0,00
0	0	0	0	1	0,15
0	0	0	1	1	1,20
0	1	1	1	1	4,05
0	1	1	1	1	9,60
10	0	0	0	0	4,00
10	0	0	0	1	4,15
10	0	0	1	1	5,20
10	0	1	1	1	8,05
10	0	1	1	1	13,60

Ces combinaisons nous paraissent les plus représentatives pour l'objectif que nous visons . Par exemple certaines combinaisons des quatre paramètres (P,TC,FO,SA) sont exclues vu que les pondérations sont les mêmes . C'est le cas des combinaisons :

00001 ==01000 ==00100 ==00010

ANNEXE 2°/

Causes et remèdes pour quelques dégradations :

DEGRADATIONS	CAUSES POSSIBLES	REMEDES
1_ Ressuage	<ul style="list-style-type: none"> _ dosage en liant trop élevé _ liant inadapté 	sablage
2_ Fissures	<ul style="list-style-type: none"> _ mauvaise qualité des matériaux _ mauvaise mise en oeuvre _ épaisseur insuffisante de la chaussée par rapport au trafic . _ retrait _ âge de la chaussée 	réfection localisée du revêtement ou colmatage pour les fissures de surface . Si les fissures du corps de chaussée
3° Ornières ou flaches	<ul style="list-style-type: none"> -portance insuffisante du sol support ou du corps de chaussée par rapport au trafic stabilité insuffisante du revêtement (pour les enrobés) . 	déflachage réfection localisée du corps de chaussée .
4° Affaissement localisé des bords de chaussée	<ul style="list-style-type: none"> _ Accotements insuffisants ou non entretenus pénétration d'eau et perte de portance des couches du corps de chaussée ou du sol support _ mauvais drainage 	Selon profondeur il faut : déflacher et réfectionner les accotements . réfection localisée du corps de chaussée et améliorer drainage

ANNEXE 3

ESSAIS

1) MARSHALL (stabilité et

fluage)

Nous avons effectué cet essai qui n'est pas normalisé - puisque le MARSHALL de l'ASTMD1559 concerne les enrobés à chaud-afin de nous faire une idée de la stabilité et du fluage des enrobés à froid sous trafic. Il n'existe pas d'essai , en patique, qui puisse caractériser ce type de mélange.

Les critères marshall retenus par l' Asphalt Institute[Mix Design Methods For Asphalt ,Concrete and Other Hot mixTypes.(4th edition 1974 ; page 31] sont pour un trafic léger:

-Stabilité :Minimum =2224N

-Fluage :Minimum=8 (en unités de 0.25mm)

Maximum=20(en unités

de025mm).

La valeur maximale observée lors de nos essais est de 637.28 N soit 28.7% de la valeur minimale requise même pour un trafic léger(cas le plus optimiste); on observe une grande disproportionnalité entre les efforts appliqués et les déformations(fluage =14 en unités de 0.25mm). Cette grande déformabilité des enrobés à froid ,peut s'expliquer par certains traits propres à ce type de mélange:

-Le niveau de compacité

Le stockage en plein air de ces enrobés a augmenté la viscosité du liant ;celui-ci en durcissant constitue une matrice qui

s'oppose au compactage. Cette masse visqueuse absorbe une bonne partie de l'énergie de compactage. Or la stabilité du mélange est d'autant plus bonne que les granulats sont bien imbriqués; idem pour le fluage.

- l'adhésivité

Le mélange étant fait à froid et sur du granulat dont la propriété est incertaine, de minces films de fines s'interposent entre le granulat et le liant. Aussi sous une charge donnée, chacun des constituants a un déplacement relatif par rapport à l'autre; cette faible adhésivité explique en partie ces faiblesses des enrobés à froid.

Signalons aussi que lorsque nous avons effectué des essais sur un autre mélange d'enrobés (40% de 3/8 et 60% de 8/16), nous avons obtenu des valeurs de fluage plus faibles mais aussi des stabilités un plus faibles que précédemment. Ceci peut s'expliquer par la relative rigidification de la matrice bitumineuse due aux éléments fins.

2- Granulométrie d'un

bicouche .(voir feuille de resultats)

Ces deux(2) courbes (3/8 et 8/16) sont assez régulières et favorisent un bon compactage. Notre visite sur le chantier nous a permis de nous rendre compte effectivement de la qualité de surface de la chaussée (sur le tronçon Tivaouane-MBoro) refectonnée avec ces matériaux. (Voir courbes granulométriques en annexe).

ANNEXES4

Autres essais et recommandations

A) Emulsions et CUT Back

- 1) viscosité (émulsions et cut back)
- 2) Stabilité au stockage (émulsion)
- 3) Pénétration résiduelle (Emulsion et cut back)

B) Enrobés à froids

- 1) Granularité
- 2) Stabilité.

En règle générale les caractéristiques essentielles d'un matériau butumineux sont les suivantes:

a)- Il doit posséder un bon pouvoir de cimentation ou une bonne cohésivité.

b)- Il doit posséder une bonne affinité ou adhésivité pour les substances minérales.

c)- Il doit être physiquement stable, c'est à dire résistant au vieillissement.

d)- Il ne doit avoir un caractère uniforme et ne contenir que des traces d'impuretés.

e)- Il ne doit pas être inflammable aux températures d'utilisation.

f) Il ne doit pas poser de problèmes de construction . Il doit posséder une bonne viscosité, un temps de décharge ou de prise

raisonnable.

C'est dans le but de s'assurer de la qualité de certaines propriétés que nous jugeons essentielles que nous avons choisies celles que nous avons indiquées au début de la présente étape.

Il est essentiel de connaître le trafic ici encore. Certains essais comme le MARSHALL dépendent du type de trafic pour le nombre de coups lors du compactage de l'échantillon.

BIBLIOGRAPHIE

- 1) G.Jeuffroy "Conception et Construction des Chaussées"
- 2) Yoder &Witczack: "Principles of Pavement Design"
- 3) OCDE : "Catalogue des dégradations de surfaces des chaussées"
- 4) BCEOM /CEBTP:"MANUEL sur les routes dans les zones tropicales et désertiques .Tome 3
- 5) CEBTP : "Guide dedimensionnement des chaussées dans les pays tropicaux "
- 6) LCPC : "les enduits superficiels et les routes économiques "
- 7) Nations Unies (CEA) : "Manuel d'entretien des routes ".Tome 3 : A-Point à temps ; B- Enduits superficiels ; C- Tapis bicouche .
- 8) Jean Mallouk: "Bitume et béton bitumineux".Tome 1&2
- 9) Revue générale des routes et aérodrômes. Numéros : 669; 670 ;671; 672; 673 .
- 10)G.I.C. "Comptage Routier 1989"
- 11) Louis Berger Int. Inc. "Manuel de Système de programmation et de planification de l' entretien routier " Février 1979
- 12) LCPC/SETRA/CEBTP/BCEOM : "Domentation routière pour les pays en développement " Numéro 33 Janvier -Juin 1988.
- 13) Bulletin de liaison laboratoire ponts & chaussées Numéro 160 Février-mars 1989 Référence 336R.
- 14) Bulletin de liaison LCPC 162 Juillet-Aout 1989 Reference 3408
- 15) Cheick Guèye & Mamadou D.Sow "Conception des voies urbaines revêtues au Sénégal" Memoire de fin d'étude .ENSUT . Dakar. 1980
- 16) Bacari Coly & Ousseynou Samb : "- Entretien

d'aérodromes/Renforcement des chaussées revêtues par les méthodes modernes". ENSUT .1982.DAKAR.

17) Ministère de l'équipement /Direction des travaux publics . DEP-
Juin 1982 "Etude de renforcement des routes bitumées" Phase 1.
Diagnostic .BCEOM.

18) Techniques de l'ingénieur "Véhicules routiers et chaussées ".
C4400.

19) COURS de MR MASSAMBA SALL SAMB Route 521 & Laboratoire de
Voirie.

20) Le Soleil du 10 janvier 1990

21) Le Soleil du 22 Avril 1990

22) G. Caroff "Sceroute" in RGRA 1989.

23) ASTM " PART 15 of the 1978 annual book of ASTM Standards ".

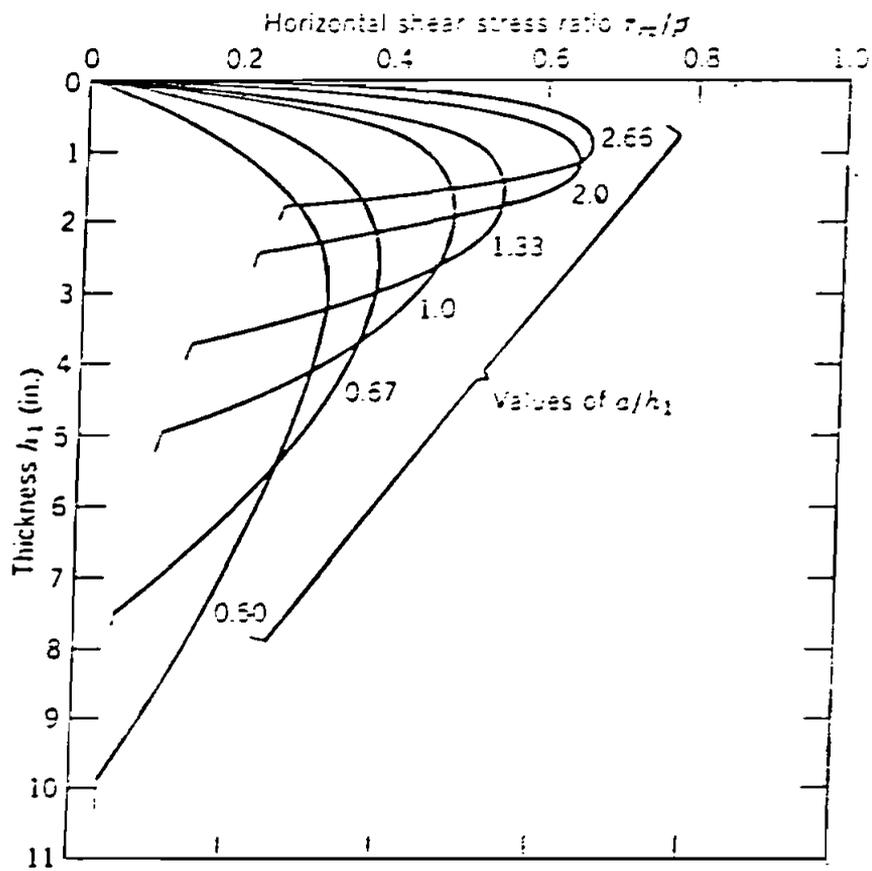


Figure 2.13. Influence of a/h on the depth and magnitude of (τ_{max}/p) for $a = 5$ inches and $K_1 = K_2 = 20$. (From Nielson.)

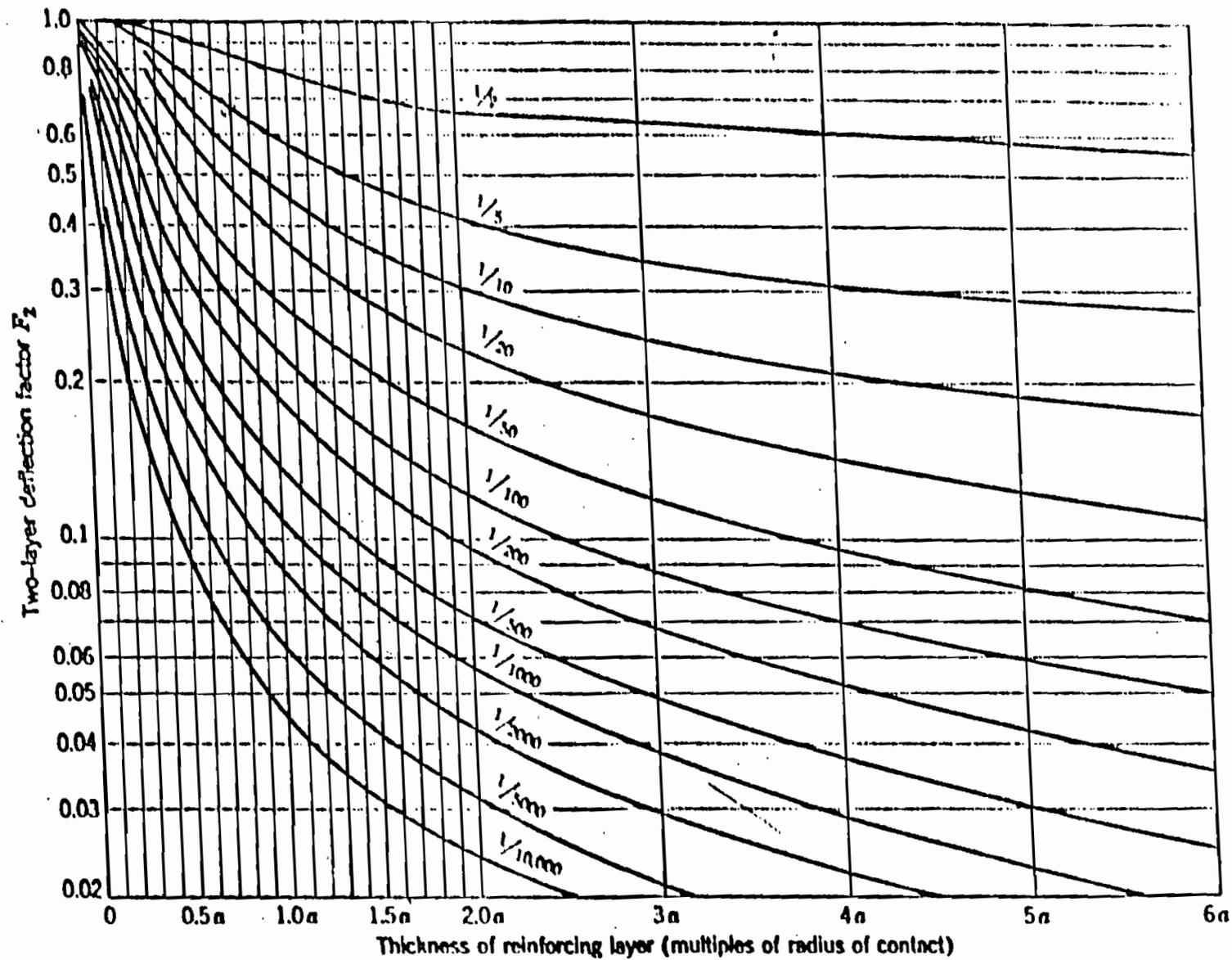


Figure 2.7. Influence values—two-layer theory. (From Burmister, *Proceedings, Highway Research Board*, 1943.)

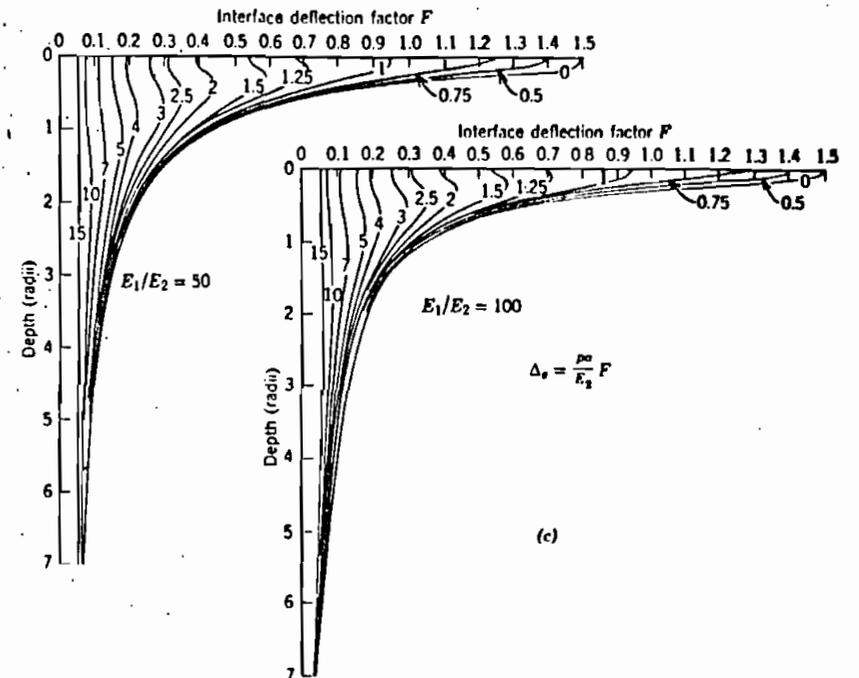
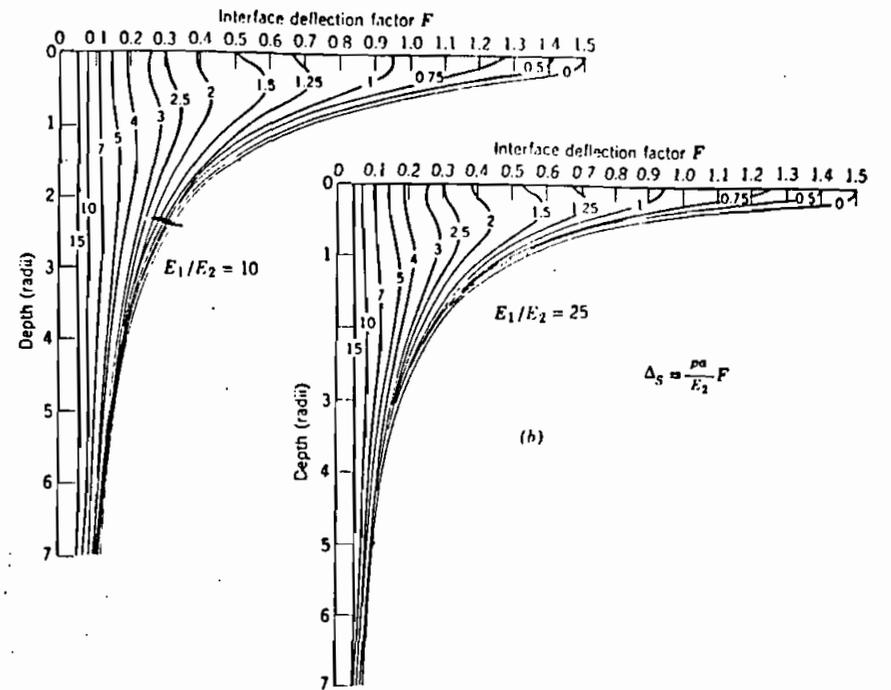
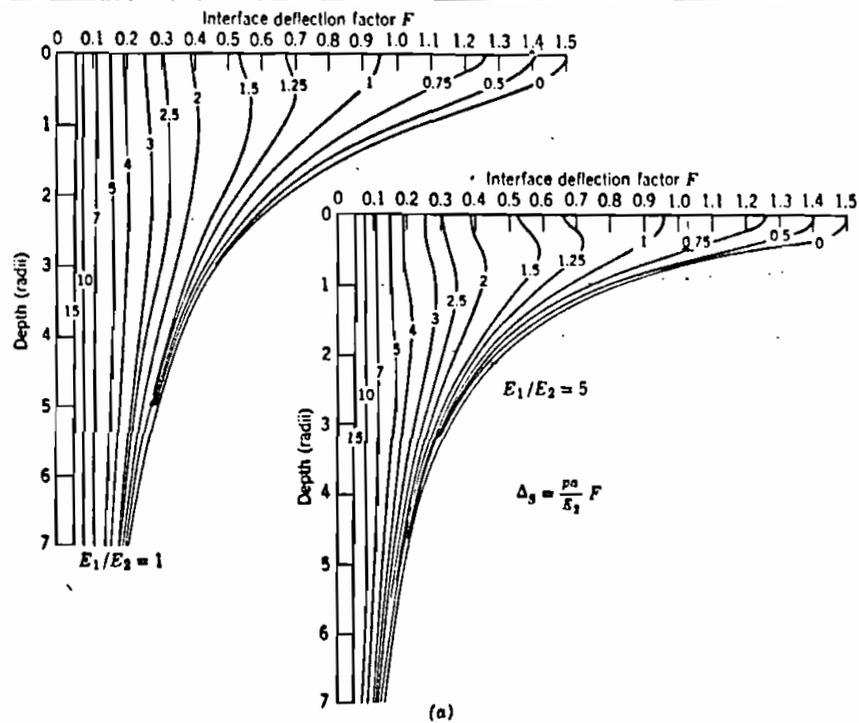


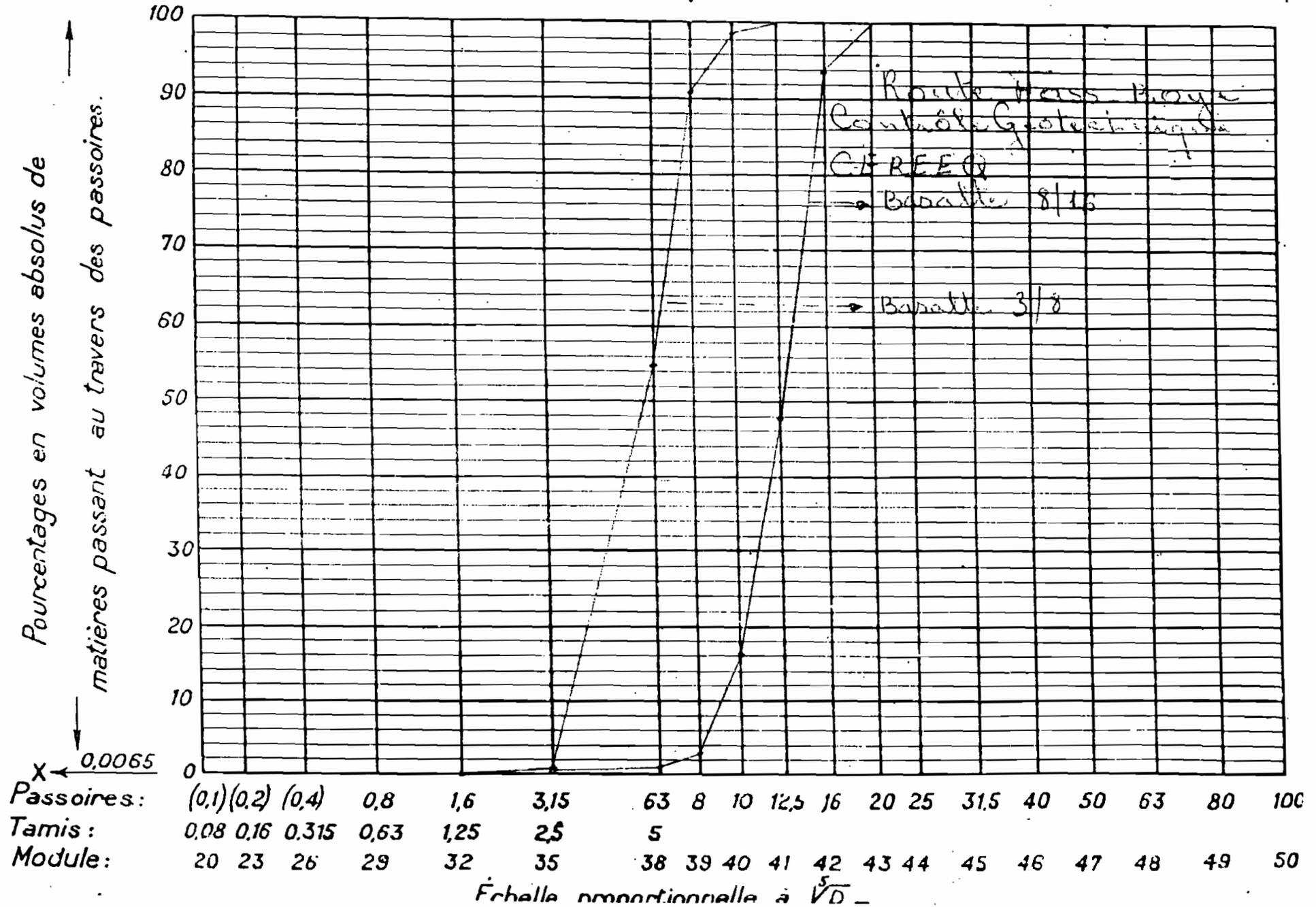
Figure 2.8. Vertical deflection at the interface of a two-layer system. Deflection values are obtained from Equation 2.10. Numbers on curves indicate offset distances in radii. Curves are for various modular ratios as follows. (a) $E_1/E_2 = 1$; 3; (b) $E_1/E_2 = 10$; 25; (c) $E_1/E_2 = 50$; 100. (From Huang.)

Figure 2.8. Continued

Courbes granulométriques

selon MM. CAQUOT et FAURY -

DOSSIER:.....
ESSAI n°:.....



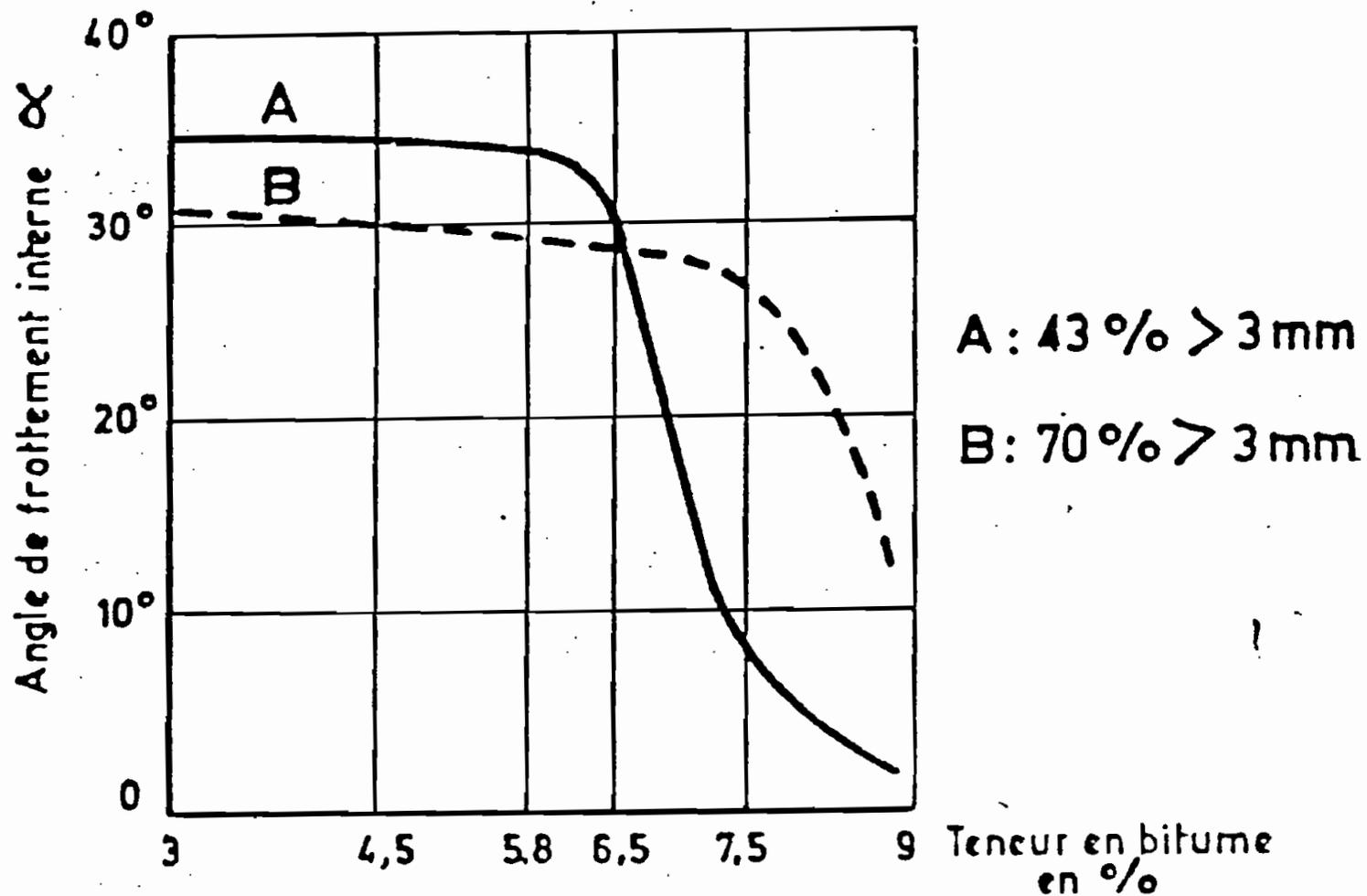


FIG. IX-11. — Variation de l'angle de frottement interne de deux bétons bitumineux en fonction du dosage en liant.

		Répandage	
		Niveleuse	Finisseur
Épaisseurs de reprofilage *	0 à 4 cm	Microbéton 0/4 ou 0/6 à chaud dosé à 7,5 % de bitume 80/100 **	
	0 à 12 cm	Grave - émulsion 0/14 dosée de 4,2 à 4,5 % de bitume résiduel 180/220 voire 80/100 **	
	2 à 10 cm		Béton bitumineux 0/10 sableux (40 à 45 % de tamisat à 2 mm) dosé de 5 à 5,5 % de bitume 60/70
<p>* La grave-bitume est inadaptée au reprofilage.</p> <p>** Les reprofilages réalisés avec ces matériaux indentables ne devront pas recevoir d'enduit d'usure aux liants anhydres.</p>			

ESSAI MARSHALL - STABILITÉ ET FLUAGE

II - L'ESSAI ET LES RÉSULTATS

(norme ASTM D 1559)

ÉQUIPE N° : _____ DATE : _____
 NOMS : Ali Boukari

Éprouvettes préparées le : _____ Type de mélange : Enrobés à froid

Caract. du compactage : 50 coups Teneur en bitume = 6 %

IDENTIFICATION de L'ÉPROUVETTE	1	2	3
	(1)	(2)	(3)

FACTEUR DE CORRECTION	ÉPAISSEUR DE L'ÉPROUVETTE (en mm)	1	64,7 mm	2	64,6 mm	3	64,6 mm
	(faire la moyenne d'au moins 3 mesures à l'aide d'un pied à coulisse)	2	64,6 mm	2	64,6 mm	2	64,7 mm
		3	64,8 mm	2	64,6 mm	2	64,5 mm
	épaisseur moyenne :		64,7 mm	2	64,6 mm	2	64,6 mm
	VOLUME CALCULÉ (N _B : 4 po. = 10,16 ca) =		566,66 cm ³	2	556,18 cm ³	2	559,37 cm ³
VOLUME MESURÉ (essai de densité brute) =		, cm ³	2	, cm ³	2	, cm ³	
FACTEUR DE CORRECTION (voir tableau (f(épais. en mm) ou f(volume en cm ³))	-A-	0,86	2	0,89	2	0,89	

Température du bain d'eau (normalement 60 ± 1°C) Durée d'immersion des éprouvettes (30 à 40 min)							
FLUAGE	LECTURE INITIALE de L'INDICATEUR Li =	4	1,05 mm	5	1,18 mm	5	1,60 mm
	LECTURE FINALE de L'INDICATEUR Lf =	5	1,80 mm	10	1,80 mm	9	1,20 mm
	FLUAGE (différence Lf - Li en mm) =	1	1,75 mm	5	1,62 mm	3	1,6 mm
	INDICE DE FLUAGE (en unités de 0,25 mm) =	7	22,48	14,4			
FLUAGE MOYEN (en mm ou en unités de 0,25 mm)		14,6					

STABILITÉ	Charge maximale observée (à la rupture)	22	15	15
	LECTURE DU COMPARETEUR (anneau de charge) : (nombre de divisions de 0,001 pouce)	22	15	15
	FORCE en lbf (voir calibration de l'anneau)	210, lbf	140,0 lbf	140,0 lbf
	FORCE en newtons (lbf x 4,448222) -B-	934,213 N	622,75 N	622,75 N
	STABILITÉ MARSHALL CORRIGÉE en N (B x A)	803,35 N	554,25 N	554,25 N
STABILITÉ MARSHALL MOYENNE CORRIGÉE		637,28 N		

DURÉE DE L'ESSAI (de la sortie du bain à la rupture) (maximum 30 secondes)	5	5	5
---	---	---	---

REMARQUES : Cet essai n'est pas normalisé. Nous l'effectuons dans le but de caractériser notre enrobé à froid de point de vue mécanique.

no - Thiès - mars 1987

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE THIÈS - LABORATOIRE DE VOIRIE
ESSAI MARSHALL - STABILITÉ ET FLUAGE

II - L'ESSAI ET LES RÉSULTATS

(norme ASTM D 1559)

ÉQUIPE N° : _____ DATE : _____
 NOMS : _____

Éprouvettes préparées le : _____ Type de mélange : Mélange 38,55% de 3/8
 et 61,45% de 8/16
 Caract. du compactage : 50 coups Teneur en bitume = 6 %

IDENTIFICATION de L'ÉPROUVETTE			
1	2	3	
()	()	()	

FACTEUR DE CORRECTION	ÉPAISSEUR DE L'ÉPROUVETTE (en mm)	1	64,7 mm	64,5 mm	63,7 mm
	(faire la moyenne d'au moins 3 mesures à l'aide d'un pied à coulisse)	2	64,7 mm	64,7 mm	63,8 mm
		3	64,8 mm	64,6 mm	63,7 mm
	épaisseur moyenne :		64,73 mm	64,6 mm	63,73 mm
	VOLUME CALCULÉ (N°: 4 po. = 10,16 cm) =		562,64 cm ³	561,5 cm ³	554,99 cm ³
	VOLUME MESURÉ (essai de densité brute) =		, cm ³	, cm ³	, cm ³
FACTEUR DE CORRECTION (voir tableau)		0,86	0,86	0,89	
	(f(épais. en mm) ou f(volume en cm ³))	-A-			

Température du bain d'eau (normalement 60 ± 1°C)					
Durée d'immersion des éprouvettes (30 à 40 min)					
FLUAGE	LECTURE INITIALE de L'INDICATEUR	Li =	8,76 mm	3,70 mm	8,71 mm
	LECTURE FINALE de L'INDICATEUR	Lf =	9,90 mm	7,50 mm	9,72 mm
	FLUAGE (différence Lf - Li en mm) =		1,14 mm	3,80 mm	1,01 mm
	INDICE DE FLUAGE (en unités de 0,25 mm) =		4,56	15,20	4,04
	FLUAGE MOYEN		7,9		
	(en mm ou en unités de 0,25 mm)				

STABILITÉ	Charge maximale observée (à la rupture)				
	LECTURE DU COMPAREUR (anneau de charge) :		10	13	20
	(nombre de divisions de 0,001 pouce)				
	FORCE en lbf (voir calibration de l'anneau)		90,0 lbf	120,0 lbf	190,0 lbf
	FORCE en newtons (lbf x 4,448222)	-B-	400,34 N	533,78 N	845,16 N
	STABILITÉ MARSHALL CORRIGÉE en N (B x A)		344,29 N	459,06 N	752,19 N
STABILITÉ MARSHALL MOYENNE CORRIGÉE		518,51 N			
DURÉE DE L'ESSAI (de la sortie du bain à la rupture)		5	5	5	
	(maximum 30 secondes)				

REMARQUES : Cet essai n'a été fait que pour constater la stabilité et le fluage de notre matériau.

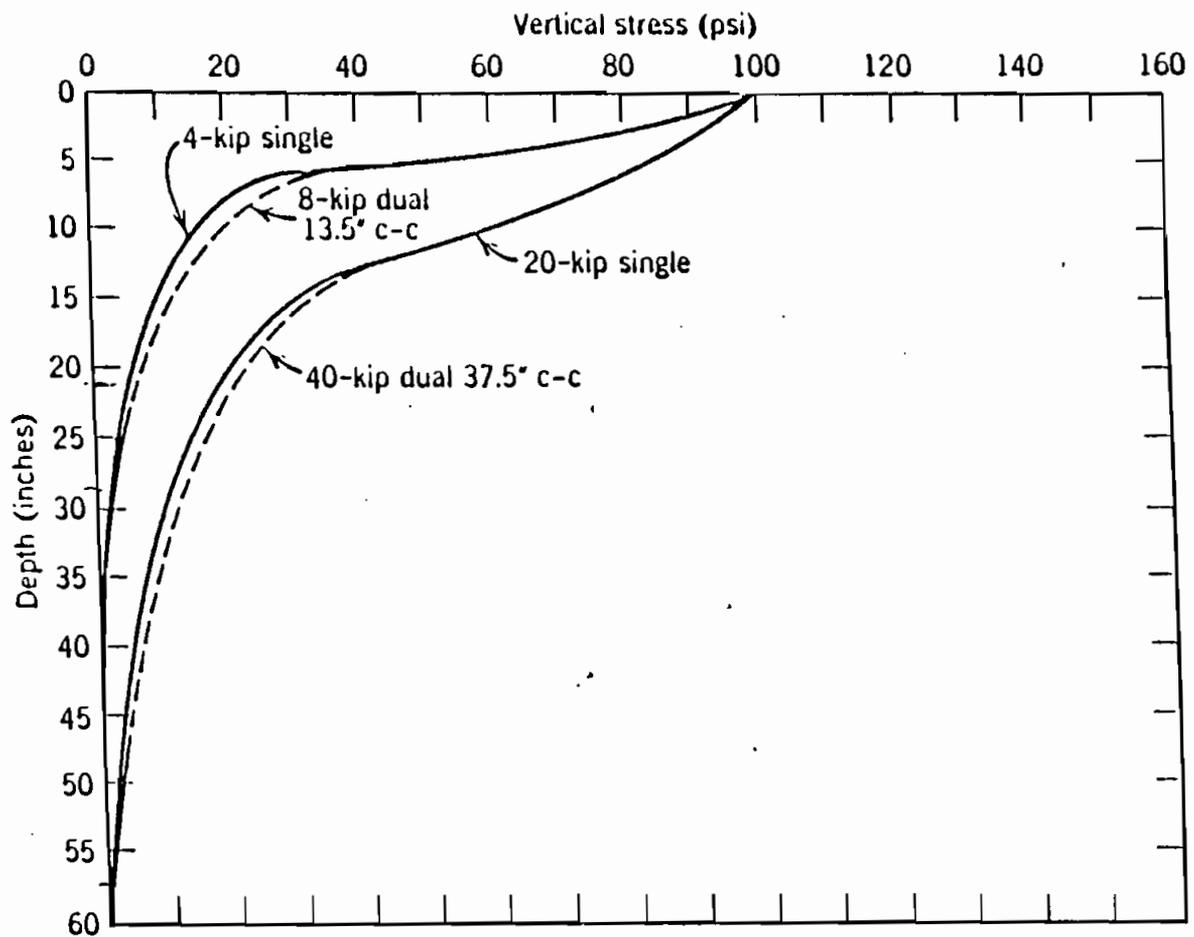
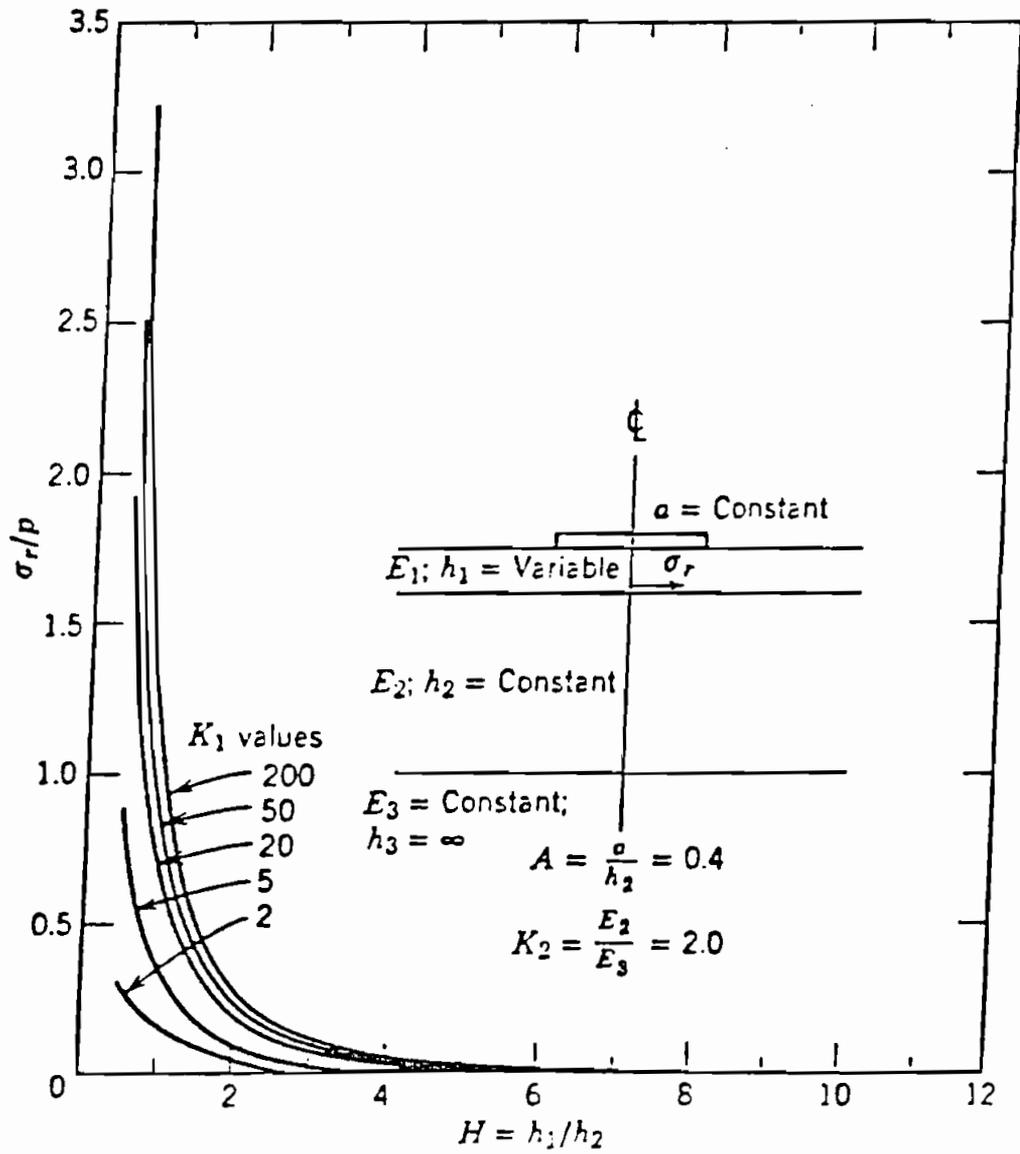


Figure 2.16. Effect of number of wheels on vertical stress. Boussinesq problem. Notes (1) All tires have 100 psi inflation. (2) Depth at which interaction of dual wheels is significant is about equal to one-half the clear distance between tires. (3) Depth at which dual tires will act as a single tire is about two times the c-c spacing of the tires.

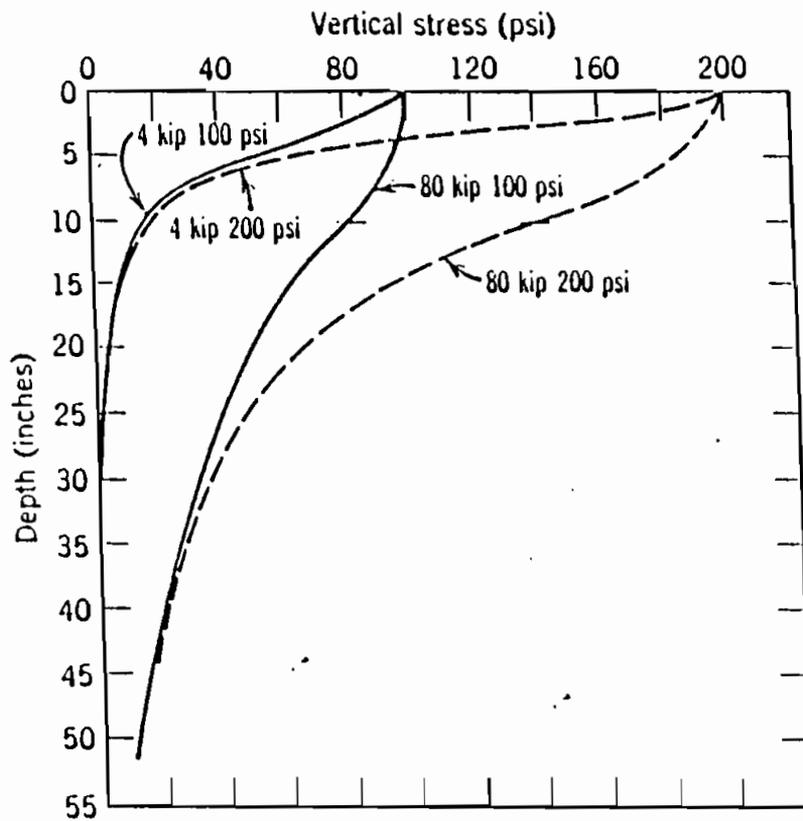


2.14. Horizontal tensile stress ratio at the bottom of the first layer of a three-layered system as a function of K_1 and H .

CATALOGUE DES INDICES DE DÉGRADATION

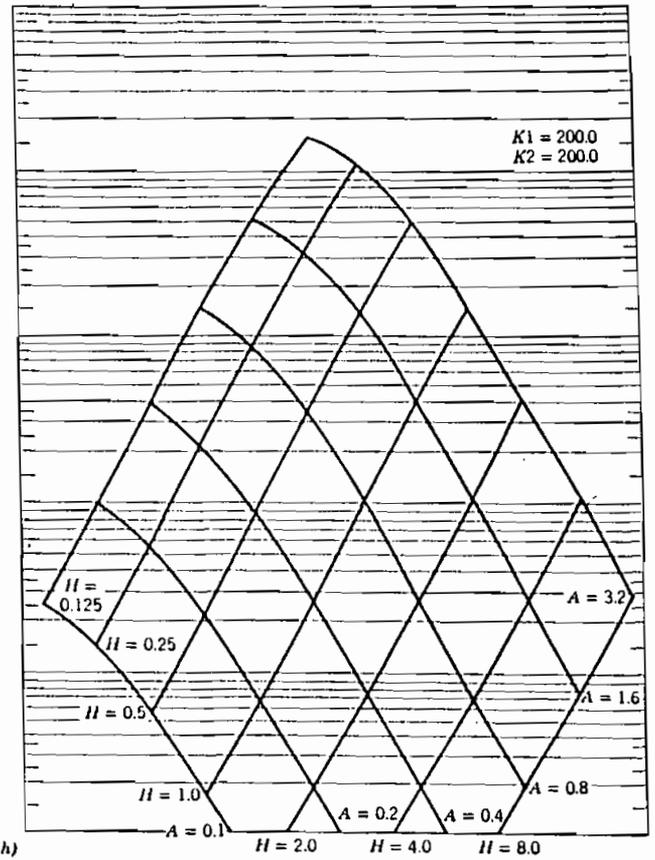
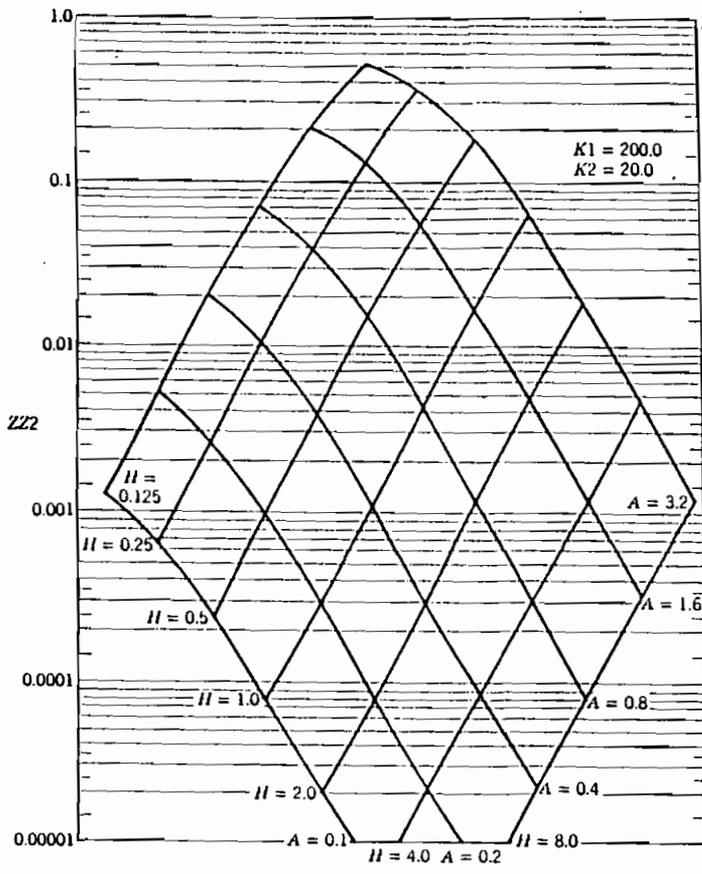
REVISION : 00

CHAUSSEES REVETUES		
INDICE	ETAT	DESCRIPTION
5	Excellent	Chaussée ou route nouvellement construite
4	Bon	Détérioration (fissures, nids de poule, ressuage, déchaussement, déformations) rares sur moins de 5 % de la longueur. L'état de la chaussée est satisfaisant pour le trafic existant.
3	Moyen	Détériorations sporadiques sur 5 à 15 % de la longueur. Un entretien point à temps est nécessaire pour ramener la chaussée à l'indice "Bon" et éviter une dégradation plus importante.
2	Mauvais	Détériorations fréquentes sur 15 à 50 % de la longueur. Une couche d'étanchéité est nécessaire pour enrayer la poursuite des dégradations et ramener la chaussée à l'indice "Bon".
1	Très mauvais	Détériorations nombreuses sur plus de 50 % de la longueur. Un reprofilage aux enrobés est nécessaire pour ramener la chaussée à l'indice "Bon".



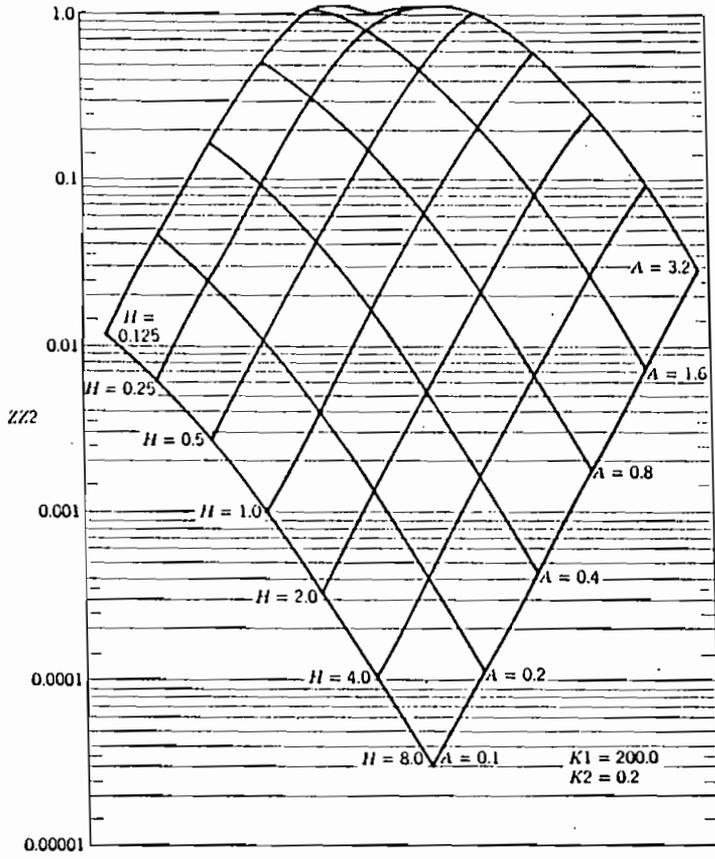
EFFETS
DE
LA PRESSION
DE
GONFLEMENT.

Figure 2.15. Variation of vertical stress with depth, Boussinesq problem.

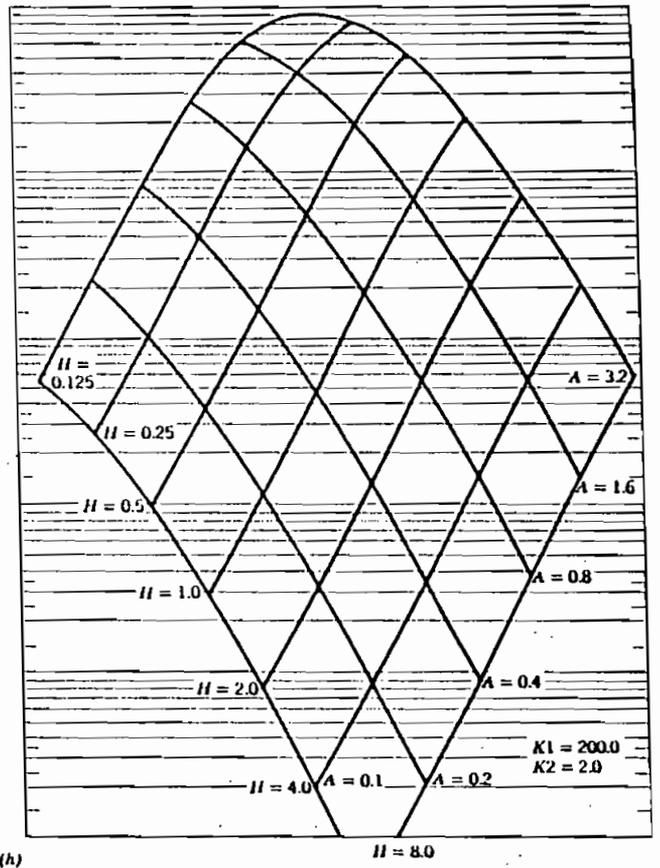


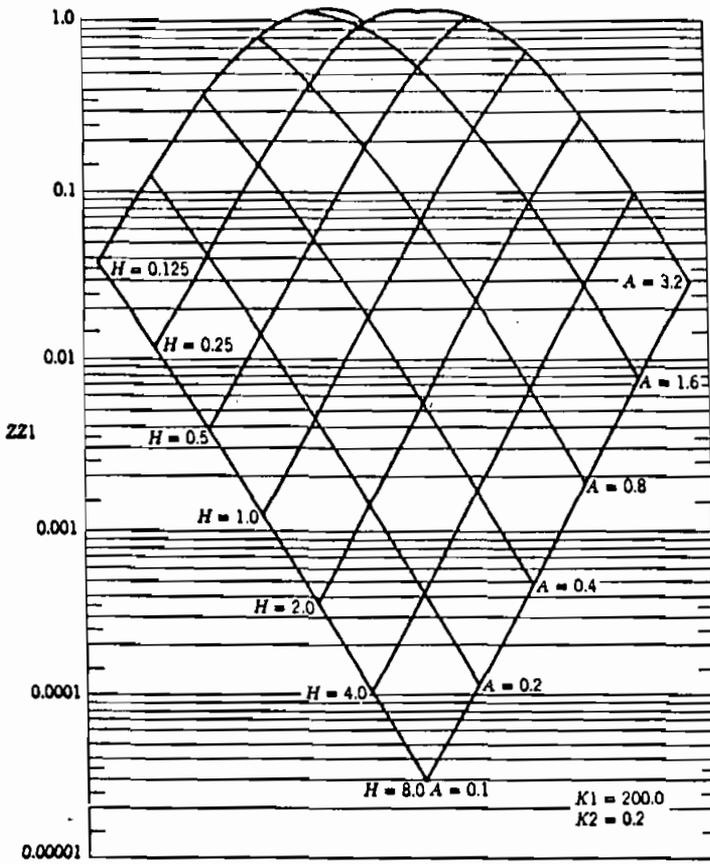
(h)

63 Figure 2.10. Three-layer stress factors. (From Peattie.) (h) Vertical stress, Z_{22} , $K_1 = 200.0$, $K_2 = 0.2$ to 200.0 .

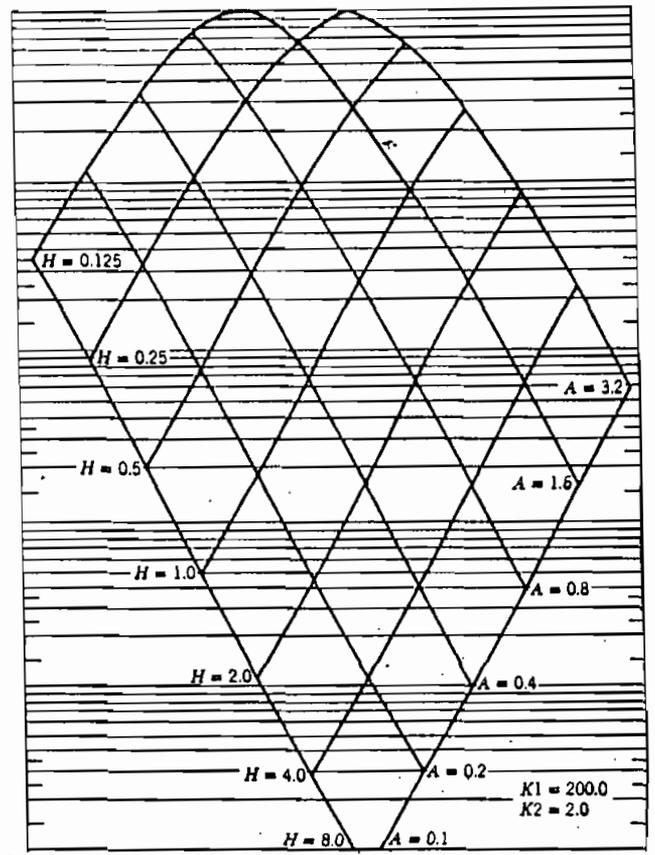


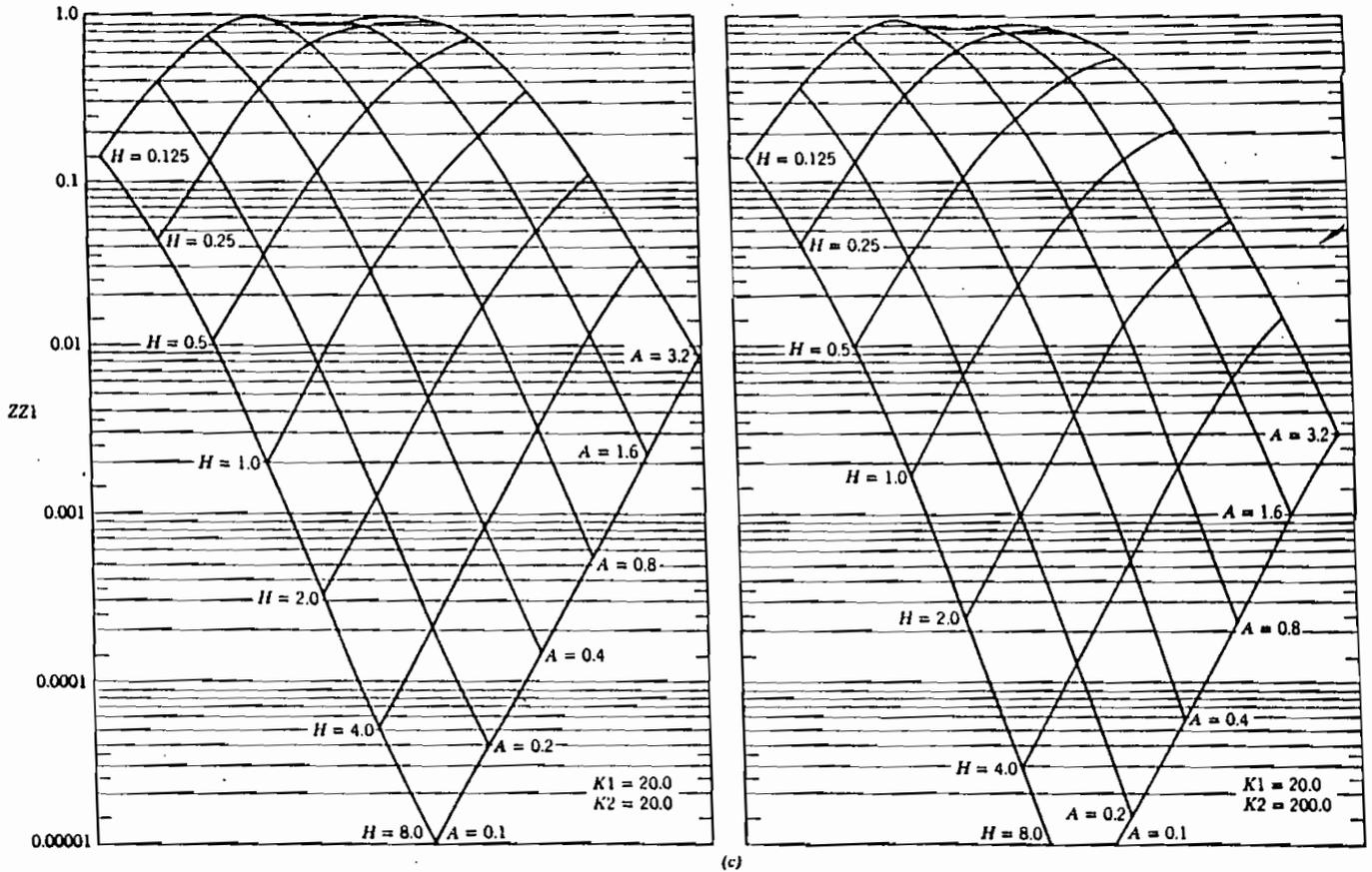
(a)





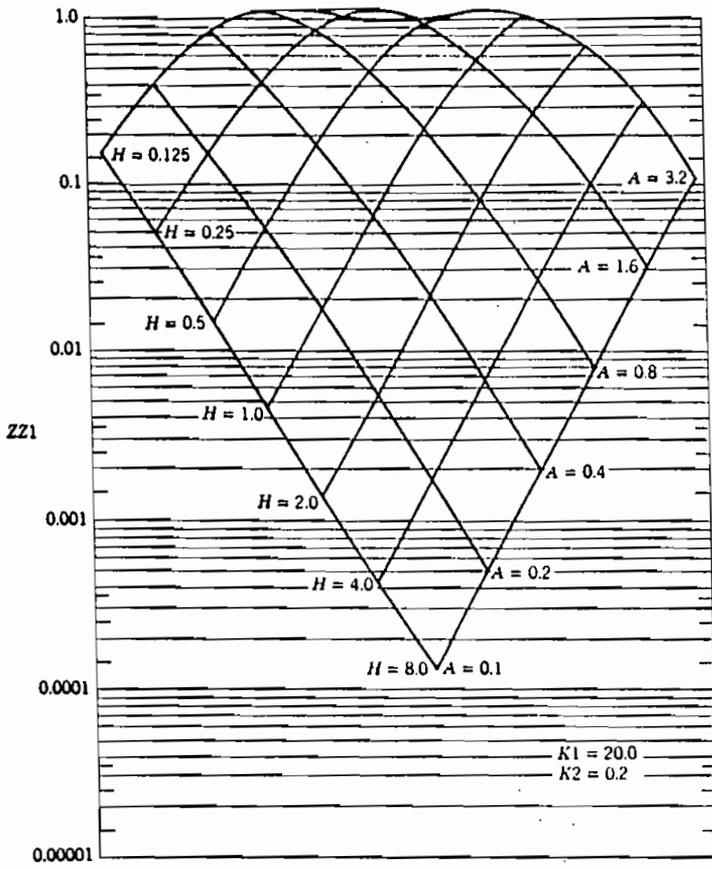
(d)



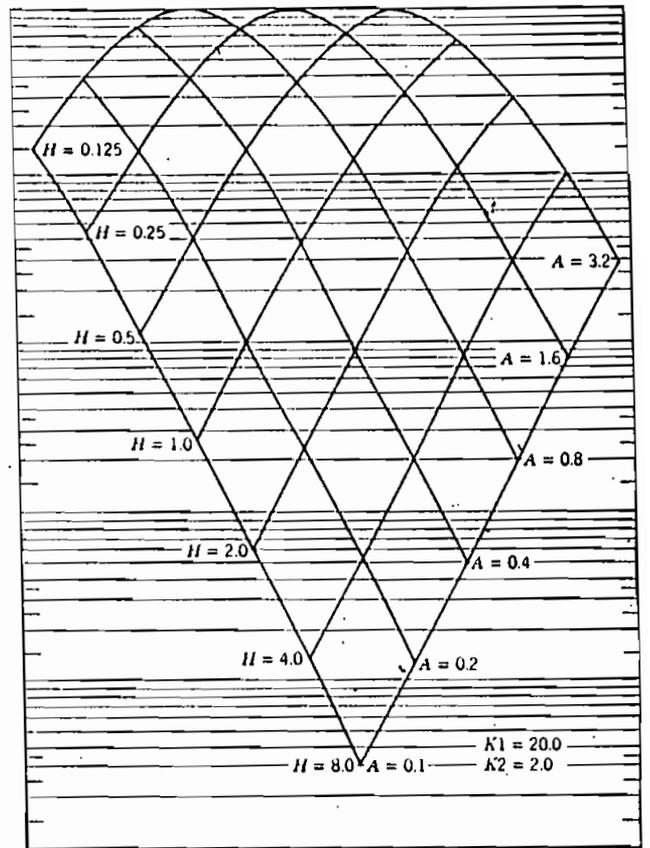


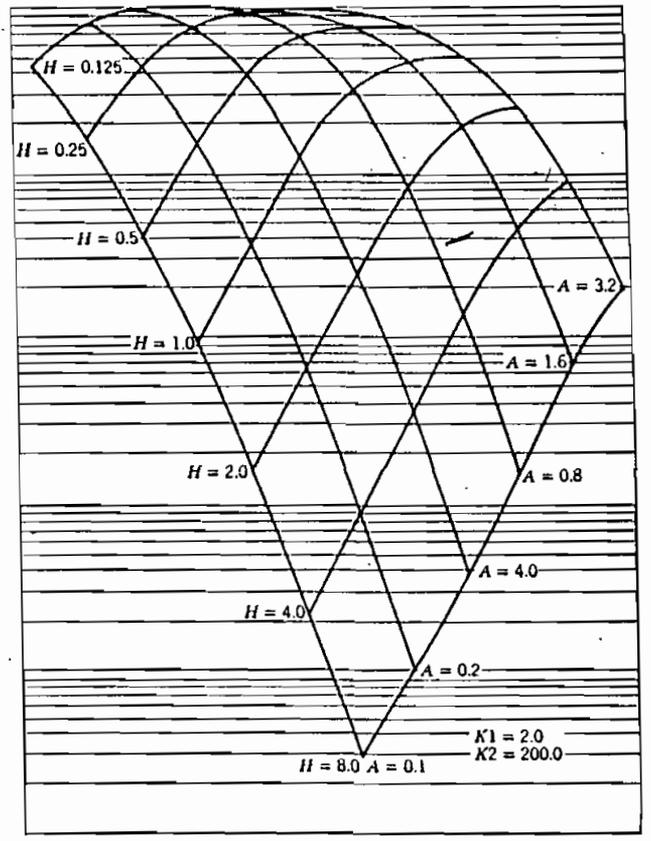
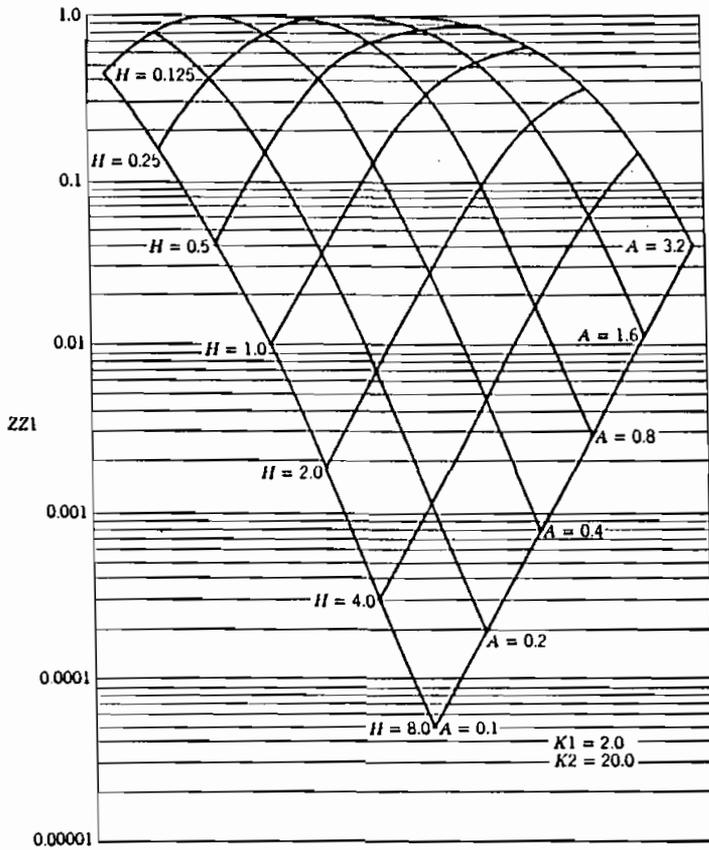
(c)

53 Figure 2.10. Three-layer stress factors. (From Peattie.) (c) Vertical stress $ZZ1$, $K1 = 20.0$, $K2 = 0.2$ to 200.0 .



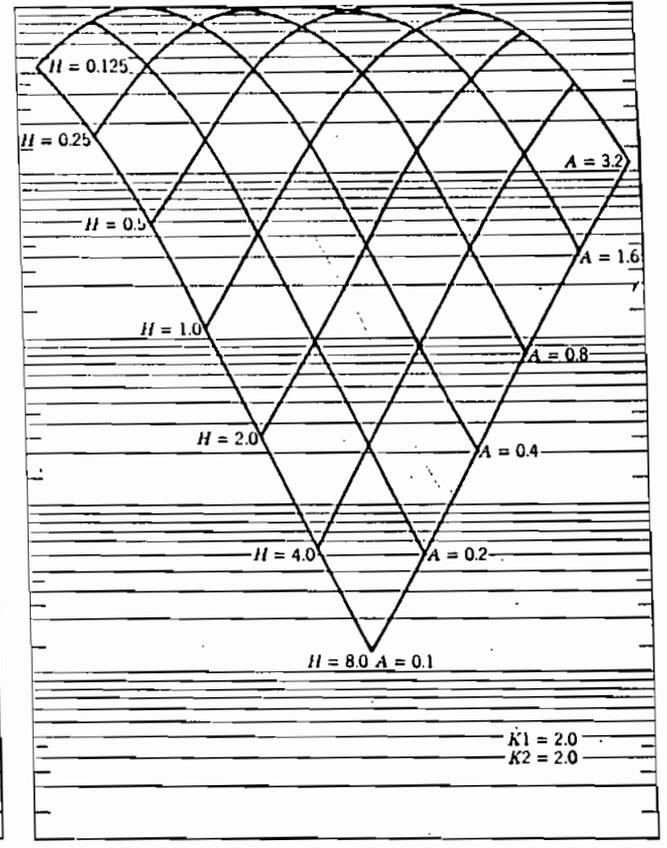
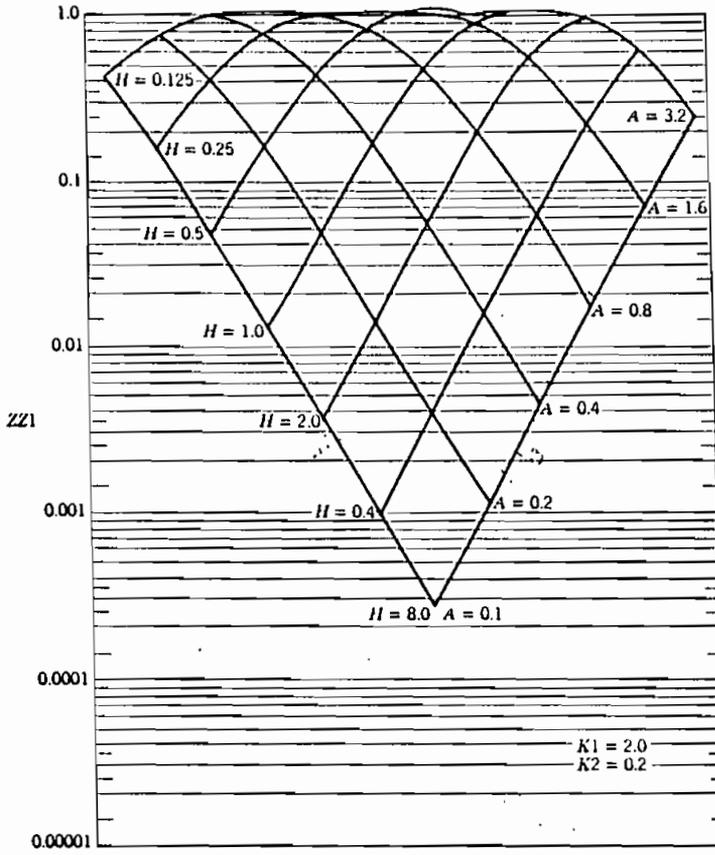
(c)



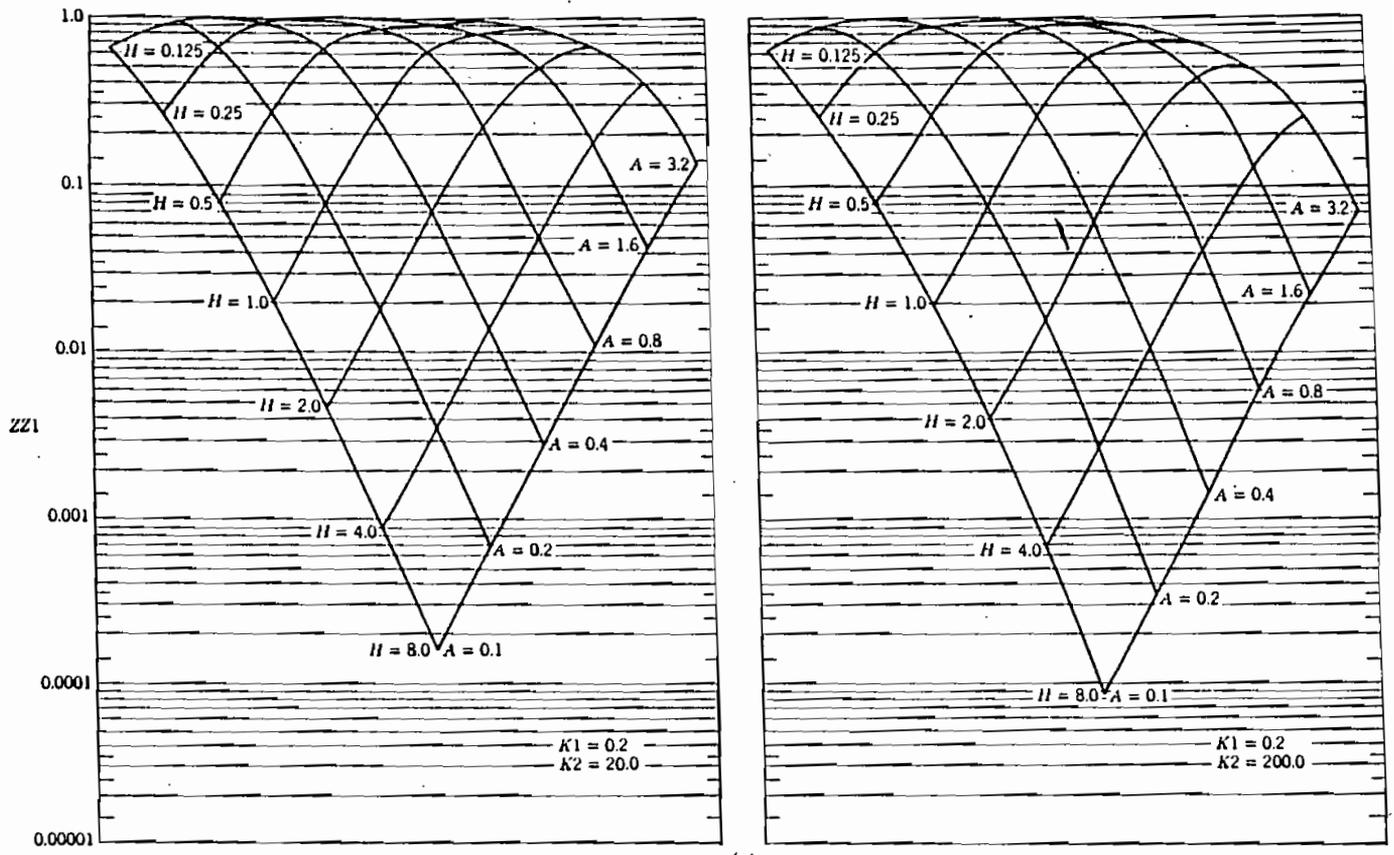


(b)

51 Figure 2.10. Three-layer stress factors. (From Peattie.) (b) Vertical stress, ZZ_1 , $K_1 = 2.0$, $K_2 = 0.2$ to 200.0 .

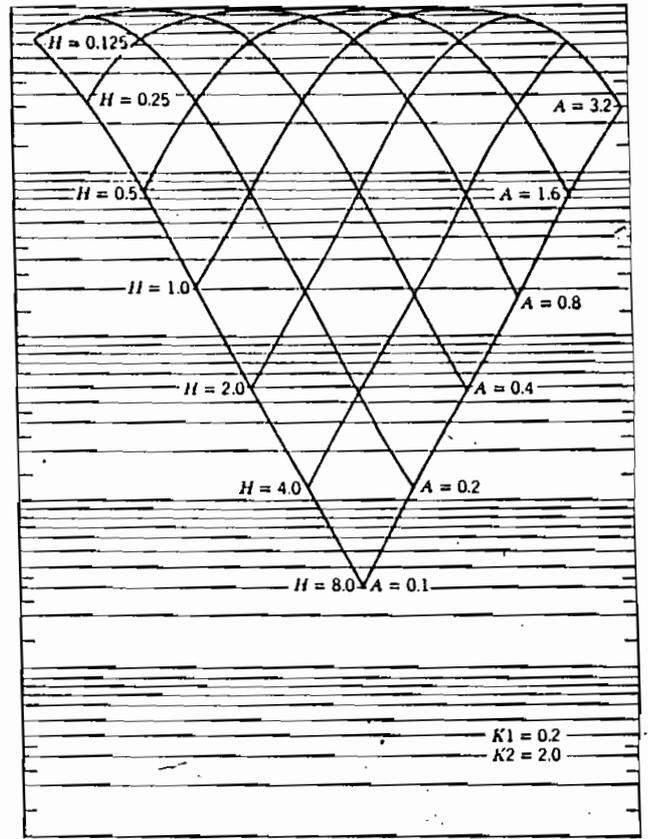
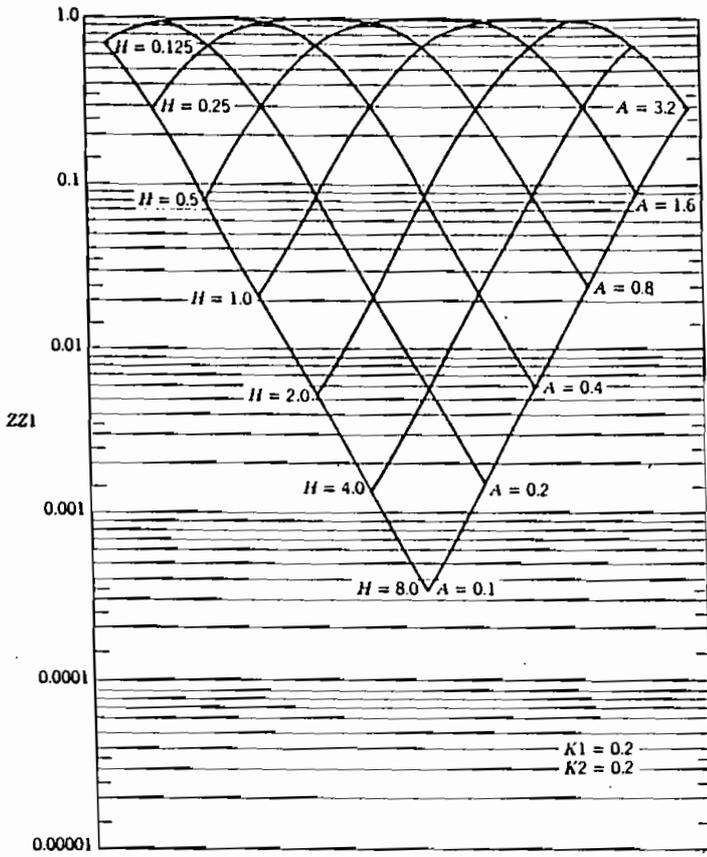


(b)



(a)

49 Figure 2.10. Three-layer stress factors. (From Peattie.) (a) Vertical stress, ZZ_1 , $K_1 = 0.2$, $K_2 = 0.2$ to 200.0.



(a)

TABLE 2.3. (continued)

α_1	$H = 8.0$ $k_1 = 0.2$			$H = 8.0$ $k_1 = 2.0$			$H = 8.0$ $k_1 = 20.0$			$H = 8.0$ $k_1 = 200.0$		
	(ZZ1-RR1)	(ZZ2-RR2)	(ZZ2-RR3)	(ZZ1-RR1)	(ZZ2-RR2)	(ZZ2-RR3)	(ZZ1-RR1)	(ZZ2-RR2)	(ZZ2-RR3)	(ZZ1-RR1)	(ZZ2-RR2)	(ZZ2-RR3)
	$k_1 = 0.2$			$k_1 = 0.2$			$k_1 = 0.2$			$k_1 = 0.2$		
0.1	0.00006	0.00007	0.00036	0.00028	0.00004	0.00022	0.00058	0.00001	0.00006	0.00083	0.00000	0.00001
0.2	0.00023	0.00028	0.00142	0.00111	0.00017	0.00087	0.00223	0.00005	0.00025	0.00330	0.00001	0.00005
0.4	0.00090	0.00113	0.00567	0.00444	0.00069	0.00347	0.00889	0.00020	0.00099	0.01320	0.00004	0.00018
0.8	0.00354	0.00449	0.02246	0.01752	0.00275	0.01373	0.03522	0.00079	0.00393	0.05342	0.00014	0.00072
1.6	0.01335	0.01725	0.08624	0.06662	0.01000	0.05298	0.13569	0.00306	0.01528	0.20411	0.00058	0.00282
3.2	0.04270	0.05907	0.29533	0.22014	0.03093	0.18466	0.47240	0.01105	0.05524	0.74013	0.00212	0.01058
	$k_1 = 2.0$			$k_1 = 2.0$			$k_1 = 2.0$			$k_1 = 2.0$		
0.1	0.00008	0.00011	0.00021	0.00039	0.00020	0.00010	0.00070	0.00001	0.00002	0.00100	0.00001	0.00000
0.2	0.00030	0.00185	0.00083	0.00157	0.00078	0.00039	0.00318	0.00016	0.00008	0.00438	0.00002	0.00001
0.4	0.00121	0.00660	0.00330	0.00628	0.00311	0.00156	0.01260	0.00064	0.00032	0.01748	0.00009	0.00005
0.8	0.00480	0.02416	0.01308	0.02487	0.01237	0.00618	0.05007	0.00253	0.00127	0.08956	0.00037	0.00018
1.6	0.01841	0.10080	0.05040	0.09597	0.04802	0.02401	0.19496	0.00993	0.00496	0.27262	0.00145	0.00072
3.2	0.06307	0.35008	0.17504	0.33806	0.17188	0.08594	0.70709	0.03678	0.01839	1.01322	0.00547	0.00273
	$k_1 = 20.0$			$k_1 = 20.0$			$k_1 = 20.0$			$k_1 = 20.0$		
0.1	0.00010	0.00105	0.00005	0.00061	0.00037	0.00002	0.00106	0.00000	0.00000	0.00136	0.00001	0.00000
0.2	0.00040	0.00421	0.00021	0.00242	0.00149	0.00007	0.00425	0.00025	0.00001	0.00546	0.00003	0.00000
0.4	0.00158	0.01679	0.00084	0.00907	0.00596	0.00030	0.01696	0.00100	0.00005	0.02181	0.00013	0.00001
0.8	0.00629	0.06664	0.00333	0.03845	0.02369	0.00118	0.06751	0.00398	0.00020	0.08687	0.00052	0.00003
1.6	0.02463	0.25871	0.01294	0.15010	0.00274	0.00464	0.26466	0.01565	0.00078	0.34202	0.00204	0.00010
3.2	0.09123	0.92478	0.04024	0.54042	0.34233	0.01712	0.98450	0.05892	0.00295	1.29190	0.00777	0.00039
	$k_1 = 200.0$			$k_1 = 200.0$			$k_1 = 200.0$			$k_1 = 200.0$		
0.1	0.00015	0.00162	0.00001	0.00082	0.00052	0.00000	0.00133	0.00008	0.00000	0.00163	0.00001	0.00000
0.2	0.00059	0.00648	0.00003	0.00328	0.00200	0.00001	0.00531	0.00032	0.00000	0.00854	0.00004	0.00000
0.4	0.00235	0.02587	0.00013	0.01310	0.00825	0.00004	0.02122	0.00128	0.00001	0.02613	0.00016	0.00000
0.8	0.00938	0.10287	0.00051	0.05216	0.03287	0.00016	0.08453	0.00509	0.00003	0.10417	0.00003	0.00000
1.6	0.03710	0.40238	0.00201	0.20491	0.12933	0.00065	0.33268	0.02009	0.00010	0.41121	0.00249	0.00001
3.2	0.14226	1.48067	0.00740	0.76769	0.48719	0.00244	1.25614	0.07660	0.00038	1.56843	0.00657	0.00005

H	k ₁ = 0.2				k ₁ = 2.0				k ₁ = 20.0				k ₁ = 200.0			
	(ZZ1-HR1)	(ZZ2-HR2)	(ZZ3-HR3)	(ZZ1-HR1)	(ZZ2-HR2)	(ZZ3-HR3)	(ZZ1-HR1)	(ZZ2-HR2)	(ZZ3-HR3)	(ZZ1-HR1)	(ZZ2-HR2)	(ZZ3-HR3)	(ZZ1-HR1)	(ZZ2-HR2)	(ZZ3-HR3)	
0.1	0.00028	0.00023	0.00114	0.00128	0.00147	0.00065	0.00032	0.00032	0.00015	0.00015	0.00007	0.00007	0.00007	0.00007		
0.2	0.00112	0.00091	0.00454	0.00511	0.00511	0.00222	0.00120	0.00120	0.00029	0.00029	0.00017	0.00017	0.00017	0.00017		
0.4	0.00444	0.00360	0.01801	0.02022	0.02022	0.00877	0.00470	0.00470	0.00098	0.00098	0.00047	0.00047	0.00047	0.00047		
0.8	0.01680	0.01394	0.06968	0.07722	0.07722	0.04384	0.02212	0.02212	0.00206	0.00206	0.00103	0.00103	0.00103	0.00103		
1.6	0.05229	0.04000	0.21515	0.25055	0.25055	0.09133	0.04826	0.04826	0.00593	0.00593	0.00290	0.00290	0.00290	0.00290		
3.2	0.11350	0.08670	0.43352	0.52874	0.52874	0.18500	0.10201	0.10201	0.01227	0.01227	0.00610	0.00610	0.00610	0.00610		
0.1	0.00026	0.00130	0.00065	0.00147	0.00065	0.00032	0.00032	0.00032	0.00015	0.00015	0.00007	0.00007	0.00007	0.00007		
0.2	0.00104	0.00518	0.00257	0.00280	0.00130	0.00070	0.00032	0.00032	0.00015	0.00015	0.00007	0.00007	0.00007	0.00007		
0.4	0.00412	0.02057	0.01028	0.02324	0.01032	0.00518	0.00245	0.00245	0.00029	0.00029	0.00017	0.00017	0.00017	0.00017		
0.8	0.01574	0.07477	0.03980	0.08657	0.04031	0.02015	0.10247	0.05224	0.00224	0.00224	0.00117	0.00117	0.00117	0.00117		
1.6	0.05311	0.28357	0.14178	0.31216	0.14735	0.07308	0.30749	0.03488	0.01734	0.01734	0.00870	0.00870	0.00870	0.00870		
3.2	0.12024	0.75661	0.37825	0.81008	0.43032	0.21818	0.90749	0.05419	0.02776	0.02776	0.01406	0.01406	0.01406	0.01406		
0.1	0.00018	0.00025	0.00018	0.00201	0.00201	0.00128	0.00066	0.00066	0.00032	0.00032	0.00015	0.00015	0.00015	0.00015		
0.2	0.00072	0.00129	0.00063	0.00220	0.00220	0.00128	0.00066	0.00066	0.00032	0.00032	0.00015	0.00015	0.00015	0.00015		
0.4	0.00283	0.00510	0.00258	0.00319	0.00319	0.00202	0.00102	0.00102	0.00050	0.00050	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025		
0.8	0.01089	0.02013	0.01007	0.02427	0.02427	0.01400	0.00791	0.00791	0.00400	0.00400	0.00200	0.00200	0.00200	0.00200		
1.6	0.03790	0.23222	0.03066	0.45100	0.45100	0.01600	0.00885	0.00885	0.00450	0.00450	0.00225	0.00225	0.00225	0.00225		
3.2	0.10841	0.71300	0.10083	1.30427	1.30427	0.04885	0.02701	0.02701	0.01580	0.01580	0.00790	0.00790	0.00790	0.00790		
0.1	0.00019	0.00019	0.00002	0.00002	0.00002	0.00180	0.00001	0.00001	0.00004	0.00004	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001		
0.2	0.00078	0.00147	0.00010	0.00220	0.00220	0.00094	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001		
0.4	0.00300	0.00300	0.00039	0.01170	0.01170	0.00270	0.00014	0.00014	0.00014	0.00014	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003		
0.8	0.01190	0.03032	0.00380	0.11334	0.11334	0.00657	0.00027	0.00027	0.00027	0.00027	0.00010	0.00010	0.00010	0.00010		
1.6	0.04352	0.13373	0.00567	0.40808	0.40808	0.02261	0.00747	0.00747	0.00261	0.00261	0.00110	0.00110	0.00110	0.00110		
3.2	0.14445	0.59008	0.01708	1.98899	1.98899	0.07477	0.02300	0.02300	0.00747	0.00747	0.00295	0.00295	0.00295	0.00295		

TABLE 2.3. (continued)

TABLE 2.3. (continued)

H	k ₁ = 0.2									
	(ZZ1-HK1)	(ZZ2-HK2)	(ZZ3-HK3)	(ZZ1-HK1)	(ZZ2-HK2)	(ZZ3-HK3)	(ZZ1-HK1)	(ZZ2-HK2)	(ZZ3-HK3)	(ZZ1-HK1)
0.1	0.01705	0.00200	0.01030	0.08308	0.00181	0.00906	0.16220	0.00098	0.00098	0.00098
0.2	0.02724	0.00504	0.01020	0.28004	0.00711	0.02564	0.58918	0.01029	0.00380	0.00130
0.4	0.13069	0.02224	0.14022	0.72213	0.02534	0.13172	1.66749	0.01474	0.00480	0.00448
0.8	0.15214	0.08309	0.14843	1.03603	0.07022	0.30022	3.22121	0.04007	0.01007	0.02221
1.0	0.13250	0.13220	0.08647	0.83475	0.13073	0.08803	3.54853	0.11270	0.05305	0.20003
3.2	0.00070	0.12074	0.03371	0.45110	0.10007	0.53330	1.27334	0.00527	0.47037	0.43121
0.1	0.01017	0.01074	0.00537	0.08250	0.00878	0.00430	0.17097	0.00440	0.00220	0.00128
0.2	0.05375	0.04200	0.02103	0.28318	0.03454	0.01727	0.61770	0.00872	0.00872	0.00254
0.4	0.11770	0.15534	0.07707	0.70119	0.06477	0.06477	1.80817	0.01744	0.00872	0.00500
0.8	0.11252	0.47015	0.23523	0.90081	0.41187	0.20504	4.05022	0.23470	0.11738	0.03734
1.0	0.01897	0.00072	0.43036	0.70720	0.82930	0.42005	0.22002	0.02040	0.31023	0.23838
3.2	0.01380	0.04385	0.47192	0.33878	0.00353	0.48170	5.41828	0.03831	0.16010	0.27400
0.1	0.01430	0.02415	0.00121	0.08014	0.01778	0.00089	0.10872	0.00911	0.00040	0.00257
0.2	0.04089	0.05019	0.00470	0.27574	0.02027	0.00351	0.22201	0.03820	0.00181	0.00013
0.4	0.09018	0.06008	0.01800	0.67174	0.20817	0.01341	2.19520	0.14118	0.00700	0.00202
0.8	0.07260	1.10151	0.05058	0.80191	0.01108	0.04558	5.24750	0.01585	0.02570	0.00773
1.0	-0.24330	2.05409	0.14770	0.30688	2.30377	0.11919	10.30212	1.05941	0.07907	0.02002
3.2	-0.53220	4.80789	0.24339	-0.41078	4.47022	0.22351	10.38520	3.09109	0.18455	0.07820
0.1	0.01243	0.03082	0.00018	0.07864	0.02515	0.00013	0.21440	0.01355	0.00027	0.00002
0.2	0.03012	0.14578	0.00073	0.20853	0.00908	0.00050	0.78403	0.05305	0.00027	0.00008
0.4	0.00000	0.50051	0.00280	0.61303	0.00192	0.00192	2.44430	0.21105	0.00106	0.00031
0.8	-0.10147	1.96771	0.00984	0.74017	0.00681	0.23424	0.29688	0.29688	0.00308	0.00118
1.0	-0.07154	5.77009	0.02888	-0.02701	4.08037	0.02045	14.11490	2.67578	0.01338	0.00432
3.2	-1.80120	13.03423	0.00817	-1.88545	10.25031	0.05128	20.95815	7.01457	0.03807	0.01404

H = 0.5
k₁ = 200.0

TABLE 2.2. (continued)

Depth (z) in Kadmi	Function C																
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.5	2	3	4	5	6	8	10	12	14
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.1	.00315	.00802	.01951	.06682	.31405	.05555	.00865	.00159	.00023	.00007	.00003	0	0	0	0	0	0
0.2	.01163	.02877	.06441	.16214	.30474	.13592	.03060	.00614	.00091	.00026	.00010	.00005	.00002				
0.3	.02301	.05475	.11072	.21465	.29228	.10216	.05747	.01302	.00201	.00059							
0.4	.03460	.07883	.14477	.23442	.27779	.20195	.08233	.02138									
0.5	.04429	.09618	.16426	.23652	.26216	.20731	.10185	.03033	.00528	.00158	.00063	.00030	.00009	.00004	.00002	.00001	
0.6	.04966	.10729	.17192	.22949	.24574	.20496	.11541										
0.7	.05484	.11256	.17126	.21772	.22924	.19840	.12373	.04718									
0.8	.05590	.11225	.16534	.20381	.21295	.18953	.12855										
0.9	.05496	.10856	.15628	.18904	.19712	.17945	.28881										
1	.05266	.10274	.14566	.17419	.16884	.12745	.06434	.01646	.00555	.00233	.00113	.00036	.00015	.00007	.00004		
1.2	.04585	.08831	.12323	.14615	.15408	.14755	.12038	.06967	.02077	.00743	.00320	.00159	.00051				
1.5	.03483	.06688	.09293	.11071	.11904	.11030	.10477	.07075	.02599	.01021	.00460	.00233	.00078	.00033	.00016	.00009	
2	.02102	.04069	.05721	.06948	.07738	.08067	.07804	.06275	.03062	.01409	.00692	.00369	.00129	.00055	.00027	.00015	
2.5	.01293	.02534	.03611	.04484	.05119	.05509	.05668	.05117	.03099	.01650	.00886	.00499	.00185	.00082	.00041	.00023	
3	.00840	.01638	.02376	.02994	.03485	.03843	.04124	.04039	.02886	.01745	.01022	.00610	.00241	.00110	.00057	.00032	
4	.00382	.00772	.01149	.01480	.01764	.02004	.02271	.02475	.02215	.01639	.01118	.00745	.00340	.00167	.00090	.00052	
5	.00214	.00382	.00582	.00772	.00992	.00992	.01343	.01551	.01601	.01364	.01105	.00782	.00404	.00216	.00122	.00073	
6	.00092	.00150	.00243	.00332	.00432	.00432	.00887	.01014	.01148	.01082	.00917	.00733	.00432	.00243	.00150	.00092	
7	.00073	.00110	.00171	.00272	.00396	.00396	.00887	.00830	.00842	.00842	.00770	.00656	.00432	.00272	.00171	.00110	
8	.00124	.00185	.00270	.00413	.00568	.00568	.00612	.00612	.00612	.00656	.00631	.00568	.00413	.00270	.00185	.00124	
9	.00192	.00274	.00381	.00513	.00685	.00685	.00758	.00758	.00758	.00842	.00817	.00758	.00612	.00413	.00274	.00192	
10	.00133	.00192	.00274	.00381	.00513	.00685	.00842	.00842	.00842	.00917	.00886	.00842	.00717	.00513	.00381	.00274	.00133

Function F

Depth (z) in Radii	Offset (r) in Radii																
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.5	2	3	4	5	6	8	10	12	14
0	.5	.5	.5	.5	.5	0	-.34722	-.22222	-.12500	-.05556	-.03125	-.02000	-.01389	-.00781	-.00500	-.00347	-.00255
0.1	.45025	.44794	.43981	.41954	.35789	.03817	-.20000	-.17612	-.10950	-.05151	-.02961	-.01917					
0.2	.40194	.39781	.38294	.34823	.26215	.05466	-.11165	-.13381	-.09441	-.04750	-.02798	-.01835	-.01295	-.00742			
0.3	.35633	.35094	.34508	.29016	.20503	.06372	-.05346	-.09768	-.08010	-.04356	-.02636						
0.4	.31431	.30801	.28681	.24469	.17086	.06848	-.01818	-.06835	-.06684								
0.5	.27639	.26997	.24890	.20937	.14752	.07037	.00388	-.04529	-.05479	-.03595	-.02320	-.01590	-.01154	-.00681	-.00450	-.00318	-.00237
0.6	.24275	.23444	.21667	.18138	.13042	.07068	.01797	-.02749									
0.7	.21327	.20762	.18956	.15903	.11740	.06963	.02704	-.01392	-.03469								
0.8	.18765	.18287	.16679	.14053	.10604	.06774	.03277	-.00365									
0.9	.16552	.16158	.14747	.12528	.09664	.06533	.03619	.00408									
1	.14645	.14280	.12395	.11225	.08850	.06256	.03819	.00984	-.01367	-.01994	-.01591	-.01209	-.00931	-.00587	-.00400	-.00289	-.00219
1.2	.11589	.11360	.10460	.09449	.07486	.05670	.03913	.01716	-.00452	-.01491	-.01337	-.01068	-.00844	-.00550			
1.5	.08398	.08196	.07719	.06918	.05919	.04804	.03686	.02177	.00413	-.00879	-.00995	-.00870	-.00723	-.00495	-.00353	-.00261	-.00201
2	.05279	.05348	.04994	.04614	.04162	.03593	.03029	.02197	.01043	-.00189	-.00546	-.00589	-.00544	-.00410	-.00307	-.00233	-.00183
2.5	.03576	.03673	.03459	.03263	.03014	.02762	.02406	.01927	.01188	.00198	-.00226	-.00364	-.00386	-.00332	-.00263	-.00208	-.00166
3	.02566	.02586	.02255	.02395	.02263	.02097	.01911	.01623	.01144	.00396	-.00010	-.00192	-.00258	-.00263	-.00223	-.00183	-.00150
4	.01493	.01536	.01412	.01259	.01386	.01331	.01256	.01134	.00912	.00508	.00209	.00026	-.00076	-.00148	-.00153	-.00137	-.00120
5	.00971	.01011				.00905			.00700	.00475	.00277	.00129	.00031	-.00066	-.00096	-.00099	-.00093
6	.00680					.00675			.00538	.00409	.00278	.00170	.00088	-.00010	-.00053	-.00066	-.00070
7	.00503					.00483			.00428	.00346	.00258	.00178	.00114	.00027	-.00020	-.00041	-.00049
8	.00386					.00380			.00350	.00291	.00229	.00174	.00125	.00044	.00003	-.00020	-.00033
9	.00306					.00374			.00291	.00247	.00203	.00163	.00124	.00062	.00020	-.00005	-.00019
10									.00267	.00246	.00213	.00176	.00149	.00126	.00070		

TABLE 2.2. (continued)

Depth (z) in Radii	Function F																
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.5	2	3	4	5	6	8	10	12	14
0	.5	.5	.5	.5	.5	.5	.5	.5	.5	.5	.5	.5	.5	.5	.5	.5	.5
0.1	.45025	.44949	.44698	.44173	.43008	.39198	.30445	.20399	.11806	.05362	.03045	.01959	.01389	.00781	.00500	.00347	.00255
0.2	.40194	.40043	.39591	.38660	.36798	.32802	.26598	.18633	.11121	.05170	.02965	.01919	.01342	.00762			
0.3	.35633	.35428	.33809	.33674	.31578	.28003	.23311	.16967	.10450	.04979	.02886						
0.4	.31431	.31214	.30541	.29298	.27243	.24200	.20526	.15428	.09801								
0.5	.27639	.27407	.26732	.25511	.23639	.21119	.18168	.14028	.09180	.04608							
0.6	.24275	.24247	.23411	.22289	.20634	.18520	.16155	.12759	.08027								
0.7	.21327	.21112	.20535	.19525	.18093	.16356	.14421	.11620									
0.8	.18765	.18550	.18049	.17190	.15977	.14523	.12928	.10602									
0.9	.16532	.16337	.15921	.15179	.14168	.12954	.11634	.09686									
1	.14645	.14483	.14610	.13472	.12618	.11611	.10510	.08865	.06552	.03736	.02352	.01602	.01157	.00683	.00450	.00318	.00237
1.2	.11589	.11435	.11201	.10741	.10140	.09431	.08657	.07476	.05728	.03425	.02208	.01527	.01113	.00664			
1.5	.08398	.08356	.08159	.07885	.07517	.07088	.06611	.05871	.04703	.03003	.02008	.01419	.01049	.00636	.00425	.00304	.00228
2	.05279	.05105	.05146	.05034	.04850	.04675	.04442	.04078	.03454	.02410	.01706	.01248	.00943	.00590	.00401	.00290	.00219
2.5	.03576	.03426	.03489	.03435	.03360	.03211	.03150	.02953	.02599	.01945	.01447	.01096	.00850	.00546	.00378	.00276	.00210
3	.02566	.02519	.02470	.02491	.02444	.02389	.02330	.02216	.02007	.01585	.01230	.00962	.00763	.00505	.00355	.00263	.00201
4	.01493	.01452	.01495	.01526	.01446	.01418	.01395	.01356	.01281	.01084	.00900	.00742	.00612	.00431	.00297	.00185	.00139
5	.00971	.00927								.00873	.00774	.00673	.00579	.00495	.00364	.00275	.00185
6	.00680									.00629	.00574	.00517	.00457	.00404	.00309	.00241	.00154
7	.00503									.00466	.00438	.00404	.00370	.00330	.00264	.00213	.00140
8	.00386									.00354	.00344	.00325	.00297	.00273	.00228	.00185	.00127
9	.00306									.00275	.00273	.00264	.00229	.00228	.00194	.00155	.00116
10										.00220	.00225	.00221	.00203	.00200	.00171		

Depth (z) in Radii	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.5	2	3	4	5	6	8	10	12	14
0.1	.09852	.10140	.11138	.13424	.18796	.05388	-.07899	-.02672	-.00845	-.00210	-.00084	-.00042	0	0	0	0	0
0.2	.18857	.19306	.20772	.23524	.25883	.08513	-.07759	-.04448	-.01593	-.00412	-.00166	-.00083	-.00024	-.00010	0	0	0
0.3	.28362	.26787	.28018	.29483	.27257	.10757	-.04316	-.04999	-.02166	-.00599	-.00245	0	0	0	0	0	0
0.4	.32016	.32259	.32748	.32273	.26925	.12404	-.00766	-.04535	-.02522	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	.35777	.35752	.35323	.33106	.26236	.13591	.02165	-.03455	-.02651	-.00991	-.00388	-.00199	-.00116	-.00049	-.00025	-.00014	-.00009
0.6	.37831	.37531	.36308	.32822	.25411	.14440	.04457	-.02101	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.7	.38487	.37962	.36072	.31929	.24638	.14986	.06209	-.00702	-.02329	0	0	0	0	0	0	0	0
0.8	.38091	.37408	.35133	.30699	.23779	.15292	.07530	.00614	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.9	.36962	.36275	.33734	.29299	.22891	.15404	.08507	.01795	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.0	.35355	.34553	.32075	.27819	.21978	.15355	.09210	.02814	-.01005	-.01115	-.00608	-.00344	-.00210	-.00092	-.00048	-.00028	-.00018
1.2	.31485	.30730	.28481	.24836	.20113	.14915	.10002	.04378	.00023	-.00995	-.00632	-.00378	-.00236	-.00107	0	0	0
1.5	.25602	.25025	.23338	.20694	.17368	.13732	.10193	.05745	.01385	-.00669	-.00600	-.00401	-.00265	-.00126	-.00068	-.00040	-.00026
2.0	.17889	.18144	.16644	.15198	.13375	.11331	.09254	.06371	.02366	-.00028	-.00410	-.00371	-.00278	-.00148	-.00084	-.00050	-.00033
2.5	.12807	.12633	.12126	.11327	.10298	.09130	.07869	.06022	.03429	.00661	-.00130	-.00271	-.00250	-.00156	-.00094	-.00059	-.00039
3.0	.09487	.09394	.09099	.08636	.07325	.06551	.05354	.03511	.01112	-.00157	-.00134	-.00192	-.00151	-.00099	-.00065	-.00046	-.00037
4.0	.05707	.05666	.05562	.05383	.04773	.04532	.03995	.03066	.01515	.00595	.00155	-.00029	-.00109	-.00094	-.00068	-.00050	-.00049
5.0	.03772	.03760	.03700	.03384	.02474	.02474	.01522	.00810	.00371	.00132	-.00043	-.00070	-.00068	-.00049	-.00049	-.00049	-.00049
6.0	.02666	.02468	.02468	.01968	.01380	.01380	.00867	.00496	.00254	.00028	-.00037	-.00047	-.00045	-.00045	-.00045	-.00045	-.00045
7.0	.01980	.01858	.01858	.01577	.01204	.01204	.00842	.00547	.00332	.00093	-.00002	-.00029	-.00037	-.00037	-.00037	-.00037	-.00037
8.0	.01526	.01429	.01429	.01279	.01034	.01034	.00779	.00554	.00372	.00141	.00035	-.00008	-.00025	-.00025	-.00025	-.00025	-.00025
9.0	.01212	.01170	.01170	.01054	.00888	.00888	.00705	.00533	.00386	.00178	.00066	-.00012	-.00012	-.00012	-.00012	-.00012	-.00012
10.0							.00924	.00879	.00764	.00631	.00501	.00382	.00199	0	0	0	0

Function B

Offset (r) in Radii

TABLE 2.2. One-Layer Elastic Function Values (after Ahlvin and Uley)

		Function A																
Depth (z) in Radii	Offset (r) in Radii																	
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.5	2	3	4	5	6	8	10	12	14	
0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0.1	.90050	.89748	.88679	.86126	.78797	.43015	.09645	.02787	.00856	.00211	.00084	.00042						
0.2	.80388	.79824	.77884	.73483	.63014	.38269	.15433	.05251	.01680	.00419	.00167	.00083	.00048	.00020				
0.3	.71265	.70518	.68316	.62690	.52081	.34375	.17964	.07199	.02440	.00622	.00250							
0.4	.62861	.62015	.59241	.53767	.44329	.31048	.18709	.08593	.03118									
0.5	.55279	.54403	.51622	.46448	.38390	.28156	.18556	.09499	.03701	.01013	.00407	.00209	.00118	.00053	.00025	.00014	.00009	
0.6	.48550	.47691	.45078	.40427	.33676	.25588	.17952	.10010										
0.7	.42654	.41874	.39491	.35428	.29833	.21727	.17124	.10228	.04558									
0.8	.37531	.36832	.34729	.31243	.26581	.21297	.16206	.10236										
0.9	.33104	.32492	.30669	.27707	.23832	.19488	.15253	.10094										
1	.29289	.28763	.27005	.24697	.21468	.17868	.14329	.09849	.05185	.01742	.00761	.00393	.00226	.00097	.00050	.00029	.00018	
1.2	.23178	.22795	.21662	.19890	.17626	.15101	.12570	.09192	.05260	.01935	.00871	.00459	.00269	.00115				
1.5	.16795	.16552	.15877	.14804	.13436	.11892	.10296	.08048	.05116	.02142	.01013	.00548	.00325	.00141	.00073	.00043	.00027	
2	.10557	.10453	.10140	.09647	.09011	.08269	.07471	.06275	.04496	.02221	.01160	.00659	.00399	.00180	.00094	.00056	.00036	
2.5	.07152	.07098	.06947	.06698	.06373	.05974	.05555	.04880	.03787	.02143	.01221	.00732	.00463	.00214	.00115	.00068	.00043	
3	.05132	.05101	.05022	.04886	.04707	.04487	.04241	.03839	.03150	.01980	.01220	.00770	.00505	.00242	.00132	.00079	.00051	
4	.02986	.02976	.02907	.02832	.02802	.02749	.02651	.02490	.02193	.01592	.01109	.00768	.00536	.00282	.00160	.00099	.00065	
5	.01942	.01938				.01835			.01573	.01249	.00949	.00708	.00527	.00298	.00179	.00113	.00075	
6	.01361					.01307			.01168	.00983	.00795	.00628	.00492	.00299	.00188	.00124	.00084	
7	.01005					.00976			.00894	.00784	.00661	.00548	.00445	.00291	.00193	.00130	.00091	
8	.00772					.00755			.00703	.00635	.00554	.00472	.00398	.00276	.00189	.00134	.00094	
9	.00612					.00600			.00566	.00520	.00466	.00409	.00353	.00256	.00184	.00133	.00096	
10									.00477	.00465	.00438	.00397	.00352	.00326	.00241			

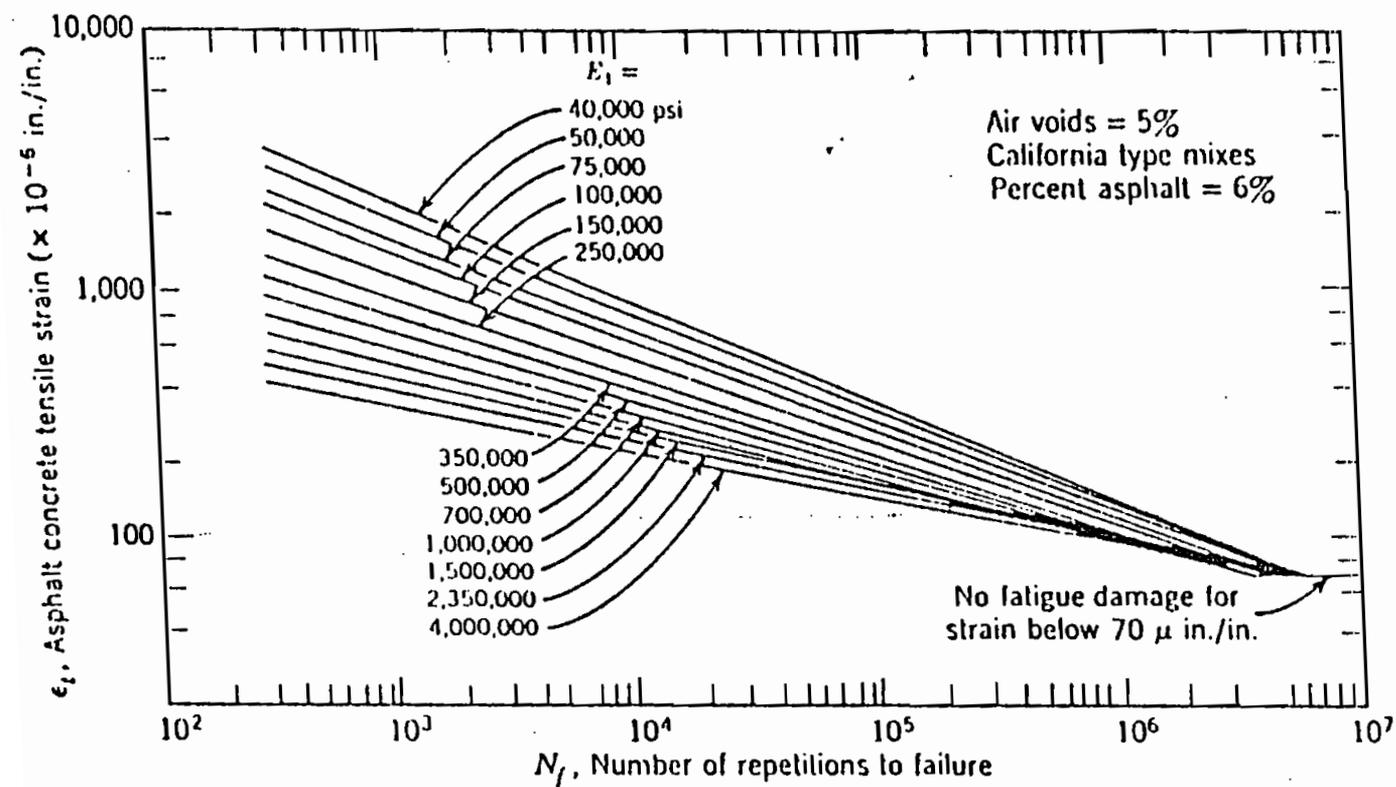


Figure 8.22. Typical fatigue criteria. (From Mouismith.)